

Mục lục

CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU VÀ CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN.....	12
MỤC TIÊU.....	12
1.1. Đối tượng nghiên cứu, các lĩnh vực ứng dụng.....	12
1.1.1. Môn học Thủy khí động lực học.....	12
1.1.2. Các lĩnh vực ứng dụng của Thủy khí động lực học.....	13
1.2. Điều kiện không trơn trượt.....	14
1.3. Phân loại dòng chảy.....	16
1.3.1. Dòng không nhớt và dòng nhớt.....	16
1.3.2. Dòng chảy bên trong và dòng chảy bao.....	17
1.3.3. Dòng nén được và không nén được.....	17
1.3.4. Dòng chảy tầng và dòng chảy rối.....	18
1.3.5. Dòng chảy tự nhiên và dòng chảy cưỡng bức.....	19
1.3.6. Dòng chảy dừng và dòng chảy không dừng.....	19
1.3.7. Dòng chảy một, hai và ba chiều.....	21
1.3.8. Ví dụ 1.1: Dòng đối xứng trục bao quanh viên đạn.....	22
1.4. Hệ thống và thể tích khống chế.....	23
1.5. Ý nghĩa quan trọng của thứ nguyên và đơn vị đo.....	24
1.5.1. Một số đơn vị trong hệ SI và hệ Anh.....	26
1.5.2. Tính đồng nhất thứ nguyên.....	28
1.5.3. Ví dụ 1.2: Phát hiện ra lỗi từ đơn vị không thống nhất.....	28
1.5.4. Ví dụ 1.3: Xây dựng công thức từ xem xét đồng nhất đơn vị.....	29
1.6. Mô hình toán học của các vấn đề kỹ thuật.....	29
1.6.1. Các phương pháp nghiên cứu.....	29
1.6.2. Mô hình hóa trong kỹ thuật.....	30
1.7. Kỹ thuật giải quyết các bài toán thủy khí.....	32
1.8. Về các gói phần mềm kỹ thuật.....	34
1.8.1. Giới thiệu về phần mềm MATLAB.....	36
1.8.2. Giới thiệu về phần mềm ANSYS FLUENT.....	37
1.9. Độ chính xác, độ chụm và số chữ số có nghĩa.....	38
1.10. Tóm lược lịch sử Thủy khí động lực học.....	40

TỔNG KẾT	44
Các câu hỏi ôn tập, bài tập	44
Giới thiệu, phân loại và hệ thống	44
Khối lượng, lực và đơn vị	45
Mô hình hóa và kỹ thuật giải các bài toán kỹ thuật	45
CHƯƠNG 2. CÁC TÍNH CHẤT CỦA CHẤT LỎNG	46
MỤC TIÊU	46
2.1. Giới thiệu	46
2.1.1. Các đặc trưng của một hệ thống	46
2.1.2. Môi trường liên tục	47
2.2. Sự khác nhau giữa chất rắn, chất lỏng và chất khí	48
2.2.1. Chất lỏng là gì?	48
2.2.2. Lực liên kết giữa các phân tử	50
2.3. Mật độ, thể tích riêng, tỷ trọng riêng	52
2.4. Hệ số nén và hệ số giãn nở thể tích	54
2.4.1. Hệ số nén	54
2.4.2. Hệ số giãn nở thể tích	55
2.4.3. Ví dụ 2.1: Thay đổi của mật độ theo nhiệt độ và áp suất	56
2.4. Tính chất của chất khí	57
2.4.1. Phương trình trạng thái khí lý tưởng	57
2.4.2. Ví dụ 2.2 : Mật độ, tỷ trọng riêng và khối lượng của không khí trong phòng	58
2.5. Áp suất hóa hơi và hiện tượng xâm thực	59
2.5.1. Áp suất hóa hơi	59
2.5.2. Hiện tượng xâm thực	61
2.5.3. Ví dụ 2.3: Áp suất tối thiểu để tránh xâm thực	61
2.6. Năng lượng và nhiệt dung riêng	62
2.7. Độ nhớt	64
2.7.1. Khái niệm độ nhớt	64
2.7.2. Sự phụ thuộc của độ nhớt vào nhiệt độ và áp suất	68
2.7.3. Ví dụ 2.4: Xác định độ nhớt của chất lỏng	71
2.8. Sức căng bề mặt và hiệu ứng mao dẫn	72
2.8.1. Khái niệm về sức căng bề mặt	72
2.8.2. Hiệu ứng mao dẫn	77

2.8.3. Ví dụ 2.5: Cột nước dâng trong ống mao dẫn.....	79
TỔNG KẾT	80
Các câu hỏi và bài tập	82
Mật độ và tỷ trọng riêng.....	82
Áp suất hơi và xâm thực	82
Năng lượng và nhiệt dung riêng	83
Hệ số nén.....	83
Độ nhớt	84
Sức căng bề mặt và hiệu ứng mao dẫn.....	88
Các bài ôn tập.....	89
Chương 3. ÁP SUẤT VÀ TĨNH HỌC CHẤT LỎNG	91
MỤC TIÊU.....	91
3.1. Giới thiệu về tĩnh học chất lỏng	91
3.2. Áp suất.....	92
3.2.1. Ví dụ 3.1: Áp suất tuyệt đối của buồng chân không.....	94
3.2.2. Áp suất tại một điểm.....	94
3.2.3. Biến thiên của áp suất theo độ sâu	95
3.3. Áp kế ống (manometer).....	99
3.3.1. Áp kế ống.....	99
3.3.2. Ví dụ 3.2: Đo áp suất với áp kế ống.....	99
3.3.3. Ví dụ 3.3: Đo áp suất với áp kế ống nhiều chất lỏng.....	102
3.3.4. Các thiết bị đo áp suất khác	102
3.4. Phong vũ biểu và áp suất khí quyển.....	104
3.4.1. Ví dụ 3.5: Đo áp suất khí quyển bằng phong vũ biểu.....	105
3.4.2. Ví dụ 3.6: Ảnh hưởng của trọng lượng piston tự do lên áp suất trong xi lanh	105
3.4.3. Ví dụ 3.7: Áp suất thủy tĩnh trong ao năng lượng mặt trời với mật độ biến đổi	106
3.5. Áp lực thủy tĩnh trên bề mặt phẳng ngập trong chất lỏng.....	108
3.5.1. Trường hợp đặc biệt: Tấm phẳng hình chữ nhật.....	112
3.5.2. Ví dụ 3.8: Áp lực thủy tĩnh tác dụng lên cửa xe ô tô ngập nước	113
3.6. Áp lực thủy tĩnh lên bề mặt cong ngập trong chất lỏng	114
3.6.1. Các thành phần áp lực tác dụng lên thành cong.....	114
3.6.2. Ví dụ 3.9: Cửa trọng lực hình trụ.....	116

3.7. Lực đẩy nổi và sự ổn định	118
3.7.1. Lực đẩy nổi	118
3.7.2. Ví dụ 3.10: Đo tỷ trọng riêng bằng tỷ trọng kế (hydrometer).....	120
3.7.3. Tính ổn định của vật chìm và nổi trong chất lỏng	122
3.8. Chất lỏng trong chuyển động bó cứng (tĩnh tương đối).....	125
3.8.1. Trường hợp đặc biệt 1: Chất lỏng ở trạng thái tĩnh không có gia tốc	127
3.8.2. Trường hợp đặc biệt 2: Rơi tự do của một bình chứa chất lỏng	128
3.8.3. Chuyển động có gia tốc trên đường thẳng	128
3.8.4. Ví dụ 3.11: Nước tràn từ bồn chứa khi tăng tốc	130
3.8.5. Bồn chứa hình trụ quay xung quanh trục.....	131
3.8.6. Ví dụ 3.12: Chất lỏng dâng lên trong chuyển động quay	133
TỔNG KẾT	134
Câu hỏi và bài tập.....	136
Áp suất, áp kế ống và phong vũ biểu	136
Áp lực thủy tĩnh lên tấm phẳng và mặt cong	144
Lực đẩy nổi	145
Chất lỏng trong chuyển động bó cứng	147
Bài ôn tập	150
Chương 4. NĂNG LƯỢNG TRONG DÒNG CHẢY ỔN ĐỊNH	156
MỤC TIÊU.....	156
4.1. Giới thiệu.....	157
4.1.1. Bảo toàn khối lượng.....	157
4.1.2. Bảo toàn động lượng.....	157
4.1.3. Bảo toàn năng lượng	157
4.2. Bảo toàn khối lượng	158
4.2.1. Lưu lượng khối lượng và lưu lượng thể tích.....	158
4.2.2. Nguyên lý bảo toàn khối lượng.....	160
4.2.3. Trường hợp thể tích không chế di chuyển hoặc biến dạng	162
4.2.4. Phương trình cân bằng khối lượng cho dòng chảy ổn định	162
4.2.5. Dòng chảy không nén được	163
4.3. Năng lượng cơ học và hiệu suất	164
4.3.1. Năng lượng cơ học.....	164
4.3.2. Truyền năng lượng cơ học và hiệu suất	165

4.3.3. Ví dụ 4.3: Hiệu suất của cặp Tua bin-Máy phát điện	167
4.4. Phương trình Bernoulli.....	168
4.4.1. Gia tốc của hạt chất lỏng.....	169
4.4.2. Thu nhận phương trình Bernoulli	170
4.4.3. Áp suất tĩnh, áp suất động lực và áp suất điểm dừng.....	172
4.4.4. Những hạn chế trong việc sử dụng phương trình Bernoulli	173
4.4.5. Đường Đo áp và Đường Năng	175
4.5. Ứng dụng phương trình Bernoulli.....	178
4.5.1. Ví dụ 4.5: Vòi phun vào không khí.....	178
4.5.2. Ví dụ 4.6: Nước chảy qua vòi từ một bể chứa lớn.....	179
4.5.3. Ví dụ 4.8: Đo vận tốc dòng chảy bằng ống Pitot.....	180
4.5.4. Ví dụ 4.9: Nước dâng trên biển do bão.....	181
4.5.5. Ống Venturi	183
4.5.6. Ví dụ 4.10: Tính lưu lượng qua ống Venturi	185
4.5.7. Dòng chảy qua đập tràn hình chữ nhật	186
4.5.8. Dòng chảy qua đập tràn hình chữ V	187
4.6. Phương trình năng lượng tổng quát.....	188
4.6.1. Chuyển giao năng lượng bằng nhiệt lượng, Q	190
4.6.2. Chuyển giao năng lượng bằng công cơ học, W	190
4.6.3. Công trực quay.....	191
4.6.4. Công thực hiện bởi các áp lực.....	192
4.7. Phân tích năng lượng đối với dòng chảy dừng.....	194
4.7.1. Các thành phần trong phương trình năng lượng tổng quát	194
4.7.2. Dòng chảy không nén được, không có thiết bị cơ học và bỏ qua ma sát.....	197
4.7.3. Hệ số hiệu chỉnh động năng, α	197
4.7.4. Ví dụ 4.11: Ảnh hưởng của ma sát lên nhiệt độ chất lỏng và tổn thất cột áp	198
4.7.5. Ví dụ 4.12: Công suất máy bơm và nhiệt ma sát trong máy bơm.....	200
4.7.6. Ví dụ 4.13: Công suất phát điện từ một đập thủy điện	201
4.7.7. Ví dụ 4.14: Lựa chọn quạt làm mát cho máy tính	202
4.7.8. Ví dụ 4.15: Tổn thất cột áp và công suất trong quá trình bơm	204
TỔNG KẾT.....	205
Câu hỏi và bài tập.....	208
Bảo toàn khối lượng.....	208

Năng lượng cơ học và hiệu suất.....	210
Phương trình Bernoulli	211
Phương trình năng lượng	212
Chương 5. NGUYÊN LÝ ĐỘNG LƯỢNG VÀ LỰC TRONG DÒNG CHẢY.....	215
MỤC TIÊU.....	215
5.1. Các định luật Newton và bảo toàn động lượng.....	215
5.2. Thê tích không chế	217
5.2.1. Lựa chọn thê tích không chế.....	217
5.2.2. Lực tác dụng lên thê tích không chế	218
5.3. Phương trình nguyên lý động lượng	223
5.3.1. Các trường hợp đặc biệt.....	224
5.3.2. Hệ số hiệu chỉnh động lượng β	225
5.3.3. Ví dụ 5.1: Hệ số hiệu chỉnh động lượng cho dòng chảy tầng.....	225
5.4. Ứng dụng của nguyên lý động lượng.....	226
5.4.1. Lưu lượng ổn định với hệ thống một cửa vào và một cửa ra.....	227
5.4.2. Dòng chảy không có ngoại lực tác dụng.....	227
5.4.3. Ví dụ 5.2: Lực tác dụng lên đường ống gấp khúc hướng dòng	228
5.4.4. Ví dụ 5.3: Lực tác dụng lên đường ống hình chữ U	230
5.4.5. Ví dụ 5.4: Lực tác dụng của tia nước tác dụng lên tấm phẳng	231
5.4.6. Ví dụ 5.5: Công suất phát điện và tải trọng gió của tua bin gió.....	232
5.4.7. Ví dụ 5.6: Định vị vệ tinh	235
5.5. Ôn lại chuyển động quay và mô-men động lượng	236
5.6. Phương trình mô-men động lượng	239
5.6.1. Các trường hợp đặc biệt.....	242
5.6.2. Dòng chảy không có mô-men lực ngoài	242
5.6.3. Các thiết bị ly tâm.....	243
5.6.4. Ví dụ 5.7: Mô-men uốn tác dụng lên giá đỡ của ống nước	244
5.6.5. Ví dụ 5.8: Máy phát điện bằng hệ thống vòi phun.....	246
TỔNG KẾT.....	249
Câu hỏi và bài tập.....	250
Định luật Newton và Bảo toàn Động lượng	250
Phương trình động lượng tuyến tính.....	250
Phương trình mô-men động lượng.....	254

Chương 6. DÒNG CHẢY TRONG ĐƯỜNG ỐNG.....	256
MỤC TIÊU.....	256
6.1. Giới thiệu.....	256
6.2. Dòng chảy tầng và dòng chảy rối.....	258
6.2.1. Số Reynolds	259
6.2.2. Đường kính thủy lực	259
6.3. Khu vực phát triển dòng chảy	260
6.3.1. Khu vực phát triển dòng chảy	260
6.3.2. Chiều dài phát triển dòng vào	262
6.4. Dòng chảy tầng trong đường ống.....	262
6.4.1. Sụt áp suất và tổn thất cột chất lỏng	265
6.4.2. Đường ống nằm nghiêng.....	266
6.4.3. Dòng chảy tầng trong đường ống không tròn	267
6.4.4. Ví dụ 6.1: Lưu lượng dòng chảy trong ống nằm ngang và ống nghiêng	268
6.4.5. Ví dụ 6.2: Sụt áp suất và tổn thất cột chất lỏng trong đường ống.....	269
6.5. Dòng chảy rối trong đường ống	270
6.5.1. Ứng suất cắt trong dòng chảy rối	272
6.5.2. Hệ số ma sát trong dòng chảy rối.....	273
6.5.3. Ba bài toán cơ bản trong đường ống.....	276
6.5.4. Ví dụ 6.3: Xác định tổn thất cột chất lỏng trong ống nước.....	277
6.5.5. Ví dụ 6.4: Xác định đường kính của ống dẫn khí.....	278
6.5.6. Ví dụ 6.5: Xác định lưu lượng dòng khí trong đường ống	279
6.6. Tổn thất cục bộ.....	280
6.7. Mạng đường ống và lựa chọn bơm	284
6.7.1. Hệ thống đường ống với bơm và tua bin	286
6.7.2. Ví dụ 6.6 : Bơm nước qua hai ống song song.....	287
6.7.3. Ví dụ 6.7: Dòng chảy do trọng lực trong đường ống.....	289
6.7.4. Ví dụ 6.8: Ảnh hưởng của việc xả nước lên lưu lượng dòng chảy từ vòi hoa sen	291
TỔNG KẾT	293
Câu hỏi và bài tập.....	295
Dòng chảy tầng và dòng chảy rối	295
Dòng chảy phát triển hoàn toàn trong đường ống	296
Tổn thất cục bộ.....	299

Hệ thống đường ống và lựa chọn bơm.....	300
Chương 7. LỰC TÁC DỤNG LÊN VẬT TRONG DÒNG CHẢY BAO.....	303
MỤC TIÊU.....	303
7.1. Giới thiệu.....	304
7.2. Lực cản và lực nâng	306
7.2.1. Khái niệm lực cản và lực nâng.....	306
7.2.2. Lực cản do ma sát và áp suất	311
7.3. Hệ số lực cản cho các hình dạng thông thường.....	312
7.4. Dòng chảy song song bao tấm phẳng.....	316
7.4.1. Hệ số ma sát.....	318
7.4.2. Ví dụ 7.1: Dòng dầu nóng chảy trên tấm phẳng	319
7.5. Dòng chảy bao hình trụ và hình cầu.....	320
7.5.1. Ảnh hưởng của độ nhám bề mặt	322
7.5.2. Ví dụ 7.2: Xác định lực cản tác dụng lên đường ống bắc ngang sông.....	323
7.6. Lực nâng.....	324
7.6.1. Lực nâng cánh.....	324
7.6.2. Lực nâng tạo ra bởi vật thể tự quay	327
7.6.3. Ví dụ 7.3: Ảnh hưởng của tốc độ xoáy đối với bóng tennis	328
TỔNG KẾT	329
Câu hỏi và bài tập.....	330
Lực cản, lực nâng và hệ số lực cản	330
Dòng chảy bao tấm phẳng.....	333
Dòng chảy bao ống hình trụ và quả cầu.....	335
Lực nâng	335
Chương 8. CHUYỂN ĐỘNG ỔN ĐỊNH CỦA CHẤT LỎNG NÉN ĐƯỢC	337
MỤC TIÊU.....	337
8.1. Một số vấn đề nhiệt động lực học	337
8.1.1. Ví dụ 8.1: Sự thay đổi nội năng và enthalpy của một khối lượng chất khí ...	338
8.2. Các phương trình cơ bản cho dòng chảy chất lỏng nén được	339
8.2.1. Phương trình liên tục.....	339
8.2.3. Phương trình chuyển động	339
8.2.3. Phương trình năng lượng	340
8.3. Vận tốc âm và số Mach	340

8.3.1. Ví dụ 8.2: Số Mach của không khí đi vào ống khuếch tán	343
8.4. Dòng hãm và dòng tới hạn	343
8.4.1. Ví dụ 8.3: Nhiệt độ và áp suất tới hạn trong dòng chảy khí	345
8.5. Dòng chảy đẳng entropy một chiều.....	345
8.5.1. Ví dụ 8.4 : Dòng chảy khí qua ống phun thu hẹp - mở rộng	345
8.6. Ảnh hưởng của thay đổi thiết diện trong dòng chảy chất lỏng nén được.....	348
8.6.1. Dòng chảy trong ống phun thu hẹp.....	351
8.6.2. Ví dụ 8.5: Ảnh hưởng của áp suất bên ngoài ống phun lên lưu lượng khối lượng	353
8.6.3. Ví dụ 8.6: Dòng chảy chất khí qua ống phun thu hẹp.....	355
8.6.4. Dòng chảy trong ống phun thu hẹp-mở rộng.....	355
8.6.5. Ví dụ 8.7: Dòng chảy chất khí qua ống phun thu hẹp-mở rộng.....	358
8.7. Sóng xung kích.....	359
8.7.1. Ví dụ 8.8: Điểm entropy cực đại trên đường cong Fanno	364
8.7.2. Ví dụ 8.9: Sóng xung kích trong ống phun thu hẹp-mở rộng	365
TỔNG KẾT	366
Câu hỏi và bài tập.....	368
Các thông số dòng hãm.....	368
Vận tốc âm và số Mach.....	369
Dòng chảy mộtchiều đẳng entropy	370
Dòng chảy đẳng entropy qua ống phun	371
Chương 9. MỘT SỐ BÀI TOÁN DÒNG CHẢY KHÔNG DỪNG	373
MỤC TIÊU.....	373
9.1. Lưu lượng xả với cột nước thay đổi.....	373
9.1.1. Ví dụ 9.1 Thời gian xả nước trong một bồn chứa.....	375
9.2. Dòng chảy không dừng của chất lỏng không nén được trong đường ống	376
9.2.1. Ví dụ 9.2: Thay đổi lưu lượng dòng chảy trong đường ống do thay đổi tốc độ bơm	377
9.3. Sự tiệm cận đến dòng chảy dừng	379
9.3.1. Ví dụ 9.3: Biến thiên lưu lượng giữa hai bồn chứa thông nhau.....	380
9.4. Vận tốc sóng áp suất trong đường ống.....	381
9.5. Búa nước	382
9.5.1. Đóng van đột ngột.....	382
9.5.2. Ví dụ 9.4: Tính sự gia tăng áp suất khi đóng van	386

9.5.3. Đóng van nhanh	387
9.5.4. Van đóng chậm ($t_c > T_r$).....	388
9.5.5. Ví dụ 9.5: Tính áp suất búa nước cực đại tại van	389
9.6. Bể dâng.....	390
9.6.1. Ví dụ 9.6: Thiết kế đường kính bể dâng	393
TỔNG KẾT	394
Câu hỏi và bài tập.....	395
Lưu lượng xả với cột nước thay đổi.....	395
Dòng chảy không dừng trong đường ống	396
Tiệm cận đến dòng chảy dừng	397
Búa nước	397
Bể dâng	398
TÀI LIỆU THAM KHẢO	399
Phụ lục 1: Bảng tính chất của một số chất lỏng.....	400
Bảng A1: Khối lượng mol, Hằng số khí và Nhiệt dung riêng của một số chất.....	400
Bảng A2: Tính chất của nước bão hòa	401
Bảng A3: Tính chất của không khí ở áp suất 1 atm	401
Bảng A4: Tính chất của một số chất khí ở áp suất 1 atm.....	402
Bảng A5: Tính chất của không khí ở độ cao khác nhau.....	404
Bảng A6: Một số đặc trưng của dòng một chiều đẳng entropy của chất khí lý tưởng với $k=1.4$	405
Phụ lục 2: Một số thuật ngữ tiếng Anh	406
Phụ lục 3: Hướng dẫn giải một số bài tập.....	412
Chương 2	412
Mật độ và tỷ trọng riêng.....	412
Độ nhớt	414
Sức căng bề mặt và hiệu ứng mao dẫn.....	417
Chương 3	419
Áp suất, áp kế ống và phong vũ biểu	419
Áp lực thủy tĩnh lên tấm phẳng và mặt cong	424
Lực đẩy nổi	427
Chất lỏng trong chuyển động bó cứng	428
Chương 4.....	431
Bảo toàn khối lượng.....	431

Năng lượng cơ học và hiệu suất.....	433
Phương trình Bernoulli	434
Phương trình năng lượng	436
Chương 5	438
Phương trình động lượng tuyến tính	438
Chương 6	445
Dòng chảy phát triển hoàn toàn trong đường ống	445
Tổn thất cục bộ.....	452
Hệ thống đường ống và lựa chọn bơm.....	456
Chương 7	461
Lực cản, lực nâng và hệ số lực cản	461
Dòng chảy bao tằm phẳng.....	466
Dòng chảy bao ống hình trụ và quả cầu.....	469
Lực nâng	472
Chương 8	473
Các thông số dòng hãm.....	473
Vận tốc âm và số Mach.....	476
Dòng chảy một chiều đẳng entropy	478
Dòng chảy đẳng entropy qua ống phun	481

CHƯƠNG 1. GIỚI THIỆU VÀ CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN

Chương này trình bày các khái niệm cơ bản được sử dụng trong môn học Thủy khí động lực học ứng dụng. Mở đầu với các khái niệm về các pha của vật chất (pha rắn, pha lỏng, pha khí) và phương pháp phân loại dòng chảy chất lỏng như: dòng nhớt và không nhớt, dòng chảy bên trong và dòng chảy bao, dòng nén được và dòng không nén được, dòng chảy tầng và dòng chảy rối, dòng chảy tự nhiên và dòng chảy cưỡng bức, dòng chảy dừng và dòng chảy không dừng. Tiếp theo là những thảo luận về điều kiện bám dính/không trơn trượt tại biên tiếp xúc rắn-lỏng, về các khái niệm về hệ thống, khái niệm về thể tích khống chế và các hệ thống đơn vị khác nhau được sử dụng trên thế giới. Ở phần tiếp theo, các vấn đề về phương pháp mô hình toán học, quy trình giải quyết các bài toán kỹ thuật và khái niệm về tính chính xác trong tính toán được đề cập tới. Cuối cùng là một trình bày ngắn gọn về lịch sử phát triển của Cơ học chất lỏng hay Thủy khí động lực học nói chung.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này, sinh viên sẽ có thể:

- Hiểu được các khái niệm cơ bản về Thủy khí động lực học và phân biệt được các loại dòng chảy khác nhau thường gặp trong thực tế.
- Nắm bắt được quy trình kỹ thuật mô hình hóa và giải quyết các bài toán Thủy khí động lực học một cách có hệ thống.
- Có hiểu biết về độ chính xác và các chữ số có nghĩa sau dấu thập phân và thấy được tầm quan trọng của tính đồng nhất thứ nguyên trong tính toán kỹ thuật.

1.1. Đối tượng nghiên cứu, các lĩnh vực ứng dụng

1.1.1. Môn học Thủy khí động lực học

Cơ học là ngành khoa học vật lý lâu đời nhất nghiên cứu các vật thể ở trạng thái tĩnh hoặc chuyển động dưới tác dụng của các lực. Một nhánh của Cơ học nghiên cứu các vật thể ở trạng thái tĩnh được gọi là Tĩnh học, các nhánh khác nghiên cứu các vật thể chuyển động được gọi là Động lực học. Cơ học chất lỏng và chất khí (còn gọi là Cơ học thủy khí, Cơ học lưu chất hay đơn giản là Cơ học chất lỏng) là một lĩnh vực Cơ học nghiên cứu hành vi của chất lỏng và chất khí ở trạng thái tĩnh (Tĩnh học thủy khí) hoặc chuyển động và sự tương tác của chất lỏng với chất rắn hoặc các chất lỏng khác (Động lực học thủy khí). Cơ học thủy khí cũng được gọi là Thủy khí động lực học khi xem xét ở phần tĩnh học là một trường hợp đặc biệt của chuyển động với vận tốc bằng không.

Thủy khí động lực học cũng được chia thành nhiều lĩnh vực chuyên ngành khác nhau. Các nghiên cứu về chuyển động của chất lỏng không nén được (hầu hết

các chất lỏng, đặc biệt là nước, các chất khí ở tốc độ thấp) được gọi là Thủy động lực học (tiếng Anh là Hydrodynamics). Một chuyên ngành của Thủy động lực học là Thủy lực (Hydraulics), nghiên cứu chất lỏng chảy trong đường ống và các kênh hở. Khí động lực học (Gas dynamics) nghiên cứu dòng chảy của chất lỏng có mật độ thay đổi đáng kể trong dòng chảy, chẳng hạn như dòng chảy của khí qua các vòi phun ở tốc độ cao. Chuyên ngành Khí động lực học dòng chảy bao (Aerodynamics) nghiên cứu dòng chảy của khí, cụ thể là dòng không khí bao quanh vật thể như máy bay, tên lửa và xe ô tô ở tốc độ cao hay thấp. Một số chuyên ngành khác như Khí tượng, Hải dương học, Thủy văn nghiên cứu các dòng chảy trong tự nhiên.

1.1.2. Các lĩnh vực ứng dụng của Thủy khí động lực học

Thủy khí động lực học được ứng dụng rộng rãi trong các hoạt động hàng ngày và trong thiết kế các hệ thống kỹ thuật hiện đại từ quạt máy đến máy bay siêu âm. Vì vậy, có được một hiểu biết tốt về các nguyên lý cơ bản của Thủy khí động lực học là điều rất quan trọng.

Đầu tiên, có thể nhận thấy vai trò quan trọng của Thủy khí động lực học trong cơ thể con người. Trái tim liên tục bơm máu cho tất cả các bộ phận của cơ thể con người thông qua các động mạch và tĩnh mạch theo các hướng khác nhau và phổi là nơi cung cấp không khí cho cơ thể. Rõ ràng là, các hoạt động của tim, phổi, động mạch, tĩnh mạch... đều tuân thủ các quy luật của Thủy khí động lực học.

Ở một số khía cạnh nào đó, một căn nhà bình thường là một phòng triển lãm với các ứng dụng của Thủy khí động lực học. Các hệ thống đường ống nước, thông khí và nước thải cho một ngôi nhà và cho toàn bộ thành phố được thiết kế chủ yếu dựa trên cơ sở của Thủy khí động lực học. Tủ lạnh liên quan đến hệ thống đường ống vận chuyển chất làm lạnh, máy nén có tác dụng nén các chất làm lạnh và bộ phận trao đổi nhiệt cũng hoạt động theo các nguyên lý của Thủy động lực học. Ngay cả những hoạt động của vòi nước thông thường cũng được dựa trên các kiến thức cơ bản của Thủy khí động lực học.

Chúng ta cũng có thể thấy rất nhiều các ứng dụng của Thủy khí động lực học trong một chiếc xe hơi. Tất cả các thành phần liên quan đến việc vận chuyển nhiên liệu từ thùng nhiên liệu đến các xi-lanh: bơm nhiên liệu, phun nhiên liệu, hoặc chế hòa khí, cũng như sự pha trộn nhiên liệu với không khí trong xi-lanh và hệ thống lọc khí đốt trong ống xả đều được thiết kế bằng cách sử dụng kiến thức Thủy khí động lực học. Thủy khí động lực học cũng được sử dụng trong việc thiết kế các hệ thống sủi và hệ thống điều hòa không khí, hệ thống phanh thủy lực, trợ lực tay lái, truyền tải và hệ thống bôi trơn, hệ thống làm mát của động cơ, bộ tản nhiệt, Các hình dạng, kiểu dáng hợp lý của mẫu xe gần đây là kết quả của những nỗ lực giảm thiểu lực cản bằng cách sử dụng các kết quả mới nhất về dòng chảy trên bề mặt.

Ngoài ra, Thủy khí động lực học đóng một vai trò quan trọng trong việc thiết kế máy bay, tàu ngầm, tên lửa, động cơ phản lực, tua bin gió, thiết bị y sinh, làm mát linh kiện điện tử, giao thông vận tải trên nước, khai thác dầu thô và khí tự nhiên. Thủy khí động lực học cũng được xem xét trong thiết kế của các tòa nhà, cầu cống và thậm chí cả biển quảng cáo để đảm bảo rằng các cấu trúc có thể chịu được tải trọng gió. Nhiều hiện tượng tự nhiên như mưa, thời tiết, dòng mao dẫn của nước ngầm lên ngọn cây, gió, sóng biển... cũng hoạt động theo các nguyên lý của Thủy khí động lực học (Hình 1.1).



Dòng chảy tự nhiên và Thời tiết
© Vol. 16/Photo Disc.



Tàu thủy
© Vol. 5/Photo Disc.



Máy bay
© Vol. 1/Photo Disc.



Nhà máy điện
© Vol. 57/Photo Disc.



Cơ thể người
© Vol. 110/Photo Disc.



Ô tô
Photo by John M. Cimbal.



Tua bin gió
© Vol. 17/Photo Disc.



Hệ thống ống nước
Photo by John M. Cimbal.



Ứng dụng trong công nghiệp
Courtesy UMDE Engineering, Contracting, and Trading. Used by permission.

Hình 1.1 Một số lĩnh vực ứng dụng của Thủy khí động lực học

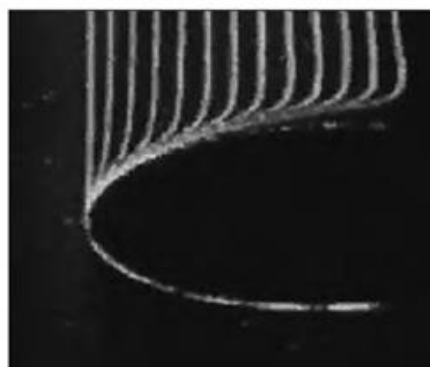
1.2. Điều kiện không trơn trượt

Dòng chảy chất lỏng thường bị giới hạn bởi bề mặt rắn và điều quan trọng là phải hiểu ảnh hưởng của bề mặt rắn đến dòng chảy như thế nào. Chúng ta biết rằng nước trong một dòng sông không thể chảy qua những tảng đá, mà chảy bao xung quanh chúng. Điều đó có nghĩa là thành phần vận tốc nước vuông góc với bề mặt đá phải bằng 0 và nước khi tiếp cận bề mặt theo hướng vuông góc phải hoàn toàn dừng lại tại bề mặt rắn. Tuy nhiên, không phải là quá rõ ràng để nhận biết rằng khi nước tiếp cận với bề mặt rắn từ bất kỳ góc độ nào cũng dừng tại các

bề mặt rắn, điều đó có nghĩa là các vận tốc tiếp tuyến của nước trên bề mặt rắn cũng bằng 0.

Hãy xem xét các dòng chảy của chất lỏng trong một ống cố định hoặc bao quanh một bề mặt rắn không thấm. Tất cả các quan sát thực nghiệm chỉ ra rằng chất lỏng là không chuyển động trên bề mặt và có một vận tốc bằng 0 so với bề mặt. Như vậy, khi chất lỏng tiếp xúc trực tiếp với chất rắn nó "bám dính" vào bề mặt

và có không trơn trượt trên bề mặt rắn. Điều này được gọi là *điều kiện không trơn trượt* hay *điều kiện bám dính*. Hình 1.2 là kết quả của một thí nghiệm cho thấy rõ sự biến đổi của phân bố vận tốc là hệ quả của việc chất lỏng dính trên bề mặt của một vật cản. Lớp dính vào bề mặt làm chậm lớp chất lỏng liền kề do lực nhớt giữa các lớp chất lỏng và quá trình xảy ra tương tự với các lớp tiếp theo. Vì vậy, điều kiện không trượt là nguyên nhân hình thành phân bố (profile) vận tốc.

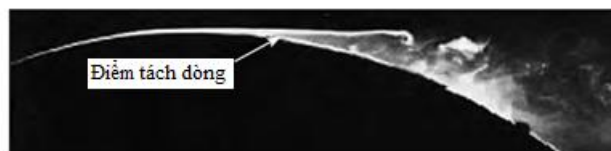


Hình 1.2 Phát triển của phân bố vận tốc trong dòng chảy bao do điều kiện không trơn trượt trên bề mặt rắn. Nguồn: IIHR, University of Iowa

Các khu vực dòng chảy liền kề với thành tường nơi mà ảnh hưởng nhớt là đáng kể (có gradient vận tốc khác không) được gọi là *lớp biên*.

Một hệ quả của điều kiện không trơn trượt là lớp chất lỏng tiếp giáp với một bề mặt chuyển động có vận tốc bằng vận tốc của bề mặt. Hay nói khác, vận tốc chất lỏng phải bằng 0 so với bề mặt tại các điểm tiếp xúc giữa chất lỏng và bề mặt rắn. Một hệ quả khác của điều kiện không trơn trượt là sinh ra lực cản bề mặt, đó là lực do chất lỏng tác dụng lên bề mặt rắn theo hướng của dòng chảy.

Khi chất lỏng chảy trên một bề mặt cong, ví dụ như khi bao quanh một hình trụ với tốc độ đủ cao, lớp biên có thể không còn gắn liền với bề mặt nữa mà tại một số điểm nó tách ra khỏi bề mặt, quá trình này gọi là hiện tượng *tách dòng* (flow separation) (Hình 1.3). Tuy nhiên, cần nhấn mạnh rằng điều kiện không trơn trượt được áp dụng ở khắp mọi nơi trên bề mặt, thậm chí ở sau các điểm tách dòng.



From G. M. Homsy et al, "Multi-Media Fluid Mechanics," Cambridge Univ. Press (2001). ISBN 0-521-78748-3.

Hình 1.3 Hiện tượng tách dòng trong dòng chảy qua một bề mặt cong. Nguồn: [2]

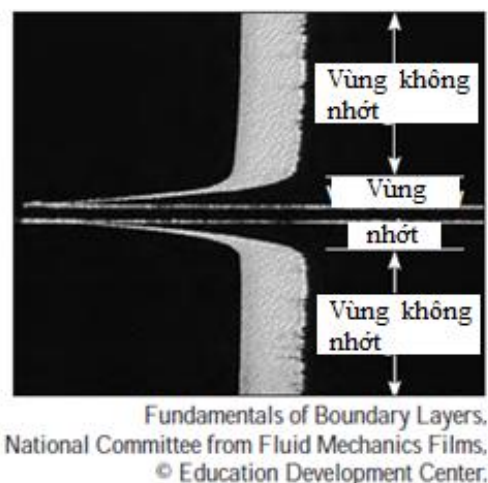
1.3. Phân loại dòng chảy

Trước đó chúng ta đã định nghĩa Thủy khí động lực học là môn khoa học nghiên cứu ứng xử của chất lỏng ở trạng thái tĩnh hay đang chuyển động và sự tương tác của chất lỏng với chất rắn hoặc với các chất lỏng khác. Trong thực tế có nhiều loại dòng chảy khác nhau, để thuận tiện cho nghiên cứu, chúng được phân loại thành các nhóm khác nhau trên cơ sở một số đặc điểm chung. Có nhiều cách phân loại dòng chảy và ở đây chúng ta sẽ trình bày một số loại dòng chảy chính.

1.3.1. Dòng không nhớt và dòng nhớt

Khi hai lớp chất lỏng di chuyển tương đối với nhau, lực ma sát xuất hiện trên mặt tiếp xúc giữa chúng và lớp chuyển động chậm hơn sẽ cản trở lớp chuyển động nhanh hơn. Sức cản bên trong của dòng chảy được xác định thông qua tính nhớt của chất lỏng, là thước đo của tính dính bên trong của chất lỏng. Tính nhớt sinh ra bởi lực liên kết giữa các phân tử và sự trao đổi động lượng giữa các lớp trong chất lỏng và sự va chạm giữa các phân tử trong chất khí. Trong thực tế, không thể tồn tại chất lỏng với độ nhớt bằng 0, do đó tất cả dòng chảy chất lỏng đều liên quan đến hiệu ứng nhớt ở một mức độ nào đó. Dòng chảy, trong đó các hiệu ứng ma sát là đáng kể được gọi là *dòng chảy nhớt*. Tuy nhiên, trong nhiều dòng chảy thực tế có những vùng (thường là vùng xa bề mặt rắn) nơi lực nhớt là nhỏ hơn nhiều so với lực quán tính hoặc áp lực. Khi đó, việc bỏ qua các hiệu ứng nhớt ở các khu vực dòng chảy ít nhớt sẽ đơn giản hóa việc phân tích mà không có nhiều mất mát về độ chính xác.

Hình 1.4 trình bày sự hình thành của khu vực không nhớt và khu vực nhớt của dòng chảy bao quanh tấm phẳng song song với chiều dòng chảy trong dòng chất lỏng với vận tốc đều. Chất lỏng dính trên cả hai mặt của tấm vì điều kiện không trơn trượt và lớp biên mỏng trong đó ảnh hưởng nhớt là quan trọng ở gần bề mặt tấm là khu vực dòng chảy nhớt. Các khu vực dòng chảy ở cả hai bên xa tấm phẳng không bị ảnh hưởng của nhớt là khu vực dòng chảy không nhớt.

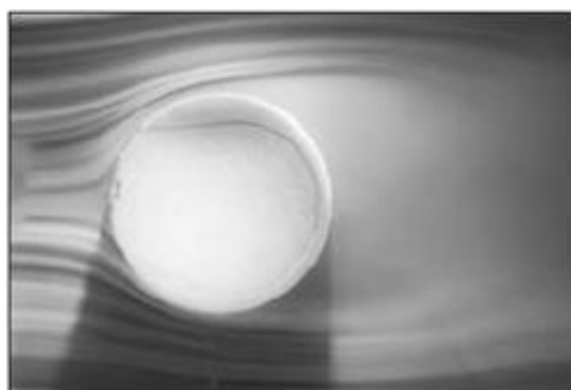


Hình 1.4 Dòng chảy bao quanh tấm phẳng: khu vực dòng chảy nhớt (sát tấm phẳng cả 2 phía) và khu vực dòng chảy không nhớt (xa tấm phẳng).

Nguồn: [2]

1.3.2. Dòng chảy bên trong và dòng chảy bao

Dòng chảy chất lỏng được phân loại là *dòng chảy bên trong* hay *dòng chảy bao*, tùy thuộc vào chất lỏng bị buộc chảy trong kênh kín hoặc bao quanh một bề mặt. Dòng chảy của nước trong một đường ống là ví dụ dòng chảy bên trong, dòng chảy không khí bao quanh một quả bóng hoặc một đoạn ống lộ ra ngoài là dòng chảy bao (Hình 1.5). Dòng chảy của chất lỏng trong ống được gọi là dòng chảy *hở/kênh hở* nếu ống chỉ chứa chất lỏng



Courtesy NASA and Cislunar Aerospace, Inc.

Hình 1.5 Dòng chảy bao xung quanh quả bóng tennis và khu vực vệt chảy ở phía sau. Nguồn: [2]

một phần và có một bề mặt tự do. Các dòng chảy của nước trong sông và mương thủy lợi là những ví dụ của các dòng chảy kênh hở. Dòng chảy bên trong bị chi phối bởi ảnh hưởng của độ nhớt trong toàn miền chảy. Đối với dòng chảy bao, ảnh hưởng nhớt được giới hạn trong các lớp biên gần bề mặt rắn và vùng *vết chảy* ở khu vực sau vật thể.

1.3.3. Dòng nén được và không nén được

Dòng chảy được phân loại là *nén được* hay *không nén được*, tùy thuộc vào mức độ biến đổi của mật độ trong dòng chảy. Không nén được chỉ là một xấp xỉ và một dòng chảy được cho là không nén được nếu mật độ luôn luôn gần như không thay đổi. Vì vậy, thể tích của từng phần chất lỏng là không thay đổi trong quá trình chuyển động và khi đó dòng chảy (hoặc chất lỏng) được gọi là không nén được.

Trong các điều kiện thực tế, mật độ của chất lỏng cơ bản là không đổi, do đó dòng chảy của chất lỏng thường là không nén được. Vì vậy, chất lỏng thường được coi là chất không nén được. Ví dụ, ở áp suất 210 atm, mật độ của nước trong điều kiện tiêu chuẩn (1 atm, 20 °C) chỉ thay đổi chỉ 1 phần trăm. Ngược lại, chất khí là chất có độ nén cao. Với thay đổi áp suất chỉ 0.01 atm đã gây ra thay đổi 1% mật độ của không khí trong khí quyển.

Khi nghiên cứu tên lửa, tàu vũ trụ và các hệ thống khác có liên quan đến dòng khí tốc độ cao, tốc độ dòng chảy thường được biểu diễn theo số không thứ nguyên Mach được định nghĩa như sau:

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{\text{Vận tốc dòng chảy}}{\text{Vận tốc âm}}$$

trong đó c là tốc độ âm thanh có giá trị khoảng 346 m/s trong không khí ở nhiệt độ phòng và ở độ cao mực nước biển. Một dòng chảy được gọi là *ngang âm*

(sonic) khi $Ma=1$, dưới âm (subsonic) khi $Ma < 1$, trên âm (supersonic) khi $Ma > 1$ và siêu âm hoặc siêu thanh (hypersonic) khi $Ma \gg 1$.

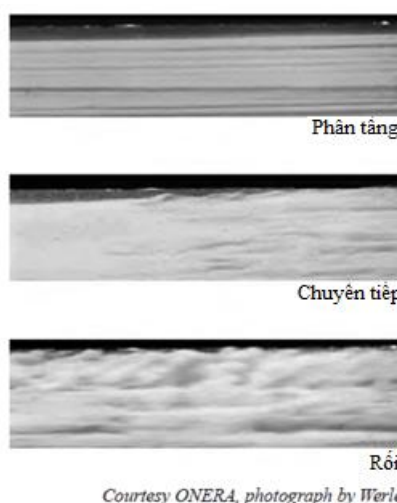
Dòng chảy chất lỏng không nén được là xấp xỉ có mức độ chính xác cao, tuy nhiên mức độ chính xác của xấp xỉ dòng không nén được của dòng khí phụ thuộc vào số Mach. Dòng khí thường có thể được xấp xỉ như không nén được nếu mật độ thay đổi dưới 5%, thường là trong trường hợp khi $Ma < 0.3$. Thực tế cho thấy, những ảnh hưởng của tính nén được của không khí có thể được bỏ qua ở tốc độ dưới 100 m/s. Vì vậy, cần lưu ý rằng dòng chảy của một chất khí không phải nhất thiết phải là một dòng chảy nén được.

Tính chất nén yếu của chất lỏng (thay đổi mật độ nhỏ tương ứng với thay đổi áp lực lớn) có thể dẫn đến những hậu quả quan trọng. Các tác hại của hiện tượng "búa nước" trong ống nước gây ra các rung động của đường ống tạo ra bởi sự phản xạ của sóng áp lực sau khi đóng mở các cửa van đột ngột là một ví dụ.

1.3.4. Dòng chảy tầng và dòng chảy rối

Một số dòng chảy được xem là êm đềm và có trật tự, trong khi một số dòng chảy khác có thể coi là khá hỗn loạn. Chất lỏng chuyển động có trật tự cao được đặc trưng bởi lớp chất lỏng chảy êm đềm được gọi là *dòng chảy tầng* (laminar). Thuật ngữ chảy tầng xuất phát từ sự chuyển động của các lớp chất lỏng liền kề với nhau mà không xâm phạm vào nhau (trong tiếng Anh từ "laminar" có nghĩa là cán mỏng). Dòng chảy của chất lỏng độ nhớt cao như dầu ở vận tốc thấp thường là chảy tầng. Các chất lỏng thường chuyển động rối loạn khi ở vận tốc cao và được đặc trưng bởi sự dao động nhanh của vận tốc, được gọi là *dòng chảy rối* (turbulent) (Hình 1.6). Dòng chảy của chất lỏng độ nhớt thấp như không khí ở tốc độ cao thường là chảy rối. Chế độ dòng chảy liên quan đến sự tiêu tán năng lượng trong dòng chảy. Trong dòng chảy rối, đường đi của các phân tử dài hơn do đó công để duy trì dòng chảy thường là lớn hơn.

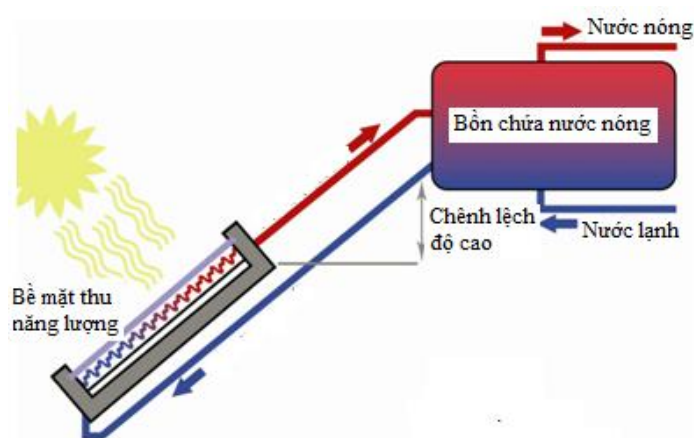
Dòng chảy trung gian giữa chảy tầng và chảy rối được gọi là *dòng chuyển tiếp* (transitional). Các thí nghiệm tiến hành bởi Osborn Reynolds trong những năm 1880 đã dẫn đến việc thành lập số không thứ nguyên Reynolds (Re) là thông số quan trọng cho việc xác định chế độ dòng chảy trong đường ống.



Hình 1.6 Hình ảnh dòng chảy tầng, chuyển tiếp và rối. Nguồn: [2]

1.3.5. Dòng chảy tự nhiên và dòng chảy cưỡng bức

Dòng chảy chất lỏng được gọi là dòng chảy *tự nhiên* hay *cưỡng bức*, tùy thuộc vào chuyển động của chất lỏng được khởi tạo như thế nào. Trong dòng chảy cưỡng bức, chất lỏng bị buộc chảy quanh một bề mặt hoặc trong một đường ống do tác động từ bên ngoài như máy bơm hoặc quạt. Trong dòng chảy tự nhiên, chuyển động chất lỏng là do tác động của các lực tự nhiên. Ví dụ như lực của hiệu ứng đẩy nổi, mà thể hiện là sự nổi lên của chất lỏng ấm hơn và chìm xuống của chất lỏng mát hơn. Hệ thống nước nóng năng lượng mặt trời là một ví dụ, ở đây hiệu ứng xi-phông nhiệt được sử dụng để thay thế máy bơm bằng cách đặt bể nước đủ cao trên tấm thu gom năng lượng mặt trời (Hình 1.7). Dòng chảy trong sông, dòng chảy ở đại dương là những ví dụ rõ ràng nhất về dòng chảy tự nhiên dưới tác dụng của trọng trường.



Hình 1.7 Sơ đồ hệ thống nước nóng năng lượng mặt trời. Nguồn:

<http://lightontheearth.blogspot.com/p/homeowners-solar-manual-online.html>

1.3.6. Dòng chảy dừng và dòng chảy không dừng

Các thuật ngữ *dừng* (steady) hay *ổn định* và *đều* (uniform) được sử dụng thường xuyên trong kỹ thuật, do đó cần thiết có một sự hiểu biết rõ ràng về ý nghĩa của chúng. Thuật ngữ dừng có nghĩa là các tham số dòng chảy không thay đổi tại từng điểm theo thời gian. Dòng chảy đều có nghĩa là các tham số dòng chảy có giá trị như nhau tại từng điểm trong không gian (giá trị này có thể thay đổi theo thời gian). Ngược lại với dòng dừng là dòng không dừng (unsteady). Lưu ý rằng trong tiếng Việt có thể sử dụng từ *ổn định* thay cho dừng (dòng chảy ổn định và dòng chảy không ổn định). Lưu ý rằng dừng từ “ổn định” ở đây có thể nhầm lẫn với sự ổn định của dòng chảy (flow stability) là khái niệm khác hẳn với khái niệm dòng chảy dừng. Tuy nhiên trong nhiều trường hợp thực tế dừng từ *ổn định* có thể phù hợp hơn (ví dụ như khi nói về: thiết bị ở chế độ ổn định, động cơ hoạt động ổn định ...phù hợp hơn là nói: thiết bị ở chế độ dừng và động cơ hoạt động dừng...).

Các thuật ngữ *không dừng* (unsteady) và *chuyển tiếp* (transient) thường được sử dụng thay thế cho nhau, nhưng các thuật ngữ này không phải là từ đồng nghĩa.

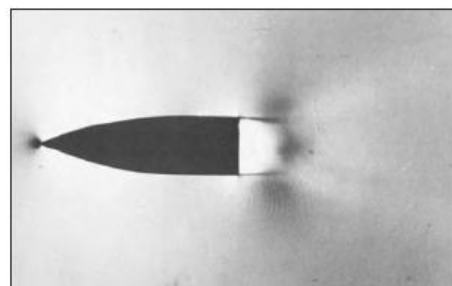
Trong Thủy khí động lực học, “không dừng” là thuật ngữ chung áp dụng cho bất kỳ dòng chảy nào đó có các thông số thay đổi theo thời gian, nhưng “chuyển tiếp” thường được sử dụng cho giai đoạn phát triển dòng chảy. Ví dụ, khi một động cơ tên lửa được bắn lên, các hiệu ứng chuyển tiếp xảy ra (hình thành trường áp suất bên trong động cơ tên lửa, dòng chảy được tăng tốc, vv.) cho đến khi động cơ hoạt động ổn định. Thuật ngữ dòng chảy có chu kỳ (periodic flow) đề cập đến các loại dòng chảy không dừng, trong đó giá trị các tham số dòng chảy dao động xung quanh giá trị trung bình ổn định.

Nhiều thiết bị thủy lực như tua bin, máy nén khí, nồi hơi, bình ngưng, và các thiết bị trao đổi nhiệt hoạt động trong một thời gian dài trong cùng điều kiện và được phân loại như các *thiết bị ổn định* (lưu ý rằng các trường dòng chảy gần cánh quay của một tua bin hiển nhiên là không dừng, nhưng ở đây chúng ta xem xét trường dòng chảy tổng thể chứ không phải là chi tiết tại một số điểm khi phân loại các thiết bị). Trong dòng chảy dừng, các đặc tính chất lỏng có thể thay đổi từ điểm này đến điểm khác trong thiết bị, nhưng tại điểm cố định bất kỳ chúng không thay đổi. Vì vậy, thể tích, khối lượng và tổng năng lượng dòng chảy của thiết bị ổn định là không thay đổi khi thiết bị hoạt động ổn định.

Một số hình ảnh thú vị của dòng chất lỏng được cung cấp trong cuốn sách "Album chuyên của động chất lỏng" của Milton Van Dyke (1982). Một ví dụ hay về trường dòng chảy không ổn định được thể hiện trong Hình 1.8, lấy từ cuốn sách của Van Dyke. Hình 1.8a là một ảnh chụp tức thời hình ảnh chuyển động tốc độ cao; bức ảnh cho thấy các xoáy rối lớn, xen kẽ, dao động sau vật thể. Những xoáy này tạo ra sóng xung kích (những vệt đen) di chuyển ngược dòng luân phiên trên và dưới bề mặt của cánh. Hình 1.8b chỉ ra cùng một trường dòng chảy, nhưng phim được thực hiện trong một thời gian dài để các hình ảnh phản ánh giá trị trung bình theo thời gian trên 12 chu kỳ (của sóng xung kích). Kết quả là trường dòng chảy trung bình theo thời gian là "ổn định" có nghĩa là các chi tiết của các dao động không ổn định bị mất đi trong thời gian đủ dài.



(a)



(b)

(a) Dymant, A., Flodrops, J. P. & Gryson, P. 1982 in Flow Visualization II, W. Merzkirch, ed., 331-336. Washington: Hemisphere.

(b) Dymant, A. & Gryson, P. 1978 in Inst. Méc. Fluides Lille, No. 78-5.

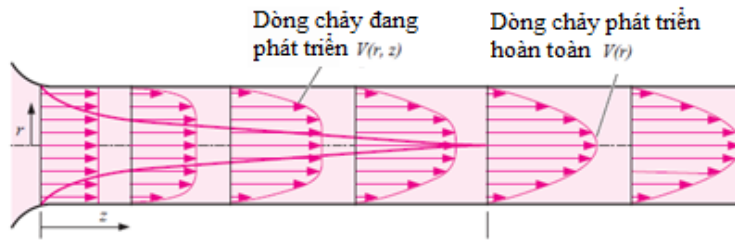
Hình 1.8 Vết dòng của dòng chảy bao quanh cánh với $Ma=0.6$: (a) Ảnh tức thời; (b) Ảnh với thời gian phơi sáng lâu. Nguồn: [2]

Một trong những công việc quan trọng nhất của kỹ sư là cần xác định xem là có đủ không nếu chỉ nghiên cứu tính "ổn định" của dòng chảy trung bình theo thời gian của một vấn đề, hay cần nghiên cứu chi tiết hơn về các tính không ổn định của vấn đề. Nếu các kỹ sư chỉ quan tâm đến các đặc trưng toàn cục của trường dòng chảy (ví dụ như hệ số cản trung bình theo thời gian, tốc độ trung bình và trường áp suất trung bình) như mô tả trung bình theo thời gian ở Hình 1.8b thì các phép đo thực nghiệm trung bình theo thời gian, hoặc các lời giải giải tích hoặc số trị của các trường dòng chảy trung bình theo thời gian sẽ là đủ. Tuy nhiên, nếu các kỹ sư đã quan tâm đến chi tiết về trường dòng chảy không ổn định, chẳng hạn như dao động dòng chảy, biến động không ổn định của áp suất, hoặc các sóng âm thanh phát ra từ các xoáy rối hoặc sóng xung kích, thì một mô tả trung bình theo thời gian của các trường dòng chảy sẽ là không đủ. Hầu hết các ví dụ phân tích và tính toán được cung cấp trong giáo trình này phục vụ dòng chảy dừng hoặc trung bình theo thời gian, tuy nhiên một số đặc trưng dòng chảy không dừng có liên quan sẽ được đề cập tới khi cần thiết.

1.3.7. Dòng chảy một, hai và ba chiều

Trường dòng chảy được đặc trưng tốt nhất bởi phân bố vận tốc, do đó một dòng chảy được cho là một, hai, hoặc ba chiều, nếu vận tốc dòng chảy thay đổi trong một, hai, hoặc ba chiều, tương ứng. Dòng chảy thực tế xảy ra trong hình học ba chiều và vận tốc có thể thay đổi trong tất cả các chiều, vì thế dòng chảy thực tế là dòng chảy ba chiều [$V(x,y,z)$ trong tọa độ đề các hoặc $V(r,\theta,z)$ trong tọa độ trụ]. Tuy nhiên, biến thiên của vận tốc trong chiều nhất định có thể tương đối nhỏ so với các biến thiên trong hướng khác và có thể được bỏ qua với sai số không đáng kể. Trong trường hợp này, dòng chảy có thể được mô hình hóa thuận tiện hơn như là một hoặc hai chiều.

Hãy xem xét dòng chảy dừng của chất lỏng trong một ống tròn gắn liền với một bể lớn. Vận tốc chất lỏng ở khắp mọi nơi trên bề mặt đường ống là bằng 0 vì điều kiện không trơn trượt và dòng chảy là hai chiều trong khu vực cửa vào của ống bởi vì vận tốc thay đổi theo cả hướng r và z . Phân bố vận tốc sẽ phát triển hoàn toàn và chỉ thay đổi theo r ở khoảng cách nhất định tính từ cửa vào (khoảng 10 đường kính ống đối với dòng chảy rối, và ít hơn đối với dòng chảy tầng, như trong Hình 1.9), dòng chảy trong vùng này được gọi là *phát triển hoàn toàn*. Dòng chảy phát triển hoàn toàn trong một ống tròn là một chiều vì vận tốc chỉ thay theo bán kính r và không thay đổi theo tọa độ góc θ hay theo trục z , như thể hiện trong Hình 1.9. Có thể thấy, phân bố vận tốc là như nhau trên bất kỳ mặt cắt trên trục z và đối xứng xung quanh trục của ống.



Hình 1.9 Sự phát triển dòng chảy trong ống trụ

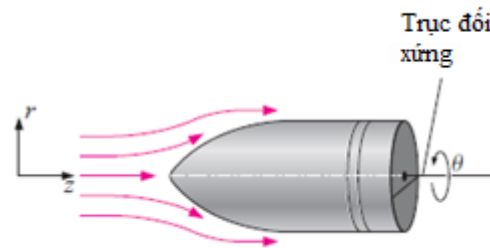
Lưu ý rằng các chiều của dòng chảy cũng phụ thuộc vào sự lựa chọn hệ tọa độ. Ví dụ, dòng chảy trong ống thảo luận ở trên là một chiều trong tọa độ hình trụ, nhưng hai chiều trong tọa độ Đề các. Cũng cần lưu ý rằng trong ví dụ đơn giản này, vận tốc không có phân bố đều trên mặt cắt ngang của đường ống là do điều kiện không trơn trượt (trên thành ống vận tốc bằng 0, còn trên trục tâm ống vận tốc có giá trị lớn nhất).

Dòng chảy trong hồ lớn, vùng ven biển... có thể được xấp xỉ là dòng chảy 2 chiều ngang khi thành phần vận tốc theo chiều thẳng đứng thay đổi nhỏ so với các vận tốc theo chiều ngang. Dòng chảy lũ trong sông có thể coi là dòng chảy một chiều dọc theo trục của sông vì dòng chảy theo phương ngang và phương thẳng đứng nhỏ hơn nhiều so với dòng chảy theo trục chính.

1.3.8. Ví dụ 1.1: Dòng đối xứng trục bao quanh viên đạn

Xem xét một viên đạn bắn trong không khí ở trạng thái tĩnh. Xác định xem dòng chảy không khí trung bình theo thời gian bao quanh viên đạn là một, hai, hay ba chiều? (Hình 1.10).

Vấn đề: Cần xác định dòng chảy không khí bao quanh viên đạn là một, hai, hay ba chiều?



Hình 1.10 Dòng chảy đối xứng trục bao quanh viên đạn

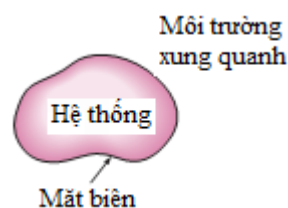
Giả thiết: Không khí ở trạng thái tĩnh (không có gió) và viên đạn không quay, xoáy.

Phân tích: Viên đạn là một vật thể đối xứng trục. Dòng không khí phía trước viên đạn là song song với trục đối xứng này, vì vậy có thể giả thiết là dòng không khí trung bình theo thời gian có tính đối xứng trục. Vận tốc trong trường hợp này thay đổi theo trục z và bán kính r , nhưng không thay đổi theo góc θ . Do đó, dòng không khí trung bình theo thời gian bao quanh viên đạn là hai chiều.

Thảo luận: Dòng không khí trung bình theo thời gian là đối xứng trục, tuy nhiên dòng tức thời không phải là đối xứng trục, như minh họa trong Hình 1.8.

1.4. Hệ thống và thể tích khống chế

Một hệ thống được định nghĩa là một lượng vật chất hay một vùng trong không gian được lựa chọn để nghiên cứu. Vật chất hoặc khu vực bên ngoài hệ thống được gọi là *môi trường xung quanh*. Bề mặt thật hay bề mặt tưởng tượng phân cách hệ thống với môi trường xung quanh được gọi là *mặt biên* (Hình 1.11). Mặt biên của một hệ thống



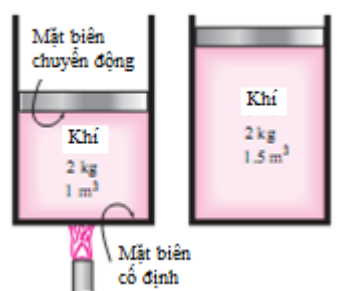
Hình 1.11 Hệ thống, môi trường xung quanh và mặt biên

có thể cố định hoặc di động. Lưu ý rằng mặt biên là bề mặt tiếp xúc chung của hệ thống và môi trường xung quanh. Một cách toán học, mặt biên có độ dày bằng không, do đó nó có thể không chứa bất kỳ khối lượng vật chất nào và cũng không chiếm bất kỳ thể tích nào trong không gian.

Hệ thống có thể được xem là *đóng* hoặc *mở*, tùy thuộc vào việc một khối lượng vật chất cố định hay một thể tích không gian được lựa chọn để nghiên cứu. Một hệ thống đóng còn được gọi là một *khối lượng khống chế* hay *khối lượng kiểm soát* (control mass) bao gồm một khối lượng vật chất cố định và không cho vật chất vượt qua mặt biên của nó. Tuy nhiên, năng lượng, dưới dạng nhiệt hoặc công, có thể được trao đổi qua biên và thể tích của một hệ thống khép kín có thể thay đổi. Trong trường hợp đặc biệt, khi ngay cả năng lượng cũng không được phép vượt qua mặt biên thì hệ thống đóng được gọi là một *hệ thống cô lập*.

Xem xét một thiết bị bao gồm piston và xi lanh, Hình 1.12. Hãy tìm hiểu những gì xảy ra với khí trong xi lanh khi được nung nóng. Chất khí trong xi lanh là một hệ thống. Các bề mặt bên trong của piston và xi lanh là các mặt biên, vật chất không thể vượt qua những mặt biên này, vì vậy đây là một hệ thống đóng. Chú ý rằng năng lượng có thể trao đổi qua mặt biên và một phần của mặt biên (bề mặt bên trong của piston) có thể di chuyển. Tất cả mọi thứ bên ngoài khí trong xi lanh, bao gồm cả piston và xi lanh là môi trường xung quanh.

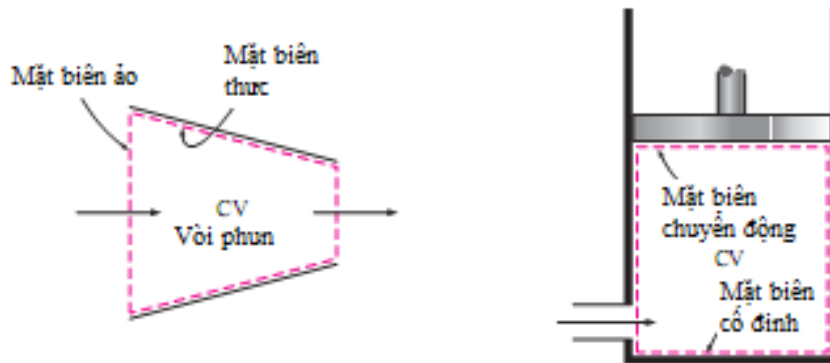
Một hệ thống mở, hoặc một *thể tích khống chế* hay *thể tích kiểm soát* (control volume) là một vùng được chọn thích hợp trong không gian. Nó thường bao quanh một thiết bị có liên quan đến dòng chảy như một máy nén khí, tua bin, hoặc vòi phun. Khối lượng và năng lượng có thể đi qua mặt biên của thể tích khống chế. Thể tích khống chế thường là một hệ thống mở.



Hình 1.12 Hệ thống piston và xi lanh

Một số lượng lớn các vấn đề kỹ thuật liên quan đến dòng chảy vào và ra một hệ thống và hệ thống đó thường được coi như là một thể tích khối khí. Máy bơm nước, bộ tản nhiệt xe hơi, tua bin, máy nén khí... đều hoạt động liên quan đến dòng chảy và cần được phân tích như thể tích khối khí (hệ thống mở) thay vì khối lượng khối khí (hệ thống đóng). Nói chung, không có quy định cụ thể cho việc lựa chọn thể tích khối khí, nhưng sự lựa chọn thích hợp làm cho việc phân tích dễ dàng hơn. Ví dụ, nếu chúng ta phân tích dòng chảy của không khí qua một ống phun, một lựa chọn tốt cho thể tích khối khí là khu vực trong vòi phun.

Thể tích khối khí có thể được cố định về kích thước và hình dạng như trong trường hợp của một vòi phun, hoặc có thể bao gồm một mặt biên chuyển động như trong hệ thống piston – xi lanh (Hình 1.13). Tuy nhiên, hầu hết thể tích khối khí có mặt biên cố định và không chứa bất kỳ mặt biên chuyển động nào. Thể tích khối khí cũng có thể trao đổi nhiệt và công giống như một hệ thống kín, ngoài ra thể tích không khí còn có thể trao đổi vật chất qua mặt biên.



Hình 1.13 Ví dụ về thể tích khối khí bao gồm các mặt biên cố định, mặt biên chuyển động, mặt biên thực tế và mặt biên tưởng tượng (ảo)

1.5. Ý nghĩa quan trọng của thứ nguyên và đơn vị đo

Mỗi đại lượng vật lý đều có một đặc trưng là *thứ nguyên* (dimension). Độ lớn của các thứ nguyên là các *đơn vị đo*. Một số thứ nguyên cơ bản như: khối lượng m , chiều dài L , thời gian t và nhiệt độ T được chọn là thứ nguyên chính hay *thứ nguyên cơ sở*, trong khi thứ nguyên của những đại lượng khác như vận tốc v , năng lượng E , và thể tích V được biểu diễn thông qua các thứ nguyên cơ sở được gọi là *thứ nguyên thứ cấp* (secondary dimensions), hoặc *thứ nguyên dẫn suất* (derived dimensions).

Một số hệ thống đơn vị đo khác nhau đã được phát triển ở những khu vực và quốc gia khác nhau. Mặc dù có những nỗ lực mạnh mẽ trong cộng đồng khoa học và kỹ thuật để thống nhất trên thế giới một hệ thống đơn vị duy nhất, tuy nhiên hai hệ thống đơn vị vẫn đang được sử dụng phổ biến ngày hôm nay là hệ thống đơn vị Anh, còn được gọi là Hệ thống thông lệ Hoa Kỳ (USCS –United

States Customary System) và Hệ thống đơn vị quốc tế SI (Le Système International d'Unites, metric system). SI là một hệ thống đơn giản và hợp lý dựa trên mối quan hệ thập phân của các đơn vị khác nhau (các đơn vị trong hệ thống liên hệ với nhau qua dấu thập phân; ví dụ $1.0 \text{ m} = 100.0 \text{ cm} = 0.001 \text{ km} \dots$) và đang được sử dụng trong các công trình khoa học và kỹ thuật ở hầu hết các nước trên thế giới, trong đó có nước Anh. Hệ thống đơn vị Anh không có cơ sở hệ thống số một cách rõ ràng, các đơn vị khác nhau trong hệ thống này liên hệ với nhau một cách tùy tiện ($12 \text{ in} = 1 \text{ ft}$, $1 \text{ dặm} = 5280 \text{ ft}$, $4 \text{ qt} = 1 \text{ gal}$, vv.), vì thế dễ làm bị nhầm lẫn và khó sử dụng. Hoa Kỳ là nước công nghiệp duy nhất chưa chuyển đổi hoàn toàn sang hệ SI. Bảng 1.1 chỉ ra 7 thứ nguyên cơ sở thường dùng trong kỹ thuật.

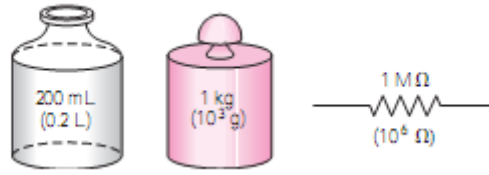
Bảng 1.1 Bảy thứ nguyên cơ sở dùng trong kỹ thuật và đơn vị trong hệ SI

TT	Thứ nguyên	Đơn vị
1	Độ dài	mét (m)
2	Khối lượng	kilôgram (kg)
3	Thời gian	giây (s)
4	Nhiệt độ	kelvin (K)
5	Cường độ dòng điện	Ampe (A)
6	Lượng ánh sáng	candela (cd)
7	Lượng vật chất	mole (mol)

Như đã chỉ ra, SI được dựa trên mối quan hệ thập phân giữa các đơn vị. Các tiền tố được sử dụng để thể hiện các bội số của các đơn vị khác nhau được liệt kê trong Bảng 1.2. Chúng là những tiêu chuẩn cho tất cả các đơn vị, sinh viên được khuyến khích ghi nhớ vì sử dụng rộng rãi của chúng. Một số ví dụ sử dụng tiền tố được trình bày trên Hình 1.14.

Bảng 1.2 Các tiền tố đơn vị được sử dụng trong hệ SI

Thừa số nhân	Tiền tố
10^{12}	tera, T
10^9	giga, G
10^6	mega, M
10^3	kilo, k
10^2	hecto, h
10^1	deka, da
10^{-1}	deci, d
10^{-2}	centi, c
10^{-3}	milli, m
10^{-6}	micro, μ
10^{-9}	nano, n
10^{-12}	pico, p



Hình 1.14 Một số ví dụ sử dụng các tiền tố đơn vị

1.5.1. Một số đơn vị trong hệ SI và hệ Anh

Trong hệ SI, các đơn vị của khối lượng, chiều dài và thời gian là kilôgam (kg), mét (m) và giây (s). Các đơn vị tương ứng trong hệ Anh là *pao-khối lượng* (lbm), foot (ft) và giây (s). Ký hiệu của pao lb là chữ viết tắt của từ libra, một đơn vị trọng lượng của La Mã cổ đại. Anh giữ lại ký hiệu này cho đến tận ngày nay sau khi La Mã kết thúc chiếm đóng nước Anh từ năm 410. Các đơn vị khối lượng và thời gian trong hai hệ thống có liên quan với nhau bằng biểu thức:

$$1\text{lbm}=0.45359\text{kg}$$

$$1\text{ft}=0.3048\text{m}$$

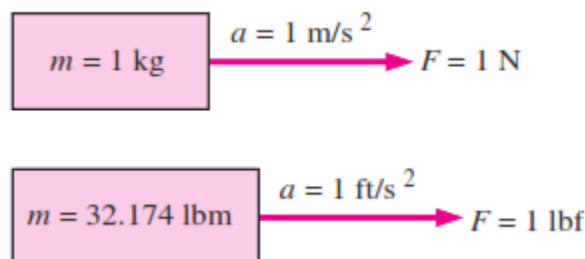
Trong hệ thống đơn vị Anh, lực thường được coi là một trong những thứ nguyên cơ sở. Đây là nguồn gốc của nhiều sự nhầm lẫn liên quan tới hằng số gia tốc trọng trường (g_c) trong nhiều công thức. Để tránh phiền toái này, chúng ta xem xét lực là một thứ nguyên mà đơn vị của nó có nguồn gốc từ định luật thứ hai của Newton:

$$F=ma \tag{1.1}$$

Trong SI, đơn vị lực là newton (N), được định nghĩa là lực cần thiết để đẩy một khối lượng 1 kg chuyển động với gia tốc là 1 m/s^2 . Trong hệ thống đơn vị Anh, đơn vị lực lượng là *pao-lực* (lbf) và được định nghĩa là lực cần thiết để đẩy một khối lượng 32.174 lbm (1 slug) với gia tốc 1 ft/s^2 (Hình 1.15). Đó là:

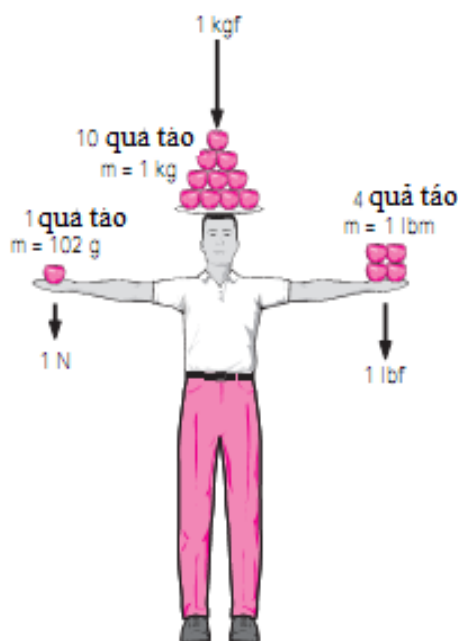
$$1\text{N}=1\text{kg.m/s}^2$$

$$1\text{lbf}=32.174\text{lbm.ft/s}^2$$



Hình 1.15 Định nghĩa đơn vị lực

Một lực 1 N là tương đương với trọng lượng của một quả táo nhỏ ($m=100\text{g}$), trong khi một lực 1 lbf là tương đương với trọng lượng của bốn quả táo trung bình ($m= 454\text{ g}$), như thể hiện trong Hình 1.16. Lực với đơn vị khác được sử dụng phổ biến ở nhiều nước châu Âu là *kilogram-lực* (kgf), đó là trọng lượng của khối lượng 1 kg ở độ cao mực nước biển ($1\text{ kgf}= 9.807\text{ N}$).



Hình 1.16 Minh họa sự khác nhau giữa các đơn vị lực (N và lbf)

Thuật ngữ *trọng lượng* thường diễn tả không đúng khối lượng của vật. Không giống như khối lượng, trọng lượng

W là một lực. Đó là lực hấp dẫn (của trái đất) tác dụng vật thể và độ lớn của nó được xác định từ định luật Newton thứ hai:

$$W=mg \quad (\text{N}) \quad (1.2)$$

trong đó m là khối lượng của vật thể và g là gia tốc trọng trường địa phương (g có giá trị là 9.807 m/s^2 hoặc 32.174 ft/s^2 ở độ cao mực nước biển và vĩ độ 45°). Một cái cân bình thường dùng để đo lực hấp dẫn tác động lên vật thể. Trọng lượng của một đơn vị thể tích của một chất được gọi là trọng lượng riêng γ và xác định từ công thức $\gamma=\rho g$, trong đó ρ là mật độ.

Khối lượng của một vật thể vẫn giữ nguyên bất kể vị trí của nó ở đâu. Tuy nhiên, trọng lượng của nó thay đổi theo gia tốc trọng trường. Một vật thể có trọng lượng ít hơn trên đỉnh ngọn núi vì g giảm dần theo độ cao.

Nguyên nhân chính của sự nhầm lẫn giữa khối lượng và trọng lượng là vì khối lượng thường được đo gián tiếp bằng cách đo lực hấp dẫn tác động lên nó. Phương pháp tiếp cận này cũng dựa trên giả thiết rằng các lực tác dụng bởi các hiệu ứng khác như đẩy nổi của không khí và chuyển động của chất lỏng là không đáng kể. Điều này cũng giống như đo khoảng cách một ngôi sao bằng cách đo sự dịch chuyển màu đỏ, hoặc đo độ cao của một máy bay bằng cách đo áp suất khí quyển. Cả hai cách đo này cũng là cách đo gián tiếp. Cách đo trực tiếp khối lượng là phải so sánh với một khối lượng đã được biết (bằng các quả cân). Đây là phương pháp cộng kênh, được sử dụng chủ yếu để kiểm định cân và xác định khối lượng kim loại quý.

Công là một dạng năng lượng, được định nghĩa là giá trị của tích số của lực nhân với đường đi. Công có đơn vị "newton-mét (N.m)", được gọi là jun (J):

$$1J=1N.m \quad (1.3)$$

Một đơn vị phổ biến của năng lượng trong SI là kilo-jun (1 kJ= 10³ J). Trong hệ thống đơn vị Anh, đơn vị năng lượng là Btu (đơn vị nhiệt lượng Anh), được định nghĩa như là năng lượng cần thiết để tăng nhiệt độ của 1 lbm của nước ở 68 °F lên 1 °F. Trong hệ thống SI, lượng năng lượng cần thiết để nâng nhiệt độ của 1 g nước ở 14.5 °C lên 1 °C được định nghĩa là 1calo (cal), và 1 cal= 4.1868 J. Độ lớn của kilo-jun và Btu gần như giống hệt nhau (1Btu=1.0551 kJ).

1.5.2. Tính đồng nhất thứ nguyên

Tất cả chúng ta đã biết từ hồi học phổ thông là táo và cam hoặc bàn ghế là không cộng được với nhau. Nhưng nhiều khi chúng ta tìm cách để làm điều đó (tất nhiên là do nhầm lẫn). Trong kỹ thuật, tất cả phương trình phải có *thứ nguyên đồng nhất*. Điều đó có nghĩa là mỗi số hạng trong phương trình phải có cùng đơn vị. Nếu tại một bước nào đó của quá trình phân tích, chúng ta thấy mình phải cộng hai đại lượng có đơn vị khác nhau, đó là một dấu hiệu chắc chắn rằng chúng ta đã mắc lỗi ở giai đoạn trước đó. Vì vậy, kiểm tra thứ nguyên là một công cụ có giá trị để phát hiện lỗi trong tính toán kỹ thuật.

1.5.3. Ví dụ 1.2: Phát hiện ra lỗi từ đơn vị không thống nhất

Trong khi giải quyết một vấn đề, một người đã nhận được phương trình sau đây tại một bước nào đó:

$$E = 25kJ + 7kJ/kg$$

trong đó E là năng lượng toàn phần và có đơn vị calo. Hãy xác định làm thế nào để sửa lỗi và thảo luận về những gì có thể đã gây ra nó.

Vấn đề: Trong quá trình phân tích đã nhận được mối quan hệ giữa các đơn vị không phù hợp. Cần phải điều chỉnh lại và xác định nguyên nhân có thể xảy ra lỗi này.

Phân tích: Hai số hạng vế phải không có các đơn vị phù hợp, do đó không thể cộng chúng vào nhau để nhận được tổng năng lượng. Nhân số hạng cuối cùng với khối lượng sẽ loại bỏ kg trong mẫu số và toàn bộ phương trình sẽ trở thành có thứ nguyên đồng nhất; sau khi chuyển đổi đơn vị, mỗi số hạng trong phương trình sẽ có cùng một đơn vị.

Thảo luận: Rõ ràng lỗi này là do quên để nhân số hạng cuối cùng với khối lượng ở giai đoạn trước đó.

Kinh nghiệm cho chúng ta biết rằng vấn đề đơn vị có thể trở thành rối rắm nếu không được sử dụng một cách cẩn thận trong việc giải quyết các vấn đề kỹ thuật. Tuy nhiên, với cẩn trọng và một số kỹ năng có được, đơn vị có thể được sử dụng để làm lợi thế. Chúng có thể được sử dụng để kiểm tra các công thức; thậm chí có thể được sử dụng để xây dựng công thức, như được giải thích trong ví dụ dưới đây.

1.5.4. Ví dụ 1.3: Xây dựng công thức từ xem xét đồng nhất đơn vị

Một bể chứa đầy dầu có mật độ $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$. Nếu thể tích của bể là $V = 2 \text{ m}^3$, xác định khối lượng m của dầu trong bể chứa.

Vấn đề: Thể tích của một bể chứa dầu đã cho trước. Cần xác định khối lượng của dầu.

Giả thiết: Dầu là một chất không nén được và do đó mật độ của nó là không đổi.

Phân tích: Giả sử chúng ta quên công thức quan hệ của mật độ đến khối lượng và thể tích. Tuy nhiên, chúng ta biết rằng khối lượng có đơn vị kg. Điều đó có nghĩa là chúng ta phải kết thúc bài toán với đơn vị kg, cho dù chúng ta làm tính toán như thế nào. Theo đầu bài chúng ta có:

$$\rho = 850 \text{ kg/m}^3 \text{ và } V = 2 \text{ m}^3$$

Rõ ràng là chúng ta có thể loại bỏ m^3 và kết thúc với kg bằng cách nhân hai đại lượng này với nhau. Do đó, công thức mà chúng ta đang tìm kiếm cần có dạng:

$$m = \rho V$$

Vậy:
$$m = (850 \text{ kg/m}^3)(2 \text{ m}^3) = 1700 \text{ kg}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng phương pháp này có thể không làm việc với trường hợp công thức phức tạp hơn.

Sinh viên cần lưu ý rằng một công thức không có thứ nguyên đồng nhất chắc chắn là một công thức sai, nhưng một công thức có thứ nguyên đồng nhất không nhất thiết phải là công thức đúng.

1.6. Mô hình toán học của các vấn đề kỹ thuật

1.6.1. Các phương pháp nghiên cứu

Một thiết bị kỹ thuật hoặc một quá trình có thể được nghiên cứu bằng phương pháp *thí nghiệm* (tiến hành thí nghiệm và đo đạc) hoặc bằng phương pháp *phân tích* (bằng phân tích và tính toán). Phương pháp thí nghiệm có lợi thế bởi vì chúng ta làm việc với hệ thống vật lý thực tế và các đại lượng cần biết được xác định bằng đo lường trong giới hạn sai số thực nghiệm. Tuy nhiên, phương pháp này rất tốn kém về thời gian và kinh phí và nhiều khi không thể thực hiện được. Bên cạnh đó, hệ thống chúng ta đang nghiên cứu có thể không tồn tại, hoặc cần phải xây dựng mô hình vật lý không hoàn toàn đúng với thực tế. Ví dụ, toàn bộ hệ thống thông gió và hệ thống ống nước của một tòa nhà thường phải được thiết kế căn cứ vào một số thông số kỹ thuật nhất định trước khi xây dựng. Các phương pháp phân tích (bao gồm cả phương pháp số) có lợi thế là nhanh chóng và không tốn kém, nhưng các kết quả thu được đều dựa trên các giả thiết, mô hình toán và phương pháp xấp xỉ đã được lý tưởng hóa trong phân tích. Trong các nghiên cứu kỹ thuật, một sự thỏa hiệp tốt thường đạt được bằng cách giảm

sự lựa chọn phương án bằng một số kết quả phân tích (mô hình toán) sau đó xác nhận các kết quả bằng thực nghiệm.

1.6.2. Mô hình hóa trong kỹ thuật

Hầu hết các vấn đề khoa học đều được mô hình hóa bởi các phương trình toán mô tả mối quan hệ giữa những *thay đổi* của một số biến quan trọng. Thông thường, mô tả sự thay đổi nhỏ càng nhỏ của các biến sẽ nhận được sự mô tả càng tổng quát và chính xác hơn. Trong trường hợp giới hạn vô cùng nhỏ, chúng ta sẽ nhận được các phương trình vi phân là các mô hình toán học của vấn đề nghiên cứu tuân thủ các nguyên lý và định luật vật lý đã biết. Vì vậy, các phương trình vi phân thường được sử dụng để nghiên cứu các vấn đề về khoa học và kỹ thuật. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng nhiều vấn đề gặp phải trong thực tế có thể được giải quyết mà không cần đến các phương trình vi phân và các vấn đề khác liên quan tới chúng.

Nghiên cứu các hiện tượng vật lý thường được tiến hành qua hai bước quan trọng. Bước đầu tiên, tất cả các biến có ảnh hưởng đến hiện tượng cần được xác định, các giả thiết hợp lý và các xấp xỉ cần được thực hiện và sự phụ thuộc lẫn nhau của các biến này cần được nghiên cứu. Các định luật và nguyên lý vật lý có liên quan cần được sử dụng để vấn đề được mô tả bằng mô hình toán học. Phương trình toán học cần được sử dụng vì nó cho thấy mức độ phụ thuộc của một số biến vào các biến khác và tầm quan trọng tương đối của các số hạng khác nhau. Trong bước thứ hai, vấn đề sẽ được giải quyết bằng cách sử dụng một phương pháp tiếp cận phù hợp và cuối cùng lời giải nhận được sẽ được phân tích và thảo luận (Hình 1.17).

Các quá trình xảy ra trong tự nhiên dường như xảy ra một cách ngẫu nhiên và không theo bất kỳ trật tự nào. Tuy nhiên, trong thực tế chúng đều bị chi phối bởi một số định luật vật lý. Cho dù chúng ta có biết hay không biết, các định luật này vẫn hoạt động làm cho các quá trình có thể được điều chỉnh và dự đoán được. Rất may mắn là hầu hết các định luật vật lý đã được xác định và hiểu rõ bởi các nhà khoa học. Điều này giúp cho việc có thể dự đoán quá trình của một sự kiện trước khi nó thực sự xảy ra hay nghiên cứu các khía cạnh khác nhau của một sự kiện bằng toán học mà không quá đắt tiền và tốn thời gian làm thí nghiệm. Đây là ưu thế của phương pháp phân tích. Kết quả chính xác cho các vấn đề có ý nghĩa thực tế có thể thu được với công sức tương đối ít bằng cách sử dụng một mô hình toán học phù hợp với thực tế. Việc thiết lập một mô hình như vậy đòi hỏi một kiến thức đầy đủ về hiện tượng tự nhiên, các định luật liên quan, cũng như *sự cảm nhận về vấn đề* (liên quan đến việc thiết lập thành công mô hình toán học phù hợp với thực tế). Một mô hình không phù hợp thực tế sẽ cho kết quả không chính xác do đó không thể được chấp nhận.



Hình 1.17 Sơ đồ mô hình hóa toán học và giải quyết các vấn đề vật lý

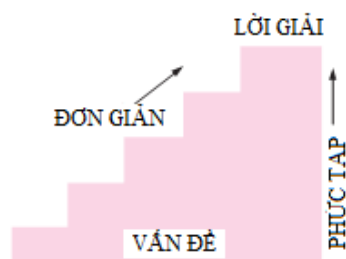
Một nhà phân tích làm việc với một vấn đề kỹ thuật thường thấy mình hay ở một vị trí phải lựa chọn giữa một mô hình rất chính xác nhưng phức tạp và một mô hình đơn giản với mức độ chính xác không cao. Sự lựa chọn đúng đắn sẽ phụ thuộc vào tình hình cụ thể. Tuy nhiên, sự lựa chọn đúng thường là mô hình đơn giản nhất nhưng mang lại kết quả chấp nhận được. Tuy nhiên, điều quan trọng cuối cùng là phải xem xét điều kiện vận hành của mô hình trong thực tế.

Thiết lập một mô hình rất chính xác nhưng phức tạp thường không phải là quá khó khăn. Tuy nhiên, mô hình này thường không được sử dụng nhiều để phân tích vì rất khó, tốn kém kinh phí và rất nhiều thời gian để tìm lời giải cho các mô hình phức tạp. Ở mức độ tối thiểu, mô hình cần phản ánh các đặc trưng cơ bản của vấn đề vật lý mà nó mô tả. Nhìn chung, có rất nhiều vấn đề thực tế quan trọng có thể được phân tích bằng một mô hình đơn giản. Tuy nhiên, cần luôn luôn phải nhớ rằng các kết quả thu được từ phân tích chỉ phù hợp với các điều kiện đơn giản hóa vấn đề. Vì vậy, lời giải không nên được áp dụng cho các tình huống khác. Một lời giải không phù hợp với các kết quả quan sát có nghĩa là mô hình toán học đã sử dụng là quá thô thiển (nếu không phải là sai). Trong trường hợp đó, một mô hình thực tế hơn cần được chuẩn bị bằng cách loại bỏ một hoặc nhiều giả thiết không phù hợp. Điều này, tất nhiên, sẽ dẫn đến một mô hình phức tạp hơn và khó giải hơn. Do đó, bất kỳ lời giải nào cho một vấn đề nào đó cần được hiểu trong bối cảnh các giả thiết đã được sử dụng.

1.7. Kỹ thuật giải quyết các bài toán thủy khí

Bước đầu tiên trong việc học bất cứ ngành khoa học nào là phải nắm bắt các nguyên lý cơ bản và có được một kiến thức tương đối đầy đủ về nó. Bước tiếp theo là phải làm chủ được các nguyên lý cơ bản đó bằng cách kiểm tra lại các kiến thức đã học được. Điều này được thực hiện bằng cách giải quyết các vấn đề có ý nghĩa thực tế. Để giải quyết các vấn đề thực tế, đặc biệt là những vấn đề phức tạp, đòi hỏi phải có một hệ thống phương pháp tiếp cận. Bằng cách sử dụng phương pháp tiếp cận *từng bước*, người kỹ sư có thể thay vì giải quyết một vấn đề phức tạp bằng việc giải quyết một loạt các vấn đề đơn giản (giống như khi cần lên tầng gác, chúng ta nên đi lên bằng đường cầu thang, còn nếu chúng ta chọn phương pháp “nhảy” lên thì hiếm ai có thể giải quyết được vấn đề, Hình 1.18).

Khi bạn cần giải quyết một vấn đề, chúng tôi khuyên bạn nên áp dụng *trung thành* các bước sau đây. Điều này sẽ giúp bạn tránh được một số khó khăn thường gặp trong quá trình giải quyết vấn đề.



Hình 1.18 Phương pháp tiếp cận từng bước có thể làm đơn giản vấn đề cần giải quyết

Bước 1: Đặt vấn đề

Bằng ngôn ngữ riêng của mình, chúng ta cần nêu lại vấn đề một cách ngắn gọn, liệt kê các thông tin quan trọng và các đại lượng cần tìm. Điều này đảm bảo rằng chúng ta hiểu rõ vấn đề và những mục tiêu trước khi cố gắng để giải quyết vấn đề.

Bước 2: Phác thảo sơ đồ

Phác thảo các hệ thống vật lý có liên quan và liệt kê các thông tin liên quan đến bài toán. Phác thảo phải là một cái gì đó không phức tạp, nhưng nó cần giống các hệ thống thực tế và cần phải hiển thị rõ các đặc trưng chính của vấn đề. Chỉ ra khả năng tương tác năng lượng và khối lượng của hệ thống với môi trường xung quanh. Liệt kê các thông tin được cung cấp trên bản phác thảo giúp ta nhìn thấy toàn bộ vấn đề cùng một lúc. Ngoài ra, tìm ra các tính chất không thay đổi trong suốt quá trình (chẳng hạn như nhiệt độ trong quá trình đẳng nhiệt) và hiển thị chúng trên bản phác thảo.

Bước 3: Giả thiết và xấp xỉ

Trình bày các giả thiết và xấp xỉ thích hợp được thực hiện để đơn giản hóa vấn đề và làm cho vấn đề có thể có được lời giải. Biện luận cho các giả thiết (lý do để

áp đặt giả thiết). Tự xác định các giá trị hợp lý cho các đại lượng thiếu mà cần thiết sử dụng để giải quyết vấn đề. Ví dụ, trong trường hợp không có số liệu cụ thể cho áp suất khí quyển, có thể lấy áp suất khí quyển là 1 atm.

Bước 4: Áp dụng các định luật vật lý

Áp dụng tất cả các định luật cơ bản và các nguyên lý vật lý có liên quan (chẳng hạn như định luật bảo toàn khối lượng) và làm đơn giản các định luật bằng cách sử dụng các giả thiết. Tuy nhiên, đầu tiên phải xác định rõ ràng phạm vi mà các định luật vật lý được áp dụng. Ví dụ, sự gia tăng tốc độ của nước chảy qua một vòi phun thu hẹp được phân tích bằng cách áp dụng bảo toàn khối lượng giữa đầu vào và đầu ra của vòi phun.

Bước 5: Các tính chất của chất lỏng

Xác định khoảng giới hạn cần thiết để giải quyết vấn đề cho các tính chất của chất lỏng chưa biết bằng các quan hệ đã có hoặc các bảng giá trị. Liệt kê các tính chất một cách riêng rẽ, chỉ rõ nguồn gốc tài liệu tham khảo, nếu có.

Bước 6: Tính toán

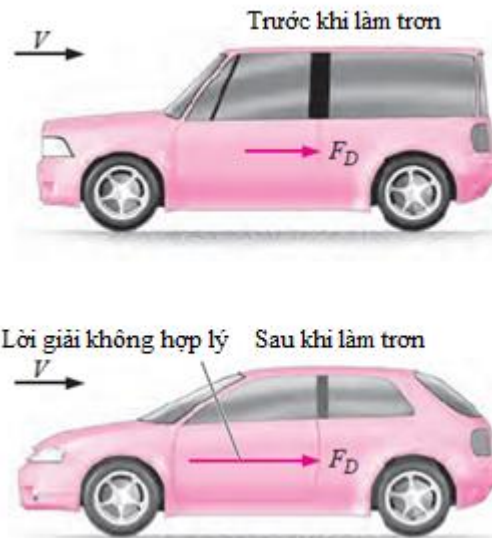
Thay các đại lượng đã biết vào các mối quan hệ đã được đơn giản hóa và thực hiện các tính toán để xác định ẩn số. Đặc biệt chú ý đến các đơn vị và thứ nguyên và hãy nhớ rằng một đại lượng vật lý mà không có đơn vị là vô nghĩa. Ngoài ra, tránh suy nghĩ sai lầm rằng có thể có được độ chính xác cao bằng cách lấy quá nhiều chữ số sau dấu phẩy, cần làm tròn các kết quả với số chữ số sau dấu phẩy phù hợp (xem Phần 1.9).

Bước 7: Căn cứ, xác minh và thảo luận

Hãy kiểm tra để đảm bảo rằng kết quả thu được là hợp lý và *phù hợp với cảm tính*, xác minh lại tính đúng đắn của các giả thiết. Nếu kết quả không hợp lý cần thực hiện lại các tính toán dẫn đến các kết quả không hợp lý. Ví dụ, trong cùng một điều kiện thử nghiệm, lực cản khí động học tác dụng lên một chiếc xe không thể tăng lên sau khi vỏ xe được làm trơn tru hơn (Hình 1.19).

Ngoài ra, cần chỉ ra tầm quan trọng của các kết quả và thảo luận về tác động của chúng. Nêu rõ các kết luận có thể được rút ra từ các kết quả và đề xuất các kiến nghị. Nhấn mạnh những hạn chế, giả thiết của những trường hợp mà kết quả được áp dụng và lưu ý đối với bất kỳ sự hiểu lầm nào có thể mắc phải trong trường hợp các giả thiết cơ bản không được áp dụng. Ví dụ, nếu bạn xác định rằng việc sử dụng một đường ống có đường kính lớn hơn trong một đường dẫn nước dự kiến sẽ mất thêm \$ 5000 vật liệu, nhưng nó sẽ làm giảm chi phí bơm hàng năm \$ 3000, hãy chỉ ra chi phí cho đường kính lớn hơn sẽ được hoàn lại trong 2 năm từ tiết kiệm điện. Tuy nhiên, cũng cần chỉ rõ rằng chỉ chi phí nguyên liệu cho đường ống dẫn có đường kính lớn hơn được xem xét trong phân tích (các chi phí khác, ví dụ như cần làm đường hào lớn hơn, chưa được tính đến).

Hãy ghi nhớ rằng các lời giải mà bạn trình bày cho người quản lý, hay bất kỳ phân tích kỹ thuật nào trình bày cho người khác là một hình thức giao tiếp. Do đó sự ngăn nắp, có tổ chức, đầy đủ, và hình ảnh minh họa là vô cùng quan trọng để có hiệu quả tối đa. Bên cạnh đó, sự trình bày ngăn nắp, rõ ràng cũng phục vụ như một công cụ kiểm tra rất tốt vì nó giúp dễ dàng cho việc phát hiện lỗi và sự không nhất quán trong kết quả. Sự bất cẩn và bỏ qua các bước để tiết kiệm thời gian thường sẽ phải chi phí thời gian nhiều hơn để kiểm tra lại và thêm vào đó là sự lo lắng không cần thiết.



Hình 1.19 Kết quả phân tích kỹ thuật cần được kiểm tra logic về sự hợp lý

Phương pháp trình bày ở trên được sử dụng để giải quyết các vấn đề mà không cần mô tả lại từng bước một cách rõ ràng, trong phần hướng dẫn giải các bài tập ví dụ của giáo trình này cũng được trình bày vậy. Đối với một số vấn đề, một số bước có thể không áp dụng hoặc không cần thiết phải trình bày. Ví dụ, bước thường được bỏ qua là bước liệt kê các tính chất dòng chảy. Tuy nhiên, chúng ta không thể bỏ qua tầm quan trọng của logic và thứ tự giải quyết vấn đề. Hầu hết các khó khăn gặp phải trong khi giải quyết một vấn đề không phải là do thiếu kiến thức mà đúng hơn là do *thiếu tổ chức*. Bạn được khuyến khích làm theo các bước giải quyết vấn đề đã trình bày ở đây cho đến khi bạn phát triển các phương pháp tiếp cận của riêng bạn.

1.8. Về các gói phần mềm kỹ thuật

Bạn có thể tự hỏi tại sao chúng ta lại phải học chuyên sâu các nguyên lý cơ bản của một ngành khoa học kỹ thuật khi mà hầu như tất cả các vấn đề chúng ta thường gặp trong thực tế có thể được giải quyết bằng cách sử dụng một trong số các gói phần mềm tiến tiến có sẵn trên thị trường ngày nay. Những gói phần mềm không chỉ cung cấp các kết quả số trị mong muốn, mà còn cung cấp các kết quả dưới dạng đồ họa đầy màu sắc cho bài thuyết trình ấn tượng. Không thể tưởng tượng được việc thực hành kỹ thuật ngày nay mà không sử dụng một số các gói phần mềm đó. Thực ra, sức mạnh của các gói phần mềm có sẵn này có thể khiến chúng ta chỉ qua việc bấm một nút để có thể trở thành một "anh hùng" hay một "tội đồ". Bởi vì, chúng cho phép các kỹ sư có thể dễ dàng và nhanh chóng giải quyết vấn đề, nhưng nó cũng mở ra cánh cửa cho lạm dụng và thông tin sai lệch. Trong tay của những người ít kiến thức hoặc có kiến thức sai lệch, các gói

phần mềm nguy hiểm như vũ khí hiện đại mạnh mẽ trong bàn tay của những người lính được đào tạo kém.

Ý nghĩ cho rằng một người có thể sử dụng tốt các gói phần mềm kỹ thuật khi không được đào tạo đầy đủ về nguyên tắc cơ bản cũng giống như cho rằng một người biết cầm cò lê thì có thể làm việc như một thợ máy (bạn có thể trao cò lê cho một người không biết gì về xe máy và nhờ họ sửa chữa xe của bạn không?). Nếu sự thật là các sinh viên kỹ thuật không cần những kiến thức cơ bản từ các khóa học mà có thể giải quyết các vấn đề kỹ thuật thực tế bằng máy tính một cách nhanh chóng và dễ dàng, thì cũng sẽ là sự thật để các nhà tuyển dụng sẽ không cần trả lương các kỹ sư cao vì bất kỳ người nào biết cách sử dụng chương trình xử lý văn bản hay biết chơi game trên máy tính đều có thể học cách sử dụng những gói phần mềm. Tuy nhiên, số liệu thống kê gần đây cho thấy số lượng cần tuyển các kỹ sư là trên tăng lên, chứ không phải sự suy giảm, mặc dù ngày càng có nhiều những gói phần mềm dễ sử dụng và có các tính năng mạnh mẽ.

Vì vậy, chúng ta phải luôn luôn nhớ rằng tất cả các khả năng tính toán của các gói phần mềm chỉ là công cụ và các công cụ chỉ có ý nghĩa khi nằm trong tay của các "bậc thầy". Có chương trình xử lý văn bản tốt không làm cho một người trở thành một nhà văn giỏi, nhưng chắc chắn nó làm cho công việc của một nhà văn dễ dàng hơn và làm cho các nhà văn có nhiều sản phẩm hơn. Máy tính cầm tay không loại bỏ sự cần thiết phải dạy cho con em chúng ta làm phép cộng hoặc trừ hay các gói phần mềm y tế phức tạp cũng không thể thay thế nơi đào tạo y học. Tương tự như vậy, các gói phần mềm kỹ thuật không thể thay thế việc đào tạo kỹ thuật truyền thống. Chúng đơn giản chỉ là một thay đổi quan trọng trong các khóa học về Toán học, Vật lý hay Cơ học. Nhờ nó thời gian trên lớp sẽ được dành cho thảo luận về các khía cạnh vật lý của vấn đề nhiều hơn và cần ít thời gian hơn dành cho quy trình giải quyết vấn đề (vì có sự giúp đỡ của các phần mềm máy tính).

Tuy nhiên, tất cả những công cụ tuyệt vời và mạnh mẽ hiện nay, theo một nghĩa nào đó, càng đặt thêm gánh nặng cho các kỹ sư ngày nay. Họ vẫn phải có một sự hiểu biết thấu đáo về các nguyên lý cơ bản, có một "cảm nhận" về các hiện tượng vật lý, để có thể chuẩn bị dữ liệu thích hợp và phân tích kết quả một cách sâu sắc giống như những người tiền nhiệm của họ. Tuy nhiên, họ có thể làm điều đó tốt hơn nhiều, nhanh hơn nhiều, có được các mô hình gần thực tế hơn vì có trong tay những công cụ mạnh mẽ. Các kỹ sư trong quá khứ đã phải dựa vào tính toán tay, thước trượt, máy tính tay và sau đó là máy tính. Ngày nay, các kỹ sư được thừa hưởng các gói phần mềm sẵn có và việc dễ dàng nhận được kết quả nếu kèm theo là sự hiểu lầm hoặc diễn giải sai có thể gây ra thiệt hại lớn. Do đó, quan trọng hơn bao giờ hết, các kỹ sư cần được đào tạo vững chắc về các nguyên lý cơ bản của kỹ thuật. Trong giáo trình này, chúng tôi cố gắng đặt trọng tâm hướng đến một sự hiểu biết gắn liền với thực tế và bản chất của các bài toán Thủy khí động lực học thay vì những chi tiết toán học của phương pháp giải quyết vấn đề.

1.8.1. Giới thiệu về phần mềm MATLAB

MATLAB là một môi trường tính toán số và lập trình được, được thiết kế bởi công ty MathWorks. MATLAB cho phép tính toán số với các phương trình, ma trận, vẽ đồ thị hàm số hay biểu đồ thông tin, thực hiện các thuật toán giải số, tạo giao diện người dùng và liên kết với những chương trình máy tính viết trên nhiều ngôn ngữ lập trình khác. MATLAB giúp làm đơn giản hóa việc giải quyết các bài toán tính toán kỹ thuật so với các ngôn ngữ lập trình truyền thống như C, C++ hay Fortran....

MATLAB được sử dụng trong nhiều lĩnh vực bao gồm vật lý, cơ học, thiết kế điều khiển tự động, xử lý tín hiệu và ảnh, truyền thông, đo lường kiểm tra, phân tích mô hình tài chính, hay sinh học tính toán.... Hiện nay MATLAB được sử dụng bởi hàng triệu kỹ sư và các nhà khoa học làm việc trong môi trường công nghiệp cũng như ở môi trường hàn lâm như là ngôn ngữ của tính toán khoa học.

Cách tìm một bản MATLAB để sử dụng

Mỗi năm Mathworks - công ty sản xuất và phân phối MATLAB đưa ra thị trường 2 bản cập nhật rxxxxa vào đầu năm và rxxxxb vào cuối năm (với xxxx là năm phát hành). Các bạn bắt đầu tìm hiểu và sử dụng Matlab, nên sử dụng bản r2008a vì dung lượng không quá lớn, chạy nhanh với các máy tính có cấu hình không cao.

Với các bạn sinh viên muốn sử dụng MATLAB, bạn cần có phần mềm MATLAB, thông thường là qua 1 trong các cách sau:

- Xin bản trial trên trang chủ của Mathworks, bạn cần hoàn thành form đăng kí.
- Sử dụng MATLAB có bản quyền ở trường Đại học bạn học.
- Mua phần mềm bản cá nhân phần mềm.

Sử dụng MATLAB thế nào cho hiệu quả ?

Cách học "trial and error" là cách tốt nhất để học lập trình. Bạn cần phải tự mình gõ các câu lệnh và xem kết quả câu lệnh, mắc lỗi và tìm cách sửa lỗi. Thời gian và công sức bạn bỏ ra bao nhiêu sẽ mang lại cho bạn nhiều kiến thức bấy nhiêu.

- Nếu bạn đã có nền tảng là một ngôn ngữ lập trình như C, C++ hay Pascal, ... việc làm quen với MATLAB sẽ rất dễ dàng, chỉ cần một ngày là bạn có thể biết cách sử dụng được MATLAB.
- Khả năng ứng dụng to lớn của MATLAB là nhờ các Toolbox được viết bởi những chuyên gia hàng đầu trong nhiều lĩnh vực. Người dùng MATLAB cần tìm hiểu những Toolbox liên quan đến công việc của mình.
- Tài liệu quan trọng nhất chính là Help của MATLAB, nếu như bạn thạo tiếng Anh và có khả năng tự học thì Help là tài liệu duy nhất bạn cần và nó đã có sẵn khi cài MATLAB.

Cần nhớ rằng MATLAB chỉ là công cụ để giải quyết vấn đề, MATLAB có thể cho ta kết quả nhưng nó không thay ta suy nghĩ, không mang cho ta kiến thức. Nắm chắc kiến thức chuyên môn là chìa khóa để sử dụng MATLAB có hiệu quả.

Để học sử dụng MATLAB cơ bản, các bạn có thể tham khảo các trang Web hướng dẫn dùng MATLAB của các trường Đại học trên thế giới như sau:

<http://www.math.utah.edu/~eyre/computing/matlab-intro/>

<http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-094-introduction-to-matlab-january-iap-2010/index.htm>

<http://users.ece.gatech.edu/bonnie/book/TUTORIAL/tutorial.html#anchor145051>

1.8.2. Giới thiệu về phần mềm ANSYS FLUENT

ANSYS FLUENT là một phần mềm giải số các bài toán động lực học chất lỏng (CFD) đang sử dụng rộng rãi cho các ứng dụng mô hình dòng chảy, được cung cấp bởi công ty ANSYS (USA). Bước đầu tiên trong thiết lập mô hình là *bước tiền xử lý* (pre-processor), trong đó có việc lựa chọn mô hình, chia lưới và nhập dữ liệu. Một khi mô hình số được chuẩn bị, FLUENT thực hiện các tính toán cần thiết và xuất kết quả theo yêu cầu. Bước cuối cùng trong phân tích là *bước sau xử lý* (post-processor) liên quan đến việc trình bày và giải thích các kết quả và minh họa bằng hình ảnh. FLUENT có thể xử lý dòng chảy cận âm hoặc siêu âm, dòng chảy dừng hoặc không dừng, dòng chảy tầng hoặc chảy rối, dòng chảy cho chất lỏng Newton hoặc phi Newton, dòng một hoặc nhiều pha, dòng chảy có phản ứng hóa học như đốt cháy, chảy qua môi trường xốp, truyền nhiệt, và các bài toán dao động do dòng chảy.

Sự sát nhập của ANSYS FLUENT vào ANSYS Workbench đã cung cấp cho người sử dụng kết nối tới toàn bộ hệ thống CAD, xây dựng và thay đổi hình học của vấn đề nghiên cứu một cách hữu hiệu với ANSYS DesignModeler và những công nghệ chia lưới tiên tiến trong ANSYS Meshing. Sự kết hợp của những tiện ích này với khả năng mô hình hóa mô hình vật lý rộng rãi và tốc độ tính toán nhanh, phần mềm ANSYS FLUENT là một trong những gói phần mềm toàn diện nhất cho quá trình mô hình hóa CFD trên thế giới hiện nay.

Ngày nay, hàng ngàn công ty trên thế giới đã thu được lợi nhuận lớn từ việc sử dụng để phân tích thiết kế và tối ưu hóa quá trình phát triển sản phẩm. Các bộ giải hệ phương trình tiên tiến, khả năng tính toán song song giúp phần mềm đưa ra những kết quả CFD nhanh và chính xác, các thuật toán chia lưới thích nghi, phi cấu trúc đã đa dạng hóa ứng dụng của phần mềm. Ngoài ra, ANSYS FLUENT còn có các chức năng cho phép người dùng định nghĩa, bổ sung những mô hình mới hay những khả năng tương tác của người dùng với mô hình đang tồn tại.

Ở Việt Nam, gần đây ANSYS FLUENT đã được sử dụng khá phổ biến tại Viện Cơ học, Đại học Bách khoa Hà Nội, Đại học Bách khoa Tp. Hồ Chí Minh và nhiều

cơ sở nghiên cứu khác. Thậm chí đã có những Doanh nghiệp mở các khóa đào tạo về phần mềm cho các kỹ sư như Công ty Cổ phần Công nghệ Tiên Tiến (Advantech., JSC) và Viện nghiên cứu quốc tế về Khoa học và Kỹ thuật tính toán (ICSE).

1.9. Độ chính xác, độ chụm và số chữ số có nghĩa

Trong tính toán kỹ thuật, thông tin cung cấp (ví dụ các giá trị đầu vào) không được biết chính xác hơn với một số lượng chữ số sau dấu phẩy nhất định, thường là ba chữ số. Do đó, kết quả thu được không thể chính xác hơn *số chữ số có nghĩa*. Báo cáo kết quả với nhiều chữ số sau dấu phẩy so với các giá trị đầu vào là không có ý nghĩa và cần phải tránh.

Không phụ thuộc vào hệ thống của các đơn vị sử dụng, các kỹ sư phải nhận thức được ba nguyên tắc chi phối việc sử dụng hợp lý các số: *độ chính xác* (accuracy), *độ chụm* (precision) và *số chữ số có nghĩa* sau dấu phẩy thập phân. Đối với các phép đo kỹ thuật, chúng được định nghĩa như sau:

- *Sai số độ chính xác* (accuracy error) là giá trị của một giá trị đo trừ đi giá trị thực. Nói chung, độ chính xác của một tập hợp các phép đo liên quan đến sự sai khác của giá trị bình quân đo so với giá trị thực. *Độ chính xác* thường là liên quan đến các sai số cố định, lặp lại.
- *Sai số độ chụm* (precision error) là giá trị của một giá trị đo trừ đi giá trị *trung bình của các giá trị đo*. Nói chung, độ chụm của một tập hợp các phép đo liên quan đến độ mịn phân giải và khả năng lặp lại của thiết bị đo. *Độ chụm* thường là liên quan tới sai số ngẫu nhiên, không lặp lại.
- *Số chữ số có nghĩa sau dấu phẩy* là số chữ số có liên quan đến phép đo và có ý nghĩa tương tự độ chụm.

Một phép đo hoặc tính toán có thể rất *chính xác* mà không *chụm*, và ngược lại. Ví dụ, giá sử giá trị thực sự của tốc độ gió là 25.00 m/s. Hai thiết bị đo A và B ghi lại 5 tốc độ gió mỗi lần đo:

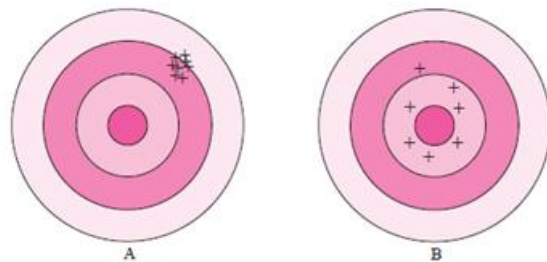
Tốc độ gió do A đo: 25.50, 25.69, 25.52, 25.58 và 25.61 m/s. Trung bình của tất cả các phép đo 25.58 m/s.

Tốc độ gió do B đo: 26.3, 24.5, 23.9, 26.8 và 23.6 m/s. Trung bình của tất cả các phép đo 25.02 m/s.

Rõ ràng, máy đo gió A có độ chụm tốt hơn, vì không một số nào trong các số ghi khác nhau hơn 0.11 m/s so với giá trị trung bình. Tuy nhiên, giá trị trung bình của máy A là 25.58 m/s, với 0.58 m/s lớn hơn tốc độ gió thực sự; điều này cho thấy *lỗi xu hướng* (bias error) là đáng kể, còn được gọi là lỗi không đối hoặc lỗi hệ thống. Trong khi đó, máy đo gió B không phải là rất chụm, vì các giá trị đo dao động mạnh xung quanh giá trị trung bình; nhưng giá trị trung bình của B là gần

với giá trị thực. Do đó, máy đo gió B có độ chính xác cao hơn máy đo gió A, ít nhất là cho tập hợp các phép đo này. Sự khác biệt giữa *độ chụm* và

độ chính xác có thể được minh họa dễ hiểu hơn như trong trường hợp bắn súng vào một mục tiêu, như trình bày trong Hình 1.20. Trường hợp A, súng bắn rất *chụm*, nhưng không rất chính xác vào mục tiêu, trong khi trường hợp B, súng bắn có độ chính xác tổng thể tốt hơn, nhưng độ chụm của các viên đạn lại thấp hơn.



Hình 1.20 Xạ thủ A có độ chụm cao hơn nhưng độ chính xác kém hơn xạ thủ B.

Nhiều kỹ sư không quan tâm đúng mức về số chữ số có nghĩa trong tính toán. Chữ số cuối cùng trong các chữ số có nghĩa liên quan đến độ chụm của phép đo hay kết quả tính toán. Ví dụ, một kết quả được viết là 1.23 (số có ba chữ số có nghĩa) ngụ ý rằng kết quả là chính xác trong vòng một đơn vị trong số thập phân thứ hai; nghĩa là, con số này nằm giữa 1.22 và 1.24. Biểu diễn con số này với nhiều chữ số sẽ gây hiểu nhầm (Ví dụ, nếu viết kết quả là 1.2345, người đọc có thể hiểu số 34 là kết quả chính xác). Số lượng chữ số có nghĩa có thể dễ dàng đánh giá khi số được viết bằng ký hiệu theo số mũ; số lượng chữ số có nghĩa sau đó có thể đơn giản nhận được bằng cách đếm các chữ số, bao gồm cả số không. Một số ví dụ được thể hiện trong Bảng 1.3.

Bảng 1.3 Các chữ số có nghĩa

Số	Viết theo dạng số mũ	Số chữ số có nghĩa
12.3	1.23×10^1	3
123,000	1.23×10^5	3
0.00123	1.23×10^{-3}	3
40,300	4.03×10^4	3
40,300.	4.0300×10^4	5
0.005600	5.600×10^{-3}	4
0.0056	5.6×10^{-3}	2
0.006	$6. \times 10^{-3}$	1

Ví dụ số 123000 được viết dưới dạng 1.23×10^5 , điều đó có nghĩa là số này có 3 chữ số có nghĩa, giá trị chính xác nằm trong khoảng 1.22×10^5 (122000) và 1.24×10^5 (124000); trong khi số 40300 viết dưới dạng 4.0300×10^4 , có nghĩa là số này có 5 chữ số có nghĩa, giá trị chính xác nằm trong khoảng 4.0299×10^4 (40299) và 4.0301×10^4 (40301).

Khi thực hiện các phép tính với một số tham số với các chữ số có nghĩa khác nhau, kết quả cuối cùng cần được lấy với số chữ số có nghĩa ít nhất. Ví dụ, giả sử A và B được nhân lên để có được C. Nếu A = 2.3601 (năm chữ số có nghĩa), và B =

0.34 (hai chữ số có nghĩa), như vậy $C = 0.80$ (chỉ có hai chữ số có ý nghĩa trong kết quả cuối cùng). Lưu ý rằng hầu hết các sinh viên sẽ viết $C = 0.802434$, với sáu chữ số có nghĩa, vì đó là những gì được hiển thị trên một máy tính sau khi nhân hai con số. Thực chất, ở đây cần hiểu là $C = 0.80$ và có thể có giá trị nằm trong khoảng $[0.79, 0.81]$, chứ không phải C nằm trong khoảng $[0.802433, 0.802435]$.

1.10. Tóm lược lịch sử Thủy khí động lực học

Một trong những vấn đề kỹ thuật đầu tiên mà nhân loại phải đối mặt khi các thành phố được phát triển là nguồn cung cấp nước sinh hoạt và tưới tiêu cho cây trồng. Lối sống đô thị có thể được duy trì chỉ khi có nguồn nước dồi dào. Các kết quả khảo cổ học đã cho thấy rõ ràng rằng các nền văn minh thời tiền sử thành công đều dựa trên đầu tư xây dựng và bảo trì hệ thống cấp thoát nước. Các cống dẫn nước thời La Mã, mà một số trong đó hiện nay vẫn còn đang sử dụng, là những ví dụ nổi tiếng nhất. Tuy nhiên, có lẽ các công trình ấn tượng nhất trên quan điểm kỹ thuật đã được thực hiện tại thành phố Hy Lạp cổ đại Pergamon mà ngày nay thuộc Thổ Nhĩ Kỳ. Ở đó, từ 283 đến 133 trước Công nguyên, một loạt các đường ống nước áp lực bằng chì và đất sét đã được xây dựng (Hình 1.20), chiều dài lên đến 45 km và hoạt động ở áp suất trên 1.7 MPa (khoảng 180 m cột nước). Thật đáng tiếc, tên tuổi của hầu như tất cả các nhà xây dựng đầu tiên đã bị lịch sử lãng quên. Sự đóng góp được công nhận sớm nhất về lý thuyết cơ học chất lỏng đã được thực hiện bởi nhà toán học Hy Lạp Archimedes (285-212 trước Công nguyên).

Ông xây dựng và áp dụng các nguyên lý đẩy nổi như một phương pháp không phá hủy đầu tiên trong lịch sử để xác định hàm lượng vàng trên vương miện của Vua Hiero I. Người La Mã đã xây dựng những ống dẫn nước lớn và hướng dẫn nhiều dân tộc bị chinh phục về lợi ích của thủy lợi, nhưng nhìn chung trên cơ sở một sự thiếu hiểu biết về lý thuyết dòng chảy chất lỏng.

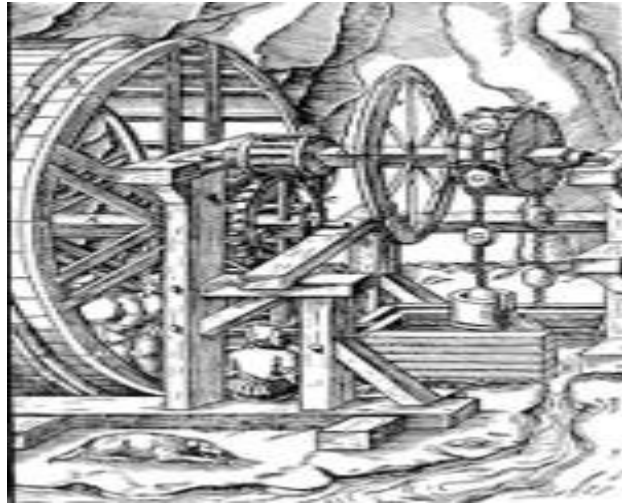
Trong thời Trung cổ, việc áp dụng máy móc thiết bị thủy lực đã được phát triển. Máy bơm piston khá tốt đã được phát triển để phục vụ khai thác mỏ, cối xay nước và cối



Courtesy Gunther Garbrecht.

Hình 1.20 Một đoạn đường ống Pergamon. Đường kính của các ống bằng đất sét khoảng từ 13 đến 18 cm. Nguồn: [2]

xay gió đã được hoàn thiện để xay ngũ cốc, rèn kim loại và các nhiệm vụ khác. Thời trung cổ là lần đầu tiên trong lịch sử nhân loại đã ghi nhận công việc nặng nhọc được thực hiện mà không cần sức mạnh của cơ bắp của người hoặc động vật và những phát minh này chính là nguồn kích hoạt các cuộc cách mạng công nghiệp sau này. Rất đáng tiếc, những người sáng tạo của hầu hết các tiến bộ đều không để lại tên tuổi, nhưng các thiết bị này cũng được ghi lại bởi một số nhà văn kỹ thuật ví dụ như nhà văn Georgius Agricola (Hình 1.21).



Hình 1.21 Cỗ trục mỏ hoạt động bởi bánh xe nước
(G. Agricola, *De Re Metalica*, Basel, 1556):
<http://www.gupf.tu-freiberg.de/bergbau/agricola.html>

Thời Phục hưng mang lại sự phát triển mạnh mẽ của các hệ thống máy thủy lực, nhưng quan trọng hơn là phương pháp khoa học đã được hoàn thiện và phổ biến khắp châu Âu. Simon Stevin (1548-1617), Galileo Galilei (1564-1642), Edme Mariotte (1620-1684), và Evangelista Torricelli (1608-1647) là những người đầu tiên áp dụng những phương pháp này khi họ nghiên cứu về phân bố áp suất thủy tĩnh và áp suất trong bình chân không. Thành quả đó đã được tổng hợp và phát triển bởi nhà toán học xuất sắc Blaise Pascal (1623- 1662). Tu sĩ Ý, Benedetto Castelli (1577-1644) là người đầu tiên công bố *nguyên lý liên tục* của chất lỏng. Bên cạnh những phương trình về chuyển động của các vật rắn, Sir Isaac Newton (1643-1727) đã áp dụng định luật chuyển động cho chất lỏng để khám phá quán tính, lực cản và độ nhớt của chất lỏng.

Các nỗ lực nghiên cứu tiếp theo là nhờ nhà bác học người Thụy Sĩ Daniel Bernoulli (1700-1782) và người đồng nghiệp của ông là Leonard Euler (1707-1783). Cùng với nhau, họ đã xây dựng các phương trình năng lượng và động lượng cho chất lỏng. Cuốn *Hydrodynamica* của Bernoulli 1738 có thể được coi là văn bản đầu tiên của Thủy khí động lực học. Cuối cùng, Jean d'Alembert (1717-1789) đã phát triển ý tưởng về các thành phần vận tốc và gia tốc, xây dựng phương trình vi phân của nguyên lý liên tục (còn gọi là phương trình liên tục) và trình bày một "nghịch lý" (nghịch lý d'Alembert) về sức cản bằng 0 trong chuyển động ổn định thẳng đều.

Sự phát triển của lý thuyết Thủy khí động lực học đến cuối thế kỷ XVIII có ảnh hưởng rất ít đến kỹ thuật vì các tính chất của chất lỏng và các thông số dòng chảy được định lượng kém và hầu hết các lý thuyết là quá trừu tượng không thể sử

dụng được cho các mục đích thiết kế. Tuy nhiên, điều đó được thay đổi với sự phát triển của các trường phái kỹ thuật của Pháp do Riche de Prony (1755-1839) dẫn đầu. Prony (được biết đến với các thiết bị đo năng lượng do ông phát minh) và các cộng sự ở Paris tại Đại học Bách khoa và Trường Đại học Cầu Đường đã là những người đầu tiên tích hợp toán giải tích và định luật khoa học vào chương trình giảng dạy kỹ thuật. Chính vì vậy, cho đến bây giờ, các chương trình học về toán giải tích của các trường kỹ thuật cho năm thứ nhất thường rất nặng nề. Sau đó, Antonie Chezy (1718-1798), Louis Navier (1785-1836), Gaspard Coriolis (1792-1843), Henry Darcy (1803-1858) và những người khác đã có đóng góp nhiều cho lý thuyết và ứng dụng của môn Thủy khí động lực học đều từng là sinh viên và/hoặc giảng viên tại các trường Đại học đó.

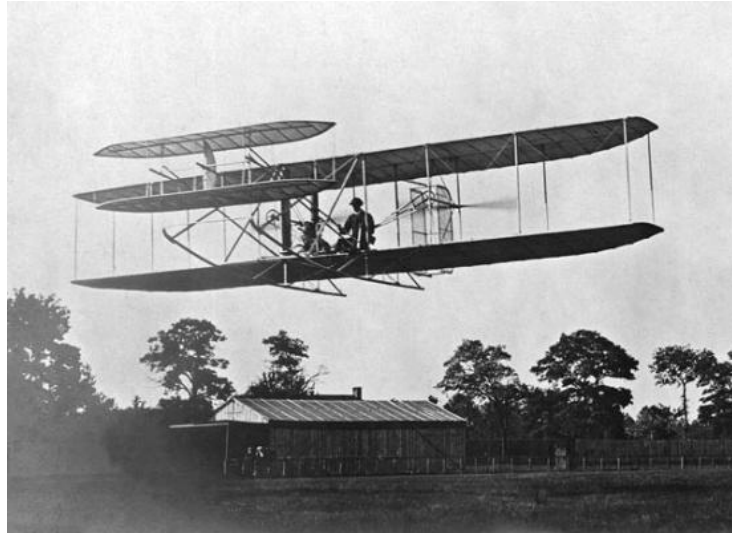
Vào giữa thế kỷ XIX những tiến bộ cơ bản về lý thuyết đã được thu nhận theo nhiều hướng khác nhau. Nhà vật lý Jean Poiseuille (1799-1869) đã đo chính xác dòng chảy trong ống mao dẫn cho nhiều chất lỏng, trong khi ở Đức Gotthilf Hagen (1797-1884) đã phân biệt giữa dòng chảy tầng và chảy rối trong đường ống. Ở Anh, Osborn Reynolds (1842-1912) tiếp tục công việc đó và đề xuất số không thứ nguyên ngày nay mang tên ông. Song song với công việc của Clause-Louise Navier, George Stokes (1819- 1903) đã hoàn thành thu nhận các phương trình tổng quát của chuyển động chất lỏng có ma sát nhớt mang tên của họ (phương trình nổi tiếng Navier-Stokes). William Froude (1810-1879) đã phát triển các quy trình và chứng minh giá trị của mô hình vật lý thử nghiệm (số Froude mang tên ông được sử dụng rộng rãi đến ngày nay). Các chuyên gia Mỹ cũng có những đóng góp ngang bằng với châu Âu, qua những công trình James Francis (1815-1892) và Lester Pelton của (1829-1908) về tua-bin và phát minh của Clemens Herschel (1842-1930) về ống đo Venturi [hiệu ứng giảm áp suất do Giovanni Battista Venturi (Ý) phát hiện trước đó].

Cuối thế kỷ XIX là thời gian đáng chú ý cho việc phát triển lý thuyết Thủy khí động lực học của các nhà khoa học và các kỹ sư Ai len và Anh, ngoài Reynolds và Stokes ra, còn có William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), William Strutt, Lord Rayleigh (1842-1919) và Sir Horace Lamb (1849-1934). Các nhà khoa học này đã nghiên cứu một số lượng lớn các vấn đề bao gồm phân tích thứ nguyên, dòng chảy không xoáy, chuyển động của xoáy, hiện tượng xâm thực và sóng. Họ là những người đầu tiên khám phá mối liên hệ giữa cơ học chất lỏng, nhiệt động lực học và truyền nhiệt.

Phương trình Navier-Stokes đã ít được sử dụng đến thời điểm này vì chúng quá khó để giải. Trong một bài báo tiên phong trong năm 1904, nhà khoa học Đức Ludwig Prandtl (1875-1953) đã cho thấy, dòng chảy chất lỏng có thể được chia thành hai khu vực một khu vực gần các thành tường được gọi là lớp biên, nơi mà các hiệu ứng ma sát là rất lớn và một khu vực xa các thành tường, nơi mà ảnh hưởng của nhớt là không đáng kể và ở đây phương trình Euler và Bernoulli có thể được áp dụng. Những sinh viên của ông, Theodore von Kármán (1881-1963), Paul Blasius (1883-1970), Johann Nikuradse (1894-1979) và những người khác đã

xây dựng trên lý thuyết đó các ứng dụng trong Thủy khí động lực học (Trong Thế chiến thứ II, cả hai bên cuộc chiến đều được hưởng lợi từ lý thuyết ấy bởi vì Prandtl vẫn ở Đức, trong khi sinh viên tốt nhất của ông, người Hungary Theodore von Kármán thì làm việc tại Mỹ).

Đầu thế kỷ hai mươi đã mang đến hai phát triển có ý nghĩa to lớn. Năm 1903, anh em nhà Wright (Wilbur, 1867-1912 và Orville, 1871-1948) đã ứng dụng lý thuyết và tiến hành thực nghiệm hoàn thiện máy bay. Phát minh của họ đã được hoàn tất và bao gồm tất cả các khía cạnh chính của ngành hàng không hiện đại (Hình 1.22).



Hình 1.22 Máy bay đầu tiên của anh em Wright (nguồn: <http://www.ccc.edu/colleges/wright/menu/pages/history.aspx>)

Giữa thế kỷ XX có thể được coi là một thời kỳ vàng son của các ứng dụng Thủy khí động lực học. Lý thuyết hiện có là đủ để giải quyết các vấn đề kỹ thuật, tính chất và các thông số của chất lỏng cũng được xác định rõ ràng. Điều đó đã hỗ trợ cho sự phát triển mạnh mẽ của các ngành công nghiệp hàng không, hóa chất, giao thông vận tải và ngành tài nguyên nước...; những phát triển đó đã thúc đẩy Thủy khí động lực học mở ra những hướng nghiên cứu mới. Nghiên cứu Thủy khí động lực học trong những năm cuối thế kỷ XX đã được hỗ trợ nhiều bởi sự phát triển của máy tính, đặc biệt là ở Mỹ. Khả năng giải quyết vấn đề lớn, phức tạp, chẳng hạn như mô hình khí hậu toàn cầu hoặc tối ưu hóa thiết kế của một cánh tuabin, đã mang lại những lợi ích to lớn cho xã hội. Các nguyên lý Thủy khí động lực học được trình bày trong những trang tiếp theo có thể áp dụng cho các dòng chảy khác nhau, từ một quy mô vi mô với khoảnh khắc vô cùng ngắn đến mô phỏng cho dòng chảy trong toàn bộ lưu vực sông trong thời gian nhiều năm. Đó thực sự là một điều khó tin?!

Thủy khí động lực học sẽ đi đến đâu trong thế kỷ XXI? Thành thật mà nói, thậm chí một phép ngoại suy ngắn hạn cũng đã là một điều điên rồ. Tuy nhiên, nếu lịch sử cho chúng ta biết điều gì, thì đó là việc các kỹ sư sẽ áp dụng những gì họ biết để mang lại lợi ích xã hội, nghiên cứu những gì họ không biết và họ sẽ có những khoảnh khắc tuyệt vời trong quá trình nghiên cứu này.

TỔNG KẾT

Trong chương này, một số khái niệm cơ bản của Thủy khí động lực học giới thiệu và thảo luận. Một chất dưới dạng pha lỏng hoặc khí được gọi là một chất lỏng/lưu chất. Thủy khí động lực học là khoa học nghiên cứu các hành vi của chất lỏng ở trạng thái tĩnh hoặc đang chuyển động và sự tương tác của chất lỏng với chất rắn hay chất lỏng khác trên biên.

Dòng chảy của một chất lỏng không bị chặn chảy xung quanh một bề mặt gọi là chảy *bao* và dòng chảy trong đường ống hoặc kênh gọi là dòng chảy *bên trong* nếu chất lỏng bị hoàn toàn giới hạn bởi bề mặt rắn. Một dòng chảy chất lỏng được phân loại là dòng chảy nén hay không nén được tùy thuộc vào sự thay đổi mật độ của chất lỏng trong dòng chảy. Mật độ của chất lỏng ở trạng thái lỏng thường được coi là không đổi, do đó dòng chảy của chất lỏng thường là dòng chảy không nén được. Dòng chảy dừng/ổn định ứng với dòng chảy không thay đổi theo thời gian. Ngược lại với dòng chảy ổn định là dòng chảy không ổn định/không dừng, hoặc dòng chảy chuyển tiếp. Dòng chảy đều là dòng chảy có các tham số không có thay đổi theo không gian trong vùng xem xét. Dòng chảy được cho là một chiều khi vận tốc chỉ thay đổi theo một chiều không gian. Khi chất lỏng tiếp xúc trực tiếp với bề mặt rắn, chất lỏng dính vào bề mặt và không có hiện tượng trượt của chất lỏng trên bề mặt rắn. Điều kiện này được gọi là điều kiện *không trơn trượt* hay *điều kiện bám dính*, dẫn đến sự hình thành của lớp biên dọc theo bề mặt rắn.

Một hệ thống với lượng vật chất cố định được gọi là một hệ thống khép kín hoặc khối lượng không chế. Một hệ thống có liên quan đến trao đổi vật chất qua các biên của nó được gọi là một hệ thống mở hoặc một thể tích không chế. Phần lớn các vấn đề kỹ thuật liên quan đến lưu lượng vào và ra khỏi hệ thống và được mô hình hóa như một thể tích không chế.

Trong tính toán kỹ thuật, điều quan trọng đặc biệt là phải chú ý đến đơn vị của các đại lượng để tránh các lỗi gây ra do các đơn vị không phù hợp, cần tuân thủ quy trình giải quyết vấn đề bằng một phương pháp tiếp cận có hệ thống. Cũng cần nhận ra rằng giá trị đầu vào không được biết chính xác một cách tuyệt đối mà chỉ đến một số lượng nhất định các chữ số có nghĩa, vì vậy kết quả thu được không thể nào chính xác hơn số chữ số có nghĩa.

Các câu hỏi ôn tập, bài tập

Các bài tập kèm theo ký hiệu LT là các câu hỏi lý thuyết, các bài tập khác là các bài tập có đòi hỏi tính toán.

Giới thiệu, phân loại và hệ thống

1.1LT Định nghĩa dòng chảy bên trong, dòng chảy bao và dòng chảy kênh hở.

1.2LT Định nghĩa dòng chảy không nén được và chất lỏng không nén được. Dòng chảy của chất lỏng nén được nhất thiết phải được xem như dòng chảy nén được?

1.3LT Điều kiện không trơn trượt là gì? Nguyên nhân gây ra nó?

1.4LT Dòng chảy *cưỡng bức* là gì? Nó khác với dòng chảy tự nhiên như thế nào? Dòng chảy gây ra bởi gió là dòng chảy cưỡng bức hay tự nhiên?

1.5LT Lớp biên là gì? Nguyên nhân gây ra biên lớp?

1.6LT Sự khác nhau giữa phương pháp tiếp cận cổ điển và phương pháp tiếp cận thống kê là gì?

1.7LT Thế nào là một dòng chảy dừng/ổn định?

1.8LT Hệ thống, môi trường xung quanh và mặt biên là gì?

1.9LT Khi nào một hệ thống là một hệ thống khép kín, khi nào hệ thống là một thể tích khống chế?

Khối lượng, lực và đơn vị

1.10 Một bể nhựa nặng 3 kg có thể tích 0.2 m³ chứa đầy nước ở dạng lỏng. Giả sử mật độ của nước là 1000 kg/m³, xác định trọng lượng của cả hệ thống bể và nước.

1.11 Xác định khối lượng và trọng lượng của không khí chứa trong một căn phòng có kích thước 6 m x 6 m x 8 m. Giả sử mật độ của không khí là 1.16 kg/m³.

1.12 Tại 45 ° vĩ độ, gia tốc trọng trường là một hàm số của độ cao trên mực nước biển z được cho bởi $g=a-bz$, trong đó $a= 9.807 \text{ m/s}^2$ và $b= 3.32 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-2}$. Xác định chiều cao trên mực nước biển mà trọng lượng của một vật sẽ giảm 1%.

Mô hình hóa và kỹ thuật giải các bài toán kỹ thuật

1.13LT Sự khác biệt giữa độ chính xác và độ chụm là gì? Một phép đo có thể rất chụm nhưng không chính xác không? Giải thích.

1.14LT Sự khác biệt giữa phương pháp phân tích số và phương pháp thực nghiệm đối với các bài toán kỹ thuật là gì? Thảo luận về ưu và nhược điểm của từng phương pháp.

1.15LT Tầm quan trọng của mô hình hóa trong kỹ thuật là gì? Cần lựa chọn các mô hình toán như thế nào?

1.16LT Khi mô hình hóa một bài toán kỹ thuật, như thế nào là lựa chọn đúng đắn giữa một mô hình đơn giản nhưng thô và mô hình phức tạp nhưng chính xác? Nhất thiết là mô hình phức tạp phải là lựa chọn tốt hơn vì nó chính xác hơn?

CHƯƠNG 2. CÁC TÍNH CHẤT CỦA CHẤT LỎNG

Trong chương này, chúng ta sẽ tìm hiểu về các tính chất của chất lỏng và các đặc trưng của dòng chảy cần thiết trong việc phân tích dòng chảy. Trước tiên, chúng ta sẽ thảo luận về các tính chất *cường tính* (intensive property) và *quảng tính* (extensive property), nhớ lại định nghĩa về mật độ và tỷ trọng riêng... Tiếp theo là những trình bày về các tính chất như *áp suất hóa hơi*, năng lượng và các dạng năng lượng khác nhau của chất lỏng, nhiệt dung riêng, chất lỏng không nén được và hệ số nén. Sau đó, chúng ta thảo luận về khái niệm và phương pháp xác định độ nhớt, một tính chất có vai trò quan trọng trong hầu hết các khía cạnh khác nhau của dòng chảy chất lỏng. Cuối cùng, chúng ta tìm hiểu về sức căng bề mặt và các công thức xác định cột dâng mao dẫn từ điều kiện cân bằng thủy tĩnh.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này, sinh viên sẽ có thể:

- Có kiến thức chuyên môn về các tính chất cơ bản của chất lỏng và hiểu được khái niệm môi trường liên tục.
- Có kiến thức chuyên môn về độ nhớt và những hiệu ứng ma sát do nó gây ra trong dòng chảy chất lỏng.
- Có khả năng tính toán cột dâng mao dẫn và kích thước các giọt lỏng do hiệu ứng sức căng bề mặt.

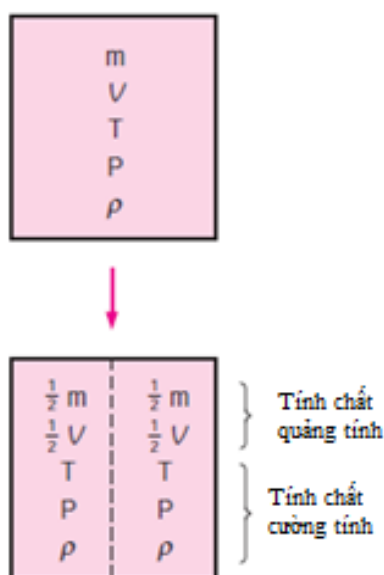
2.1. Giới thiệu

2.1.1. Các đặc trưng của một hệ thống

Bất kỳ đặc trưng nào của một hệ thống đều được gọi là một tính chất hay còn gọi là tham số của hệ thống. Một số tính chất quen thuộc như áp suất P , nhiệt độ T , thể tích V và khối lượng m . Danh sách này có thể được mở rộng để bao gồm những tính chất không quen thuộc như độ nhớt, độ dẫn nhiệt, mô đun đàn hồi, hệ số giãn nở nhiệt, điện trở và thậm chí cả tốc độ và độ cao...

Tính chất được phân loại là *cường tính* hay *quảng tính*. Tính chất cường tính là tính chất không phụ thuộc vào khối lượng của hệ thống, ví dụ như nhiệt độ, áp suất và mật độ. Tính chất quảng tính là những tính chất có giá trị phụ thuộc vào kích thước của hệ thống. Tổng khối lượng, thể tích V và tổng động lượng là một số ví dụ về các tính chất quảng tính. Có thể dễ dàng để xác định xem một tính chất là cường tính hay quảng tính bằng cách phân chia hệ thống thành hai phần bằng nhau với một mặt biên ảo, như trong Hình 2.1. Trong mỗi phần, các tính

chất cường tính sẽ có cùng giá trị, trong khi đó các tính chất có một nửa giá trị là các tính chất quang tính.



Hình 2.1: Tiêu chuẩn để phân biệt tính chất cường tính và quang tính

Thông thường, chữ hoa được sử dụng để biểu thị tính chất quang tính (riêng khối lượng m là một ngoại lệ) và chữ thường được sử dụng cho tính chất cường tính (riêng áp suất P và nhiệt độ T là ngoại lệ). Tính chất quang tính trên một đơn vị khối lượng được gọi là *tính chất riêng*. Ví dụ về các tính chất riêng là thể tích riêng ($v=V/m$) và năng lượng riêng ($e=E/m$).

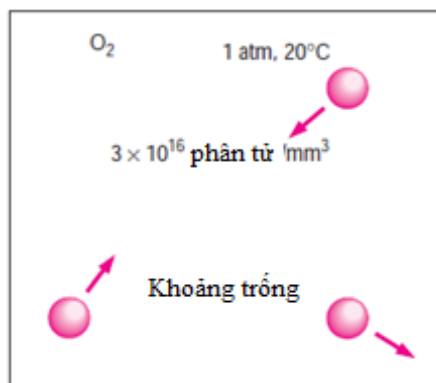
Trạng thái của một hệ thống được mô tả bởi các tính chất của nó. Nhưng chúng ta không cần phải xác định tất cả các tính chất để xác định một trạng thái. Một khi các giá trị của một *số lượng đủ* các tính chất được xác định, các tính chất còn lại sẽ có những giá trị nhất định (được xác định theo các tính chất đã biết).

2.1.2. Môi trường liên tục

Vật chất được tạo thành từ các nguyên tử có khoảng cách cách nhau khá xa so với kích thước của nguyên tử, đặc biệt là trong trạng thái khí. Tuy nhiên, để thuận tiện người ta có thể bỏ qua tính chất nguyên tử của một chất và xem nó như là một chất đồng nhất liên tục không có lỗ rỗng, được gọi là *môi trường liên tục*. Ý tưởng về môi trường liên tục cho phép chúng ta coi các tính chất của một chất như là các hàm số của các điểm không gian và thiên liên tục trong không gian. Ý tưởng lý tưởng hóa này sẽ có hiệu lực chừng nào khi kích thước của hệ thống chúng ta đang xem xét là lớn hơn nhiều so với khoảng cách giữa các phân tử. Đây là trường hợp thực tế của hầu hết các vấn đề kỹ thuật, ngoại trừ một số những trường hợp đặc biệt. Ý tưởng lý tưởng hóa về môi trường liên tục luôn ẩn chứa trong nhiều phát biểu của chúng ta, chẳng hạn khi nói "mật độ nước trong

bình thủy tinh là như nhau ở mọi điểm". Thực ra, ở mức độ phân tử mật độ vật chất tại điểm không gian giữa các phân tử nước là bằng 0 và mật độ tại tâm các phân tử lại là rất lớn.

Để có một cảm nhận về khoảng cách ở mức độ phân tử, hãy xem xét một thùng chứa đầy oxy trong điều kiện khí quyển bình thường. Đường kính của phân tử oxy là khoảng 3×10^{-10} m và khối lượng của nó là 5.3×10^{-26} kg. Ngoài ra, *quãng đường tự do* trung bình của oxy ở áp suất 1 atm và 20 °C là 6.3×10^{-8} m. Có nghĩa là, một phân tử oxy di chuyển trung bình một khoảng cách 6.3×10^{-8} m (khoảng 200 lần đường kính của nó) trước khi nó va chạm với phân tử khác. Mặt khác, có khoảng 3.0×10^{16} phân tử oxy trong thể tích nhỏ 1 mm^3 ở áp suất 1 atm và 20°C (Hình 2.2). Mô hình môi trường liên tóngẽ được áp dụng chừng nào khi chiều dài đặc trưng của hệ thống (như đường kính của bình chứa) lớn hơn nhiều so với quãng đường tự do trung bình của các phân tử. Ở môi trường chân không hoặc độ cao rất cao, quãng đường tự do trung bình có thể trở nên khá lớn (ví dụ, đó là khoảng 0.1 m cho không khí trong khí quyển ở độ cao 100 km). Vì thế khi nghiên cứu chuyển động của một vệ tinh có kích thước vài mét ở độ cao trên 100 km, lý thuyết dòng khí loãng cần được sử dụng và các tác động của từng phân tử cần được xem xét đến. Trong tài liệu này, chúng ta hạn chế chỉ nghiên cứu trường hợp môi trường liên tục.



Hình 2.2: Với số lượng phân tử rất lớn trong một thể tích vô cùng nhỏ, vật chất có thể coi như một môi trường liên tục

2.2. Sự khác nhau giữa chất rắn, chất lỏng và chất khí

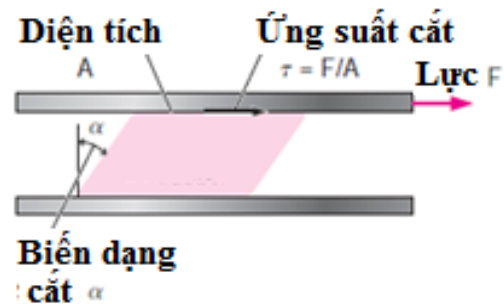
2.2.1. Chất lỏng là gì?

Chúng ta có thể nhớ lại từ môn Vật lý ở trường Trung học, vật chất có thể tồn tại trong ba pha/trạng thái chính: rắn, lỏng, khí (Ngoài ra, ở nhiệt độ rất cao, vật chất có thể tồn tại ở trạng thái plasma là trạng thái thứ 4 của vật chất). Cần lưu ý rằng một chất có thể ở trạng thái rắn, lỏng, hay khí phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất.

Một chất ở pha lỏng hoặc khí được gọi là một *chất lưu* (danh từ chất lưu có thể sử dụng để gọi chung cho chất lỏng và chất khí, tuy nhiên danh từ này ít khi được sử dụng và trong Cơ học kỹ thuật danh từ *chất lỏng* thường được sử dụng thay cho chất lưu). Sự phân biệt giữa chất rắn và chất lỏng được xem xét trên cơ sở khả năng chống lại ứng suất cắt hay ứng suất theo phương tiếp tuyến (shear stress) liên quan đến khả năng chống chịu thay đổi hình dạng của khối vật chất. Một chất rắn có thể chống lại ứng suất cắt khi bị biến dạng (sau đó không biến dạng tiếp nữa), trong khi đó chất lỏng biến dạng liên tục (không ngừng) dưới tác động của ứng suất cắt, không quan trọng là ứng suất đó có thể nhỏ như thế nào. Trong chất rắn, ứng suất là tỷ lệ thuận với biến dạng (strain), nhưng trong chất lỏng ứng suất tỷ lệ với tốc độ biến dạng (strain rate). Khi một lực cắt liên tục được áp dụng, biến dạng ở chất rắn cuối cùng sẽ dừng lại, với góc hoặc kích thước biến dạng cố định, trong khi biến dạng của chất lỏng không dừng lại và tiệm cận đến một tốc độ biến dạng nhất định.

Hãy xem xét một khối cao su hình chữ nhật được kẹp chặt giữa hai tấm phẳng. Tấm trên được kéo với một lực F trong khi tấm dưới được cố định, khối cao su bị biến dạng, như thể hiện trong Hình 2.3. Góc biến dạng α [gọi là biến dạng cắt (shear strain) hoặc dịch chuyển góc (angular displacement)] tăng

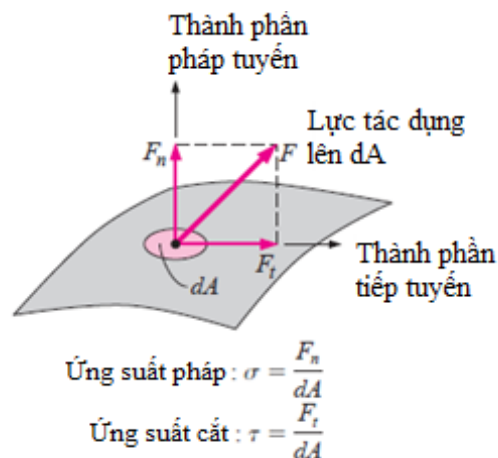
tỷ lệ thuận theo độ lớn lực tác dụng F . Giả sử không có trượt giữa cao su và các tấm, bề mặt trên của cao su có dịch chuyển bằng dịch chuyển của tấm trên trong khi bề mặt dưới vẫn đứng yên. Trong trạng thái cân bằng, tổng hợp lực tác dụng lên tấm theo chiều nằm ngang phải bằng không, do đó một lực có cùng giá trị nhưng ngược chiều với F tác dụng lên tấm trên. Lực đối lập này phát triển do ma sát giữa mặt tiếp xúc của tấm phẳng và khối cao su có giá trị là $F = \tau A$. Trong đó τ là ứng suất cắt và A là diện tích tiếp xúc giữa tấm trên và khối cao su. Khi lực kéo bị loại bỏ, khối cao su trở về vị trí ban đầu của nó. Hiện tượng này cũng có thể được quan sát với chất rắn khác ví dụ như một khối thép với điều kiện lực tác dụng không vượt quá giới hạn đàn hồi. Nếu thí nghiệm này lặp lại với một chất lỏng (với hai bản song song đặt trong một bể lớn nước), lớp chất lỏng tiếp xúc với tấm trên sẽ di chuyển liên tục cùng tấm trên với vận tốc của tấm cho dù lực F là rất



Hình 2.3 Biến dạng của khối cao su đặt giữa 2 tấm phẳng dưới tác dụng của một lực cắt

nhỏ. Vận tốc chất lỏng giảm dần theo chiều sâu do ma sát giữa các lớp chất lỏng và đạt giá trị bằng 0 ở tấm dưới do điều kiện bám dính.

Ứng suất được định nghĩa là lực tác dụng trên một đơn vị diện tích và được xác định bằng cách chia độ lớn của lực cho diện tích mà trên đó nó tác dụng. Thành phần vuông góc của lực tác dụng lên bề mặt mỗi đơn vị diện tích được gọi là ứng suất pháp và thành phần tiếp tuyến được gọi là ứng suất cắt (Hình 2.4). Trong chất lỏng ở trạng thái tĩnh, ứng suất pháp được gọi là áp suất.



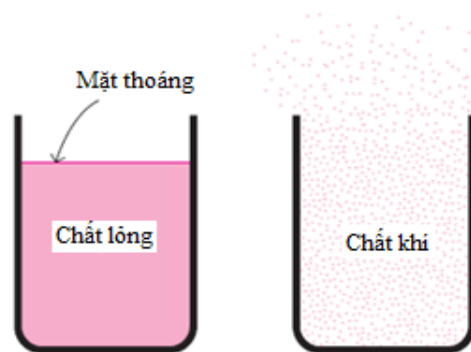
Hình 2.4 Ứng suất pháp và ứng suất cắt trên bề mặt một phần tử chất lỏng

Các thành tường chứa chất lỏng tạo ra các phản lực có tác dụng loại bỏ ứng suất cắt, do đó khi chất lỏng ở trạng thái tĩnh thì ứng suất cắt bằng 0. Khi thành tường được gỡ bỏ hoặc bình chứa chất lỏng chuyển từ trạng thái đứng sang trạng thái nghiêng, ứng suất cắt phát triển làm chất lỏng di chuyển để đạt được một bề mặt tự do nằm ngang mới.

2.2.2. Lực liên kết giữa các phân tử

Trong chất lỏng, các khối phân tử có thể di chuyển tương đối so với nhau, nhưng thể tích hầu như không thay đổi vì các lực liên kết mạnh mẽ giữa các phân tử chất lỏng. Vì vậy, chất lỏng có hình dạng của bình chứa nó và có thể không lấp đầy bình chứa mà tạo thành một bề mặt tự do trong bình chứa trong trường hấp dẫn. Trong khi đó, chất khí nở rộng cho đến khi gặp các thành tường của bình chứa và lấp đầy toàn bộ không gian của bình. Điều này là do các phân tử khí cách xa nhau và các lực liên kết giữa chúng là rất nhỏ. Không giống như chất lỏng, chất khí không thể tạo thành một bề mặt tự do (Hình 2.5).

Mặc dù chất rắn và chất lỏng có thể dễ dàng phân biệt trong phần lớn trường hợp, tuy nhiên sự khác biệt này không phải là quá rõ ràng trong một số trường hợp đặc biệt. Ví dụ, nhựa đường có thể ứng xử như một chất rắn vì nó chống lại chống ứng suất cắt trong một khoảng thời gian

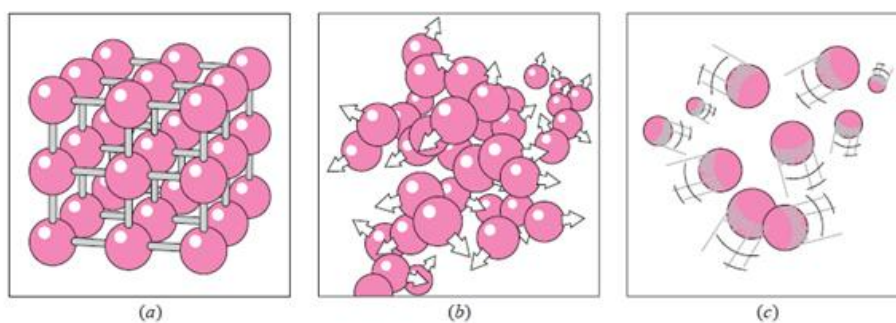


Hình 2.5 Khác với chất lỏng, chất khí không

ngăn. Nhưng nó biến dạng từ từ và ứng xử như một chất lỏng khi các lực này tác dụng trong khoảng thời gian dài.

tạo thành bề mặt tự do mà nở rộng choán toàn bộ không gian sẵn có

Một số chất dẻo khác cũng có hành vi tương tự. Tuy nhiên trong giáo trình này, chúng ta sẽ chỉ nghiên cứu những trường hợp được nhận ra rõ ràng là chất lỏng. Lực tương tác giữa các phân tử trong chất rắn là mạnh nhất còn trong các chất khí là yếu nhất. Một trong các lý do là các phân tử trong chất rắn rất gần nhau, trong khi ở chất khí chúng có khoảng cách tương đối lớn (Hình 2.6).



Hình 2.6 Sự sắp xếp phân tử trong các pha khác nhau: (a) các phân tử ở các vị trí cố định trong chất rắn; (b) nhóm các phân tử có thể di chuyển tương đối so với nhau trong chất lỏng; (c) các phân tử chuyển động hỗn loạn trong chất khí

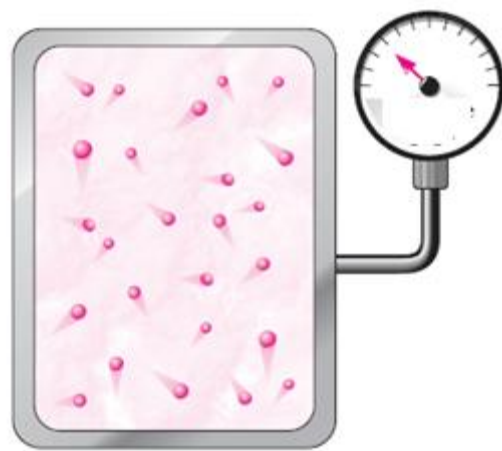
Các phân tử trong chất rắn thường được sắp xếp theo một mô hình nhất định được lặp đi lặp lại trong cả khối chất rắn. Bởi vì khoảng cách giữa các phân tử trong chất rắn là rất nhỏ, lực hấp dẫn giữa các phân tử với nhau là rất lớn và lực này giữ các phân tử ở vị trí hầu như cố định. Khoảng cách giữa các phân tử trong pha lỏng không khác nhiều so với pha rắn, tuy nhiên các phân tử không còn ở vị trí cố định mà chúng có thể xoay và dịch chuyển tự do tương đối với nhau. Trong chất lỏng, các lực hấp dẫn giữa các phân tử yếu hơn so với trong chất rắn, nhưng lớn hơn so với trong chất khí. Khoảng cách giữa các phân tử nói chung tăng lên khi một chất rắn biến thành chất lỏng, tuy nhiên nước là một ngoại lệ đặc biệt. Khi nước đóng băng (chuyển thành thể rắn) khoảng cách giữa các phân tử tăng lên, chính vì vậy băng có mật độ nhỏ hơn và do đó băng nổi trên nước.

Trong pha khí, các phân tử cách xa nhau và khái niệm khoảng cách giữa các phân tử không còn tồn tại. Các phân tử khí di chuyển một cách ngẫu nhiên, liên tục và va chạm với nhau và va chạm vào các bức tường của bình chứa. Đặc biệt khi ở mật độ thấp, lực hấp dẫn giữa các phân tử là rất nhỏ và va chạm là hình thức tương tác duy nhất giữa các phân tử. Các phân tử trong pha khí có mức năng lượng cao hơn đáng kể so với trong pha lỏng hoặc pha rắn. Do đó, chất khí phát ra một lượng năng lượng lớn trước khi nó bị ngưng tụ hoặc đóng băng [khí giãn nở ra

làm giảm nhiệt độ, muốn ngưng tụ khí phải làm lạnh (lấy bớt năng lượng đi)]. Khí (gas) và hơi (vapor) thường được sử dụng như từ đồng nghĩa (về mặt cơ học). Hơi thường ngụ ý một loại khí ở không xa trạng thái ngưng tụ.

Để thuận tiện, từ nay về sau chúng ta sẽ sử dụng từ *chất lỏng* thay cho chất lỏng và chất khí; như vậy khi nói về chất lỏng, nếu không có sự phân biệt từ trước thì *chất lỏng* ở đây có thể hiểu là chất lỏng hoặc chất khí. Bất kỳ hệ thống chất lỏng thực tế đều bao gồm một số lượng lớn các phân tử và các thuộc tính của hệ thống phụ thuộc về bản chất vào hành vi của các phân tử. Ví dụ, áp suất của một chất khí trong một bình chứa là kết quả của trao đổi động lượng giữa các phân tử và

các thành tường của bình chứa. Tuy nhiên, người ta không cần phải biết hành vi của các phân tử khí để xác định áp suất trong bình chứa. Để làm điều đó chỉ cần gắn một đồng hồ đo áp lực vào bình chứa (Hình 2.7). Đó là một phương pháp vĩ mô không đòi hỏi hiểu biết về hành vi của từng phân tử mà vẫn cung cấp một cách trực tiếp và dễ dàng lời giải cho các vấn đề kỹ thuật. Phương pháp vĩ mô hay phương pháp thống kê dựa trên hành vi trung bình của số lượng lớn các phân tử sẽ phức tạp hơn và không được trình bày ở đây mà có thể được sử dụng trong giáo trình này trong vai trò hỗ trợ về bản chất vật lý.



Hình 2.7 Ở mức độ vĩ mô, áp suất được xác định bởi sự tương tác của từng phân tử. Tuy nhiên, ở mức độ vĩ mô, áp suất có thể đo được bằng áp suất kế.

2.3. Mật độ, thể tích riêng, tỷ trọng riêng

Mật độ được định nghĩa là khối lượng trên một đơn vị thể tích (còn gọi là khối lượng riêng). Vậy, chúng ta có:

$$\text{Mật độ:} \quad \rho = m/V \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2.1)$$

Nghịch đảo của mật độ là thể tích riêng v , được định nghĩa là thể tích trên một đơn vị khối lượng. Có nghĩa là, $v = V/m = 1/\rho$. Đối với một phần tử khối lượng vi phân dm và thể tích dV , mật độ có thể được xác định bởi $\rho = dm/dV$.

Mật độ của một chất, nói chung, phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất. Mật độ của hầu hết các loại khí là tỷ lệ thuận với áp suất và tỷ lệ nghịch với nhiệt độ. Chất

lỏng và chất rắn, về cơ bản, là chất không nén được, sự biến đổi mật độ của chúng theo áp suất là không đáng kể. Ví dụ, ở 20°C, mật độ của nước thay đổi từ 998 kg/m³ ở 1 atm đến 1003 kg/m³ ở 100 atm, một sự thay đổi chỉ khoảng 0.5 %. Mật độ của chất lỏng và chất rắn phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ hơn là phụ thuộc vào áp suất. Ví dụ, tại áp suất 1 atm, mật độ nước thay đổi từ 998 kg/m³ ở 20 °C đến 975 kg/m³ ở 75 °C, sự thay đổi ở đây là 2.3 % vẫn có thể được bỏ qua trong nhiều bài toán kỹ thuật.

Đôi khi mật độ của một chất được biểu diễn thông qua tỷ số so với mật độ của một chất quen thuộc. Tỷ số này được gọi là *tỷ trọng riêng* (specific gravity), hoặc mật độ tương đối và được định nghĩa là tỷ số giữa mật độ của một chất và mật độ một chất ở nhiệt độ quy định (thường là nước ở 4 °C, khi mà $\rho_{H_2O} = 1000$ kg/m³). Vậy, chúng ta có:

$$\text{Tỷ trọng riêng:} \quad SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \quad (2.2)$$

Lưu ý rằng tỷ trọng riêng của một chất là một đại lượng không thứ nguyên. Tuy nhiên, trong đơn vị SI, giá trị tỷ trọng riêng của một chất có giá trị chính xác bằng mật độ của nó theo đơn vị g/cm³ hoặc kg/L (lít) (hoặc 0.001 lần mật độ theo kg/m³) vì mật độ của nước ở 4 °C là 1 g/cm³= 1 kg/L=1000 kg/m³. Ví dụ, tỷ trọng riêng của thủy ngân ở 0°C, là 13.6. Do đó mật độ của nó ở 0°C là 13.6 g/cm³= 13.6 kg/L= 13600 kg/m³. Tỷ trọng riêng của một số chất ở 0 °C được cho trong bảng 2.1.

Bảng 2.1 Tỷ trọng một số chất ở 0°C

Chất	SG
Nước	1.0
Máu	1.05
Nước biển	1.025
Gasoline	0.7
Cồn Ethyl	0.79
Thủy ngân	13.6
Gỗ	0.3–0.9
Vàng	19.2
Xương	1.7–2.0
Nước đá	0.92
Không khí (ở 1 atm)	0.0013

Trọng lượng của một đơn vị thể tích của một chất được gọi là *trọng lượng riêng* và được xác định như sau:

Trọng lượng riêng:

$$\gamma_s = \rho g \quad (\text{N/m}^3) \quad (2.3)$$

ở đây g là gia tốc trọng trường.

2.4. Hệ số nén và hệ số giãn nở thể tích

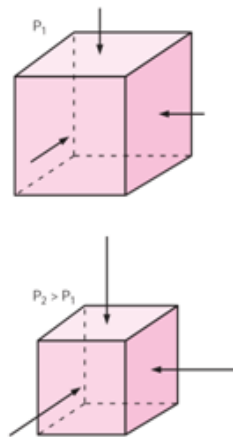
Từ các kết quả thí nghiệm, chúng ta biết rằng thể tích (hoặc mật độ) của chất lỏng thay đổi khi có sự thay đổi về nhiệt độ hay áp suất. Chất lỏng thường nở ra khi được đun nóng hoặc ở áp suất thấp và co lại khi bị làm lạnh hoặc bị nén dưới áp suất cao.

Tuy nhiên, giá trị thay đổi thể tích là khác nhau đối với các chất lỏng khác nhau và chúng ta cần phải xác định các tính chất liên quan đến sự thay đổi thể tích do thay đổi áp suất và nhiệt độ cho một chất lỏng cụ thể. Thước đo của hai tính chất đó là *hệ số nén* α (hoặc *mô đun đàn hồi* $\kappa=1/\alpha$) và *hệ số giãn nở thể tích* β .

2.4.1. Hệ số nén

Có thể quan sát thấy rằng chất lỏng co lại khi chịu áp suất lớn hơn và nở ra khi áp suất tác động lên nó giảm đi (Hình 2.8). Có nghĩa là, chất lỏng hoạt động như một chất rắn đàn hồi. Vì vậy, một cách tương tự như mô đun đàn hồi Young của chất rắn, chúng ta có thể định nghĩa mô đun đàn hồi κ^1 [còn gọi mô đun đàn hồi gộp (bulk) để phân biệt với mô đun đàn hồi Young] cho chất lỏng như sau:

$$\kappa = -v \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = \rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \quad [\text{Pa}] \quad (2.4)$$



Hình 2.8 Giống như chất rắn, thể tích chất lỏng thu nhỏ khi áp suất tăng lên từ P_1 đến P_2 .

Biểu diễn (2.4) dưới dạng thay đổi nhỏ ta có công thức xấp xỉ:

¹ Liên quan đến mô đun đàn hồi Young (E) và tỷ số Poisson (r) theo phương trình: $\kappa = E/3(1-2r)$.

$$\kappa \cong -\frac{\Delta P}{\frac{\Delta v}{v}} \cong \frac{\Delta P}{\frac{\Delta \rho}{\rho}} \quad (T=\text{const}) \quad (2.5)$$

Để ý rằng $\Delta v/v$ hoặc $\Delta \rho/\rho$ là các đại lượng không thứ nguyên, vì vậy κ phải có thứ nguyên của áp suất. Ngoài ra, mô đun đàn hồi thể hiện sự thay đổi áp suất tương ứng với một sự thay đổi tỷ phần về thể tích hoặc mật độ của chất lỏng khi nhiệt độ không đổi. Vì vậy mô đun đàn hồi của một chất thực sự không nén được ($\rho =$ hằng số) có giá trị là vô cùng lớn. Giá trị lớn của κ chỉ ra rằng cần sự thay đổi lớn về áp suất để gây ra một sự thay đổi nhỏ của thể tích, do đó một chất lỏng với hệ số κ lớn có thể coi là không nén được. Ví dụ, áp suất nước ở điều kiện khí quyển bình thường (1 atm) phải được nâng lên tới 210 atm để thu nhỏ thể tích xuống 1%, tương ứng với giá trị mô đun đàn hồi của nước là $\kappa = 21000$ atm.

Một thay đổi mật độ nhỏ trong chất lỏng có thể gây ra hiện tượng đáng chú ý trong hệ thống đường ống như hiện tượng búa nước – đặc trưng bởi sự phát ra âm thanh tương tự như âm thanh khi một đường ống bị đập bằng búa. Điều này có thể xảy ra khi chất lỏng trong một mạng đường ống bị hạn chế dòng chảy đột ngột (chẳng hạn như van đóng đột ngột). Các sóng âm thanh được tạo ra đập vào bề mặt đường ống, các đoạn ống cong, cũng như các thiết bị khi lan truyền và phản xạ dọc theo đường ống, gây ra các dao động của hệ thống đường ống và tạo ra những âm thanh lớn.

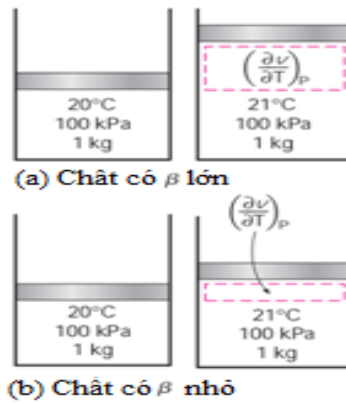
Lưu ý rằng thể tích và áp suất có quan hệ tỉ lệ nghịch (thể tích giảm khi áp suất tăng và do đó $\partial P/\partial v$ là mang dấu âm), dấu âm trong công thức (2.4) đảm bảo cho κ là một số dương.

2.4.2. Hệ số giãn nở thể tích

Mật độ của một chất lỏng, nói chung, phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ hơn là vào áp suất và sự thay đổi mật độ do nhiệt độ là nguyên nhân của nhiều hiện tượng tự nhiên như gió, dòng chảy trong các đại dương, sự bốc lên của bụi trong ống khói, hoạt động của kính khí cầu, hiện tượng truyền nhiệt do đối lưu tự nhiên.... Để định lượng những hiệu ứng đó, chúng ta cần xác định một tính chất đại diện cho sự thay đổi mật độ của chất lỏng theo nhiệt độ ở áp suất không đổi.

Tính chất cần xác định chính là hệ số giãn nở thể tích β được định nghĩa như sau ở dạng vi phân (Hình 2.9):

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad [1/K] \quad (2.6)$$



Hình 2.9 Hệ số dẫn nở thể tích là số đo thay đổi thể tích của một chất theo nhiệt độ ở áp suất không đổi

Với thay đổi nhỏ, (2.6) được xấp xỉ như sau:

$$\beta \approx \frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (\text{Với } P=\text{const}) \quad (2.7)$$

Giá trị hệ số dẫn nở nhiệt β lớn có nghĩa là mật độ thay đổi nhanh theo nhiệt độ và tích số $\beta \Delta T$ là tỷ số thay đổi thể tích của chất lỏng tương ứng với thay đổi ΔT của nhiệt độ dưới áp suất không đổi.

Ảnh hưởng kết hợp của thay đổi áp suất và nhiệt độ đến thay đổi thể tích của chất lỏng có thể được xác định bằng cách coi thể tích riêng của chất lỏng là hàm số của T và P . Lấy vi phân của hàm số $v=v(T,P)$ và sử dụng các định nghĩa về hệ số nén và hệ số dẫn nở thể tích, chúng ta có:

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial v}{\partial P}\right)_T dP = (\beta dT - \alpha dP)v \quad (2.8)$$

Từ đó, tỷ số thay đổi thể tích (hoặc mật độ) của chất lỏng được xác định xấp xỉ như sau:

$$\frac{\Delta v}{v} = -\frac{\Delta \rho}{\rho} \cong \beta \Delta T - \alpha \Delta P \quad (2.9)$$

2.4.3. Ví dụ 2.1: Thay đổi của mật độ theo nhiệt độ và áp suất

Xem xét nước ban đầu ở nhiệt độ 20 °C và áp suất 1 atm. Xác định mật độ của nước (a) nếu được làm nóng tới 50 °C ở áp suất không đổi 1 atm, và (b) nếu được nén đến áp suất 100 atm ở nhiệt độ không đổi là 20 °C. Biết hệ số nén của nước là $\alpha = 4.80 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$.

Vấn đề: Nước ở nhiệt độ và áp suất cho trước. Xác định mật độ của nước sau khi được làm nóng và sau khi bị nén.

Giả thiết: (1) Các hệ số giãn nở thể tích và hệ số nén của nước là không đổi trong khoảng nhiệt độ nhất định; (2) Một phép tính được thực hiện bằng cách thay thế những công thức vi phân bằng những thay đổi nhỏ hữu hạn.

Tính chất: Mật độ của nước ở 20 °C và 1 atm là $\rho_1=998.00 \text{ kg/m}^3$. Các hệ số giãn nở thể tích ở nhiệt độ trung bình $(20+50)/2=35 \text{ }^\circ\text{C}$ là $\beta=0.337 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Hệ số nén nước là $\alpha=4.80 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$.

Phân tích: Khi các đại lượng vi phân được thay thế bằng sự thay đổi nhỏ, các tính chất α và β được giả thiết là không đổi, thay đổi mật độ theo áp suất và nhiệt độ được thể hiện xấp xỉ như (2.9):

$$\Delta\rho = \alpha \rho \Delta P - \beta \rho \Delta T$$

Sự thay đổi mật độ do nhiệt độ thay đổi từ 20°C lên 50°C ở áp suất không đổi là:

$$\Delta\rho = -\beta\rho\Delta T = -(0,337 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}) \left(998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (50 - 20)\text{K} = -10.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Để ý rằng $\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho$, chúng ta có mật độ của nước ở 50°C và áp suất 1 atm là:

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho = 998.0 + (-10.0) = 998.0 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$$

(b) Thay đổi mật độ do thay đổi áp suất từ 1 atm đến 100 atm ở nhiệt độ không đổi là:

$$\Delta\rho = \alpha\rho\Delta P = (4.8 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1})(998 \text{ kg/m}^3)(100-1)\text{atm} = 4.7 \text{ kg/m}^3.$$

Vì vậy mật độ nước ở áp suất 100 atm và 20°C là:

$$\rho_2 = \rho_1 + \Delta\rho = 998.0 + 4.7 = 1002.7 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$$

Thảo luận: Có thể thấy rằng mật độ của nước giảm khi được làm nóng và tăng khi bị nén, như mong đợi. Sự thay đổi này có thể được xác định một cách chính xác hơn khi sử dụng các công thức vi phân với điều kiện hàm số của các tính chất đã được biết.

2.4. Tính chất của chất khí

2.4.1. Phương trình trạng thái khí lý tưởng

Một bảng các tính chất của một chất có thể cung cấp những thông tin rất chính xác về tính chất của chất đó trong các điều kiện khác nhau, tuy nhiên sẽ là thuận tiện hơn khi có được một quan hệ đơn giản tổng quát và chính xác để xác định các tính chất. Mối quan hệ đơn giản nhất và phổ biến nhất đối với các chất khí là phương trình trạng thái khí lý tưởng, được thể hiện như sau:

$$Pv=RT \text{ hoặc } P=\rho RT \quad (2.10)$$

trong đó P là áp suất tuyệt đối, v là thể tích riêng, T là nhiệt độ tuyệt đối (độ Kelvin), ρ là mật độ, và R là hằng số khí. Hằng số khí R là khác nhau cho mỗi loại khí và được xác định từ $R = Ru/M$, ở đây Ru là hằng số khí phổ quát có giá trị là $Ru = 8.314 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K} = 8.314 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K}$ và M là khối lượng mol [g/mol] (còn gọi là khối lượng phân tử) của chất khí. Các giá trị của R và M của một số chất được cho Bảng A1 (Phụ lục 1).

Thang nhiệt độ trong SI là thang Kelvin và đơn vị nhiệt độ trên thang này là Kelvin, ký hiệu là K. Trong hệ thống Anh, nhiệt độ được đo theo thang Rankine và đơn vị nhiệt độ trên thang này là Rankine, R. Các thang nhiệt độ khác nhau liên hệ với nhau theo các đẳng thức:

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273.15 \quad (2.11)$$

$$T(R) = T(^{\circ}\text{F}) + 459.67 \quad (2.12)$$

$$T(^{\circ}\text{C}) = 5/9 [T(^{\circ}\text{F}) - 32] \quad (2.13)$$

Phương trình (2.10) được gọi là phương trình trạng thái khí lý tưởng và chất khí tuân theo mối quan hệ này được gọi là khí lý tưởng. Đối với một chất khí lý tưởng với thể tích V , khối lượng m và số mol $N = m/M$, phương trình trạng thái khí lý tưởng có thể được viết như $PV = mRT$ hoặc $PV = NRuT$. Đối với một khối lượng m cố định, các tính chất của khí lý tưởng ở hai trạng thái khác nhau (trạng thái 1 và 2) liên quan với nhau bằng phương trình $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$. Để dễ nhớ, chúng ta lưu ý rằng các chỉ số trạng thái (1,2) ở cùng một vế của phương trình. Phương trình (2.10) đúng cho từng điểm trong chất khí, còn phương trình cuối cùng đúng cho một khối lượng khí cho trước.

Các thí nghiệm đã chứng tỏ rằng mối quan hệ khí lý tưởng là xấp xỉ tốt cho khí thực (ví dụ như không khí) ở mật độ thấp. Ở áp suất thấp và nhiệt độ cao, mật độ của một chất khí giảm và khí hoạt động như một chất khí lý tưởng. Trong thực tế, nhiều chất khí quen thuộc như không khí, nitơ, oxy, hydro, heli, argon, neon..., thậm chí khí nặng hơn như carbon dioxide có thể được coi là khí lý tưởng với các sai số không đáng kể (thường ít hơn 1%). Khí đậm đặc như hơi nước trong nhà máy điện hơi nước và hơi lạnh trong tủ lạnh, không nên được coi là khí lý tưởng vì chúng thường tồn tại ở trạng thái gần bão hòa.

2.4.2. Ví dụ 2.2 : Mật độ, tỷ trọng riêng và khối lượng của không khí trong phòng

Xác định mật độ, tỷ trọng và khối lượng của không khí trong một căn phòng mà thước 4 m x 5 m x 6 m ở áp suất 100 kPa và 25 °C.

Vấn đề: Mật độ, tỷ trọng và khối lượng của không khí trong một căn phòng cần được xác định.

Giả thiết: Tại các điều kiện quy định, không khí có thể được coi là một chất khí lý tưởng.

Tính chất: Hằng số khí của không khí là $R=0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$ ($=R_u/29$).

Phân tích: Mật độ không khí được xác định từ mối quan hệ khí lý tưởng $P=\rho RT$

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{100 \text{ kPa}}{\left(0.287 \text{ kPa}\cdot\frac{\text{m}^3}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)(25 + 273)\text{K}} = 1.17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tiếp theo, tỷ trọng của không khí là

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} = \frac{1.17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.00117$$

Cuối cùng, thể tích và khối lượng của không khí trong phòng là

$$V=(4\text{m})(5\text{m})(6\text{m})=120 \text{ m}^3$$

$$m = \rho V = 1.17 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 120 (\text{m}^3) = 140 \text{ kg}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng cần chuyển đổi nhiệt độ từ °C sang đơn vị K trước khi sử dụng phương trình trạng thái khí lý tưởng.

2.5. Áp suất hóa hơi và hiện tượng xâm thực

2.5.1. Áp suất hóa hơi

Các kết quả thực nghiệm đã xác định rõ ràng sự tương ứng một-một giữa nhiệt độ và áp suất đối với các chất *tinh khiết* trong quá trình chuyển pha (lỏng sang khí hoặc ngược lại). Ở một áp suất nhất định, nhiệt độ mà tại đó một chất tinh khiết chuyển pha được gọi là *nhiệt độ bão hòa* T_{sat} . Tương tự như vậy, ở một nhiệt độ nhất định, áp suất mà tại đó chất tinh khiết chuyển pha được gọi là *áp suất bão hòa* P_{sat} . Ví dụ, ở áp suất khí quyển trong điều kiện tiêu chuẩn (1 atm hoặc 101.325 kPa), nhiệt độ bão hòa của nước là 100 °C. Ngược lại, ở một nhiệt độ 100 °C, áp suất bão hòa của nước là 1 atm.

Áp suất hóa hơi P_v (vapor pressure) của một chất tinh khiết được định nghĩa là áp suất của pha hơi ở trạng thái cân bằng pha với pha lỏng ở nhiệt độ nhất định. P_v là một thuộc tính của chất tinh khiết, có giá trị bằng áp suất bão hòa P_{sat} của chất lỏng ($P_v = P_{sat}$). Chúng ta phải cẩn thận không nhầm lẫn giữa áp suất hóa hơi với *áp suất riêng phần*. Áp suất riêng phần được xác định là áp suất của một chất khí hoặc hơi nước trong hỗn hợp với các loại khí khác. Ví dụ, không khí trong khí quyển là một hỗn hợp của không khí khô và hơi nước và áp suất khí quyển là tổng của áp suất riêng phần của không khí khô và áp suất riêng phần của hơi

nước. Áp suất riêng phần của hơi nước là một phần nhỏ (thường là dưới 3%) của áp suất khí quyển (bao gồm chủ yếu là nitơ và oxy). Áp suất riêng phần của hơi phải nhỏ hơn hoặc bằng với áp suất hóa hơi nếu không có sự hiện diện chất lỏng. Tuy nhiên, khi cả pha hơi và pha lỏng có mặt và hệ thống đang trong trạng thái cân bằng pha, áp suất riêng phần của hơi phải bằng áp suất hóa hơi và khi đó hệ thống được cho là bão hòa. Tỷ lệ bốc hơi từ mặt nước có mặt thoáng như ở các hồ được kiểm soát bởi sự khác biệt giữa áp suất hóa hơi và áp suất riêng phần (của hơi). Ví dụ, áp suất hóa hơi của nước ở 20 °C là 2.34 kPa. Do đó, một xô nước ở 20 °C còn lại trong một căn phòng với không khí khô ở 1 atm sẽ tiếp tục bốc hơi (áp suất riêng phần của hơi nước ban đầu bằng 0) cho đến khi một trong hai điều xảy ra: xô nước biến thành hơi hết (không có đủ nước để thiết lập cân bằng pha trong phòng), hoặc bốc hơi dừng lại khi áp suất riêng phần của hơi nước trong phòng tăng lên đến 2.34 kPa khi mà điểm cân bằng pha được thiết lập.

Đối với quá trình chuyển pha giữa pha lỏng và hơi của một chất tinh khiết, áp suất bão hòa và áp suất hóa hơi là tương đương bởi vì pha hơi là tinh khiết (không còn áp suất riêng phần). Lưu ý rằng các giá trị áp suất sẽ là như nhau cho dù nó được đo trong pha hơi hoặc pha lỏng (với điều kiện được đo tại một địa điểm gần với mặt phân cách lỏng-hơi để tránh hiệu ứng thủy tĩnh). Áp suất hóa hơi tăng theo nhiệt độ. Vì vậy, một chất lỏng ở áp suất cao hơn sẽ sôi ở nhiệt độ cao hơn. Ví dụ, nước sôi ở 134 °C trong nồi áp suất 3 atm, nhưng sôi ở 93 °C trong nồi hơ ở độ cao 2000 m, nơi không khí có áp suất là 0.8 atm. Một số áp suất bão hòa của nước phụ thuộc nhiệt độ được đưa ra trong Bảng 2.2 để tham khảo.

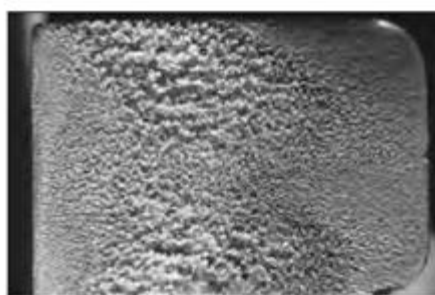
Bảng 2.2: Áp suất bão hòa của nước ở các nhiệt độ khác nhau

Nhiệt độ $T, ^\circ\text{C}$	Áp suất bão hòa $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$
-10	0.260
-5	0.403
0	0.611
5	0.872
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1554
250	3973
300	8581

2.5.2. Hiện tượng xâm thực

Lý do chúng ta quan tâm đến áp suất hóa hơi là khả năng áp suất của chất lỏng trong dòng chảy có thể xuống thấp hơn áp suất hóa hơi tại một số địa điểm và kết quả là xảy ra sự bay hơi trong lòng chất lỏng. Ví dụ, nước ở 10 °C sẽ tạo ra bọt hơi tại các vị trí (ví dụ như khu vực đầu của cánh bơm hoặc trong khu vực hút của máy bơm), mà áp suất hạ xuống dưới 1.23 kPa. Các bong bóng hơi hình thành trong điều kiện đó được gọi là *bọt xâm thực* (cavitation bubble) vì chúng tạo thành "lỗ hổng" (cavity) trong chất lỏng và sẽ biến mất khi chúng được cuốn trôi khỏi khu vực áp suất thấp và sự biến mất của chúng sẽ tạo ra sóng áp suất có sức phá hoại cao. Hiện tượng này là một nguyên nhân phổ biến giảm hiệu suất làm việc, thậm chí gây xói mòn, gãy cánh máy bơm/tuabin, được gọi là hiện tượng xâm thực. Hiện tượng xâm thực là một vấn đề quan trọng cần xem xét trong việc thiết kế các tuabin thủy lực và máy bơm (Hình 2.10).

Hiện tượng xâm thực cần phải tránh (hoặc ít nhất phải giảm thiểu) trong các hệ thống dòng chảy vì nó làm giảm hiệu suất, tạo ra rung động và tiếng ồn khó chịu và là nguyên nhân gây hỏng hóc thiết bị. Sóng áp suất do hiện tượng xâm thực gây ra gần một bề mặt rắn trong một thời gian dài có thể gây xói mòn, rỗ bề mặt, gây mỏi vật liệu và cuối cùng là phá hủy các thành phần máy móc. Sự hiện diện của xâm thực trong một hệ thống dòng chảy có thể được cảm nhận bằng âm thanh đặc trưng của nó.



Photograph by David Stinebring,
ARL/Pennsylvania State University.

Hình 2.10 Phá hoại xâm thực trên bản nhôm mẫu kích thước 16 mm x 23 mm trong dòng chảy với vận tốc 60 m/s, thời gian 2.5 giờ. Nguồn: [2]

2.5.3. Ví dụ 2.3: Áp suất tối thiểu để tránh xâm thực

Trong một hệ thống phân phối nước, nhiệt độ của nước cao nhất là 30°C. Xác định áp suất tối thiểu cho phép trong hệ thống để tránh tạo bọt xâm thực.

Vấn đề: Xác định áp suất tối thiểu trong hệ thống phân phối nước để tránh tạo bọt xâm thực.

Tính chất: Áp suất hơi của nước ở 30°C là 4.25 kPa (Bảng 2.2).

Phân tích: Để tránh tạo bọt, áp suất mọi nơi trong dòng chảy không được phép giảm xuống dưới áp suất hóa hơi (hoặc bão hòa) ở nhiệt độ cho trước. Như vậy, chúng ta có điều kiện:

$$P_{min}=P_{sat30oC}=4.25 \text{ kPa}$$

Do đó, áp suất cần được duy trì ở mức lớn hơn 4.25 kPa ở khắp mọi nơi trong dòng chảy.

Thảo luận: Lưu ý rằng áp suất hơi tăng khi nhiệt độ tăng, do đó nguy cơ xâm thực lớn hơn khi chất lỏng ở nhiệt độ cao hơn.

2.6. Năng lượng và nhiệt dung riêng

Năng lượng có thể tồn tại dưới nhiều hình thức như: nhiệt năng, cơ năng, động năng, thế năng, điện năng, năng lượng từ trường, hóa học, hạt nhân.... Tổng của các loại năng lượng trong một hệ thống được gọi là tổng năng lượng E của hệ thống (tương ứng là mật độ năng lượng e trên một đơn vị khối lượng). Các hình thức năng lượng liên quan đến cấu trúc phân tử của một hệ thống và hoạt động ở mức độ phân tử được gọi là năng lượng vi mô (microscopic energy). Tổng của tất cả các hình thức năng lượng vi mô được gọi là năng lượng nội tại (hay nội năng) của một hệ thống và được ký hiệu là U (hoặc u trên một đơn vị khối lượng).

Năng lượng vĩ mô của một hệ thống liên quan đến chuyển động và ảnh hưởng của một số tác động bên ngoài như trọng lực, từ trường, điện trường, sức căng bề mặt.... Năng lượng của một hệ thống là kết quả của chuyển động trong một hệ quy chiếu được gọi là động năng. Khi tất cả các thành phần của hệ thống chuyển động với cùng một vận tốc, động năng cho mỗi đơn vị khối lượng là $k_e=V^2/2$, trong đó V là vận tốc của hệ thống trong một hệ quy chiếu cố định. Năng lượng mà một hệ thống có được như một kết quả của độ cao trong một trường hấp dẫn được gọi là thế năng và được thể hiện trên một đơn vị khối lượng là $p_e=gz$, trong đó g là gia tốc của trường hấp dẫn và z là độ cao trọng tâm của hệ thống so với một mặt phẳng tham chiếu tùy chọn. Trong cuộc sống hàng ngày, chúng ta thường quan tâm đến các dạng nhận biết được (sensible form) và dạng tiềm ẩn (latent) của nội năng dưới dạng nhiệt độ và nhiệt lượng của các vật thể. Trong kỹ thuật, những dạng năng lượng này được gọi là *nhiệt năng*.

Trong hệ SI, đơn vị của năng lượng là jun (J) hoặc kilojun (1 kJ=1000 J). Trong hệ Anh, đơn vị năng lượng là Btu, được định nghĩa là năng lượng cần thiết để tăng nhiệt độ của 1 lbm của nước ở 68 °F lên thêm 1 °F. Độ lớn của kJ và Btu gần như nhau (1 Btu=1.0551 kJ). Một đơn vị năng lượng thông dụng khác là calo (1 cal=

4.1868 J), được định nghĩa là năng lượng cần thiết để tăng nhiệt độ 1 g nước ở 14.5 °C lên thêm 1 °C.

Khi phân tích các hệ thống có liên quan đến dòng chảy, chúng ta thường xuyên phải sử dụng đại lượng là tổng của nội năng u và đại lượng Pv . Để thuận tiện, đại lượng này được gọi là enthalpy và có ký hiệu là h . Như vậy, chúng ta có:

$$\text{Enthalpy:} \quad h = u + Pv = u + P/\rho \quad (2.14)$$

trong đó đại lượng P/ρ được gọi là năng lượng dòng chảy (flow energy), còn được gọi là công của dòng chảy (flow work), đó là năng lượng trên một đơn vị khối lượng chất lỏng cần có để di chuyển chất lỏng và duy trì dòng chảy. Trong phân tích năng lượng dòng chảy, để thuận tiện có thể coi năng lượng dòng chảy như một phần của năng lượng của chất lỏng và biểu diễn năng lượng vi mô của dòng chất lỏng bằng enthalpy h . Lưu ý rằng enthalpy là năng lượng trên một đơn vị khối lượng, do đó nó là một tính chất riêng. Trong trường hợp không có các hiệu ứng như từ trường, điện trường và sức căng bề mặt thì hệ thống được gọi là *hệ thống nén đơn giản* (simple compressible system). Tổng năng lượng của một hệ thống nén đơn giản bao gồm ba phần: nội năng, động năng và thế năng. Mật độ năng lượng trên một đơn vị khối lượng được thể hiện như sau: $e = u + k_e + p_e$. Khi chuyển động vào và ra khỏi một thể tích khống chế, chất lỏng sở hữu một dạng năng lượng bổ sung là năng lượng dòng chảy P/ρ (cùng vận tốc, cùng nhiệt độ, nhưng ở áp suất cao hơn chất lỏng có năng lượng cao hơn). Khi đó, tổng năng lượng của một chất lỏng trong dòng chảy trên một đơn vị khối lượng trở thành:

$$e_{TF} = \frac{P}{\rho} + e = h + k_e + p_e = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (2.15)$$

trong đó h là enthalpy, V là vận tốc và z là độ cao của hệ thống.

Bằng việc sử dụng enthalpy thay vì nội năng để đại diện cho năng lượng của một dòng chảy, chúng ta không cần phải quan tâm về công của dòng chảy. Năng lượng để đẩy chất lỏng chuyển động đã được bao gồm trong enthalpy. Trong thực tế, đây là lý do chính để khái niệm enthalpy tồn tại.

Sự thay đổi vi phân của nội năng và enthalpy của khí lý tưởng có thể được thể hiện thông qua các *hệ số nhiệt dung riêng* như sau:

$$du = c_v dT \quad \text{và} \quad dh = c_p dT \quad (2.16)$$

trong đó c_v và c_p là hệ số nhiệt dung đẳng tích và nhiệt dung đẳng áp của khí lý tưởng. Khi sử dụng các giá trị nhiệt dung riêng trung bình theo nhiệt độ, những thay đổi của nội năng và enthalpy được biểu diễn xấp xỉ bởi công thức:

$$\Delta u = c_{v,ave} \Delta T \quad \text{và} \quad \Delta h = c_{p,ave} \Delta T \quad (2.17)$$

Đối với chất lỏng không nén được, hệ số nhiệt dung đẳng tích và đẳng áp là như nhau. Vì vậy, $c_p = c_v = c$, sự thay đổi nội năng của chất lỏng có thể được biểu diễn bởi $\Delta u = c_{ave}\Delta T$.

Từ điều kiện $\rho = const$ đối với chất không nén được, lấy vi phân phương trình enthalpy $h = u + P/\rho$, chúng ta nhận được $dh = du + dP/\rho$. Do đó, chúng ta có:

$$\Delta h = \Delta u + \Delta P/\rho \cong c_{ave}\Delta T + \Delta P/\rho \quad (2.18)$$

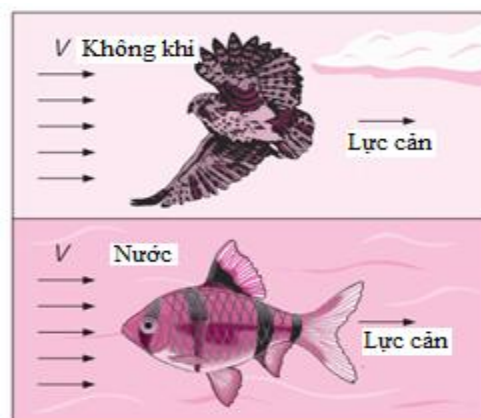
Vì vậy, $\Delta h = \Delta u \cong c_{ave}\Delta T$ đối với quá trình đẳng áp và $\Delta h = \Delta P/\rho$ đối với quá trình đẳng nhiệt.

2.7. Độ nhớt

2.7.1. Khái niệm độ nhớt

Khi hai vật thể rắn tiếp xúc và di chuyển tương đối với nhau, một lực ma sát hình thành trên bề mặt tiếp xúc có hướng ngược chiều với chiều chuyển động. Ví dụ, để di chuyển một vật trên sàn nhà, chúng ta phải tác dụng lên vật một lực theo hướng nằm ngang đủ lớn để thắng lực ma sát giữa vật và sàn nhà. Độ lớn của lực cần thiết để di chuyển vật phụ thuộc vào hệ số ma sát giữa vật và sàn nhà.

Tình hình hoàn toàn tương tự khi chất lỏng tiếp xúc và di chuyển tương đối so với một mặt rắn hoặc khi hai lớp chất lỏng chuyển động tương đối với nhau. Chúng ta di chuyển dễ dàng trong không khí nhưng khó hơn ở trong nước và càng khó hơn ở trong một loại dầu nào đó. Rõ ràng là có một tính chất nào đó của chất lỏng đại diện cho sự cản trở chuyển động bên trong của chất lỏng. Đại lượng đại diện cho tính chất đó chính là *độ nhớt*. Lực sinh ra do chất lỏng tác dụng lên một vật thể theo hướng dòng chảy được gọi là *lực cản* và độ lớn của lực này phụ thuộc một phần vào độ nhớt của chất lỏng (Hình 2.11).



Hình 2.11 Chất lỏng chuyển động tương đối so với một vật tác dụng lên vật đó một lực gọi là lực cản

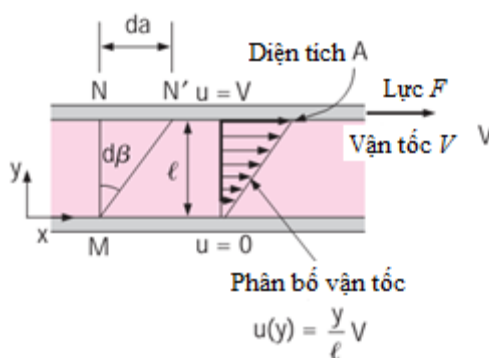
Để xác định độ nhớt, chúng ta hãy xem xét một lớp chất lỏng giữa hai tấm phẳng song song cách nhau một khoảng cách l (Hình 2.12). Tác dụng một lực F không đổi lên tấm trên theo phương song song với tấm, trong khi tấm dưới được giữ cố định. Sau một khoảng thời gian quá độ ban đầu, có thể quan sát thấy rằng tấm trên di chuyển đều dưới tác dụng của lực F với vận tốc không đổi V . Phần chất lỏng tiếp xúc với tấm trên di chuyển với cùng vận tốc V , ứng suất cắt τ tác dụng trên lớp chất lỏng này là:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.19)$$

trong đó A là diện tích tiếp xúc giữa tấm phẳng và chất lỏng. Lưu ý rằng các lớp chất lỏng biến dạng *liên tục* dưới tác dụng của ứng suất cắt. Lớp chất lỏng tiếp xúc với tấm dưới có vận tốc của tấm và có giá trị là 0 (do điều kiện không trơn trượt). Giả thiết dòng chảy tầng và ổn định, vận tốc chất lỏng giữa các tấm có phân bố tuyến tính giữa 0 và V , do đó giá trị vận tốc và gradient vận tốc là:

$$\text{và} \quad \begin{aligned} u(y) &= \frac{y}{l} V \\ \frac{du}{dy} &= \frac{V}{l} \end{aligned} \quad (2.20)$$

trong đó y là khoảng cách thẳng đứng tính từ tấm phẳng dưới.



Hình 2.12 Chất lỏng chuyển động giữa hai tấm phẳng song song khi tấm trên chuyển động với vận tốc không đổi

Trong khoảng thời gian dt , các hạt chất lỏng dọc theo đường thẳng đứng MN đã dịch chuyển được một góc $d\beta$ trong khi tấm trên di chuyển một khoảng cách $da = Vdt$. Dịch chuyển góc hoặc biến dạng cắt/trượt (shear strain) được tính như sau:

$$d\beta \approx \tan \beta = \frac{da}{l} = \frac{Vdt}{l} = \frac{du}{dy} dt \quad (2.21)$$

Biến đổi (2.21) để nhận được biểu thức cho tốc độ biến dạng:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (2.22)$$

Từ đó, chúng ta kết luận rằng tốc độ biến dạng của một phần tử chất lỏng có giá trị tương đương với gradient vận tốc du/dy . Hơn nữa, thực nghiệm xác nhận rằng đối với hầu hết các chất lỏng, tốc độ biến dạng (hay gradient vận tốc) tỷ lệ thuận với ứng suất cắt τ :

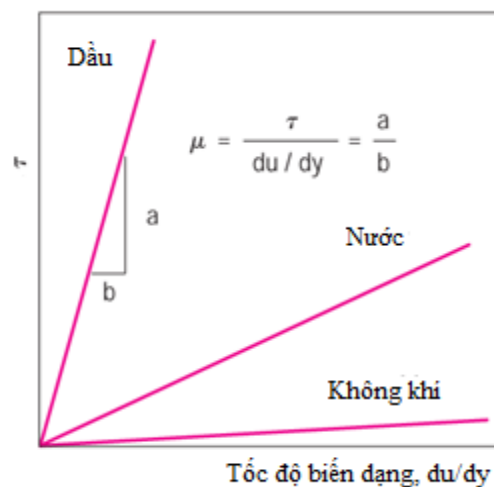
$$\tau \propto \frac{d\beta}{dt} \quad \text{hay} \quad \tau \propto \frac{du}{dy} \quad (2.23)$$

Chất lỏng có tốc độ biến dạng tỷ lệ thuận với ứng suất cắt được gọi là chất lỏng Newton. Các chất lỏng phổ biến nhất như nước, không khí, xăng, dầu là chất lỏng Newton. Các chất lỏng như máu và chất nhựa lỏng là những ví dụ của các chất lỏng phi Newton.

Trong dòng chảy cắt (shear flow) một chiều của chất lỏng Newton, ứng suất cắt và tốc độ biến dạng có mối quan hệ tuyến tính:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2.24)$$

ở đây hệ số tỉ lệ μ được gọi là hệ số độ nhớt động lực của chất lỏng, có đơn vị là kg/m.s, hoặc tương đương, N.s/m² (hoặc Pa.s, trong đó Pa là đơn vị áp suất Pascal). Đơn vị độ nhớt thường dùng trong kỹ thuật là poise, 1 poise tương đương với 0.1 Pa.s. Độ nhớt của nước ở 20 °C là 1 centipoise, do đó đơn vị centipoise là đơn vị thường được dùng. Đồ thị biểu diễn ứng suất cắt theo tốc độ biến dạng (gradient vận tốc) cho một chất lỏng Newton là một đường thẳng có độ dốc là độ nhớt của chất lỏng, như thể hiện trong Hình 2.13. Cần lưu ý rằng độ nhớt không phụ thuộc vào tốc độ biến dạng.



Hình 2.13 Tốc độ biến dạng của chất lỏng Newton tỷ lệ thuận với ứng suất cắt và hằng số tỷ lệ là độ nhớt của chất lỏng

Lực cắt tác dụng lên lớp chất lỏng (hoặc, theo định luật thứ ba của Newton, bằng với lực tác động lên tấm trên) được xác định theo công thức:

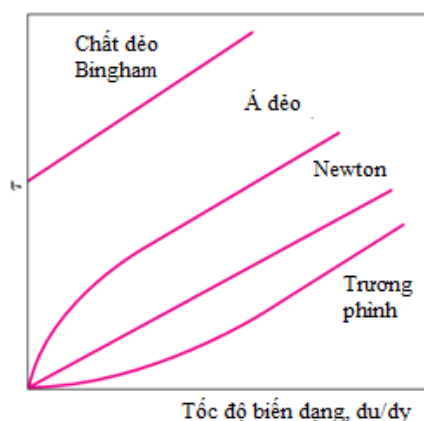
$$F = \tau A = \mu A \frac{du}{dy} \quad (N) \quad (2.25)$$

Vì vậy, lực F cần thiết để di chuyển tấm trên trong Hình 2.12 với tốc độ không đổi của V trong khi tấm dưới cố định là:

$$F = \mu A \frac{V}{l} \quad (N) \quad (2.26)$$

Mối quan hệ này có thể được sử dụng để tính toán μ khi biết lực F . Vì vậy, thí nghiệm mô tả ở trên có thể được sử dụng để đo độ nhớt của chất lỏng. Tất nhiên, trong điều kiện giống nhau, lực F sẽ khác nhau cho những chất lỏng khác nhau.

Đối với các chất lỏng phi Newton, mối quan hệ giữa ứng suất cắt và tốc độ biến dạng không còn là tuyến tính, như thể hiện trong Hình 2.14. Độ dốc của đường cong trên đồ thị τ là hàm của du/dy được gọi là *độ nhớt biểu kiến* (apparent viscosity) của chất lỏng. Chất lỏng mà độ nhớt biểu kiến tăng cùng với tốc độ biến dạng (như dung dịch tinh bột đặc hoặc cát) được gọi là *chất lỏng trương phình*, còn những chất lỏng có hành vi ngược lại (các chất lỏng trở nên ít nhớt khi tốc độ biến dạng tăng lên, chẳng hạn như một số loại sơn, dung dịch polymer hoặc các chất lỏng chứa các hạt lơ lửng) được gọi là *chất lỏng á dẻo* (pseudoplastic). Một số vật liệu như kem đánh răng có thể chống lại ứng suất cắt đủ nhỏ để ứng xử như một chất rắn, nhưng lại biến dạng liên tục khi ứng suất cắt vượt quá một ứng suất ngưỡng và khi đó lại ứng xử như một chất lỏng. Vật liệu như vậy được gọi là *chất lỏng Bingham* (mang tên E. C. Bingham, nhà nghiên cứu tiên phong người Mỹ về độ nhớt chất lỏng trong những năm đầu thế kỷ XX).



Hình 2.14: Biến thiên ứng suất cắt theo tốc độ biến dạng của các chất lỏng Newton và phi Newton

2.7.2. Sự phụ thuộc của độ nhớt vào nhiệt độ và áp suất

Trong các bài toán Thủy khí động lực học và truyền nhiệt, tỷ số độ nhớt động lực và mật độ xuất hiện thường xuyên. Do đó, để thuận tiện, tỷ số này được gọi là *độ nhớt động học* và được ký hiệu là $\nu = \mu/\rho$. Hai đơn vị phổ biến của độ nhớt động học là m^2/s và stoke (1 stoke = $1 \text{ cm}^2/\text{s} = 0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$).

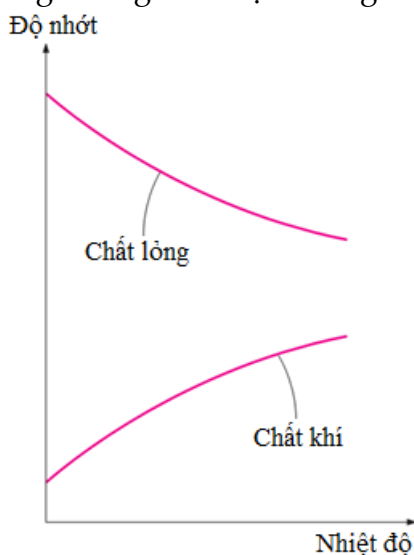
Nói chung, độ nhớt của chất lỏng phụ thuộc vào nhiệt độ và áp suất, mặc dù sự phụ thuộc vào áp suất là khá yếu. Đối với chất lỏng, cả độ nhớt động lực và động học thực tế là không phụ thuộc vào áp suất, vì vậy thông thường ảnh hưởng của áp suất đến độ nhớt thường được bỏ qua, ngoại trừ trường hợp trong điều kiện áp suất rất cao. Đối với chất khí, độ nhớt động lực có thể được coi là không đổi trong trường hợp biến đổi áp suất nhỏ, tuy nhiên không đúng với độ nhớt động học vì mật độ của một chất khí có thể thay đổi nhanh theo áp suất (Hình 2.15).

Không khí ở 20oC và 1 atm
$\mu = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
$\nu = 1.52 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Không khí ở 20oC và 4 atm
$\mu = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$
$\nu = 0.380 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Hình 2.15 Đối với chất khí, độ nhớt động lực nói chung không phụ thuộc vào áp suất, tuy nhiên độ nhớt động học phụ thuộc nhiều vào áp suất.

Độ nhớt của chất lỏng là một thước đo "chống biến dạng" của bản thân chất lỏng. Độ nhớt là kết quả của lực ma sát nội bộ giữa các lớp chất lỏng di chuyển tương đối với nhau. Độ nhớt được sinh ra bởi các lực liên kết giữa các phân tử trong chất lỏng và các va chạm phân tử trong chất khí, do đó độ nhớt phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ. Thực nghiệm chỉ ra rằng, độ nhớt của chất lỏng giảm theo nhiệt độ, trong khi độ nhớt của chất khí tăng theo nhiệt độ (Hình 2.16). Điều này là do trong chất lỏng các phân tử có năng lượng lớn hơn ở nhiệt độ cao hơn, vì thế lực liên kết giữa các phân tử yếu đi do các phân tử chất lỏng với năng lượng lớn hơn có thể di chuyển tự do hơn. Mặt khác, trong chất khí, các lực liên kết giữa các phân tử là không đáng kể và các phân tử khí ở nhiệt độ cao di chuyển ngẫu nhiên với vận tốc cao. Điều này dẫn đến va chạm phân tử trong một đơn vị thể

tích đơn vị thời gian xảy ra nhiều hơn và do đó cản trở dòng chảy nhiều hơn. Độ nhớt của chất lỏng liên quan trực tiếp đến công suất bơm cần thiết để vận chuyển chất lỏng trong một đường ống hoặc để di chuyển một vật thể trong chất lỏng (chẳng hạn như xe hơi trong không khí hoặc tàu ngầm trong nước biển).



Hình 2.16 Độ nhớt chất lỏng giảm và độ nhớt chất khí tăng khi nhiệt độ tăng

Lý thuyết động học các chất khí dự đoán độ nhớt của chất khí tỉ lệ với căn bậc hai của nhiệt độ. Dự đoán này đã được xác nhận bởi các kết quả thí nghiệm, tuy nhiên đối với các loại khí khác nhau cần phải xác định một số hệ số điều chỉnh. Độ nhớt của chất khí được biểu diễn như một hàm của nhiệt độ theo tương quan Sutherland (theo tiêu chuẩn của Hoa Kỳ về khí quyển) có dạng như sau:

$$\mu = \frac{aT^{1/2}}{1 + \frac{b}{T}} \quad (2.27)$$

Chất khí:

trong đó T là nhiệt độ tuyệt đối và a và b là hằng số thực nghiệm. Lưu ý rằng chỉ cần đo độ nhớt ở hai nhiệt độ khác nhau là đủ để xác định các hằng số. Đối với không khí, các giá trị của các hằng số là $a=1.458 \times 10^{-6} \text{ kg} / (\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{1/2})$ và $b=110.4 \text{ K}$ trong điều kiện khí quyển tiêu chuẩn. Độ nhớt của chất khí là không phụ thuộc vào áp suất trong điều kiện áp suất thấp và trung bình (từ một vài % của 1 atm tới vài atm). Nhưng độ nhớt tăng ở áp suất cao do sự gia tăng của mật độ.

Đối với chất lỏng, độ nhớt phụ thuộc vào nhiệt độ được xấp xỉ như sau:

$$\mu = \alpha 10^{\frac{b}{T-c}} \quad (2.28)$$

trong đó T là nhiệt độ tuyệt đối và a , b , c là các hằng số được xác định bằng thực nghiệm. Đối với nước, sử dụng các giá trị $a=2.414 \times 10^{-5} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$, $b=247.8 \text{ K}$ và $c=140$

K cho kết quả với sai số nhỏ hơn 2.5% đối với độ nhớt trong khoảng nhiệt độ từ 0 °C đến 370 °C (Touloukian et al., 1975).

Hãy xem xét một lớp chất lỏng có độ dày l trong khe hở nhỏ giữa hai ống trụ đồng tâm, chẳng hạn như lớp dầu bôi trơn mỏng. Khoảng cách giữa hai ống trụ có thể được coi như giữa hai tấm phẳng song song chứa đầy chất lỏng. Với mô men xoắn là $T = FR$ (lực nhân cánh tay đòn, trong trường hợp này là bán kính R của ống trụ bên trong), vận tốc tiếp tuyến là $V = \omega R$ (vận tốc góc nhân bán kính), diện tích ướt của ống trụ bên trong là $A = 2\pi RL$, bỏ qua các ứng suất cắt bên ngoài tác động trên hai đầu của ống trụ bên trong, mô men xoắn có thể được biểu diễn như sau:

$$T = FR = \mu \frac{2\pi R^3 \omega L}{l} = \mu \frac{4\pi^2 R^3 nL}{l} \quad (2.29)$$

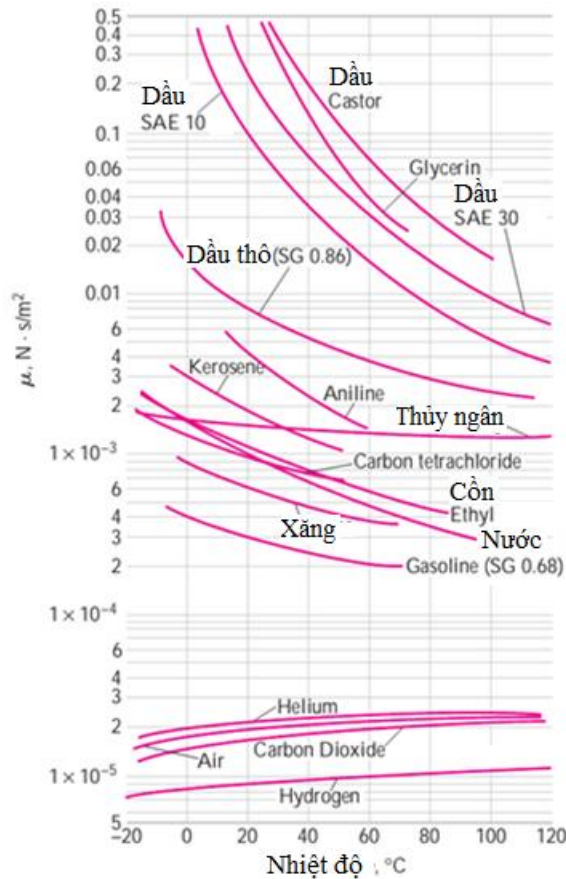
trong đó L là chiều dài của ống trụ và n là số vòng quay trong một đơn vị thời gian, thường được thể hiện bằng rpm (số vòng trong một phút). Lưu ý rằng khoảng cách góc đi được trong một vòng quay là 2π rad, do đó mối quan hệ giữa vận tốc góc (rad/phút) và rpm là $\omega = 2\pi n$. Phương trình (2.29) có thể được sử dụng để tính toán độ nhớt của chất lỏng bằng cách đo mô men xoắn ở một tốc độ góc nhất định. Do đó, hai ống trụ đồng tâm có thể được sử dụng như một thiết bị đo độ nhớt.

Bảng 2.3 Độ nhớt động lực của một số chất lỏng ở điều kiện 20 oC và 1 atm (và một số điều kiện khác như chỉ ra trong bảng)

Chất lỏng	Độ nhớt động lực μ , kg/m · s
Glycerin:	
-20°C	134.0
0°C	10.5
20°C	1.52
40°C	0.31
Dầu máy :	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Thủy ngân	0.0015
Cồn Ethyl	0.0012
Nước :	
0°C	0.0018
20°C	0.0010
100°C (lỏng)	0.00028
100°C (hơi)	0.000012
Máu , 37°C	0.00040
Gasoline	0.00029
Ammonia	0.00015
Không khí	0.000018
Hydrogen, 0°C	0.0000088

Độ nhớt của một số chất lỏng ở nhiệt độ phòng được liệt kê trong Bảng 2.3. Đồ thị độ nhớt thay đổi theo nhiệt độ được trình bày trên Hình 2.17. Lưu ý rằng độ

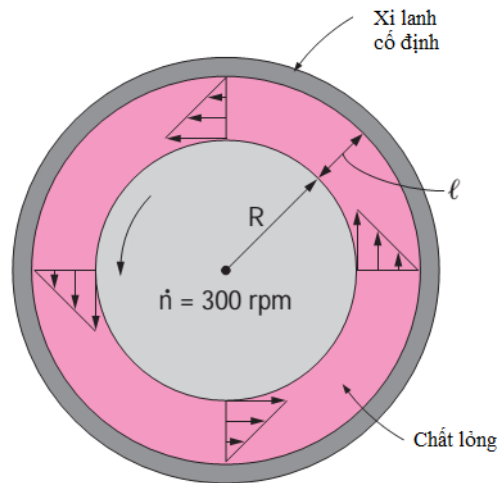
nhớt của chất lỏng khác nhau có độ lớn rất khác nhau. Cũng cần lưu ý rằng để di chuyển một vật trong một chất lỏng có độ nhớt cao như dầu động cơ hơn là khó khăn hơn trong một chất lỏng có độ nhớt thấp hơn chẳng hạn như trong nước. Nói chung, chất lỏng có độ nhớt lớn hơn chất khí.



Hình 2.17: Thay đổi độ nhớt động lực của một số chất lỏng theo nhiệt độ ở áp suất 1 atm

2.7.3. Ví dụ 2.4: Xác định độ nhớt của chất lỏng

Độ nhớt của chất lỏng được đo bằng *nhớt kế* gồm hai ống trụ đồng tâm dài 40 cm (Hình 2.18). Đường kính ngoài của trụ bên trong là 12 cm và khoảng cách giữa hai trụ là 0.15 cm. Trụ bên trong quay với vận tốc góc 300 rpm, mô men xoắn đo được là 1.8 N.m. Xác định độ nhớt của chất lỏng.



Hình 2.18 Sơ đồ của ví dụ 2.4

Vấn đề: Mô men xoắn và tốc độ góc của một thiết bị đo độ nhớt gồm hai ống trụ đồng tâm đã được xác định. Tính độ nhớt của chất lỏng bên trong thiết bị.

Giả thiết: (1) Trụ bên trong là hoàn toàn chìm trong dầu; (2) hiệu ứng nhớt ở hai đầu của trụ bên trong là không đáng kể.

Phân tích: Phân bố vận tốc là tuyến tính chỉ khi ảnh hưởng độ cong là không đáng kể, trong trường hợp này xấp xỉ tuyến tính có thể được chấp nhận vì $l/R \ll 1$. Giải phương trình (2.29) cho độ nhớt và thay thế các giá trị vào biểu thức, độ nhớt của chất lỏng được xác định là:

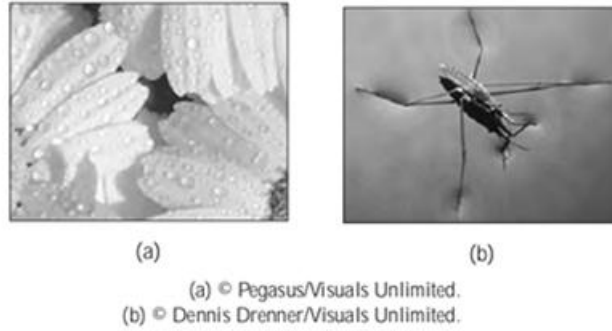
$$\mu = \frac{Tl}{4\pi^2 R^3 nL} = \frac{(1.8N \cdot m)(0.0015m)}{4\pi^2 (0.06m)^3 \left(\frac{300}{60} \frac{1}{s}\right) (0.4m)} = 0.158 N \cdot \frac{s}{m^2}$$

Thảo luận: Độ nhớt phụ thuộc mạnh vào nhiệt độ, cho giá trị độ nhớt mà không cho nhiệt độ tương ứng là ít có giá trị. Do đó, nhiệt độ của chất lỏng trong thí nghiệm này nên đưa vào báo cáo cùng với những tính toán ở trên.

2.8. Sức căng bề mặt và hiệu ứng mao dẫn

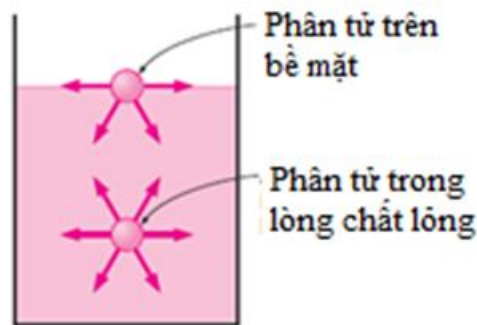
2.8.1. Khái niệm về sức căng bề mặt

Chúng ta thường quan sát thấy một giọt nước tạo thành một cái mủ trên mặt kính nằm ngang; một giọt thủy ngân tạo thành một hình cầu gần như hoàn hảo và có thể lăn như một quả bóng thép trên một bề mặt mịn; nhiên liệu lỏng phun vào động cơ tạo thành một màn sương của những giọt hình cầu; nước nhỏ giọt từ một vòi nước bị rò rỉ rơi ra những giọt nước hình cầu; bong bóng xà phòng hình cầu bay trong không khí và những hạt nước tạo thành những giọt nhỏ hình cầu đọng trên những cánh hoa (Hình 2.19),....



Hình 2.19: Một vài hiệu ứng của sức căng bề mặt. Nguồn: [2]

Trong những quan sát kể trên, các giọt chất lỏng ứng xử giống như bong bóng hình cầu nhỏ chứa đầy chất lỏng và bề mặt chất lỏng hoạt động giống như một màng đàn hồi do tác dụng của sức căng bề mặt. Lực kéo gây ra sức căng tác dụng tiếp tuyến với bề mặt là do lực hút giữa các phân tử của chất lỏng tạo thành. Độ lớn của lực này trên đơn vị độ dài được gọi là sức căng bề mặt σ_s và thường được biểu diễn bằng đơn vị N/m. Hiệu ứng này cũng liên quan đến năng lượng bề mặt và được biểu diễn bằng đơn vị tương đương với N.m/m² hoặc J/m². Trong trường hợp này, σ_s đại diện cho năng lượng cần phải được cung cấp để tăng diện tích bề mặt của chất lỏng thêm một đơn vị diện tích.



Hình 2.20: Lực hút tác dụng lên phân tử ở trên bề mặt và phân tử ở trong lòng chất lỏng

Để hình dung sức căng bề mặt phát sinh như thế nào, chúng ta sẽ tiếp cận vấn đề trên quan điểm vi mô như trình bày trên Hình 2.20 bằng cách xem xét hai phân tử chất lỏng: một ở bề mặt và một sâu trong lòng chất lỏng. Các lực hấp dẫn tác dụng lên các phân tử trong lòng chất lỏng bởi các phân tử xung quanh cân bằng nhau vì tính đối xứng. Nhưng lực hấp dẫn tác động lên các phân tử trên bề mặt không đối xứng và các lực hấp dẫn tác dụng bởi các phân tử khí trên mặt thoáng thường là rất nhỏ. Do đó, có một lực hấp dẫn tổng cộng khác 0 tác dụng lên phân tử ở bề mặt của chất lỏng và có xu hướng kéo các phân tử trên bề mặt vào phía bên trong của chất lỏng. Lực này phải được cân bằng bởi các lực đẩy từ các phân tử bên dưới bề mặt đang bị nén. Tác dụng của hiệu ứng nén làm cho chất lỏng có

xu hướng giảm thiểu diện tích bề mặt của nó. Đây là lý do tại sao các giọt chất lỏng có xu hướng đạt được một hình dạng hình cầu, bởi vì hình cầu là hình có diện tích bề mặt nhỏ nhất tương ứng với một thể tích cho trước.

Chúng ta cũng có thể quan sát, với sự ngạc nhiên, rằng một số loài côn trùng có thể hạ cánh trên mặt nước hay thậm chí đi trên mặt nước (Hình 2.19b) hoặc một cái kim thép nhỏ có thể nổi trên mặt nước. Những hiện tượng này có thể được giải thích là do sức căng bề mặt đã cân bằng với trọng lượng của các đối tượng này.

Để hiểu được những tác dụng sức căng bề mặt rõ hơn, hãy xem xét một màng mỏng chất lỏng (như màng mỏng của bong bóng xà phòng) trong một khung dây hình chữ U với một cạnh có thể di động (Hình 2.21). Thông thường, màng mỏng chất lỏng có xu hướng kéo cạnh di chuyển vào phía trong để làm giảm thiểu diện tích bề mặt của chất lỏng. Một lực F cần được tác dụng lên cạnh theo hướng ngược lại để cân bằng với lực kéo này. Màng mỏng trong khung dây có hai bề mặt (bề mặt trên và dưới) tiếp xúc với không khí, do đó chiều dài chịu tác dụng của sức căng bề mặt trong trường hợp này là $2b$. Kết quả cân bằng lực cho biểu thức $F=2b\sigma_s$, vì vậy sức căng bề mặt được xác định như sau:

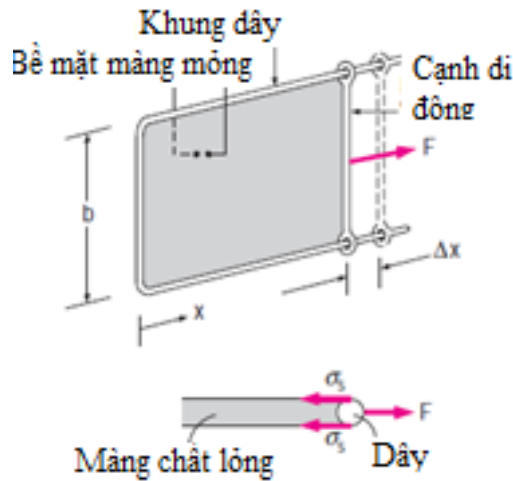
$$\sigma_s = \frac{F}{2b} \quad (2.30)$$

Lưu ý rằng với $b = 0.5 \text{ m}$, lực F (N) có giá trị đúng bằng giá trị sức căng bề mặt (N/m). Một thiết bị dạng này có thể được sử dụng để đo sức căng bề mặt của các chất lỏng khác nhau với độ chính xác khá tốt.

Trong khung dây hình chữ U , lực F vẫn không thay đổi khi dây chuyển động kéo căng màng mỏng và làm tăng diện tích bề mặt của nó. Khi dây chuyển động được một khoảng cách Δx , diện tích bề mặt tăng $\Delta A = 2b\Delta x$, vì vậy công thực hiện W trong quá trình kéo này là:

$$W = F\Delta x = 2b\sigma_s\Delta x = \sigma_s\Delta A$$

Bởi vì lực F là không đổi trong suốt quá trình kéo. Kết quả này cũng có thể được hiểu là năng lượng bề mặt của màng mỏng được cung cấp thêm một lượng $\sigma_s\Delta A$ trong quá trình kéo này và hoàn toàn phù hợp với cách giải thích về σ_s như là mật độ năng lượng bề mặt. Điều này cũng tương tự như một mẫu cao su có thêm nhiều năng lượng đàn hồi sau khi được kéo dài thêm. Trong trường hợp của màng mỏng chất lỏng, công thực hiện để di chuyển các phân tử chất lỏng từ trong lòng chất lỏng lên bề mặt chống lại các lực hấp dẫn của các phân tử khác. Do đó, sức căng bề mặt cũng có thể được định nghĩa là công thực hiện trên một đơn vị diện tích bề mặt tăng thêm của chất lỏng.



Hình 2.21: Thí nghiệm kéo màng mỏng chất lỏng trong khung dây chữ U

Sức căng bề mặt là rất khác nhau với các chất lỏng khác nhau và phụ thuộc vào nhiệt độ như trình bày trong Bảng 2.4. Ví dụ, tại 20 °C, sức căng bề mặt trong khí quyển của nước là 0.073 N/m và là 0.440 N/m cho thủy ngân. Giọt thủy ngân có thể tạo thành những quả bóng hình cầu có thể lăn như một quả bóng trên bề mặt rắn mà không làm ướt bề mặt. Sức căng bề mặt của chất lỏng, nói chung, giảm theo nhiệt độ và giá trị bằng 0 ở nhiệt độ tới hạn. Ảnh hưởng của áp suất lên sức căng bề mặt thường là không đáng kể.

Bảng 2.4 Sức căng bề mặt của một số chất trong điều kiện 20°C và 1 atm (hoặc điều kiện khác, được chỉ ra trong Bảng).

Chất lỏng	Sức căng bề mặt σ_s , N/m
Nước :	
0°C	0.076
20°C	0.073
100°C	0.059
300°C	0.014
Glycerin	0.063
Dầu SAE 30	0.035
Mercury	0.440
Ethyl alcohol	0.023
Máu 37°C	0.058
Gasoline	0.022
Ammonia	0.021
Nước xà phòng	0.025
Kerosene	0.028

Sức căng bề mặt của một chất có thể được thay đổi đáng kể bởi các tạp chất. Do đó, một số hóa chất gọi là hoạt chất bề mặt có thể được thêm vào một chất lỏng để làm giảm sức căng bề mặt của nó. Ví dụ, xà phòng và chất tẩy rửa làm giảm sức căng bề mặt của nước và cho phép nước xâm nhập qua các lỗ nhỏ giữa các sợi để giặt tẩy hiệu quả hơn. Nhưng điều này cũng cho thấy các thiết bị hoạt

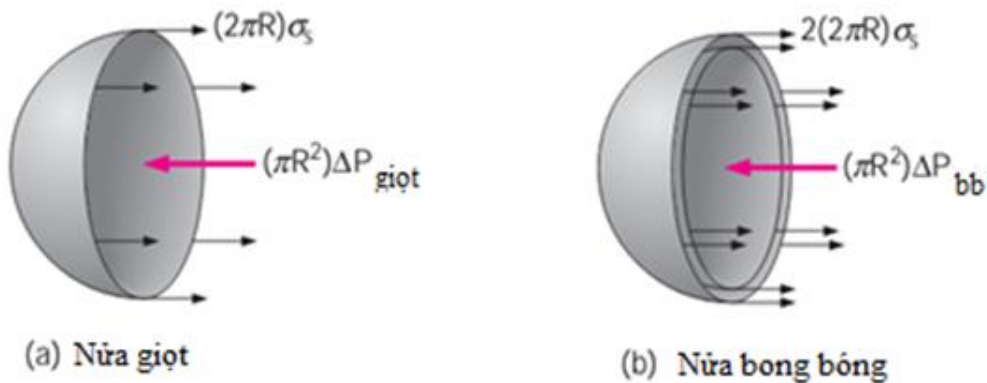
động phụ thuộc vào sức căng bề mặt (ví dụ như ống nhiệt) có thể bị phá hủy bởi sự hiện diện của các tạp chất.

Chúng ta chỉ nói về sức căng bề mặt chất lỏng ở trên mặt phân cách giữa 2 chất lỏng hoặc giữa chất lỏng và chất khí. Do đó, điều quan trọng là phải xác định chất lỏng thứ 2 hoặc chất khí khi xác định sức căng bề mặt. Ngoài ra, sức căng bề mặt quyết định kích thước của các giọt lỏng. Một giọt lỏng được bổ sung khối lượng sẽ bị phá vỡ khi sức căng bề mặt không còn khả năng giữ được hình dạng cần thiết. Điều này giống như một quả bong bóng sẽ nổ tung khi được thổi phồng lên đến khi áp lực bên trong tăng lên quá sức chịu đựng của vật liệu làm vỏ bong bóng.

Một mặt phân cách cong tạo ra sự gián đoạn áp suất trên mặt phân cách với áp suất cao hơn ở phía bên lõm. Hiệu áp suất ΔP trên mặt phân cách của một giọt lỏng hoặc bong bóng có thể được xác định bằng cách xem xét sơ đồ vật thể tự do (free-body diagram) của một nửa giọt lỏng hoặc bong bóng (Hình 2.22). Nhận thấy rằng sức căng bề mặt tác dụng dọc theo chu vi còn áp suất thì tác dụng lên bề mặt, viết phương trình cân bằng lực theo chiều nằm ngang cho giọt lỏng hoặc bong bóng, chúng ta nhận được:

Giọt lỏng:
$$(2\pi R)\sigma_s = (\pi R^2 \Delta P_{giot}) \rightarrow \Delta P_{giot} = P_i - P_o = \frac{2\sigma_s}{R} \quad (2.31)$$

Bong bóng:
$$2(2\pi R)\sigma_s = (\pi R^2 \Delta P_{bb}) \rightarrow \Delta P_{bb} = P_i - P_o = \frac{4\sigma_s}{R} \quad (2.32)$$



Hình 2.22 Sơ đồ vật thể tự do của một nửa giọt lỏng và bong bóng

trong đó P_i và P_o là áp suất bên trong và bên ngoài giọt lỏng hoặc bong bóng. Khi giọt lỏng hoặc bong bóng ở trong khí quyển thì P_o là áp suất khí quyển. Hệ số nhân 2 trong phương trình cân bằng lực cho bong bóng là do vỏ bong bóng là một màng mỏng với hai bề mặt thoáng (bề mặt bên trong và bên ngoài).

Áp suất dư trong giọt lỏng (hoặc bong bóng) cũng có thể được xác định bằng cách xem xét một sự gia tăng bán kính của giọt do bổ sung một khối lượng chất lỏng và giải thích sức căng bề mặt như là sự gia tăng năng lượng bề mặt trên một đơn vị diện tích. Khi đó, sự gia tăng năng lượng bề mặt của giọt lỏng trong quá trình nở rộng là:

$$\delta W_{bm} = \sigma_s dA = \sigma_s d(4\pi R^2) = 8\pi R \sigma_s dR$$

Công thức hiện do quá trình dẫn nở được tính như sau:

$$\delta W_{n\acute{o}} = F dR = (\Delta P A) dR = 4\pi R^2 \Delta P dR$$

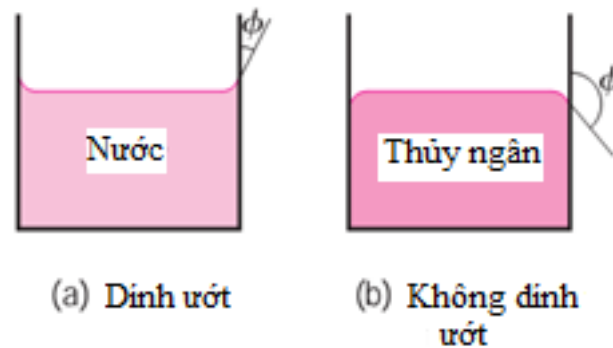
So sánh 2 biểu thức sẽ nhận được: $\Delta P_{gi\acute{o}t} = 2\sigma_s/R$ chính là biểu thức nhận được từ phương trình (2.31). Từ đó thấy rằng áp suất dư trong giọt lỏng hoặc bong bóng tỷ lệ nghịch với bán kính.

2.8.2. Hiệu ứng mao dẫn

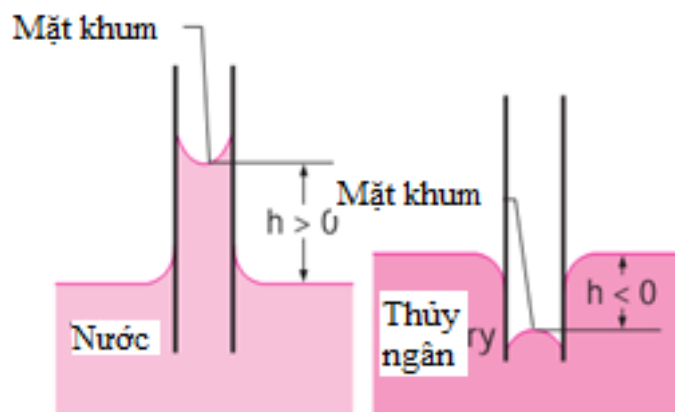
Một hệ quả thú vị của sức căng bề mặt là hiệu ứng mao dẫn, đó là sự leo lên hay tụt xuống của một chất lỏng trong một ống đường kính nhỏ. Các ống đường kính nhỏ hoặc kênh hẹp còn được gọi là *mao mạch*. Sự leo lên của dầu hỏa trong bậc bông từ bầu chứa dầu của đèn dầu để duy trì ngọn lửa là do hiệu ứng mao dẫn. Các hiệu ứng mao dẫn cũng góp phần cho việc dẫn nước trong thân cây. Bề mặt thoáng có dạng đường cong của một chất lỏng trong một ống mao dẫn được gọi là *mặt khum* (meniscus) (Hình 2.24).

Chúng ta thường quan sát thấy mép nước trong một cốc thủy tinh dâng nhẹ xung quanh thành cốc; nhưng điều ngược lại xảy ra đối với thủy ngân: mép thủy ngân hơi hạ xuống ở nơi tiếp xúc với thành cốc (Hình 2.23). Hiện tượng này được phân biệt bằng khái niệm dính ướt và không dính ướt; chúng ta nói rằng nước dính ướt mặt kính còn thủy ngân thì không. Độ lớn của hiệu ứng mao dẫn được định lượng bằng góc tiếp xúc (hoặc góc ướt) ϕ , được định nghĩa là góc giữa tiếp tuyến của bề mặt chất lỏng và bề mặt rắn tại điểm tiếp xúc. Sức căng bề mặt tác dụng dọc theo đường tiếp tuyến này và hướng về phía bề mặt rắn. Một chất lỏng được cho là dính ướt bề mặt khi $\phi < 90^\circ$ và không dính ướt bề mặt khi $\phi > 90^\circ$. Trong không khí, góc tiếp xúc của nước (và hầu hết các chất lỏng hữu cơ khác) với mặt kính gần như bằng không, $\phi \cong 0^\circ$. Do đó, trong một ống thủy tinh sức căng bề mặt sẽ kéo nước lên xung quanh theo chu vi của ống. Nước sẽ dâng lên trong ống cho đến khi trọng lượng của chất lỏng trong ống ở trên mực nước trong bình chứa cân bằng với lực căng bề mặt. Góc tiếp xúc cho thủy ngân-kính là 130° và là 26° cho dầu hỏa-kính trong không khí. Lưu ý rằng các góc tiếp xúc, nói chung, là khác nhau trong các môi trường khác nhau (chẳng hạn như một loại khí hoặc chất lỏng khác thay cho không khí).

Hiện tượng hiệu ứng mao dẫn có thể được giải thích trên quan điểm vi mô bằng cách xem xét các lực *cố kết* (cohesive) (lực giữa các phân tử giống nhau, như nước và nước) và các lực *dính kết* (adhesive) (lực giữa các phân tử khác nhau, chẳng hạn như nước và thủy tinh). Các phân tử chất lỏng tại giao diện rắn-lỏng phải chịu cả hai lực: lực cố kết bởi các phân tử chất lỏng khác và lực dính kết của các phân tử chất rắn. Độ lớn tương đối của các lực lượng này sẽ xác định liệu chất lỏng có làm ướt bề mặt rắn hay không. Rõ ràng rằng các phân tử nước bị hút mạnh mẽ hơn bởi các phân tử thủy tinh hơn là các phân tử nước khác, và do đó nước có xu hướng dâng lên cùng với bề mặt kính. Điều ngược lại xảy ra đối với thủy ngân và điều này làm cho bề mặt thủy ngân gần bức tường thủy tinh bị tụt xuống (Hình 2.24).



Hình 2.23 Góc tiếp xúc cho chất lỏng dính ướt và không dính ướt



Hình 2.24: Sự leo lên của nước và tụt xuống của thủy ngân trong ống mao dẫn thủy tinh

Độ lớn của sự dâng mao dẫn trong một ống tròn có thể được xác định từ phương trình cân bằng lực trên cột chất lỏng hình trụ có chiều cao h trong ống (Hình. 2.25). Phần dưới của cột chất lỏng là có cùng cao độ như bề mặt tự do của bình chứa và ở đó áp suất phải là áp suất khí quyển. Tương tự, mặt trên của cột chất lỏng cũng chịu áp suất khí quyển, do đó hai lực này là triệt tiêu lẫn nhau.

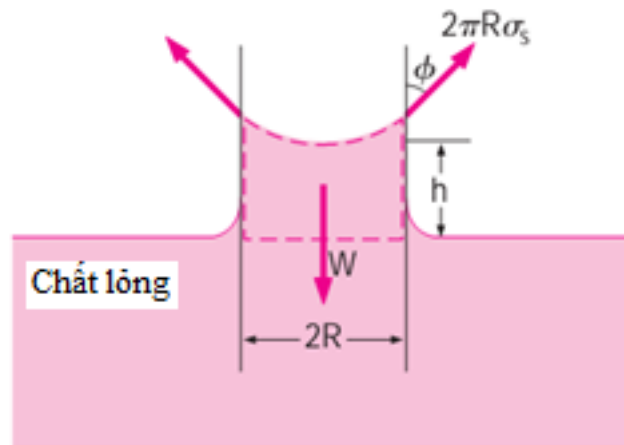
Trọng lượng của cột chất lỏng là: $W = mg = \rho Vg = \rho g(\pi R^2 h)$

Thành phần thẳng đứng của lực căng bề mặt là: $W=F_{\text{bề mặt}} \rightarrow \rho g(\pi R^2 h)=2\pi R\sigma_s \cos\phi$

Hai lực này cân bằng, từ đó:

$$\text{Cột dâng mao dẫn: } h = \frac{2\sigma_s}{\rho g R} \cos\phi \quad (R=\text{const}) \quad (2.33)$$

Biểu thức này cũng đúng cho chất lỏng không dính ướt (như thủy ngân trong thủy tinh). Trong trường hợp này $\phi > 90^\circ$ và do đó $\cos(\phi) < 0$, làm cho h có giá trị âm. Điều đó tương ứng với việc cột chất lỏng tụt xuống trong ống mao dẫn (Hình 2.25). Lưu ý rằng sự gia tăng mao dẫn là tỉ lệ nghịch với bán kính của ống. Do đó, các ống nhỏ hơn càng làm tăng (hoặc giảm) cột chất lỏng trong ống. Trong thực tế, hiệu ứng mao dẫn thường là không đáng kể trong các ống có đường kính lớn hơn 1 cm. Khi đo áp suất bằng các áp kế và khí áp, cần sử dụng đường ống đủ lớn để giảm thiểu hiệu ứng mao dẫn. Sự gia tăng mao dẫn cũng là tỉ lệ nghịch với mật độ của chất lỏng. Do đó, chất lỏng nhẹ có mức dâng mao dẫn lớn hơn. Cuối cùng, cần lưu ý rằng phương trình (2.33) thu nhận được với các ống có đường kính không đổi, vì vậy không sử dụng được cho các trường hợp ống có thiết diện thay đổi.



Hình 2.25: Các lực tác dụng lên cột chất lỏng trong ống mao dẫn

2.8.3. Ví dụ 2.5: Cột nước dâng trong ống mao dẫn

Một ống thủy tinh đường kính 0.6 mm được nhúng vào trong một cốc nước ở 20 °C. Xác định cột dâng mao dẫn của nước trong ống.

Vấn đề: Cần xác định cột nước dâng do hiệu ứng mao dẫn trong ống có đường kính nhỏ.

Giả thiết: (1) Không có tạp chất trong nước và bề mặt của ống kính không bị nhiễm bẩn; (2) Thí nghiệm được tiến hành trong không khí quyển.

Tính chất: Sức căng bề mặt của nước ở 20 °C là 0.073 N/m (Bảng 2.3). Góc tiếp xúc của nước với kính là 0°. Mật độ của nước là 1000 kg/m³.

Phân tích: Cột nước dâng mao dẫn được xác định trực tiếp từ biểu thức (2.15) bằng cách thay thế các giá trị đã cho, từ đó:

$$h = \frac{2\sigma_s}{\rho g R} \cos \phi = \frac{2 * 0.073 \left(\frac{N}{m} \right)}{1000 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * 9.81 \left(\frac{m}{s^2} \right) * 0.3 * 10^{-3} (m)} \cos 0^\circ = 0.050m = 5.0cm$$

Vậy, cột nước dâng lên trong ống là 5 cm trên mặt thoáng chất lỏng ở trong cốc.

Thảo luận: Lưu ý rằng nếu đường kính ống là 1 cm, cột nước dâng sẽ là 0.3 mm, quá nhỏ để nhận thấy bằng mắt. Trên thực tế, cột dâng mao dẫn trong một ống đường kính lớn chỉ xảy ra ở vành rìa của ống. Mặt chất lỏng ở trung tâm hầu như không bị dâng lên. Vì vậy, hiệu ứng mao dẫn có thể được bỏ qua cho ống có đường kính lớn.

TỔNG KẾT

Trong chương này một số tính chất, đặc trưng khác nhau của dòng chảy thường được sử dụng trong Thủy khí động lực học đã được thảo luận. Các tính chất phụ thuộc vào khối lượng của một hệ thống được gọi là quãng tính và những tính chất khác được gọi là cường tính. Mật độ là khối lượng trên đơn vị thể tích, thể tích riêng là thể tích trên một đơn vị khối lượng. Tỷ trọng riêng được định nghĩa là tỷ số giữa mật độ của một chất với mật độ của nước ở 4 °C:

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

Phương trình trạng thái của khí lý tưởng có dạng:

$$P = \rho RT$$

trong đó P là áp suất tuyệt đối, T là nhiệt độ tuyệt đối, ρ là mật độ và R là hằng số khí.

Tại một nhiệt độ nhất định, áp suất mà tại đó một chất tinh khiết chuyển pha được gọi là áp suất bão hòa. Đối với quá trình chuyển pha giữa pha lỏng và hơi của một chất tinh khiết, áp suất bão hòa được gọi là áp suất hóa hơi P_v . Bọt hơi hình thành ở các vùng áp suất thấp trong một chất lỏng (hiện tượng xâm thực) bị vỡ khi bị cuốn khỏi vùng áp suất thấp tạo ra sóng áp suất cao có sức phá hoại lớn.

Năng lượng có thể tồn tại ở nhiều hình thức khác nhau. Tổng số các loại năng lượng thành phần được gọi là năng lượng toàn phần E (mật độ năng lượng e là năng lượng toàn phần E trên một vị khối lượng) của một hệ thống. Tổng tất cả các dạng năng lượng vi mô được gọi là năng lượng nội tại (nội năng) U của một

hệ thống. Năng lượng mà một hệ thống sở hữu là kết quả chuyển động của nó trong một hệ quy chiếu được gọi là động năng, động năng trên một đơn vị khối lượng là $k_e = V^2/2$. Năng lượng mà một hệ thống sở hữu là kết quả của độ cao của nó trong một trường hấp dẫn là được gọi là thế năng, thể hiện trên một đơn vị khối lượng là $p_e = gz$.

Hiệu ứng nén được trong chất lỏng thể hiện qua mô đun đàn hồi κ hay hệ số nén $\alpha=1/\kappa$, trong đó κ được xác định bởi:

$$\kappa = -v \left(\frac{\partial P}{\partial v} \right)_T = \rho \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T \cong - \frac{\Delta P}{\Delta v/v}$$

Tính chất đại diện cho sự thay đổi mật độ của chất lỏng theo nhiệt độ ở áp suất không đổi là hệ số giãn nở thể tích β , được định nghĩa bởi:

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \cong - \frac{\Delta \rho/\rho}{\Delta T}$$

Độ nhớt của chất lỏng là thước đo chống biến dạng bên trong chất lỏng. Ứng suất cắt là giá trị thành phần lực tiếp tuyến trên một đơn vị diện tích và được biểu diễn trong dòng chảy cắt giữa 2 tấm phẳng song song như sau:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

trong đó μ là hệ số nhớt động lực hoặc độ nhớt của chất lỏng, u là thành phần vận tốc theo hướng dòng chảy, còn y là hướng vuông góc với hướng dòng chảy. Các chất lỏng tuân theo mối quan hệ tuyến tính trên được gọi là chất lỏng Newton. Tỷ lệ độ nhớt động lực và mật độ được gọi là độ nhớt động học ν .

Hiệu ứng kéo các phân tử chất lỏng trên mặt phân cách gây ra bởi lực hút của các phân tử trên một đơn vị chiều dài được gọi là sức căng bề mặt σ_s . Chênh lệch áp suất ΔP trên bề mặt một giọt lỏng hoặc bong bóng hình cầu được cho bởi:

$$\Delta P_{giot} = P_i - P_o = \frac{2\sigma_s}{R}$$

Giọt lỏng:

$$\Delta P_{bong} = P_i - P_o = \frac{4\sigma_s}{R}$$

Bong bóng:

trong đó P_i và P_o là áp suất bên trong và bên ngoài giọt lỏng hoặc bong bóng. Sự dâng lên hay tụt xuống của một chất lỏng trong một ống có đường kính nhỏ do sức căng bề mặt được gọi là hiệu ứng mao dẫn. Chiều cao cột chất lỏng mao dẫn được xác định bởi: $h = \frac{2\sigma_s}{\rho g R} \cos \phi$. Trong đó ϕ là góc tiếp xúc. Cột dâng mao

dẫn tỉ lệ nghịch với bán kính của ống và là không đáng kể cho các ống có đường kính lớn hơn khoảng 1 cm.

Mật độ và độ nhớt là hai tính chất cơ bản nhất của chất lỏng, chúng được sử dụng rộng rãi trong các chương tiếp theo.

Các câu hỏi và bài tập

Mật độ và tỷ trọng riêng

- 2.1LT Trình bày sự khác nhau giữa tính chất quảng tính và tính chất cường tính
- 2.2LT Tỷ trọng riêng là gì? Mối liên hệ của tỷ trọng riêng với mật độ?
- 2.3LT Với điều kiện nào khí thực có thể được xem như là khí lý tưởng?
- 2.4LT Chỉ ra sự khác nhau giữa hằng số khí R và hằng số khí phổ quát R_u . Chúng liên hệ với nhau như thế nào?
- 2.5 Một quả bóng bay hình cầu đường kính 6m chứa đầy hê li ở nhiệt độ 20°C và áp suất 200 kPa. Xác định số mole và khối lượng của hê li trong bóng bay. *Đáp số: 9.28 kmol, 37.2 kg*
- 2.6 Áp suất trong lốp ô tô phụ thuộc vào nhiệt độ của không khí trong lốp. Khi nhiệt độ không khí 25°C , áp suất là 210 kPa. Nếu thể tích của lốp xe là 0.025 m^3 , xác định sự gia tăng áp suất trong lốp khi nhiệt độ không khí trong lốp tăng lên đến 50°C . Ngoài ra, xác định khối lượng của không khí phải được xả ra để khôi phục lại áp lực giá trị ban đầu của nó ở nhiệt độ này. Cho áp suất khí quyển là 100 kPa.
- 2.7E Không khí trong lốp xe ô tô có thể tích 0.53 ft^3 là ở 90°F và 20 psig. Xác định lượng không khí phải được bổ sung để tăng áp lực lên giá trị cần thiết 30 psig. Cho biết áp suất khí quyển là 14.6 psia và nhiệt độ và thể tích vẫn không đổi. *Đáp số: 0.0260 lbm*
- 2.8E Một bể cứng chứa 20 lbm không khí ở 20 psia và 70°F . Không khí được bổ sung vào bể cho đến khi áp suất và nhiệt độ tăng lên 35 psia và 90°F , tương ứng. Xác định lượng không khí bổ sung vào bể. *Đáp số: 13.7 lbm*

Áp suất hơi và xâm thực

- 2.9LT Áp suất hóa hơi là gì? Nó liên hệ với áp suất bão hòa như thế nào?
- 2.10LT Có phải nước sôi ở nhiệt độ cao hơn dưới áp suất cao hơn? Giải thích điều này.
- 2.11LT Nếu áp suất của một chất tăng lên trong quá trình sôi, nhiệt độ có tăng theo không hay giữ không đổi? Tại sao?
- 2.12LT Hiện tượng xâm thực là gì? Cái gì sinh ra nó?
- 2.13 Trong hệ thống đường ống nhiệt độ nước không vượt quá 40°C . Xác định áp suất tối thiểu để tránh xâm thực.
- 2.14 Một chân vịt tàu thủy hoạt động ở trong nước 20°C có áp suất ở mép cánh hạ xuống 2 kPa ở vận tốc cao. Xác định xem chân vịt có khả năng bị xâm thực không.

2.15 Một cái bơm vận chuyển nước lên bề trên cao. Nếu nhiệt độ nước là 25°C , xác định áp suất thấp nhất để xâm thực không xảy ra.

Năng lượng và nhiệt dung riêng

2.16LT Sự khác nhau giữa dạng năng lượng vĩ mô và vi mô là như thế nào?

2.17LT Năng lượng toàn phần là gì? Xác định các dạng năng lượng khác nhau tạo thành năng lượng toàn phần.

2.18LT Liệt kê danh sách các dạng năng lượng cấu thành nội năng của một hệ thống.

2.19LT Khái niệm nhiệt lượng (heat), nội năng và nhiệt năng (thermal energy) có quan hệ với nhau như thế nào?

2.20LT Năng lượng hay công dòng chảy là gì? Chất lỏng ở trạng thái tĩnh có sở hữu năng lượng dòng chảy không?

2.21LT So sánh năng lượng chất lỏng trong dòng chảy và năng lượng trong trạng thái tĩnh như thế nào? Gọi tên các thành phần năng lượng trong từng trường hợp.

2.22LT Sử dụng khái niệm nhiệt dung riêng trung bình giải thích nội năng của khí lý tưởng và các chất lỏng không nén được thay đổi như thế nào.

2.23LT Sử dụng khái niệm nhiệt dung riêng trung bình giải thích enthalpy của khí lý tưởng và các chất lỏng không nén được thay đổi như thế nào.

Hệ số nén

2.24LT Nêu ý nghĩa vật lý của hệ số nén của chất lỏng? Nó khác với mô đun đàn hồi như thế nào?

2.25LT Nêu ý nghĩa vật lý của hệ số giãn nở thể tích? Nó khác với hệ số nén như thế nào?

2.26LT Hệ số nén của chất lỏng có thể có giá trị âm không? Còn hệ số giãn nở thể tích thì như thế nào?

2.27 Quan sát thấy rằng mật độ của một chất khí lý tưởng tăng 10% khi bị nén đẳng nhiệt từ 10 đến 11 atm. Xác định phần trăm tăng của mật độ nếu bị nén từ 100 đến 101 atm.

2.28 Sử dụng định nghĩa hệ số giãn nở thể tích và biểu thức chứng minh $\beta=1/T$ cho khí lý tưởng và chỉ ra rằng phần trăm tăng của thể tích riêng của khí lý tưởng trong quá trình đẳng áp bằng phần trăm tăng của nhiệt độ tuyệt đối.

2.29 Nước ở áp suất 1 atm bị nén đẳng nhiệt đến áp suất 800 atm. Xác định phần trăm tăng mật độ. Hệ số nén đẳng nhiệt của nước là $4.80 \times 10^{-5} \text{ atm}^{-1}$.

2.30 Nước ở nhiệt độ 15°C và áp suất 1 atm được đun nóng lên 100°C ở áp suất không đổi. Sử dụng số liệu về hệ số giãn nở thể tích xác định thay đổi mật độ của nước. *Đáp số: -38.7 kg/m^3*

2.31 Chất lỏng làm lạnh bão hòa refrigerant-134a ở nhiệt độ 10°C bị làm lạnh đến 0°C ở áp suất không đổi. Sử dụng số liệu về hệ số giãn nở thể tích xác định thay đổi mật độ của chất làm lạnh.

2.32 Một bình chứa đầy nước ở nhiệt độ 20°C . Vật liệu làm vỏ bình có thể chịu được sự giãn nở thể tích là 2%. Xác định nhiệt độ tối đa để bình không bị vỡ.

2.33 Làm lại bài 2.35 với khả năng chịu giãn nở là 1%.

2.34 Mật độ nước biển ở mặt thoáng với áp suất 98 kPa là xấp xỉ 1030 kg/m^3 . Với mô đun đàn hồi gộp là $2.34 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ và sự biến đổi áp suất theo chiều sâu z theo phương trình $dP = \rho g dz$, hãy xác định mật độ và áp suất tại độ sâu 2500 m. Bỏ qua ảnh hưởng của nhiệt độ.

Độ nhớt

2.35 LT Độ nhớt là gì? Cái gì là nguyên nhân gây ra hiệu ứng nhớt trong chất lỏng và trong chất khí? Chất lỏng hay chất khí có độ nhớt động lực lớn hơn?

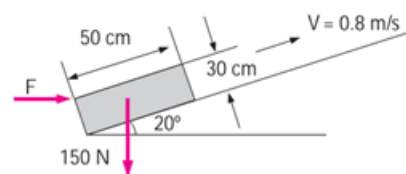
2.36 LT Thế nào là chất lỏng Newton? Nước có là một chất lỏng Newton không?

2.37LT Thả 2 giọt dầu và nước giống hệt nhau trong một bình chứa, giọt nào sẽ rơi xuống đáy trước? Tại sao?

2.38LT Độ nhớt động lực của (a) chất lỏng và (b) chất khí thay đổi như thế nào theo nhiệt độ?

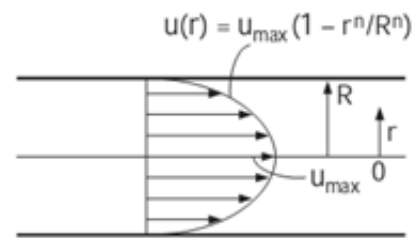
2.39LT Độ nhớt động học của (a) chất lỏng và (b) chất khí thay đổi như thế nào theo áp suất?

2.40 Một khối hình hộp kích thước 50 cm x 30 cm x 20 cm có trọng lượng 150 N chuyển động với vận tốc không đổi 0.8 m/s trên mặt phẳng nằm nghiêng với hệ số ma sát 0.27 (Hình P2.40). (a) Xác định độ lớn lực đẩy F cần tác dụng theo hướng nằm ngang. (b) Nếu một lớp dầu có độ dày 0.4-mm có độ nhớt động lực là 0.012 Pa.s nằm giữa khối và mặt phẳng nằm nghiêng, xác định phần trăm giảm lực đẩy cần thiết.



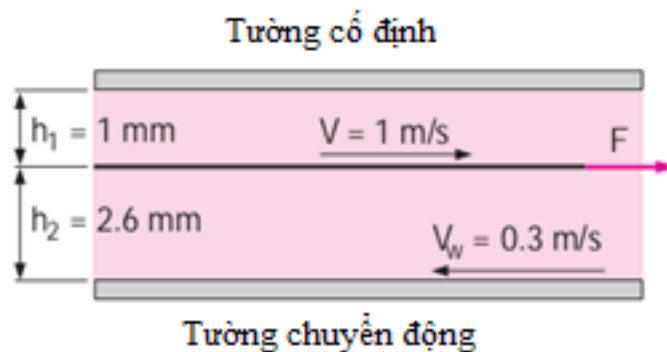
Hình P2.40

2.41 Xem xét dòng chảy của một chất lỏng có độ nhớt μ qua một ống tròn. Phân bố vận tốc trong đường ống là $u(r) = U_{max}(1 - r^n/R^n)$, ở đây U_{max} là vận tốc cực đại của dòng chảy ở đường tâm; r là khoảng cách trên bán kính từ đường tâm; $u(r)$ là vận tốc dòng chảy tại khoảng cách r . Xây dựng mối quan hệ của lực cản tác động lên thành ống bởi chất lỏng theo hướng dòng chảy trên một đơn vị chiều dài của ống (Hình P2.41).



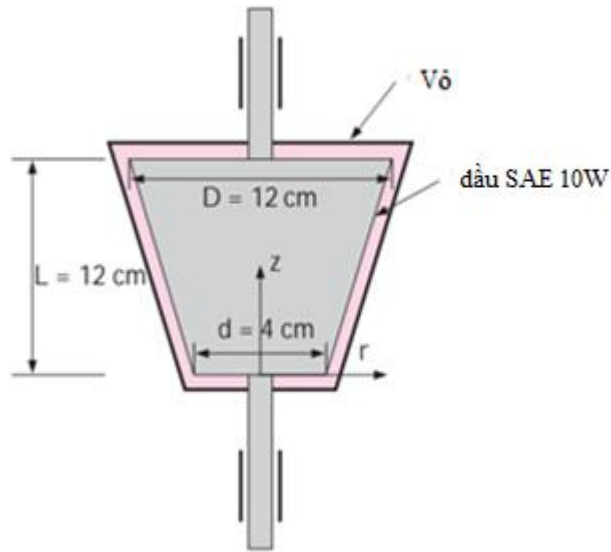
Hình P2.41

2.42 Một tấm phẳng mỏng kích thước 20 cm x 20 cm được kéo với vận tốc 1 m/s theo chiều nằm ngang trong lớp dầu dày 3.6 mm kẹp giữa hai tấm phẳng, một tấm cố định còn tấm khác di chuyển với vận tốc không đổi là 0.3 m/s, như thể hiện trong Hình P2.42. Độ nhớt động lực của dầu là 0.027 Pa.s. Giả sử vận tốc trong lớp dầu thay đổi tuyến tính, (a) Vẽ phân bố vận tốc và tìm vị trí có vận tốc bằng không; (b) xác định lực cần phải áp dụng trên tấm phẳng để duy trì chuyển động này.



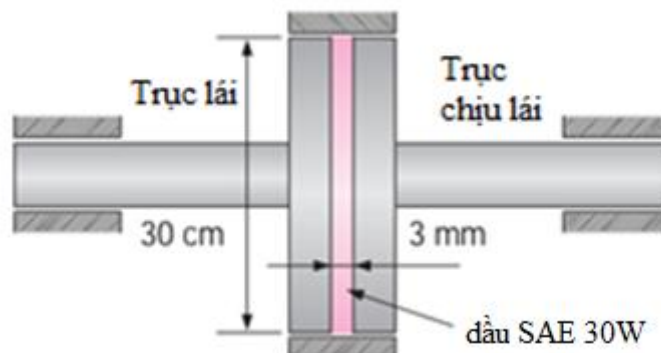
Hình P2.42

2.43 Một trục hình trụ nón cắt quay với tốc độ góc không đổi là 200 rad/s trong một thùng chứa đầy dầu SAE 10W ở 20 °C ($\mu=0.1$ Pa.s), như thể hiện trong Hình P2.43. Nếu độ dày của màng dầu xung quanh là 1.2 mm, xác định công suất cần để duy trì chuyển động này. Xác định độ giảm công suất cần thiết khi nhiệt độ dầu tăng lên đến 80 °C ($\mu= 0.0078$ Pa.s).



Hình P2.43

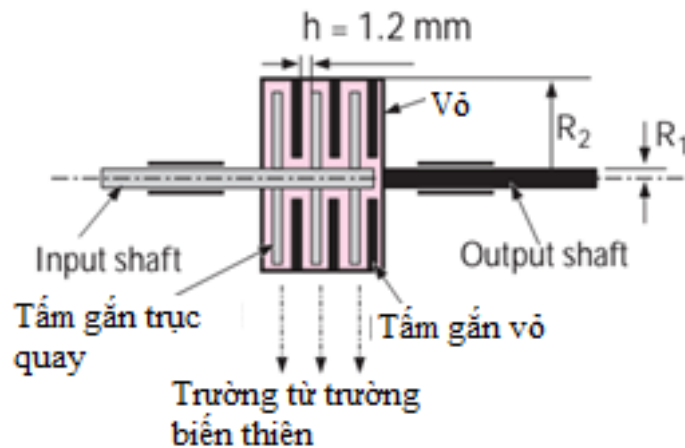
2.44 Hệ thống ly hợp hình P2.44 được sử dụng để truyền mô-men xoắn qua 3 mm màng dầu dày với $\mu=0.38$ N.s/m² giữa hai đĩa đường kính 30 cm giống hệt nhau. Khi trục lái quay với tốc độ 1450 rpm, trục chịu lái được quan sát quay với tốc độ 1398 rpm. Giả sử phân bố vận tốc tuyến tính trong màng dầu, xác định mô-men xoắn được truyền.



Hình P2.44

2.45 Độ nhớt của một số chất lỏng thay đổi khi một điện trường mạnh được áp dụng trên chúng. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng *lưu biến điện* (ER) (electrorheological), chất lỏng có biểu hiện hành vi như vậy được gọi là chất lỏng ER. Mô hình ứng suất cắt của chất dẻo Bingham thể hiện qua công thức $\tau=\tau_y+\mu(du/dy)$ được sử dụng rộng rãi để mô tả hành vi của chất lỏng ER vì tính đơn giản của nó. Một trong những áp dụng hứa hẹn nhất của chất lỏng ER là ly hợp ER. Một điển hình là đa ly hợp ER bao gồm một dây đĩa thép số lượng N gắn liền với trục quay đầu vào có khoảng cách bằng nhau với bán kính trong R1 và bán kính ngoài R2. Khoảng cách h giữa các đĩa song song được làm đầy một

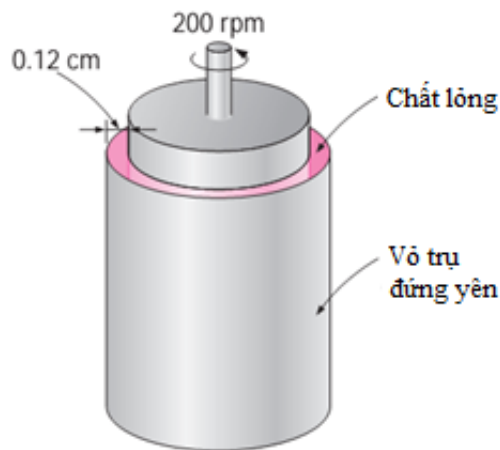
chất lỏng nhớt. (a) Tìm một mối biểu thức tính mô-men xoắn được tạo ra bởi ly hợp khi trục đầu ra quay ổn định; (b) tính toán mô-men xoắn cho một ly hợp ER với $N=11$ cho $R_1=50$ mm, $R_2=200$ mm và $\dot{\gamma}=2400$ rpm (input shaft), nếu chất lỏng là SAE 10 với $\mu=0.1$ Pa.s, $\tau_y=2.5$ kPa, và $h=1.2$ mm (Hình P2.45). *Đáp số: (b) 2060 N.m*



Hình P2.45

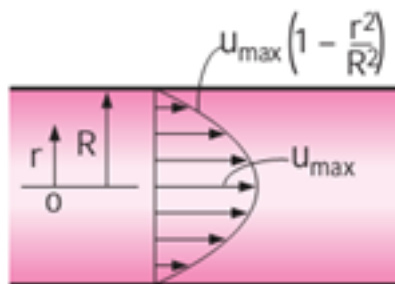
2.46 Độ nhớt của một số chất lỏng được gọi là *lưu biến từ* (magnetorheological) (MR) thay đổi khi một từ trường được áp dụng. Chất lỏng như vậy liên quan đến *vi hạt cảm biến từ* lơ lửng trong chất lỏng và rất thích hợp để sử dụng trong bộ ly hợp thủy lực có điều khiển. Xem Hình P2.45. Các chất lỏng MR có thể có độ nhớt cao hơn nhiều so với các chất lỏng ER và thường biểu hiện hành vi *cắt loãng* (shear-thinning) trong đó độ nhớt của chất lỏng giảm khi cắt lực tăng. Hành vi này được gọi là hành vi *giả dẻo* (pseudoplastic) được biểu diễn theo mô hình cấu thể (constitutive model) Herschel-Bulkley bởi $\tau=\tau_y+K(du/dy)^m$. Ở đây τ là ứng suất cắt, τ_y là ứng suất chảy, K là hệ số tương thích và m là hệ số mũ. Đối với một chất lỏng Herschel-Bulkley với $\tau_y=900$ Pa, $K=58$ Pa.s^m và $m=0.82$, (a) tìm thấy một mối quan hệ đối với các mô-men xoắn truyền qua một ly hợp MR cho N tấm gắn với trục đầu vào khi trục đầu vào được quay với tốc độ góc của v trong khi trục ra là ổn định; (b) tính toán mô-men xoắn truyền bởi một ly hợp như vậy với $N=11$ tấm cho $R_1=50$ mm, $R_2=200$ mm, $\dot{\gamma}=2400$ rpm, và $h=1.2$ mm.

2.47 Độ nhớt của chất lỏng là được đo bằng nhớt kế với hai trụ đồng tâm dài 75 cm. Đường kính ngoài của trụ bên trong là 15 cm, khoảng cách giữa hai trụ là 0.12 cm. Trụ bên trong chuyển động với vận tốc góc 200 rpm và mô-men xoắn đo được 0.8 N.m. Xác định độ nhớt của chất lỏng (Hình P2.47).



Hình P2.47

2.48 Trong vùng đủ xa lối vào, dòng chảy trong ống tròn là một chiều và vận tốc dòng chảy tầng được cho bởi $u(r) = U_{max}(1 - r^2/R^2)$, trong đó R là bán kính của đường ống, r là khoảng cách trên mặt cắt hình tròn đến tâm của đường ống, U_{max} là vận tốc lớn nhất tại tâm. (a) Thu nhận biểu thức lực cản được tác dụng bởi chất lỏng trên một phần của đường ống có chiều dài L ; (b) Tính giá trị của lực kéo cho dòng chảy nước ở 20 °C với $R=0.08$ m, $L=15$ m, $U_{max}=3$ m/s và $\mu=0.0010$ kg/m.s.



Hình P2.48

2.49 Làm lại bài 2.48 với $U_{max}=5$ m/s. Đáp số: (b) 0.942 N

Sức căng bề mặt và hiệu ứng mao dẫn

2.50LT Sức căng bề mặt là gì? Nguyên nhân gây ra sức căng bề mặt? Tại sao là sức căng bề mặt cũng được gọi là năng lượng bề mặt?

2.51LT Xem xét một bong bóng xà phòng. Áp suất bên trong bong bóng là cao hơn hoặc thấp hơn so với áp suất bên ngoài?

2.52LT Hiệu ứng mao dẫn là gì? Nguyên nhân gây ra nó? Góc tiếp xúc ảnh hưởng tới hiệu ứng mao dẫn như thế nào?

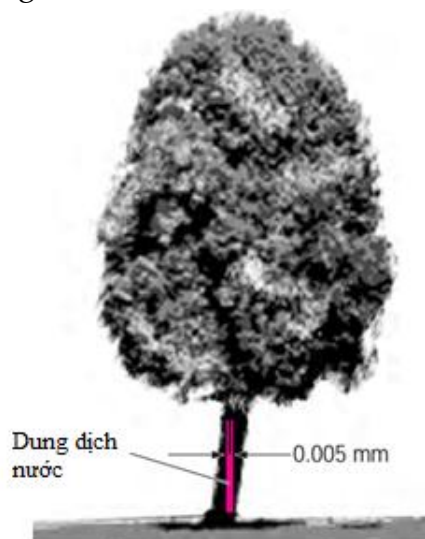
2.53LT Một ống đường kính nhỏ được nhúng vào một chất lỏng có góc tiếp xúc là 110 °. Cột chất lỏng trong ống sẽ tăng hay giảm? Giải thích.

2.54LT Cột mao dẫn tăng cao hơn trong các ống có đường kính nhỏ hơn hay lớn hơn?

2.55 Một ống đường kính 1.9 mm được nhúng vào một chất lỏng có mật độ là 960 kg/m^3 và quan sát thấy chất lỏng dâng lên 5 mm trong ống, cho biết góc tiếp xúc là 15° . Xác định sức căng bề mặt của chất lỏng.

2.56 Xác định áp suất dư bên trong một bong bóng xà phòng có đường kính (a) 0.2 cm và (b) 5 cm ở 20°C .

2.57 Các chất dinh dưỡng hòa tan trong nước được đưa lên phần trên của cây trồng bằng các ống nhỏ một phần do hiệu ứng mao dẫn. Xác định độ cao dung dịch nước sẽ dâng trong thân cây với các mao mạch có đường kính 0.005 mm do hiệu ứng mao dẫn. Giả thiết dung dịch có tính chất của nước ở 20°C với góc tiếp xúc 15° . *Đáp số: 5.75 m*



Hình P2.57

2.58 Sức căng bề mặt của chất lỏng được đo bằng màng mỏng chất lỏng trên một khung dây hình chữ U với cạnh di chuyển có chiều dài 8 cm. Nếu lực cần thiết để di chuyển dây là 0.012 N, xác định sức căng bề mặt của chất lỏng này trong không khí.

2.59 Có thể trái với những suy nghĩ của mọi người, một quả cầu thép hoàn toàn có thể nổi trên mặt nước do ảnh hưởng của sức căng bề mặt. Xác định đường kính tối đa của một quả bóng thép sẽ nổi trên mặt nước ở 20°C . Còn quả bóng nhôm thì sao? Lấy mật độ của quả bóng thép và nhôm là 7800 kg/m^3 và 2700 kg/m^3 , tương ứng.

Các bài ôn tập

2.60 Áp suất tuyệt đối của một lốp xe ô tô đo được là 290 kPa trước một chuyến đi và 310 kPa sau chuyến đi. Giả sử thể tích của lốp vẫn không đổi là 0.022 m^3 , xác định phần trăm tăng nhiệt độ tuyệt đối của không khí trong lốp.

2.61 Một bể 20 m^3 chứa nitơ ở 25°C và 800 kPa. Một số nitơ được thoát ra ngoài cho đến khi áp suất trong bình giảm xuống 600 kPa. Nếu nhiệt độ vào thời điểm này là 20°C , xác định lượng nitơ đã thoát ra. *Đáp số: 42.9 kg*

2.62 Hỗn hợp chất lỏng với các hạt rắn lơ lửng thường được đặc trưng bởi các tỷ phần theo khối lượng $C_{s,mass}=m_s/m_m$ hoặc theo thể tích $C_{s,vol}=V_s/V_m$ trong đó m là

khối lượng và V là thể tích. Các chỉ số s và m chỉ chất rắn và hỗn hợp, tương ứng. Xây dựng biểu thức cho tỷ trọng riêng của hỗn hợp theo $C_{s,mass}$ và $C_{s,vol}$.

2.63 Các tỷ trọng riêng của chất rắn và chất lỏng mang hạt rắn thường là đã biết, tuy nhiên trọng lượng riêng của bùn (chất lỏng mang hạt rắn) phụ thuộc vào nồng độ của các hạt rắn. Chỉ ra rằng tỷ trọng riêng của bùn nước có thể được biểu diễn bởi tỷ trọng riêng SG của hạt rắn và nồng độ khối lượng của các hạt rắn

lơ lửng $C_{s,mass}$ như sau:
$$SG_m = \frac{1}{1 + C_{s,mass}(1/SG_s - 1)}$$

2.64 Một bình kín một phần chứa nước ở 60°C . Nếu hút hết không khí trong bình, xác định áp suất tuyệt đối trong phần bình không chứa nước. Giả thiết nhiệt độ không thay đổi.

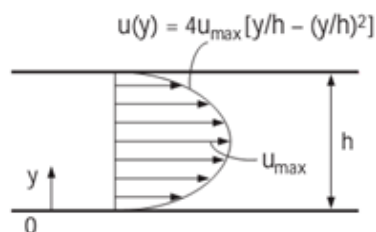
2.65 Biến thiên độ nhớt động lực của nước theo nhiệt độ tuyệt đối cho trong bảng sau:

T, K	$\mu, \text{Pa} \cdot \text{s}$
273.15	1.787×10^{-3}
278.15	1.519×10^{-3}
283.15	1.307×10^{-3}
293.15	1.002×10^{-3}
303.15	7.975×10^{-4}
313.15	6.529×10^{-4}
333.15	4.665×10^{-4}
353.15	3.547×10^{-4}
373.15	2.828×10^{-4}

Sử dụng dữ liệu trong bảng để xây dựng mối quan hệ của độ nhớt theo nhiệt độ tuyệt đối dưới dạng $\mu = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4$. Sử dụng quan hệ đã xây dựng dự đoán độ nhớt động lực của nước tại 50°C , mà tại đó giá trị đã cho là $5.468 \times 10^{-4} \text{Pa} \cdot \text{s}$.

So sánh kết quả với kết quả của phương trình Andrade, được đưa ra dạng $\mu = D \cdot e^{B/T}$, trong đó D và B là các hằng số được xác định bằng cách sử dụng dữ liệu từ bảng đã cho.

2.66 Xem xét dòng chảy tầng của một chất lỏng Newton có độ nhớt μ giữa hai tấm song song. Các dòng chảy là một chiều và vận tốc được cho là $u(y) = 4u_{max} [y/h - (y/h)^2]$, trong đó y là tọa độ thẳng đứng từ bề mặt đáy, h là khoảng cách giữa hai tấm, và u_{max} là vận tốc tối đa của dòng chảy tại mặt phẳng giữa. Xây dựng mối quan hệ với lực cản tác dụng lên cả hai tấm bởi chất lỏng theo hướng dòng chảy trên một đơn vị diện tích các tấm (Hình P2.66).



Hình P2.66

Chương 3. ÁP SUẤT VÀ TĨNH HỌC CHẤT LỎNG

Trong Chương này chúng ta thảo luận về các lực tác dụng bởi chất lỏng ở trạng thái tĩnh hoặc trong *chuyển động bó cứng* (rigid-body motion). Thông số quan trọng tạo ra các lực tác dụng bởi chất lỏng là *áp suất*. Áp suất được định nghĩa là lực pháp tuyến tác dụng bởi chất lỏng trên một đơn vị diện tích. Chúng ta bắt đầu chương này với những nội dung cụ thể về áp suất, bao gồm các khái niệm về *áp suất tuyệt đối*, *áp suất dư* và những nghiên cứu về sự biến thiên của áp suất theo độ sâu trong trường hấp dẫn, tìm hiểu về các dụng cụ đo áp suất như áp kế ống, phong vũ biểu và các thiết bị đo áp suất khác. Tiếp theo là những thảo luận về lực thủy tĩnh tác dụng lên vật ngập với bề mặt phẳng hoặc cong. Sau đó chúng ta xem xét về lực đẩy nổi tác dụng bởi chất lỏng lên vật chìm hoặc nổi và sự ổn định của các vật đó. Cuối cùng, chúng ta áp dụng định luật thứ hai của Newton để phân tích sự thay đổi của áp suất trong chất lỏng với gia tốc thẳng và gia tốc hướng tâm cho khối chất lỏng trong chuyển động bó cứng. Chương này sử dụng nhiều kiến thức cân bằng lực cho các vật trong trạng thái cân bằng tĩnh, do đó sinh viên sẽ cần ôn lại các kiến thức liên quan trong môn học Cơ học lý thuyết.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này, sinh viên sẽ có thể:

- Xác định sự thay đổi của áp suất trong chất lỏng ở trạng thái tĩnh
- Tính toán các lực tác dụng bởi một chất lỏng lên các bề mặt phẳng hoặc cong
- Tính toán phân bố áp suất trong chất lỏng chuyển động bó cứng với gia tốc thẳng hoặc gia tốc hướng tâm

3.1. Giới thiệu về tĩnh học chất lỏng

Tĩnh học chất lỏng xem xét các vấn đề liên quan đến chất lỏng ở trạng thái tĩnh. Các chất lỏng được xem xét ở đây có thể ở dạng khí hoặc dạng lỏng. Trong tĩnh học chất lỏng, không có chuyển động tương đối giữa các lớp chất lỏng, do đó không có ứng suất cắt (theo phương tiếp tuyến). Ứng suất duy nhất trong tĩnh học chất lỏng là ứng suất pháp (theo phương vuông góc), đó là *áp suất*. Các lực của chất lỏng ở trạng thái tĩnh tác dụng lên một bề mặt là vuông góc với bề mặt tại điểm tiếp xúc bởi vì không có chuyển động tương đối giữa chất lỏng và mặt rắn và do đó không có thành phần lực tiếp tuyến tác dụng song song với bề mặt.

Tĩnh học chất lỏng được ứng dụng để xác định các lực tác dụng lên vật thể nổi hoặc ngập trong chất lỏng và các lực sinh ra trong các thiết bị như máy ép thủy lực, kích thủy lực Các thiết kế của các hệ thống kỹ thuật như các đập nước, các bể chứa chất lỏng... đòi hỏi xác định các lực tác dụng lên bề mặt bằng cách

ứng dụng tĩnh học chất lỏng. Việc mô tả đầy đủ các lực thủy tĩnh tác động lên một bề mặt đòi hỏi việc xác định độ lớn, hướng và vị trí điểm đặt của áp lực.

3.2. Áp suất

Áp suất được định nghĩa là lực pháp tuyến tác dụng bởi chất lỏng trên một đơn vị diện tích. Chúng ta nói đến áp suất chỉ khi chúng ta làm việc với chất khí hoặc chất lỏng. Trong chất rắn, tương ứng với áp suất là ứng suất pháp tuyến. Áp suất có đơn vị là Newton trên mét vuông (N/m^2), được gọi là Pascal (Pa). Như vậy:

$$1Pa=1N/m^2$$

Đơn vị Pascal là quá nhỏ so với áp suất gặp trong thực tế. Vì vậy, các đơn vị khác như Kilopascal ($1kPa= 10^3Pa$) và Megapascal ($1 Mpa=10^6 Pa$) thường được sử dụng. Ngoài ra, ba đơn vị áp suất khác thường được sử dụng trong thực tế là bar, áp suất khí quyển tiêu chuẩn (atm, át một phe) và kilogram-lực (kgf) trên cm^2 . Chúng có các quan hệ với nhau như sau:

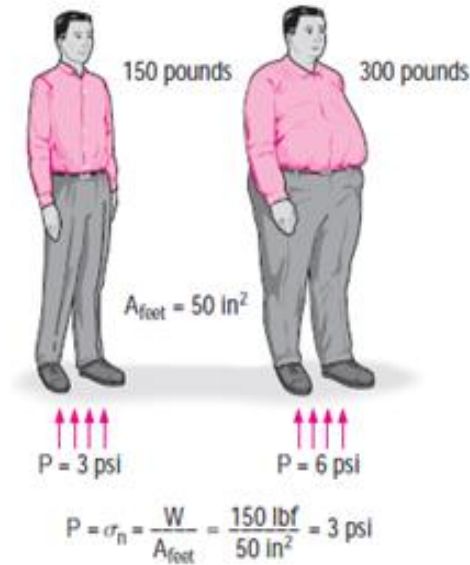
$$1 bar = 10^5 Pa = 0.1 MPa = 100kPa$$

$$1atm = 101325 Pa = 101.325 kPa = 1.01325 bar$$

$$1kgf/cm^2 = 9.807 N/cm^2 = 9.807 \times 10^4 N/m^2 = 9.807 \times 10^4 Pa = 0.9807 bar = 0.9679 atm$$

Có thể nhận thấy các đơn vị áp suất bar, atm và kgf/cm^2 là gần như tương đương với nhau. Trong hệ thống Anh, đơn vị áp suất là pao-lực trên inch vuông (lbf/in^2 , hoặc psi), $1 atm = 14.696 psi$. Các đơn vị áp suất như kgf/cm^2 và lbf/in^2 cũng được ký hiệu bằng kg/cm^2 và lb/in^2 , tương ứng, chúng thường được sử dụng trong các thiết bị đo áp suất của sơm, lốp xe. Có thể thấy $1 kgf/cm^2 = 14.223 psi$ (gần tương đương 1atm). Thuật ngữ “Áp lực” thường được sử dụng thay cho “áp suất” đối với trường hợp các chất rắn với từ đồng nghĩa là ứng suất pháp và lực tác dụng vuông góc với bề mặt trên một đơn vị diện tích. Đối với chất lỏng, thuật ngữ *áp lực* (có đơn vị là N) thường được sử dụng chỉ lực tác dụng do áp suất lên một bề mặt nào đó. Vì vậy chúng ta cần thận trọng khi dùng 2 thuật ngữ này để tránh gây nhầm lẫn.

Ví dụ, một người nặng 150 pao với tổng diện tích bàn chân là 50 in² sẽ gây ra áp lực là 150 lbf/50 in² = 3.0 psi trên sàn (Hình 3.1). Nếu người đó đứng trên một chân thì ta có thể nói là áp lực tăng gấp đôi (tuy nhiên, chính xác hơn là ứng suất pháp tăng gấp đôi, còn áp lực lên sàn vẫn giữ nguyên và bằng với trọng lượng của người). Tương tự như vậy, chúng ta có thể giải thích vấn đề làm thế nào một người có thể đi bộ trên tuyết mà không bị lún bằng cách đi giày trượt tuyết có đế lớn và làm thế nào một người có thể cắt các vật nhẹ nhàng khi sử dụng một con dao sắc.



Hình 3.1 Áp lực/áp suất lên bàn chân của người béo lớn hơn nhiều áp lực/áp suất lên bàn chân của người gầy (khi diện tích bàn chân không thay đổi nhiều)

Áp suất thực tế tại một vị trí nhất định được đo tương đối so với chân không tuyệt đối (là nơi có áp suất tuyệt đối bằng 0) được gọi là áp suất tuyệt đối (P_{abs} - absolute pressure). Tuy nhiên, hầu hết các thiết bị đo áp suất đều được kiểm định để đọc áp suất khí quyển (P_{atm} - atmospheric pressure) là bằng 0 (Hình 3.2), vì vậy chúng chỉ chỉ ra sự khác biệt giữa áp suất tuyệt đối và áp suất khí quyển tại vị trí đo. Sự khác biệt này được gọi là áp suất dư (P_{gage} - gage pressure).



Dresser Instruments, Dresser, Inc.

Hình 3.2 Một số thiết bị đo áp suất dư

Áp suất thấp hơn áp suất khí quyển được gọi là áp suất chân không (P_{vac} - vacuum pressure) và được đo bằng thiết bị đo chân không. Thiết bị này cũng chỉ ra sự khác biệt giữa áp suất khí quyển và áp suất tuyệt đối.

Áp suất tuyệt đối, áp suất dư và áp suất chân không là các giá trị dương và có mối quan hệ với nhau như sau:

$$P_{gage} = P_{abs} - P_{atm} \quad (3.1)$$

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs} \quad (3.2)$$

Giống như các thiết bị đo áp suất khác, các áp kế sử dụng để đo áp suất không khí trong lốp ô tô là đo áp suất dư. Do đó, chỉ số 2.25 kgf/cm² (32 psi) trên áp kế chỉ ra một áp suất là 2.25 kgf/cm² lớn hơn áp suất khí quyển. Ví dụ, tại một vị trí

mà áp suất khí quyển là 1.0 atm, áp suất tuyệt đối trong lớp sẽ là $2.25+1.0 = 3.25$ atm. Trong môn học Nhiệt động lực học, các công thức và bảng biểu hầu như luôn luôn sử dụng áp suất tuyệt đối. Trong giáo trình này, áp suất P sẽ là áp suất tuyệt đối, trừ khi có quy định khác. Trong tiếng Anh, các chữ cái "a" (absolute) và "g" (gage) được bổ sung cho các đơn vị áp suất (như psia và psig) để làm rõ nghĩa: psia là áp suất tuyệt đối và psig là áp suất dư.

3.2.1. Ví dụ 3.1: Áp suất tuyệt đối của buồng chân không

Một áp kế chân không kết nối với một buồng chân không chỉ 5.8 psi tại vị trí mà áp suất khí quyển là 14.5 psi. Xác định áp suất tuyệt đối trong buồng.

Vấn đề: Áp suất được chỉ ra là áp suất chân không. Cần xác định áp suất tuyệt đối trong buồng.

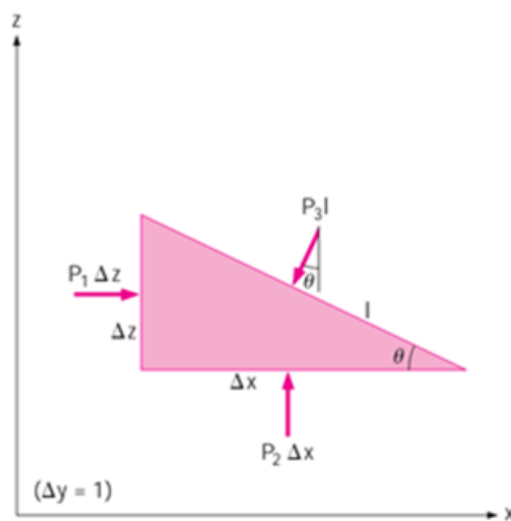
Phân tích: Áp suất tuyệt đối có thể dễ dàng xác định từ phương trình (3.2) như sau:

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vac} = 14.5 - 5.8 = 8.7 \text{ (psi)}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng áp suất khí quyển ở các nơi khác nhau trên trái đất là khác nhau. Do đó giá trị địa phương/tại chỗ của áp suất khí quyển được sử dụng khi xác định áp suất tuyệt đối.

3.2.2. Áp suất tại một điểm

Áp suất được định nghĩa là áp lực trên một đơn vị diện tích, như vậy có vẻ như là áp suất là một đại lượng véc-tơ (vì lực là một đại lượng véc-tơ). Tuy nhiên, áp suất tại điểm bất kỳ trong một chất lỏng là như nhau theo tất cả các hướng. Điều đó có nghĩa là áp suất có độ lớn nhưng không theo một hướng cụ thể nào, do đó nó là một đại lượng vô hướng. Điều này có thể được chứng minh bằng cách xem xét một phần tử nhỏ hình nêm của chất lỏng có bề dày đơn vị (theo hướng vuông góc với mặt giấy) ở trạng thái cân bằng (Hình 3.4).



Hình 3.4 Các lực tác dụng lên phần tử chất lỏng hình nêm

Áp suất trung bình ở ba mặt là P_1 , P_2 và P_3 , lực tác dụng lên bề mặt là tích số của áp suất trung bình và diện tích bề mặt. Theo định luật thứ hai của Newton, phương trình cân bằng lực theo hướng x và z có dạng:

$$\sum F_x = ma_x = 0 \rightarrow P_1 \Delta z - P_3 l \sin \theta = 0 \quad (3.3a)$$

$$\sum F_z = ma_z = 0 \rightarrow P_2 \Delta x - P_3 l \cos \theta - \frac{1}{2} \rho g \Delta x \Delta z = 0 \quad (3.3b)$$

trong đó ρ là mật độ và $W=mg=\rho g\Delta x\Delta z/2$ là trọng lượng của phần tử chất lỏng. Vì nêm là một tam giác vuông, do đó $\Delta x=l\cos\theta$ và $\Delta z=l\sin\theta$.

Thế những biểu thức hình học vào phương trình và chia hai vế (3.3a) cho Δz và (3.3b) cho Δx , chúng ta nhận được:

$$P_1 - P_3 = 0 \quad (3.4a)$$

$$P_2 - P_3 - \frac{1}{2}\rho g\Delta z = 0 \quad (3.4b)$$

Số hạng cuối cùng trong phương trình(3.4b) triệt tiêu khi $\Delta z \rightarrow 0$ khi hình nêm trở nên vô cùng nhỏ và phần tử chất lỏng trở thành một điểm.

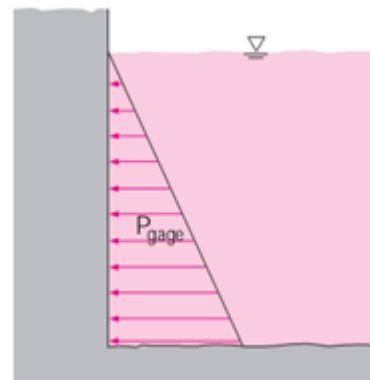
Tiếp theo, kết hợp hai phương trình trên, chúng ta có:

$$P_1=P_2=P_3=P \quad (3.5)$$

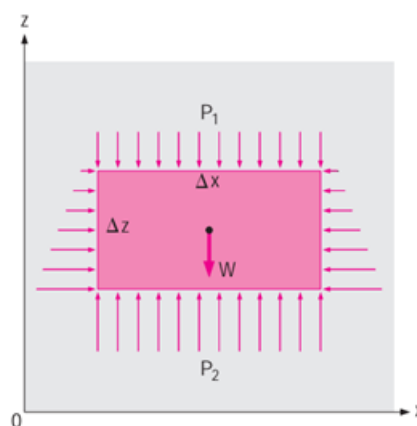
với θ là góc bất kỳ. Chúng ta có thể lặp lại phân tích trên cho một phần tử trong mặt phẳng xz và nhận được một kết quả tương tự. Do đó, chúng ta có thể kết luận rằng áp suất tại một điểm trong một chất lỏng có độ lớn như nhau theo tất cả các hướng.

3.2.3. Biến thiên của áp suất theo độ sâu

Có lẽ không có gì là ngạc nhiên khi phát biểu rằng áp suất trong một chất lỏng tĩnh không thay đổi theo phương nằm ngang. Điều này có thể chứng minh một cách dễ dàng bằng cách xem xét một phần tử chất lỏng nằm ngang và viết phương trình cân bằng lực theo một hướng nằm ngang bất kỳ. Tuy nhiên, điều đó sẽ không còn đúng theo phương thẳng đứng trong một trường hấp dẫn. Áp suất trong chất lỏng tăng lên theo độ sâu vì lớp chất lỏng ở sâu hơn phải "cõng" các lớp chất lỏng ở trên và hệ quả của việc này là lớp ở sâu hơn phải gia tăng áp suất để giữ cân bằng (Hình 3.5). Để nhận được mối quan hệ về sự thay đổi của áp suất theo độ sâu, chúng ta hãy xem xét một phần tử chất lỏng hình hộp chữ nhật có chiều cao Δz , chiều dài Δx và chiều sâu đơn vị (theo chiều vuông góc với trang giấy) ở trạng thái cân



Hình 3.5. Áp suất trong chất lỏng ở trạng thái tĩnh tăng tuyến tính theo độ sâu



Hình 3.6 Sơ đồ vật thể tự do (Free-body)

bằng, như thể hiện trong Hình 3.6. *diagram) cho phần tử chất lỏng ở trạng thái cân bằng lực*

Giả sử mật độ của chất lỏng ρ là không đổi, phương trình cân bằng lực theo phương thẳng đứng z có dạng:

$$\sum F_z = ma_z = 0 \Rightarrow P_2 \Delta x - P_1 \Delta x - \rho g \Delta x \Delta z = 0 \quad (3.6)$$

ở đây $W = mg = \rho g \Delta x \Delta z$ là trọng lượng của phần tử chất lỏng. Chia hai vế cho Δx và sắp xếp lại, chúng ta có:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g \Delta z = \gamma_s \Delta z \quad (3.7)$$

ở đây $\gamma_s = \rho g$ là trọng lượng riêng của chất lỏng. Từ đó, chúng ta kết luận rằng chênh lệch áp suất giữa hai điểm trong một chất lỏng có mật độ không đổi là tỷ lệ thuận với khoảng cách Δz theo phương thẳng đứng giữa các điểm và mật độ ρ của chất lỏng. Nói cách khác, áp suất trong chất lỏng gia tăng tuyến tính theo chiều sâu.

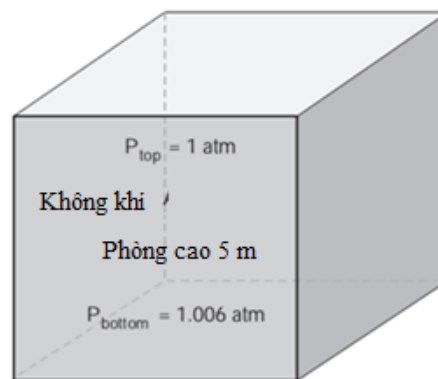
Đối với một chất lỏng cho trước, khoảng cách theo phương thẳng đứng Δz đôi khi được sử dụng như một thước đo áp lực và được gọi là *cột áp suất* (pressure head).

Từ phương trình (3.7), chúng ta có thể thấy rằng với chiều cao vừa phải, sự biến thiên của áp suất theo chiều cao là không đáng kể đối với chất khí vì chất khí có mật độ thấp. Ví dụ, áp suất trong một bình chứa khí có thể coi là đồng nhất bởi vì khối lượng chất khí trong bình là quá nhỏ để có thể tạo ra một sự khác biệt đáng kể.

Hơn nữa, áp suất trong một căn phòng chứa đầy không khí cũng có thể được giả thiết là không đổi (Hình 3.7).

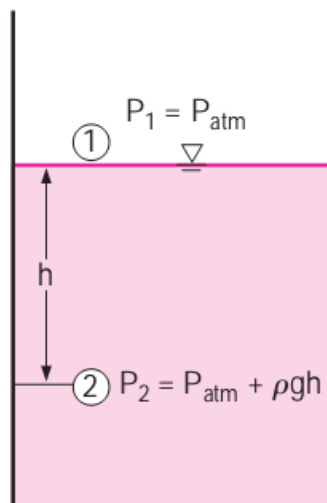
Nếu chúng ta lấy điểm 1 trên bề mặt tự do của một chất lỏng tiếp xúc với không khí (Hình 3.8), tại điểm này áp suất bằng với áp suất khí quyển $P_1 = P_{atm}$. Vì vậy, áp suất tại một điểm có chiều sâu h (tính từ bề mặt tự do) được tính như sau:

$$P = P_{atm} + \rho gh \quad \text{hoặc} \quad P_{gage} = \rho gh \quad (3.8)$$



Hình 3.7 Thay đổi áp suất trong phòng chứa đầy không khí là không đáng kể

Về cơ bản, chất lỏng là chất không nén được, do đó sự biến đổi của mật độ theo độ sâu là không đáng kể. Đối với trường hợp chất khí, khi thay đổi cao độ không lớn, mật độ cũng có thể coi là hằng số. Tuy nhiên, sự thay đổi của mật độ của chất lỏng hoặc chất khí theo nhiệt độ là đáng kể và cần phải được xem xét khi bài toán cần giải với độ chính xác cao. Ngoài ra, ở độ sâu lớn như trong các đại dương, sự thay đổi mật độ của một chất lỏng có thể là đáng kể bởi vì áp suất thay đổi theo chiều sâu là rất lớn. Gia tốc trong trường g thay đổi từ 9.807 m/s^2 ở độ cao mực nước



Hình 3.8 Áp suất trong chất lỏng tăng tuyến tính theo độ sâu

biến đến 9.764 m/s^2 ở độ cao 14000 m . Đây là một thay đổi nhỏ chỉ 0.4% . Do đó, g luôn có thể được giả thiết là không đổi với sai số tính toán là không đáng kể.

Đối với chất lỏng có mật độ thay đổi đáng kể theo độ cao, phương trình vi phân biểu diễn sự phụ thuộc của áp suất theo độ cao có thể thu được bằng cách chia phương trình (3.6) cho $\Delta x \Delta z$ và lấy giới hạn khi $\Delta z \rightarrow 0$. Khi đó, chúng ta nhận được:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g \quad (3.9)$$

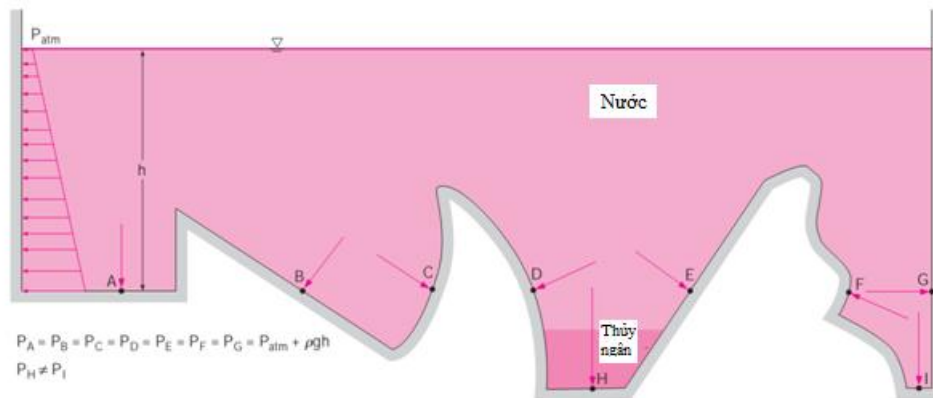
Dấu âm trong phương trình là do trục z hướng lên trên, vì vậy dP là âm khi dz là dương bởi vì áp suất giảm theo chiều hướng đi lên. Giả thiết sự thay đổi của mật độ theo độ cao đã được biết, chênh lệch áp suất giữa điểm 1 và 2 có thể được xác định bằng cách lấy tích phân:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = -\int_1^2 \rho g dz \quad (3.10)$$

Dễ dàng nhận thấy rằng trong trường hợp mật độ và gia tốc trọng trường là không đổi, phương trình (3.10) là tương đương với phương trình (3.7).

Áp suất trong chất lỏng tĩnh không phụ thuộc vào hình dạng hoặc mặt cắt ngang của bình chứa. Áp suất chỉ thay đổi theo chiều thẳng đứng và không thay đổi theo bất kỳ một phương nằm ngang nào khác. Do đó, áp suất là như nhau ở tất cả các điểm trên một mặt phẳng nằm ngang trong cùng một chất lỏng. Nhà toán học người Hà Lan Simon Stevin (1548-1620) lần đầu tiên phát biểu nguyên lý này vào năm 1586. Nguyên lý này được minh họa trong Hình 3.9. Lưu ý rằng những áp suất tại các điểm A, B, C, D, E, F, G là như nhau bởi vì chúng ở cùng một độ

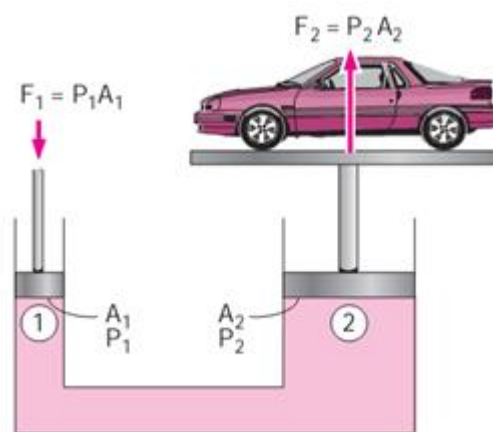
sâu và liên thông với nhau trong cùng một chất lỏng ở trạng thái tĩnh. Tuy nhiên, áp suất tại điểm H và I là không như nhau vì hai điểm này không liên thông với nhau trong cùng một chất lỏng (chúng ta không thể vẽ một đường cong liên tục từ điểm I đến điểm H trong cùng một chất lỏng), mặc dù chúng ở cùng một độ sâu. Ngoài ra, chúng ta còn thấy áp suất chất lỏng luôn tác dụng vuông góc lên bề mặt tại các điểm xem xét.



Hình 3.9 Áp suất có cùng giá trị tại các điểm trên mặt phẳng nằm ngang không phụ thuộc vào hình học của bình chứa, với điều kiện các điểm là liên thông với nhau trong cùng một chất lỏng

Một hệ quả của nguyên lý áp suất trong chất lỏng không thay đổi trên mặt phẳng nằm ngang là khi áp suất áp tăng trên bề mặt của một hệ chất lỏng kín sẽ làm tăng áp suất trong toàn bộ chất lỏng một đại lượng tương ứng. Hệ quả này được gọi là định luật Pascal, mang tên nhà bác học Blaise Pascal (1623-1662). Ông đã nhận ra rằng khi hai xi lanh thủy lực có

diện tích khác nhau được kết nối, xi lanh có diện tích lớn hơn có thể khuếch đại lực lớn lên nhiều lần lực tác dụng lên xi lanh nhỏ. Định luật này là nguồn gốc của nhiều phát minh có ứng dụng trong cuộc sống hàng ngày của chúng ta như hệ thống phanh thủy lực, hệ thống nâng hạ thủy lực.... Đó là những thiết bị cho phép chúng ta dễ dàng nâng một chiếc xe ô tô bằng một tay, như thể hiện trong Hình 3.10.



Hình 3.10 Nâng một vật có khối lượng lớn nhờ lực nhỏ bằng cách sử dụng định luật Pascal

Để ý rằng $P_1=P_2$ vì cả hai piston đang ở cùng độ cao, do đó tỉ số áp lực tại mặt 1 và mặt 2 được xác định từ phương trình:

$$P_1 = P_2 \quad \rightarrow \quad \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \quad \rightarrow \quad F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1 \quad (3.11)$$

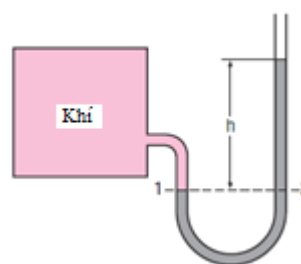
Tỷ lệ diện tích A_2/A_1 được gọi là *lợi thế cơ học* lý tưởng của máy nâng thủy lực. Ví dụ, nếu sử dụng một máy nâng thủy lực với một tỷ lệ diện tích piston của $A_2/A_1=10$, một người có thể nâng một chiếc xe 1000 kg bằng cách áp dụng một lực chỉ 100 kgf (= 908 N).

3.3. Áp kế ống (manometer)

3.3.1. Áp kế ống

Chúng ta nhận thấy từ biểu thức (3.7) rằng sự thay đổi độ cao Δz trong một chất lỏng tĩnh tương ứng với $\Delta P/\rho g$, điều này cho thấy cột chất lỏng có thể được sử dụng để đo sự khác biệt về áp suất. Một thiết bị dựa trên nguyên tắc này được gọi là một *áp kế ống*, áp kế loại này thường được sử dụng để đo sự thay đổi áp suất nhỏ và trung bình. Một áp kế ống chủ yếu bao gồm một ống thủy tinh hoặc nhựa hình chữ U chứa một hoặc nhiều chất lỏng như thủy ngân, nước, rượu, hoặc dầu. Để giữ cho kích thước của áp kế không quá lớn, chất lỏng nặng như thủy ngân thường được sử dụng nếu chênh lệch áp suất cần đo là lớn.

Xem xét áp kế (Hình 3.11) được sử dụng để đo áp suất trong bình chứa khí. Bởi vì hiệu ứng trọng trường của khí là không đáng kể, áp suất trong bình ở mọi nơi và ở vị trí 1 có giá trị như nhau. Ngoài ra, bởi vì áp suất trong một chất lỏng không thay đổi trên mặt phẳng nằm ngang nên áp suất tại điểm 2 là bằng với áp suất tại điểm 1, $P_2=P_1$.



Hình 3.11 Áp kế ống cơ bản

Hai cột chất lỏng trong ống có chiều cao chênh lệch là h và đang ở trong trạng thái cân bằng tĩnh, một đầu ống tiếp xúc với khí quyển. Vì vậy, áp suất tại điểm 2 được xác định trực tiếp từ biểu thức (3.8) như sau:

$$P_2 = P_{atm} + \rho gh \quad (3.12)$$

trong đó ρ là mật độ chất lỏng trong ống. Mặc dù diện tích thiết diện không ảnh hưởng đến chiều cao h , tuy nhiên ống cần được chọn đủ lớn (vài milimét) để hiệu ứng mao dẫn có thể bỏ qua.

3.3.2. Ví dụ 3.2: Đo áp suất với áp kế ống

Một áp kế ống được sử dụng để đo áp suất trong bình nén khí. Chất lỏng được sử dụng có tỷ trọng riêng là 0.85, chiều cao cột chất lỏng trong áp kế là 55 cm, như thể hiện trong Hình 3.12. Nếu áp suất khí quyển tại chỗ là 96 kPa, xác định áp suất tuyệt đối trong bình.

Vấn đề: Cột cao chất lỏng trong áp kế gắn vào bình và áp suất khí quyển đã biết. Xác định áp suất tuyệt đối trong bình.

Giả thiết: Chất khí trong bình là chất khí có mật độ thấp hơn nhiều so với mật độ của chất lỏng trong áp kế và ảnh hưởng của mật độ chất khí là có thể bỏ qua.

Tính chất: Tỷ trọng riêng của chất lỏng trong áp kế là 0.85 và mật độ trong điều kiện tiêu chuẩn của nước là 1000 kg/m³.

Phân tích: Mật độ của chất lỏng nhận được bằng cách nhân tỷ trọng riêng với mật độ của nước trong điều kiện tiêu chuẩn:

$$\rho = SG(\rho_{H_2O}) = (0.85)(1000\text{kg/m}^3) = 850\text{kg/m}^3$$

Từ (3.12) ta nhận được:

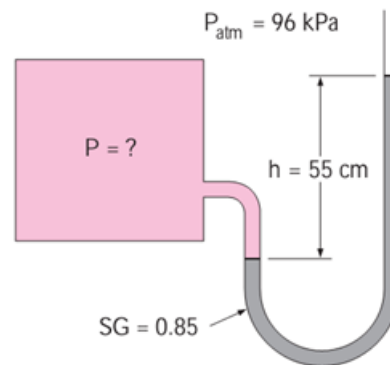
$$P = P_{atm} + \rho gh$$

$$= 96\text{ kPa} + \left(850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.55\text{ m}) \left(\frac{1\text{ kPa}}{1000\text{ Pa}}\right) = 100.6\text{ kPa}$$

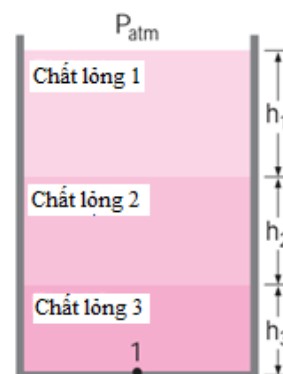
Thảo luận: Lưu ý rằng áp suất dư trong bình là 100.6-96=4.6 kPa.

Trong nhiều thiết bị kỹ thuật và một số áp kế có chứa nhiều lớp chất lỏng với mật độ khác nhau được xếp chồng lên nhau. Hệ thống như vậy có thể được phân tích một cách dễ dàng bằng cách ghi nhớ rằng (1) sự thay đổi áp suất trên một cột chất lỏng có chiều cao h là $\Delta P = \rho gh$, (2) trong một chất lỏng cho trước, áp suất tăng theo chiều hướng đi xuống và giảm theo chiều hướng đi lên (ví dụ, $P_{\text{đáy}} > P_{\text{đỉnh}}$) và (3) hai điểm ở cùng một độ cao trong chất lỏng tĩnh liên thông là có cùng một áp suất.

Theo các nguyên tắc trên, áp suất tại một điểm bất kỳ có thể được xác định bằng cách bắt đầu với một điểm có áp suất đã biết, sau đó cộng vào hoặc trừ đi các số hạng ρgh trên đường đi đến điểm quan tâm. Ví dụ, áp suất tại đáy bể trong Hình 3.13 được xác định bằng cách bắt đầu ở bề mặt tự do, nơi có áp suất là P_{atm} , di chuyển xuống cho đến khi chúng ta đạt được điểm 1 ở phía dưới. Như vậy chúng ta nhận được:



Hình 3.12 Sơ đồ cho ví dụ 3.2

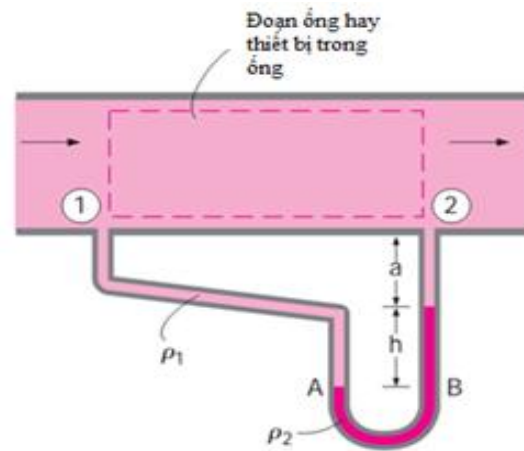


Hình 3.13 Trong các lớp chất lỏng chồng xếp lên nhau, áp suất thay đổi qua lớp chất

$$P_{atm} + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 + \rho_3 g h_3 = P_1$$

lỏng có mật độ ρ và chiều cao h một đại lượng là $\rho g h$

Áp kế ống đặc biệt thích hợp để đo tổn thất áp suất dọc theo dòng chảy trong đường ống nằm ngang giữa hai điểm cho trước (trước và sau một thiết bị thủy lực nào đó ví dụ như bộ van, thiết bị trao đổi nhiệt,...). Điều này được thực hiện bằng cách kết nối hai đầu ống của áp kế với hai điểm đã chọn, như thể hiện trong Hình 3.14. Chất lỏng trong đường ống có thể là một chất khí hoặc một chất lỏng có mật độ là ρ_1 . Mật độ của chất lỏng trong áp kế là ρ_2 , chênh lệch cột cao chất lỏng trong áp kế là h .



Hình 3.14 Đo tổn thất áp suất dọc theo đường ống bằng áp kế ống

Chênh lệch áp suất $P_1 - P_2$ có thể thu được bằng cách bắt đầu từ điểm 1 với P_1 , di chuyển dọc theo ống bằng cách thêm hoặc trừ đi các số hạng $\rho g h$ cho đến khi chúng ta đạt đến điểm 2 với áp suất P_2 :

$$P_2 = P_1 + \rho_1 g(a+h) - \rho_2 g h - \rho_1 g a \quad (3.13)$$

Lưu ý rằng chúng ta đã “nhảy” từ điểm A tới điểm B theo chiều ngang và bỏ qua những phần bên dưới vì áp suất ở cả hai điểm là như nhau. Đơn giản hóa (3.13), ta nhận được:

$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1) g h \quad (3.14)$$

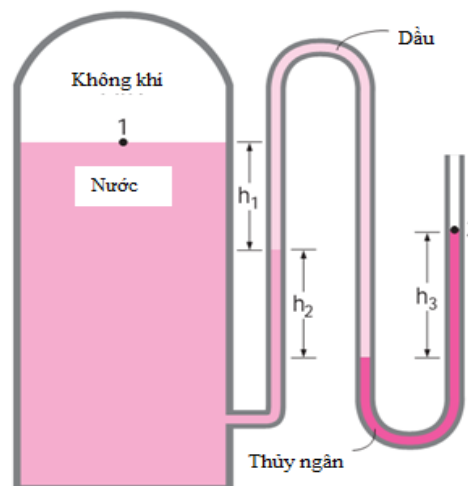
Ngoài ra, khi chất lỏng chảy trong ống là một chất khí thì $\rho_1 \ll \rho_2$ và phương trình (3.14) được đơn giản hoá thành $P_1 = P_2 + \rho_2 g h$

3.3.3. Ví dụ 3.3: Đo áp suất với áp kế ống nhiều chất lỏng

Nước trong bể bị nén bằng không khí và áp suất được đo bằng áp kế nhiều chất lỏng như Hình 3.15. Bể nằm ở độ cao 1400 m, nơi có áp suất khí quyển là 85.6 kPa. Xác định áp suất không khí trong bể nếu $h_1 = 0.1$ m, $h_2 = 0.2$ m, và $h_3 = 0.35$ m. Lấy mật độ của nước, dầu và thủy ngân tương ứng là 1000 kg/m³, 850 kg/m³ và 13.600 kg/m³.

Vấn đề: Áp suất trong một bể nước kín được đo bằng áp kế nhiều chất lỏng. Cần xác định áp suất không khí trong bể.

Giả thiết: Áp suất không khí ở mọi điểm trong bể là như nhau (bỏ qua ảnh



Hình 3.15 Sơ đồ cho ví dụ 3.15

hưởng của trọng trường vì mật độ không khí nhỏ), do đó chúng ta chỉ cần xác định áp suất tại mặt phân cách nước-không khí.

Tính chất: Mật độ của nước, dầu, thủy ngân được cho là 1000 kg/m³, 850 kg/m³ và 13.600 kg/m³, tương ứng.

Phân tích: Bắt đầu với áp suất tại điểm 1 trên mặt phân cách nước-không khí, di chuyển dọc theo ống bằng cách thêm hoặc trừ đi các số hạng ρgh cho đến khi đạt đến điểm 2, nơi có áp suất bằng P_{atm} , chúng ta có:

$$P_1 + \rho_{nuoc} gh_1 + \rho_{dau} gh_2 - \rho_{thuyngan} gh_3 = P_{atm}$$

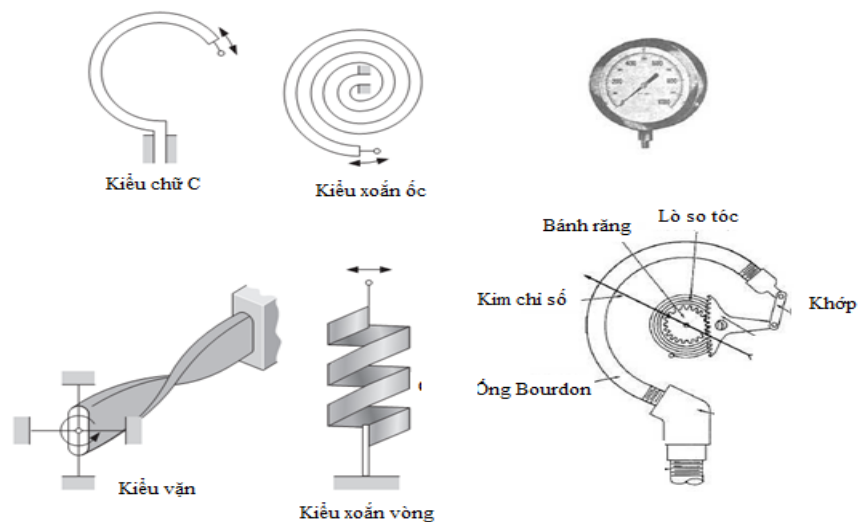
Giải phương trình cho P_1 và thay số vào, chúng ta nhận được:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{atm} - \rho_{nuoc} gh_1 - \rho_{dau} gh_2 + \rho_{thuyngan} gh_3 \\ &= P_{atm} + (\rho_{thuyngan} gh_3 - \rho_{nuoc} gh_1 - \rho_{dau} gh_2) \\ &= 85.6 \text{ kPa} + (9.81 \text{ m/s}^2)[(13600 \text{ kg/m}^3)(0.35 \text{ m}) - (1000 \text{ kg/m}^3)(0.1 \text{ m}) \\ &\quad - (850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(0.2 \text{ m}) (\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}})] = 130 \text{ kPa} \end{aligned}$$

3.3.4. Các thiết bị đo áp suất khác

Một loại thiết bị đo áp suất cơ học thường được sử dụng là ống Bourdon, theo tên của kỹ sư, nhà phát minh người Pháp Eugene Bourdon (1808-1884). Áp kế loại này bao gồm một ống kim loại rỗng cong như một cái lưỡi câu hoặc các hình dạng khác (Hình 3.16), đầu cuối đóng kín được kết nối với một kim có thể quay. Khi ống được mở tiếp xúc với không bên ngoài, ống trở về trạng thái tự do không bị biến dạng, lúc này kim cần được chỉnh về số 0. Khi chất lỏng bên trong

ống chịu một áp suất nào đó, ống biến dạng và di chuyển kim đến vị trí tương ứng trên bảng số chỉ áp suất.



Hình 3.16 Các loại ống Bourdon và cấu tạo áp kế

Ngày nay, các thiết bị điện tử đã có các ứng dụng trong mọi khía cạnh của cuộc sống, bao gồm cả các thiết bị đo áp suất. Cảm biến áp suất hiện đại, còn gọi là đầu đo áp suất, sử dụng các kỹ thuật khác nhau để chuyển đổi các hiệu ứng áp suất thành một hiệu ứng điện như sự thay đổi về điện áp, điện trở, hoặc điện dung. Đầu đo áp suất điện tử nhỏ hơn, nhanh hơn, nhạy hơn, có độ tin cậy cao hơn và chính xác hơn so với các áp kế cơ học. Nó có thể đo áp suất từ nhỏ hơn một phần triệu của 1 atm đến áp suất cao vài nghìn atm. Có nhiều loại đầu đo áp suất có sẵn để đo áp suất dư, áp suất tuyệt đối và độ chênh lệch áp suất trong các thiết bị. Đầu đo áp suất dư sử dụng áp suất khí quyển làm chuẩn với tín hiệu điện tử được đặt về 0, không phân biệt độ cao của vị trí đo. Đầu đo áp suất tuyệt đối cần hiệu chỉnh để tín hiệu về 0 với buồng chân không tuyệt đối. Đầu đo chênh lệch áp suất giữa hai điểm có thể đo trực tiếp chênh lệch áp suất thay vì sử dụng hai đầu đo và sau đó lấy hiệu của hai giá trị đo được.

Đầu đo áp suất *biến dạng* làm việc với màng mỏng có khả năng biến dạng là vách ngăn giữa hai buồng áp suất. Khi màng kéo dài để đáp ứng với sự thay đổi chênh lệch áp suất, sự thay đổi điện trở khiến mạch điện Wheatstone sẽ khuếch đại dòng điện ở đầu ra. Bộ chuyển đổi điện dung hoạt động theo nguyên tắc tương tự, nhưng sự thay đổi điện dung được đo thay cho điện trở khi màng bị biến dạng.

Đầu đo *áp điện* (Piezoelectric transducer), còn gọi là đầu đo áp suất trạng thái rắn, làm việc theo nguyên tắc điện thế được tạo ra trong một tinh thể chịu áp lực cơ học. Hiện tượng này, lần đầu tiên được phát hiện bởi anh em Pierre và Jacques Curie vào năm 1880, được gọi là hiệu ứng áp điện. Đầu đo áp suất áp điện có tần số đáp ứng nhanh hơn nhiều so với các đầu đo màng và rất thích hợp cho các

ứng dụng áp suất cao, nhưng chúng thường không nhạy như các đầu đo dạng màng.

3.4. Phong vũ biểu và áp suất khí quyển

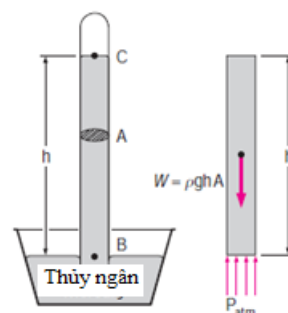
Áp suất khí quyển được đo bởi thiết bị gọi là phong vũ biểu dựa trên phát minh của nhà khoa học Ý Evangelista Torricelli (1608-1647). Ông ta là người đầu tiên chứng minh rằng áp suất khí quyển có thể được đo bằng cách lộn ngược một ống thủy ngân ngâm vào một thùng chứa thủy ngân hở tiếp xúc với không khí, như thể hiện trong Hình 3.17. Áp suất tại điểm B bằng với áp suất khí quyển và áp suất tại C có thể được xem là bằng không vì chỉ có hơi thủy ngân trên điểm C với áp suất rất thấp so với P_{atm} và có thể được bỏ qua để có một xấp xỉ tốt. Viết phương trình cân bằng lực theo hướng thẳng đứng, chúng ta nhận được:

$$P_{atm} = \rho gh \quad (3.15)$$

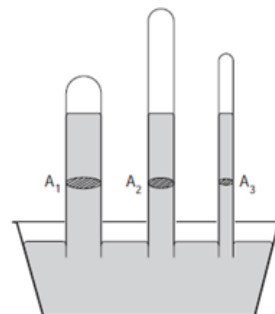
trong đó ρ là mật độ thủy ngân, g là gia tốc trọng trường tại chỗ và h là chiều cao của cột thủy ngân so với bề mặt tự do. Lưu ý rằng chiều dài và diện tích mặt cắt ngang của ống không có ảnh hưởng đến chiều cao của cột chất lỏng của phong vũ biểu (Hình 3.18). Dựa trên áp kế thủy ngân, một đơn vị áp suất thường được sử dụng là *át một phe tiêu chuẩn*, được định nghĩa là áp suất gây ra bởi một cột thủy ngân có chiều cao 760 mm ở 0°C.

(với $\rho_{Hg}=13.595 \text{ kg/m}^3$) trong trường gia tốc trọng trường tiêu chuẩn ($g=9.807 \text{ m/s}^2$). Nếu lấy nước thay cho thủy ngân để đo áp suất khí quyển thì cột nước sẽ cao khoảng 10.3 m. Áp suất đôi khi được biểu diễn bằng chiều cao của cột thủy ngân (thường được sử dụng trong dự báo thời tiết). Ví dụ, áp suất khí quyển tiêu chuẩn là 760 mmHg ở 0°C. Đơn vị mmHg còn được gọi là *torr* để tưởng nhớ đến nhà khoa học Torricelli. Do đó, $1 \text{ atm}=760 \text{ torr}$ và $1 \text{ torr}=133.3 \text{ Pa}$.

Áp suất khí quyển P_{atm} thay đổi theo độ cao từ 101.325 kPa ở mực nước biển đến 89.88, 79.50, 54.05, 26.5, và 5.53 kPa ở độ cao 1000, 2000, 5000, 10.000, và 20.000 mét, tương ứng. Ví dụ, áp suất khí quyển ngọn núi cao nhất Tam Đảo (có độ cao=1591 m) là 84.4 kPa.



Hình 3.17. Phong vũ biểu



Hình 3.18 Chiều dài và thiết diện ngang của ống không có ảnh hưởng đến chiều cao của cột chất lỏng.

Hãy nhớ rằng áp suất khí quyển tại một điểm chỉ đơn giản là trọng lượng của không khí bên trên điểm đó trên một đơn vị diện tích bề mặt. Do đó, nó không chỉ thay đổi với độ cao mà với cả điều kiện thời tiết. Sự suy giảm của áp suất khí quyển với độ cao có ảnh hưởng sâu rộng trong cuộc sống hàng ngày. Ví dụ, nấu ăn mất nhiều thời gian hơn ở độ cao lớn hơn bởi vì nước sôi ở nhiệt độ thấp hơn trong áp suất khí quyển thấp hơn. Chảy máu mũi là một hiện tượng thường thấy ở độ cao lớn do sự khác biệt giữa huyết áp và áp suất khí quyển là lớn khi các tĩnh mạch ở mũi không thể chịu đựng thêm được nữa.

Đối với nhiệt độ nhất định, mật độ không khí thấp hơn ở độ cao lớn hơn, do đó một thể tích nhất định chứa ít khí và ít oxy hơn. Vì vậy, không có gì ngạc nhiên khi chúng ta dễ mệt mỏi hơn và khó thở hơn ở độ cao lớn hơn. Để thích hợp với điều kiện, người dân sống ở độ cao lớn hơn thường có lá phổi hoạt động hiệu quả hơn. Tương tự như vậy, một động cơ xe hơi 2.0 L sẽ có sức mạnh giống như một động cơ xe hơi 1.7 L trên độ cao 1500 m do sự sụt giảm 15% áp suất và do đó giảm 15% mật độ không khí. Một quạt máy hay máy nén khí sẽ chuyển không khí ít hơn 15% ở độ cao đó trong khi tốc độ quay là như nhau. Áp suất thấp hơn và mật độ thấp hơn cũng ảnh hưởng đến lực nâng và lực cản: máy bay cần một đường băng dài hơn ở độ cao lớn để lực nâng phát triển đủ theo yêu cầu và chúng cần bay lên độ cao lớn hơn để giảm lực cản và tiết kiệm nhiên liệu.

3.4.1. Ví dụ 3.5: Đo áp suất khí quyển bằng phong vũ biểu

Xác định áp suất khí quyển tại một điểm khi phong vũ biểu chỉ 740 mm Hg và gia tốc trọng trường là $g=9.81 \text{ m/s}^2$. Giả thiết nhiệt độ của thủy ngân là $10 \text{ }^\circ\text{C}$, tương ứng với mật độ là 13570 kg/m^3 .

Vấn đề: Phong vũ biểu chỉ chiều cao của cột thủy ngân tại một điểm. Cần xác định áp suất khí quyển tại điểm đó.

Giả thiết: Nhiệt độ của thủy ngân là $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tính chất: Mật độ thủy ngân ở $10 \text{ }^\circ\text{C}$ là 13570 kg/m^3 .

Phân tích: Từ phương trình (3.15), áp suất khí quyển được xác định là:

$$P_{atm} = \rho gh = \left(13570 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.74 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}}\right) = 98.5 \text{ kPa}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng mật độ thay đổi theo nhiệt độ, do đó ảnh hưởng này cần được xem xét trong tính toán.

3.4.2. Ví dụ 3.6: Ảnh hưởng của trọng lượng piston tự do lên áp suất trong xi lanh

Piston của một thiết bị piston-xi lanh thẳng đứng chứa khí có khối lượng 60 kg và diện tích mặt cắt ngang là 0.04 m^2 , như thể hiện trên Hình 3.20. Áp suất khí quyển tại chỗ là 0.97 bar, gia tốc trọng trường là 9.81 m/s^2 . (a) Xác định áp suất bên trong xi lanh. (b) Nếu khí trong xi lanh được hâm nóng và thể tích của nó được tăng gấp đôi, hỏi áp suất bên trong xi lanh có thay đổi không?

Vấn đề: Khí được chứa trong một xi lanh thẳng đứng với một piston tự do có trọng lượng nặng. Cần xác định áp suất bên trong xi lanh và ảnh hưởng của sự thay đổi thể tích đến áp suất.

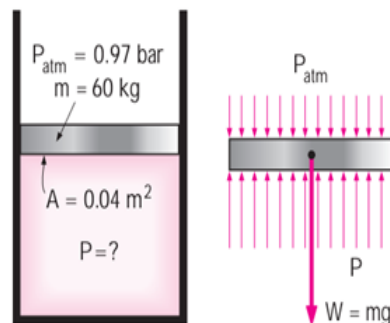
Giải thiết: Ma sát giữa piston và xi lanh là không đáng kể.

Phân tích: (a) Áp suất khí trong các thiết bị piston-xilanh phụ thuộc vào áp suất khí quyển và trọng lượng của piston. Sơ đồ của hệ thống piston-xi lanh trình bày trên Hình 3.20, theo đó phương trình cân bằng lực theo chiều thẳng đứng có dạng:

$$PA = P_{atm}A + W$$

Rút P từ phương trình và thay số vào ta có:

$$\begin{aligned} P &= P_{atm} + \frac{mg}{A} \\ &= 0.97\text{bar} + \frac{(60\text{kg})(9.81\text{m/s}^2)}{0.04\text{m}^2} \left(\frac{1\text{N}}{1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1\text{bar}}{10^5\text{N/m}^2} \right) \\ &= 1.12\text{bars} \end{aligned}$$



Hình 3.20 Sơ đồ của ví dụ 3.6 và hệ xi lanh-piston tự do

(b) Sự thay đổi thể tích sẽ không có ảnh hưởng đến áp suất của khí bên trong hệ thống mô tả trong phần (a), do đó áp suất bên trong xi lanh sẽ không thay đổi.

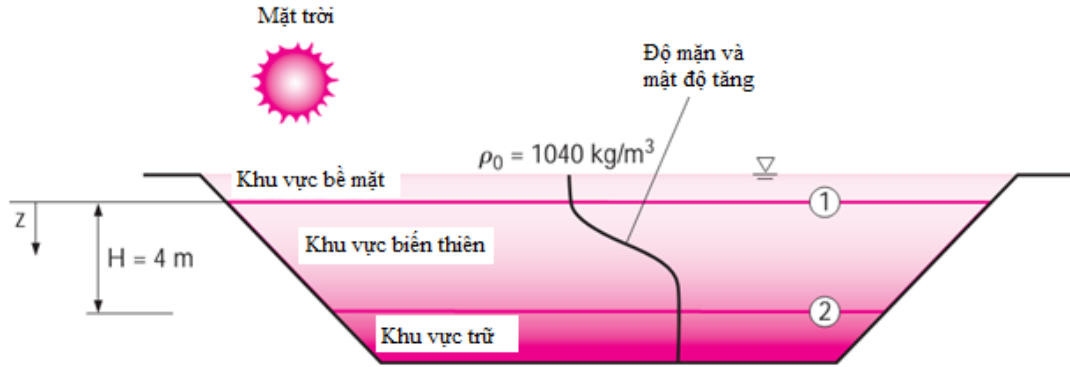
Thảo luận: Nếu chất khí trong xi lanh ứng xử như một chất khí lý tưởng, nhiệt độ tuyệt đối sẽ tăng gấp đôi khi thể tích tăng gấp đôi ở áp suất không đổi.

3.4.3. Ví dụ 3.7: Áp suất thủy tĩnh trong ao năng lượng mặt trời với mật độ biến đổi

Ao năng lượng mặt trời là một bể chứa nhân tạo nhỏ sâu vài mét được sử dụng để lưu trữ năng lượng mặt trời. Sự nổi lên của nước nóng (do mật độ nhỏ hơn) lên bề mặt được ngăn ngừa bằng cách thêm muối ở đáy ao. Trong ao mặt trời muối điển hình, mật độ của nước tăng lên trong khu vực biến thiên nồng độ muối, như thể hiện trong Hình 3.21 và mật độ có thể được tính theo công thức sau:

$$\rho = \rho_0 \sqrt{1 + \tan^2\left(\frac{\pi z}{4H}\right)}$$

trong đó ρ_0 là mật độ trên bề mặt nước, z là khoảng cách thẳng đứng đo từ đỉnh của khu vực biến thiên nồng độ và H là bề dày của khu vực này. Đối với $H=4$ m, $\rho_0=1040$ kg/m³, bề dày lớp bề mặt là 0.8m, tính áp suất dư tại đáy của khu vực biến thiên nồng độ.



Hình 3.21 Sơ đồ của ví dụ 3.7

Vấn đề: Sự thay đổi mật độ của nước mặn ở vùng biến thiên nồng độ của một ao mặt trời với độ sâu nhất định đã được cho. Xác định áp suất dư ở đáy của vùng biến thiên nồng độ.

Giả thiết: Mật độ trong khu vực bề mặt của ao là không đổi.

Tính chất: Mật độ của nước muối trên bề mặt được cho là 1040 kg/m^3 .

Phân tích: Chúng ta ký hiệu phía trên và phía dưới của vùng biến thiên nồng độ là 1 và 2 tương ứng. Cần lưu ý rằng mật độ của vùng bề mặt là không đổi, áp suất dư ở đáy của khu vực bề mặt là:

$$P_1 = \rho g h_1 = \left(1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0.8 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}}\right) = 8.16 \text{ kPa}$$

Mặt khác, ta có:

$$dP = \rho g dz$$

$$P - P_1 = \int_0^z \rho g dz \rightarrow P = P_1 + \int_0^z \rho_0 \sqrt{1 + \tan^2\left(\frac{\pi z}{4H}\right)} g dz$$

Tính giá trị tích phân, ta có:

$$P = P_1 + \rho_0 g \frac{4H}{\pi} \sinh^{-1}\left(\tan\left(\frac{\pi z}{4H}\right)\right)$$

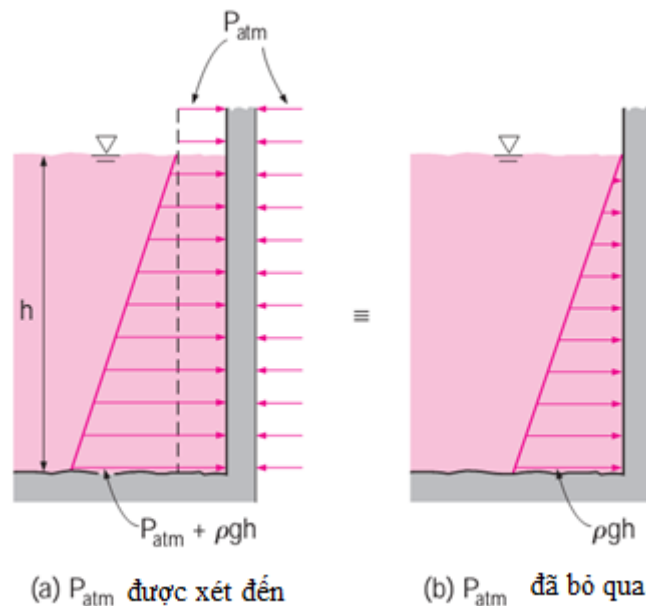
Giá trị áp suất dư tại đáy lớp biến thiên nồng độ ($z=H=4$) là:

$$\begin{aligned} P_2 &= 8.16 \text{ kPa} + \left(1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \frac{4(4 \text{ m})}{\pi} \sinh^{-1}\left(\tan\left(\frac{\pi 4}{4 \cdot 4}\right)\right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}}\right) \\ &= 54.0 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng các biến thiên của áp suất với độ sâu không tuyến tính khi mật độ thay đổi theo chiều sâu.

3.5. Áp lực thủy tĩnh trên bề mặt phẳng ngập trong chất lỏng

Một vật tiếp xúc với một chất lỏng, chẳng hạn như một cánh cửa van của đập nước, các bức thành của một bồn chứa chất lỏng, hoặc thân tàu của một tàu thủy... phải chịu một áp lực do tác dụng của áp suất chất lỏng phân bố trên bề mặt của nó. Trên một bề mặt phẳng, các lực thủy tĩnh tạo thành một hệ thống các lực song song và chúng ta cần phải xác định giá trị của tổng lực và điểm đặt của nó (được gọi là *tâm áp suất*-center of pressure).



Hình 3.24 Áp suất khí quyển có thể bỏ qua khi nó tác dụng cả hai bên của bề mặt

Trong hầu hết các trường hợp, phía bên kia của bề mặt là khí quyển (như bên mặt khô của một cánh cửa van), do đó tổng hợp áp lực khí quyển tác động lên cả hai mặt của vật là bằng 0. Vì vậy, để thuận tiện chúng ta có thể bỏ qua áp suất khí quyển và chỉ làm việc với áp suất dư (Hình 3.24). Ví dụ, khi bỏ qua áp suất khí quyển, ta có áp suất dư ở dưới đáy hồ là: $P_{gauge} = \rho gh$.

Hãy xem xét bề mặt trên của một tấm phẳng hình dạng tùy ý hoàn toàn chìm trong một chất lỏng, như thể hiện trong Hình 3.25. Mặt phẳng của bề mặt này (vuông góc với trang giấy) cắt bề mặt tự do nằm ngang một góc θ và chúng ta lấy đường giao nhau của hai mặt phẳng là trục x .

Áp suất tuyệt đối trên mặt trên chất lỏng là P_o , là áp suất khí quyển tại chỗ P_{atm} nếu chất lỏng tiếp xúc với khí quyển (nhưng P_o có thể khác với P_{atm} nếu không gian phía trên chất lỏng là kín và bị điều áp). Khi đó, áp suất tuyệt đối tại điểm bất kỳ trên tấm là:

$$P = P_o + \rho gh = P_o + \rho gy \sin \theta \tag{3.16}$$

trong đó h là khoảng cách thẳng đứng của các điểm tính từ bề mặt tự do và y là tọa độ theo trục y bằng khoảng cách tính từ trục x (từ điểm O trong Hình 3.25). Tổng hợp lực thủy tĩnh F_R trên bề mặt được xác định bằng cách lấy tích phân trên toàn bộ diện tích lực PdA tác dụng lên phần tử bề mặt dA :

$$F_R = \int_A PdA = \int_A (P_0 + \rho g y \sin \theta) dA = P_0 A + \rho g \sin \theta \int_A y dA \quad (3.17)$$

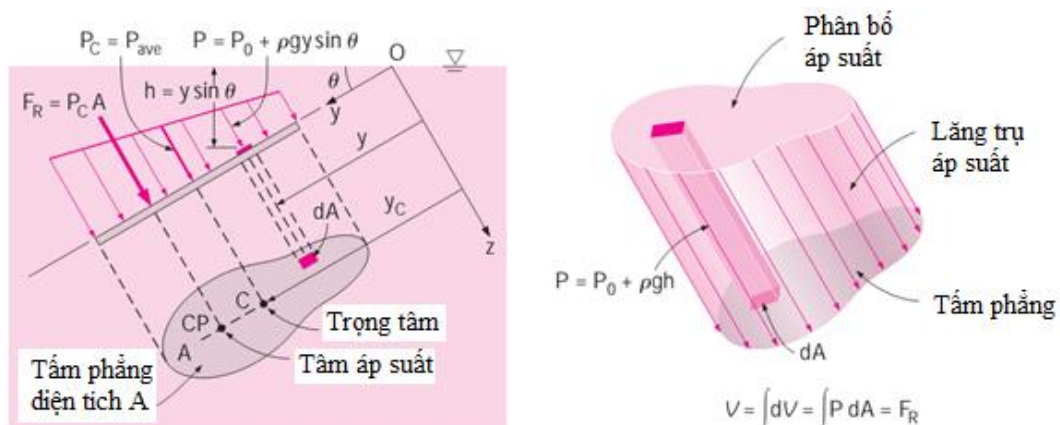
Ký hiệu y_c là tọa độ y của trọng tâm bề mặt:

$$y_c = \frac{1}{A} \int_A y dA \quad (3.18)$$

Khi đó (3.17) trở thành:

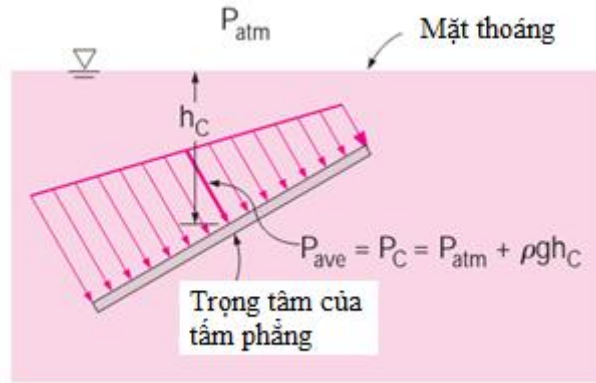
$$F_R = (P_0 + \rho g y_c \sin \theta) A = (P_0 + \rho g h_c) A = P_c A = P_{ave} A \quad (3.19)$$

trong đó $P_c = P_0 + \rho g h_c$ là áp suất tại trọng tâm bề mặt đồng thời là áp suất trung bình P_{ave} của bề mặt, $h_c = y_c \sin \theta$ là khoảng cách thẳng đứng từ trọng tâm đến bề mặt tự do (Hình 3.26).

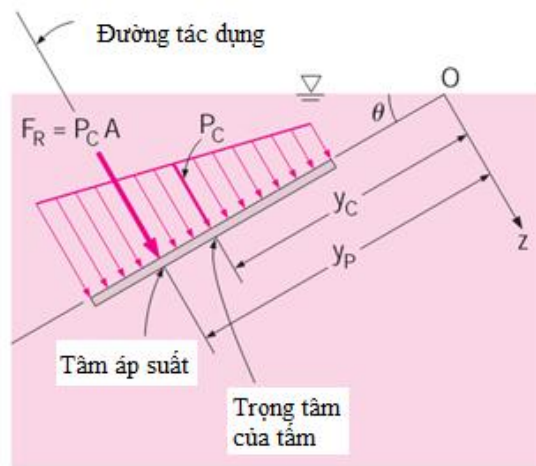


Hình 3.25 Lực thủy tĩnh tác dụng lên mặt phẳng nằm nghiêng ngập hoàn toàn trong chất lỏng

Vì vậy, chúng ta kết luận rằng: Giá trị tổng hợp áp lực tác dụng lên mặt phẳng ngập hoàn toàn trong chất lỏng đồng nhất (mật độ không đổi) bằng tích áp suất tại trọng tâm P_c và diện tích A của bề mặt (Hình 3.27).



Hình 3.26 Áp suất tại trọng tâm bề mặt là áp suất trung bình của bề mặt



Hình 3.27 Áp lực tác dụng lên bề mặt phẳng bằng tích áp suất tại trọng tâm bề mặt và diện tích bề mặt.

P_0 thường là áp suất khí quyển, có thể được bỏ qua trong hầu hết các trường hợp bởi vì nó tác dụng lên cả hai mặt của tấm. Trong trường hợp khác, đóng góp của P_0 cho tổng hợp lực có thể thông qua độ sâu tương đương $h_{equiv} = P_0 / \rho g$ để thêm vào h_C , điều đó thể hiện sự hiện diện của một lớp chất lỏng bổ sung có độ dày h_{equiv} trên bề mặt của các chất lỏng với chân không tuyệt đối ở phía trên.

Tiếp theo, chúng ta cần phải xác định điểm đặt của tổng áp lực F_R . Hai hệ thống lực song song là tương đương nếu chúng có cùng độ lớn và mô-men đối với bất kỳ điểm nào. Điểm đặt của áp lực thủy tĩnh, nói chung, không đi qua trọng tâm của bề mặt mà nằm bên dưới trọng tâm. Trên cơ sở định luật về hệ lực song song tương đương, tọa độ y của tâm áp suất được xác định từ phương trình cân bằng mô-men lực đối với trục x :

$$y_P F_R = \int_A y P dA = \int_A y (P_0 + \rho g y \sin \theta) dA = P_0 \int_A y dA + \rho g \sin \theta \int_A y^2 dA$$

hoặc

$$y_P F_R = P_0 y_C A + \rho g \sin \theta I_{xx, O} \quad (3.20)$$

trong đó y_P là khoảng cách từ tâm áp suất đến trục x (điểm O trong Hình 3.27) và $I_{xx,O} = \int_A y^2 dA$ là mô-men bề mặt bậc 2 (còn gọi là mô-men quán tính bề mặt) đối với trục x . Biểu thức xác định mô-men bề mặt bậc 2 cho các hình thông dụng có thể tìm thấy trong các sổ tay kỹ thuật, chúng thường được đưa ra đối với trục đi qua trọng tâm của hình. Tuy nhiên, mô-men bề mặt bậc 2 đối với hai trục song song có mối liên hệ như sau:

$$I_{xx,O} = I_{xx,C} + y_C^2 A \quad (3.21)$$

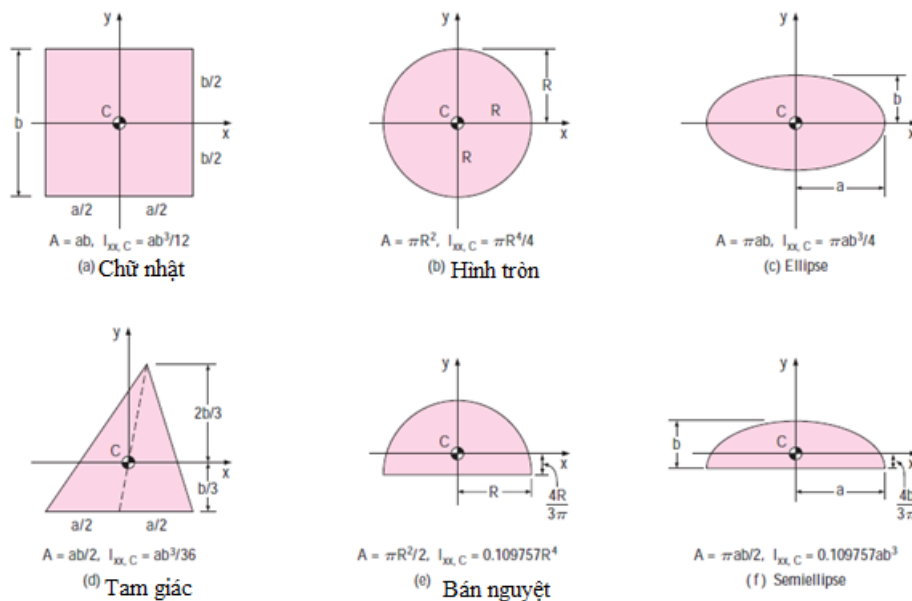
trong đó $I_{xx,C}$ là mô-men bề mặt bậc 2 đối với trục x đi qua trọng tâm của tấm và y_C (tọa độ y của trọng tâm) là khoảng cách giữa hai trục song song. Từ các phương trình (3.19), (3.21) và (3.20), chúng ta nhận được:

$$y_P = y_C + \frac{I_{xx,C}}{\left(y_C + \frac{P_0}{\rho g \sin \theta}\right) A} \quad (3.22a)$$

Với $P_0=0$, trường hợp áp suất khí quyển có thể bỏ qua, (3.22a) được đơn giản thành:

$$y_P = y_C + \frac{I_{xx,C}}{y_C A} \quad (3.22b)$$

Biết y_P , chiều sâu của tâm áp suất được xác định bởi $h_P = y_P \sin \theta$. Các giá trị $I_{xx,C}$ đối với một số hình phổ biến được đưa ra trong Hình 3.28. Đối với những hình có trục y là trục đối xứng, tâm áp suất nằm trên trục y phía dưới trọng tâm.



Hình 3.28 Trọng tâm và mô men quán tính trọng tâm của một số hình phổ biến

Áp suất tác dụng vuông góc với bề mặt và áp lực thủy tĩnh tác dụng lên một tấm phẳng hình dạng bất kỳ có thể biểu diễn như một thể tích có mặt đáy là tấm phẳng và có chiều cao là sự biến thiên tuyến tính của áp suất (lăng trụ áp suất), như thể hiện trong Hình 3.25.

3.5.1. Trường hợp đặc biệt: Tấm phẳng hình chữ nhật

Hãy xem xét một tấm phẳng hình chữ nhật hoàn toàn ngập trong chất lỏng với chiều cao b , chiều rộng a , nghiêng một góc θ và có cạnh trên nằm ngang và ở khoảng cách s đến bề mặt tự do dọc theo mặt phẳng của tấm, như thể hiện trong Hình 3.30a. Áp lực thủy tĩnh lên mặt trên của tấm có giá trị bằng tích áp suất trung bình, là áp suất tại tâm hình chữ nhật, nhân với diện tích A . Có nghĩa là:

$$F_R = P_c A = \left[P_0 + \rho g \left(s + \frac{b}{2} \right) \sin \theta \right] ab \quad (3.23)$$

Tọa độ tâm áp suất y_p được xác định từ phương trình (3.22a):

$$\begin{aligned} y_p &= s + \frac{b}{2} + \frac{a b^3 / 12}{\left[s + \frac{b}{2} + \frac{P_0}{(\rho g \sin \theta)} \right] ab} \\ &= s + \frac{b}{2} + \frac{b^2}{12 \left[s + \frac{b}{2} + \frac{P_0}{(\rho g \sin \theta)} \right]} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Khi cạnh trên của tấm nằm trên mặt tự do ($s=0$), (3.23) trở thành:

$$F_R = [P_0 + \rho g (bsin\theta)/2] ab$$

Đối với tấm thẳng đứng ($\theta=90^\circ$), ta có (Hình 3.30b):

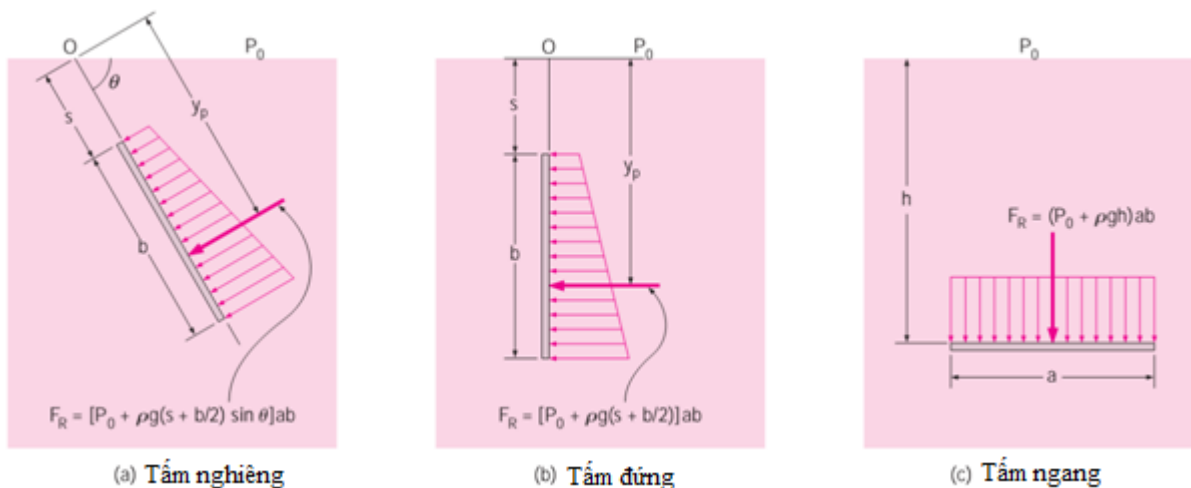
$$\text{Tấm chữ nhật thẳng đứng: } F_R = [P_0 + \rho g (s + b/2)] ab \quad (3.26)$$

$$\text{Tấm chữ nhật thẳng đứng (s=0): } F_R = [P_0 + \rho g b/2] ab \quad (3.27)$$

Khi $s=0$, điểm đặt nằm ở độ sâu $2b/3$.

$$\text{Đối với tấm nằm ngang (}\theta=0^\circ\text{), ta có: } F_R = (P_0 + \rho gh) ab \quad (3.28)$$

Điểm đặt áp lực nằm tại tâm hình chữ nhật (Hình 3.30c).



Hình 3.30 Lực thủy tĩnh tác dụng lên tấm phẳng ngập cho các trường hợp nghiêng, thẳng đứng và nằm ngang.

3.5.2. Ví dụ 3.8: Áp lực thủy tĩnh tác dụng lên cửa xe ô tô ngập nước

Một xe ô tô lao xuống hồ nước trong một tai nạn và chìm xuống đáy hồ (Hình 3.31). Cánh cửa ô tô rộng 1.0 m, cao 1.2 m, cạnh trên của cánh cửa cách mặt hồ 8 m. Xác định áp lực thủy tĩnh lên cửa và vị trí của tâm áp suất. Thảo luận xem người lái xe có thể mở cửa ra không?

Vấn đề: Một chiếc xe ngập trong nước. Cần xác định áp lực thủy tĩnh lên cửa xe và đánh giá khả năng mở được cửa của người lái xe.

Giả thiết: (1) bề mặt đáy hồ là nằm ngang; (2) các cánh cửa xe còn kín để không có rò rỉ nước vào bên trong; (3) cánh cửa xe có thể được xấp xỉ như một tấm hình chữ nhật thẳng đứng; (4) áp suất trong xe vẫn còn ở giá trị áp suất khí quyển vì không có nước rò rỉ vào trong, áp suất khí quyển có thể bỏ qua trong các tính toán bởi vì nó tác dụng lên cả hai mặt của cánh cửa; (5) trọng lượng của chiếc xe là lớn hơn so với lực đẩy nổi tác dụng lên nó.

Tính chất: Chúng ta giả thiết mật độ nước hồ là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Áp suất trung bình trên cửa là giá trị áp suất tại trọng tâm (điểm giữa) của cánh cửa và được xác định là:

$$P_{ave} = P_c = \rho g h_c = \rho g \left(s + \frac{b}{2} \right)$$

$$= \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \left(8 + \frac{1.2}{2} \text{ m} \right) \left(\frac{1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{1000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \right) = 84.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Giá trị lực thủy tĩnh tác dụng lên cánh cửa là:

$$F_R = P_{ave} A = \left(84.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) (1 \times 1.2 \text{ m}^2)$$

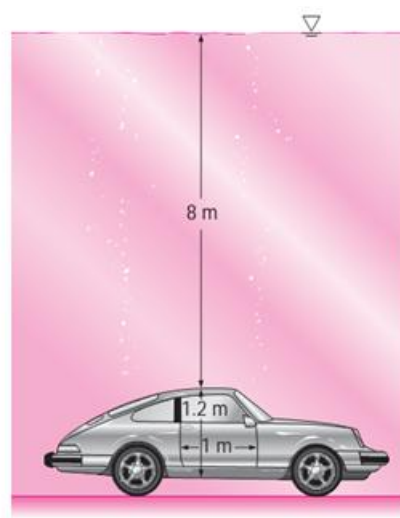
$$= 101.3 \text{ kN}$$

Tâm áp suất nằm dưới điểm giữa của cánh cửa và được xác định từ phương trình (3.24) với $P_0=0$:

$$y_P = s + \frac{b}{2} + \frac{b^2}{12 \left(s + \frac{b}{2} \right)}$$

$$= 8 + \frac{1.2}{2} + \frac{1.2^2}{12 \left(8 + \frac{1.2}{2} \right)} = 8.61 \text{ m}$$

Thảo luận: Một người khỏe mạnh có thể nâng 100 kg, có trọng lượng là 981 N hoặc khoảng 1 kN. Ngoài ra, người có thể tác dụng lực cách bản lề 1 m để có hiệu quả tối đa và tạo ra một mô-men



Hình 3.31 Sơ đồ cho ví dụ 3.8

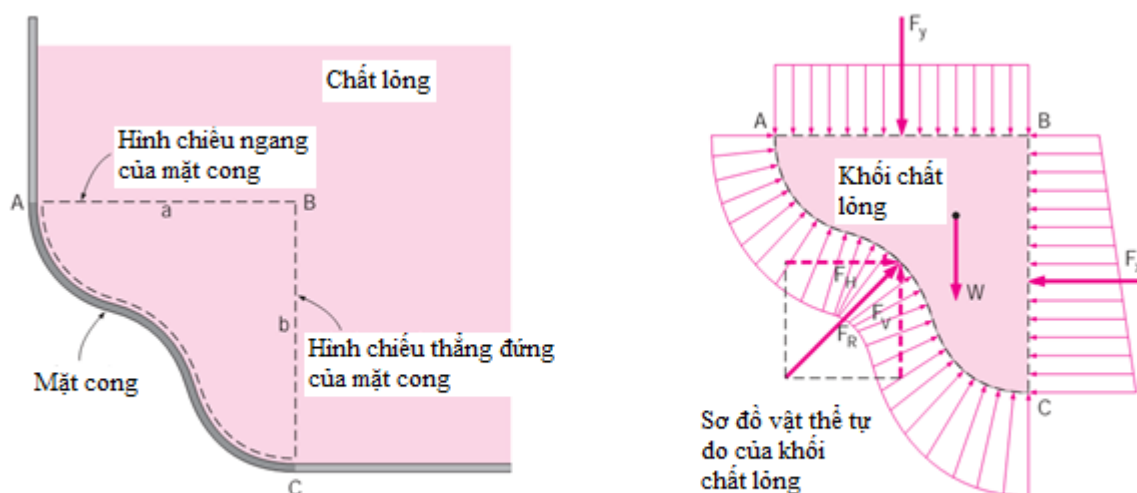
là 1 kN.m

Áp lực thủy tĩnh tác dụng tại điểm giữa của cánh cửa, do đó cách bản lề 0.5 m, tạo ra một mô men là 50.6 kN.m, gấp khoảng 50 lần so với mô men người lái xe có thể có thể tạo ra. Vì vậy, người lái xe không thể mở được cửa xe. Giải pháp tốt nhất của người lái xe là để cho một ít nước trong khoang (bằng cách mở cửa kính xuống một chút) và cố gắng giữ cho đầu mình gần trần xe. Người lái xe có thể mở cánh cửa ngay trước khi chiếc xe lấp đầy nước bởi vì thời điểm đó áp lực lên hai mặt cánh cửa là gần như nhau và việc mở cửa trong nước cũng dễ dàng gần như mở ở trong không khí.

3.6. Áp lực thủy tĩnh lên bề mặt cong ngập trong chất lỏng

3.6.1. Các thành phần áp lực tác dụng lên thành cong

Đối với một bề mặt cong ngập nước, việc xác định tổng hợp lực thủy tĩnh đòi hỏi nhiều cố gắng hơn vì các lực thành phần thay đổi hướng tác dụng theo bề mặt cong. Cách dễ nhất để xác định tổng hợp áp lực thủy tĩnh F_R trên bề mặt cong hai chiều là xác định riêng rẽ các thành phần nằm ngang F_H và thẳng đứng F_V . Điều này được thực hiện bằng cách xem xét *sơ đồ vật thể tự do* của khối chất lỏng bao quanh bởi các bề mặt cong và hai mặt phẳng (một ngang và một dọc) đi qua hai đầu của các bề mặt cong, như thể hiện trong Hình 3.32. Lưu ý rằng các bề mặt thẳng đứng của khối chất lỏng đơn giản là hình chiếu của bề mặt cong lên một mặt phẳng thẳng đứng và các bề mặt ngang là hình chiếu của bề mặt cong lên một mặt phẳng nằm ngang. Các lực tác dụng lên bề mặt rỗng cong là bằng nhau và ngược chiều với lực tác động lên bề mặt chất lỏng cong (theo định luật thứ ba của Newton).



Hình 3.32 Xác định áp lực thủy tĩnh tác dụng lên mặt cong ngập nước

Các lực tác dụng lên mặt phẳng nằm ngang hoặc thẳng đứng *tương đương* và điểm đặt của chúng có thể được xác định như thảo luận trong mục 3.5. Trọng lượng của khối chất lỏng trong thể tích V là $W=\rho gV$, tác dụng hướng xuống dưới tại trọng tâm của khối. Cần chú ý là khối chất lỏng ở trạng thái cân bằng tĩnh và phương trình cân bằng lực lượng theo hướng nằm ngang và thẳng đứng là:

$$\text{Thành phần lực nằm ngang trên mặt cong: } F_H=F_x \quad (3.29)$$

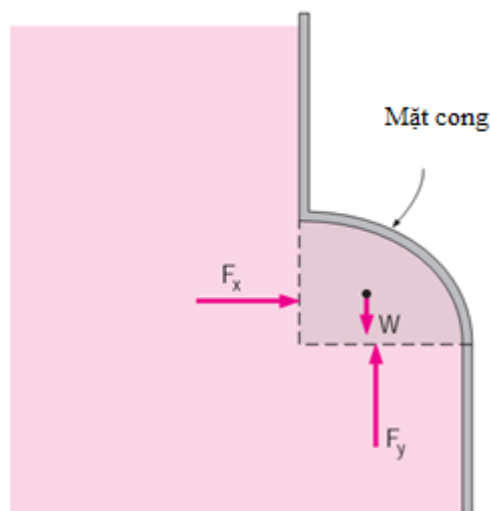
$$\text{Thành phần lực thẳng đứng trên mặt cong: } F_V=F_y+W \quad (3.30)$$

ở đây tổng F_y+W là một phép cộng véc tơ (tức là, độ lớn sẽ cộng thêm nếu cả hai lực tác dụng theo cùng một hướng và trừ đi nếu tác dụng ngược hướng nhau).

Tại đây, chúng ta có thể kết luận rằng:

1. Các thành phần nằm ngang của áp lực thủy tĩnh tác dụng lên một bề mặt cong bằng (về cả độ lớn và vị trí của *đường tác dụng*) với áp lực thủy tĩnh tác động lên hình chiếu thẳng đứng của bề mặt cong.
2. Các thành phần thẳng đứng của áp lực thủy tĩnh tác dụng lên một bề mặt cong bằng với áp lực thủy tĩnh tác động lên hình chiếu nằm ngang của bề mặt cong, cộng thêm (hoặc trừ đi, nếu tác dụng theo hướng ngược lại) trọng lượng của khối chất lỏng.

Độ lớn của tổng hợp áp lực thủy tĩnh tác dụng lên bề mặt cong là $F_R = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}$, góc của phương tác dụng với phương nằm ngang là α , trong đó $\tan(\alpha)=F_V/F_H$. Vị trí chính xác của đường tác dụng có thể được xác định bằng các phương trình mô-men thích hợp. Các thảo luận ở đây đúng cho tất cả các bề mặt cong bất kể chúng đang ở phía trên hoặc phía dưới chất lỏng. Lưu ý rằng trong trường hợp bề mặt cong ở phía trên chất lỏng, trọng lượng của chất lỏng được trừ trong phương trình cân bằng các thành phần thẳng đứng bởi vì chúng tác dụng theo hướng ngược nhau (Hình 3.33).

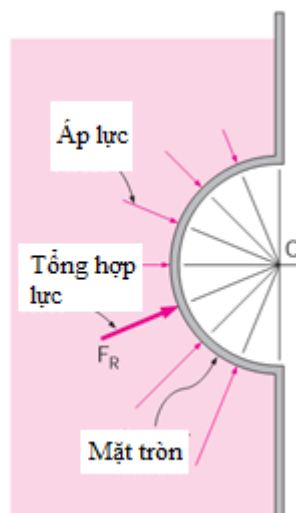


Hình 3.33 Mặt cong ở phía trên chất lỏng, áp lực thủy tĩnh lên bề mặt có hướng lên trên

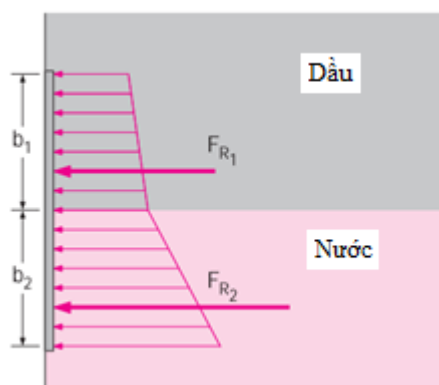
Khi bề mặt cong là một cung tròn (vòng tròn đầy đủ hoặc một phần của nó), tổng hợp áp lực thủy tĩnh tác dụng lên bề mặt luôn luôn đi qua tâm của vòng tròn. Điều này là do các thành phần áp lực là luôn vuông góc

với bề mặt và tất cả các đường vuông góc với bề mặt của một vòng tròn đều đi qua tâm của vòng tròn. Do đó, các thành phần áp lực tạo thành một hệ thống lực đồng tâm và tổng của chúng là một lực duy nhất tác dụng qua tâm của vòng tròn (Hình 3.34).

Trong trường hợp một mặt phẳng hoặc mặt cong ngập trong chất lỏng nhiều lớp có mật độ khác nhau, áp lực thủy tĩnh có thể được xác định bằng cách xem xét các phần khác nhau của bề mặt ngập trong cùng một chất lỏng và xác định áp lực trên mỗi phần riêng. Đối với một bề mặt phẳng, điều đó có thể được thể hiện như (Hình 3.35).



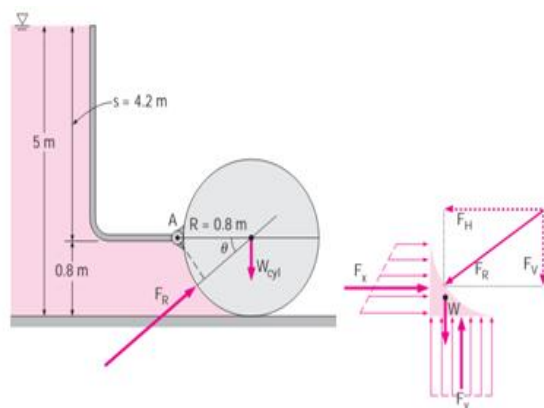
Hình 3.34 Áp lực thủy tĩnh tác dụng lên bề mặt tròn



Hình 3.35 Áp lực thủy tĩnh tác dụng lên bề mặt ngập trong nhiều lớp chất lỏng khác nhau

3.6.2. Ví dụ 3.9: Cửa trọng lực hình trụ

Một vật rắn hình trụ bán kính 0.8 m gắn bản lề theo trục nằm ngang đi qua điểm A, như thể hiện trong Hình 3.36, được sử dụng như một cửa tự động. Khi mực nước đạt 5 m, cánh cửa mở ra bằng cách quay bản lề. Xác định (a) áp lực thủy tĩnh tác dụng lên hình trụ và đường tác dụng của lực khi cửa mở ra và (b) trọng lượng của xi lanh trên mỗi 1 m chiều dài của trục.



Hình 3.36 Sơ đồ cho ví dụ 3.9

Vấn đề: Chiều cao mực nước của một hồ chứa nước được kiểm soát bởi một cửa hình trụ gắn bản lề. Xác định áp lực thủy tĩnh tác dụng lên cửa và trọng lượng của hình trụ trên mỗi 1 m chiều dài của cửa.

Giả thiết: (1) ma sát ở bản lề là không đáng kể; (2) áp suất khí quyển tác dụng lên cả hai bên cửa, do đó có thể bỏ qua.

Tính chất: Giả thiết mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: (a) Xem xét sơ đồ vật thể tự do của khối chất lỏng bao quanh bởi các bề mặt tròn của hình trụ và các hình chiếu thẳng đứng và nằm ngang của nó (Hình 3.36). Áp lực thủy tĩnh tác động lên bề mặt phẳng thẳng đứng và nằm ngang cũng như trọng lượng của khối chất lỏng được xác định như sau:

Lực nằm ngang trên bề mặt thẳng đứng:

$$\begin{aligned} F_H = F_x &= P_{ave} A = \rho g h_c A = \rho g \left(s + \frac{R}{2} \right) A \\ &= \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \left(4.2 + \frac{0.8}{2} \text{ m} \right) (0.8 \text{ m} \times 1 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ N}} \right) = 36.1 \text{ kN} \end{aligned}$$

Lực thẳng đứng trên bề mặt nằm ngang (hướng lên trên):

$$\begin{aligned} F_y = P_{ave} A &= \rho g h_c A = \rho g h_{bottom} A \\ &= \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (5 \text{ m}) (0.8 \text{ m} \times 1 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ N}} \right) = 39.2 \text{ kN} \end{aligned}$$

Trọng lượng của khối chất lỏng trên một đơn vị chiều dài (hướng xuống):

$$\begin{aligned} W = mg &= \rho g V = \rho g \left(R^2 - \frac{\pi R^2}{4} \right) (1 \text{ m}) \\ &= \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) (0.8 \text{ m})^2 \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) (1 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ N}} \right) = 1.3 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tổng hợp lực theo chiều thẳng đứng là:

$$F_V = F_y - W = 39.2 - 1.3 = 37.9 \text{ kN}$$

Giá trị và hướng của lực tác dụng lên bề mặt hình trụ được xác định như sau:

$$\begin{aligned} F_R &= \sqrt{F_H^2 + F_V^2} = \sqrt{36.1^2 + 37.9^2} = 52.3 \text{ kN} \\ \tan \theta &= \frac{F_V}{F_H} = \frac{37.9}{36.1} = 1.05 \rightarrow \theta = 46.4^\circ \end{aligned}$$

Vậy, độ lớn của áp lực thủy tĩnh tác dụng lên trụ là 52.3 kN trên mỗi m chiều dài của trụ và đường tác dụng của lực đi qua tâm hình trụ tạo thành một góc 46.4° so với phương nằm ngang.

(b) Khi mực nước cao 5 m, cống bắt đầu mở có nghĩa là phản lực ở đáy cống trụ phải bằng 0. Như vậy, các lực tác dụng lên hình trụ chỉ còn trọng lượng của nó,

có điểm đặt tại trọng tâm và áp lực thủy tĩnh tác dụng bởi nước. Viết phương trình cân bằng mô-men đối với điểm A, chúng ta nhận được:

$$F_R R \sin\theta - W_{cyl} R = 0 \rightarrow W_{cyl} = F_R \sin\theta = (52.3 \text{ kN}) \sin 46.4^\circ = 37.9 \text{ kN}$$

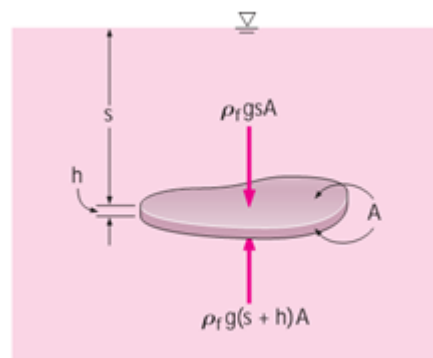
Thảo luận: Trọng lượng cổng trụ là 37.9 kN trên 1 m chiều dài. Điều đó có nghĩa là hình trụ có khối lượng là 3863 kg trên 1 m chiều dài, từ đó có thể tính được vật liệu làm cổng trụ phải có mật độ là 1921 kg/m³.

3.7. Lực đẩy nổi và sự ổn định

3.7.1. Lực đẩy nổi

Chúng ta có thể thấy rằng một vật thường được cảm thấy nhẹ hơn ở trong nước so với ở trong không khí. Điều này có thể được chứng minh một cách dễ dàng bằng cách cân một vật nặng trong nước bằng cân lò xo. Ngoài ra, các đối tượng làm bằng gỗ hoặc vật liệu nhẹ khác thì nổi trên mặt nước. Những điều đó và các quan sát khác đều cho thấy rằng chất lỏng tác dụng một lực lên vật thể ngập trong nó và có hướng hướng lên phía trên. Lực này có xu hướng nâng vật thể lên và được gọi là *lực đẩy nổi* (buoyant force), ký hiệu là F_B . Lực đẩy nổi được sinh ra bởi sự gia tăng áp suất trong chất lỏng theo độ sâu.

Ví dụ: Xem xét một tấm phẳng có độ dày h ngập trong một chất lỏng có mật độ ρ_f nằm song song với bề mặt tự do, như thể hiện trong Hình 3.37. Diện tích bề mặt của tấm là A và khoảng cách tới bề mặt tự do là s . Áp suất trên bề mặt trên và dưới của tấm là $\rho_f g s$ và $\rho_f g(s+h)$, tương ứng. Vì vậy, tấm chịu tác dụng của hai áp lực thủy tĩnh: áp lực thủy tĩnh $F_{top} = \rho_f g s A$ tác dụng lên bề mặt trên của tấm có hướng đi xuống và áp lực lớn hơn



Hình 3.37 Tấm phẳng có bề dày h ngập trong chất lỏng

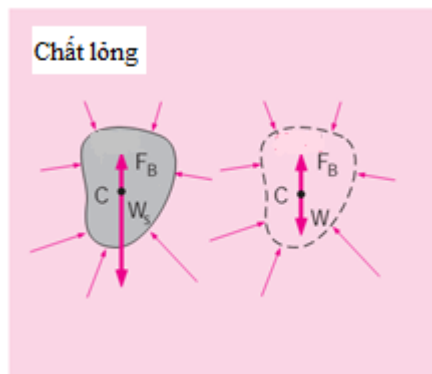
$F_{bottom} = \rho_f g(s+h)$ tác dụng lên bề mặt phía dưới của tấm và có hướng lên trên. Hiệu số giữa hai lực này là một lực hướng lên và đó là lực đẩy nổi:

$$F_B = F_{bottom} - F_{top} = \rho_f g(s+h)A - \rho_f g s A = \rho_f g h A = \rho_f g V \quad (3.32)$$

trong đó $V=hA$ là thể tích của tấm. Tuy nhiên, có thể nhận thấy biểu thức $\rho_f g V$ là trọng lượng của chất lỏng có thể tích tương đương với thể tích của tấm. Vì vậy, chúng ta kết luận rằng lực đẩy nổi tác dụng lên tấm có giá trị bằng với trọng lượng của chất lỏng bị chiếm chỗ bởi tấm. Lưu ý rằng lực đẩy nổi không phụ thuộc vào khoảng cách của vật thể tới bề mặt tự do và cũng không phụ thuộc vào mật độ của vật liệu cấu tạo nên tấm.

Phương trình (3.32) được thu nhận cho một vật có hình học đơn giản, nhưng nó cũng đúng cho vật thể có hình dạng bất kỳ. Điều này có thể được chứng minh bằng toán học trên cơ sở phương trình cân bằng lực (bằng cách sử dụng các công thức tích phân), hoặc chỉ đơn giản bằng cách lập luận như sau: Hãy xem xét một vật thể rắn có hình dạng bất kỳ ngập trong chất lỏng tĩnh và so sánh nó với một khối chất lỏng có hình dạng tương tự xác định bởi đường đứt đoạn ở cùng một

khoảng cách tới bề mặt tự do (Hình 3.38). Các lực đẩy nổi tác dụng lên hai vật thể này đều giống nhau ở mọi mặt từ phân bố đến các giá trị của áp suất trên bề mặt của hai vật thể. Vật thể chất lỏng *tương đương* là ở trạng thái cân bằng tĩnh, do đó tổng hợp lực và mô-men lực tác dụng lên nó là bằng không. Do đó, lực đẩy nổi phải bằng với trọng lượng của vật thể chất lỏng tương đương có thể tích tương đương với thể tích của vật thể rắn.



Hình 3.38 Vật rắn có hình dạng bất kỳ ngập trong nước

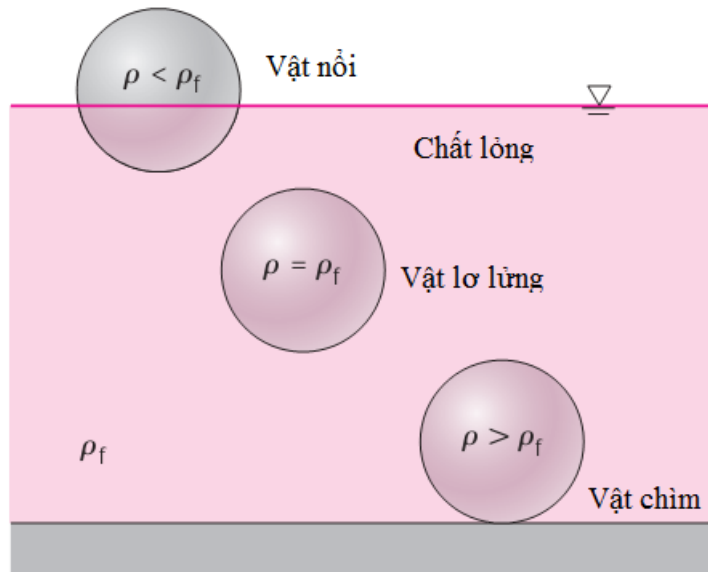
Hơn nữa, trọng lượng và lực đẩy nổi phải có cùng đường tác dụng để có mô-men lực bằng không. Điều này chính là nguyên lý Archimedes, mang tên nhà bác học Hy Lạp Archimedes (287-212 trước Công nguyên), được phát biểu như sau: *Lực đẩy nổi tác dụng lên một vật ngập trong chất lỏng có giá trị bằng trọng lượng của chất lỏng bị chiếm chỗ bởi vật, tác dụng hướng lên trên và có điểm đặt tại trọng tâm của thể tích bị chiếm chỗ.*

Đối với các vật nổi, trọng lượng của toàn bộ vật phải bằng với lực đẩy nổi và bằng trọng lượng của chất lỏng có thể tích tương đương với thể tích của phần ngập nước của vật nổi. Khi đó:

$$F_B = W \rightarrow \rho_f g V_{ng\grave{a}p} = \rho_{v\grave{a}t} g V_{v\grave{a}t} \rightarrow \frac{V_{ng\grave{a}p}}{V_{v\grave{a}t}} = \frac{\rho_{v\grave{a}t}}{\rho_f} \quad (3.33)$$

Do đó, phần thể tích ngập của một vật nổi bằng tỷ lệ mật độ trung bình của vật với mật độ của chất lỏng.

Từ đó cho thấy rằng một vật ngập trong một chất lỏng (1) có thể ở trạng thái tĩnh tại bất kỳ vị trí nào trong chất lỏng khi mật độ của nó tương đương với mật độ của chất lỏng (2) chìm xuống đáy khi mật độ của nó lớn hơn mật độ của chất lỏng và (3) nổi lên trên bề mặt của chất lỏng khi mật độ của vật là nhỏ hơn so với mật độ của chất lỏng (Hình 3.39).



Hình 3.39 Một vật nổi, lơ lửng hay chìm trong chất lỏng phụ thuộc vào tỷ lệ mật độ của vật so với mật độ của chất lỏng

Lực đẩy nổi tỷ lệ thuận với mật độ của chất lỏng, do đó chúng ta có thể nghĩ rằng lực đẩy nổi tác dụng bởi các loại khí như không khí là không đáng kể. Điều này trong nhiều trường hợp là đúng, tuy nhiên cũng có những trường hợp ngoại lệ.

Ví dụ, thể tích của một người là khoảng 0.1 m^3 , mật độ không khí là 1.2 kg/m^3 , lực đẩy nổi tác dụng bởi không khí lên người là:

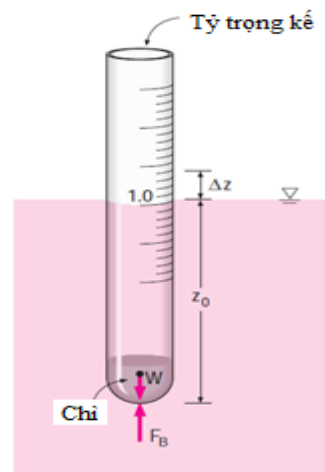
$$F_B = \rho_f g V = (1.2 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.1 \text{ m}^3) \cong 1.2 \text{ N}$$

Trọng lượng của một người 80 kg là $80 \times 9.81 = 788 \text{ N}$. Vì vậy, lực đẩy nổi trong trường hợp này có thể bỏ qua vì chỉ bằng 0.15% trọng lượng của người. Tuy nhiên, hiệu ứng đẩy nổi trong khí quyển chiếm vị trí quan trọng một số hiện tượng tự nhiên chẳng hạn như sự nổi lên của không khí nóng do được hun nóng trên mặt đất là sự khởi đầu của dòng đối lưu tự nhiên tạo ra sự chuyển động của không khí trong khí quyển. Lực đẩy nổi trong khí quyển là quan trọng cho hoạt động của các loại kính khí cầu. Ngoài ra, lực đẩy nổi Archimedes cũng được ứng dụng trong địa chất hiện đại khi xem xét các châu lục di chuyển do được nổi trên một biển dung nham.

3.7.2. Ví dụ 3.10: Đo tỷ trọng riêng bằng tỷ trọng kế (hydrometer)

Nếu bạn có một bể cá nước biển, bạn có thể sử dụng một ống thủy tinh nhỏ hình trụ với một ít chì nặng ở phía dưới của nó để đo độ mặn của nước bằng cách đơn giản là xem ống chìm sâu như thế nào. Một thiết bị nổi có thể

chuyển động lên xuống theo phương thẳng đứng và được sử dụng để đo tỷ trọng riêng của một chất lỏng được gọi là *tỷ trọng kế* (Hình 3.40). Khi thực phép đo, phần trên cùng của tỷ trọng kế phải cao hơn bề mặt chất lỏng. Các vạch trên tỷ trọng kế cho phép đọc tỷ trọng riêng của chất lỏng một cách trực tiếp. Các tỷ trọng kế được hiệu chỉnh sao cho trong nước tinh khiết vạch 1.0 chính xác là mặt tự do nước-không khí. (a) Thu nhận mối quan hệ cho tỷ trọng riêng của chất lỏng như là một hàm của khoảng cách Δz tính từ vạch 1.0



Hình 3.40 Sơ đồ cho ví dụ 3.10

tương ứng với nước tinh khiết và (b) xác định khối lượng chì phải được rót vào tỷ trọng kế đường kính 1cm, dài 20cm sao cho vạch ở giữa ống (đánh dấu 10 cm) tương ứng với nước tinh khiết.

Vấn đề: Tỷ trọng riêng của chất lỏng được đo bằng tỷ trọng kế. Cần xác định mối quan hệ giữa tỷ trọng riêng và khoảng cách thẳng đứng từ vạch tham chiếu (đối với nước tinh khiết) và lượng chì cần phải được rót vào ống để có được một tỷ trọng kế theo yêu cầu.

Giả thiết: (1) Trọng lượng của ống kính là không đáng kể so với trọng lượng của chì thêm vào; (2) Độ cong của đáy ống được bỏ qua.

Tính chất: Giả thiết mật độ của nước tinh khiết là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: (a) Cần chú ý rằng tỷ trọng kế ở trạng thái cân bằng tĩnh, lực đẩy nổi F_B tác dụng bởi chất lỏng phải bằng với trọng lượng W_{hydro} của tỷ trọng kế. Trong nước tinh khiết, để cho khoảng cách thẳng đứng giữa đáy của tỷ trọng kế và bề mặt tự do của nước là z_0 , ta có:

$$W_{\text{hydro}} = F_{B,w} = \rho_w g V_{\text{sub}} = \rho_w g A z_0 \quad (1)$$

trong đó A là diện tích mặt cắt ngang của ống và ρ_w là mật độ của nước tinh khiết.

Trong chất lỏng nhẹ hơn nước ($\rho_f < \rho_w$), tỷ trọng kế chìm sâu hơn và mức chất lỏng sẽ ở trên z_0 một khoảng Δz , ta có:

$$W_{\text{hydro}} = F_{B,f} = \rho_f g V_{\text{sub}} = \rho_f g A (z_0 + \Delta z) \quad (2)$$

Phương trình này cũng đúng cho chất lỏng nặng hơn nước bằng cách lấy Δz dưới z_0 là một số âm. Từ các phương trình (1) và (2), vì trọng lượng của tỷ trọng kế là không đổi, chúng ta nhận được:

$$\rho_w g A z_0 = \rho_f g A (z_0 + \Delta z) \rightarrow SG_f = \frac{\rho_f}{\rho_w} = \frac{z_0}{z_0 + \Delta z}$$

đó là mối quan hệ giữa tỷ trọng riêng của chất lỏng và Δz . Lưu ý z_0 đó là hằng số đối với một tỷ trọng kế cho trước và Δz là có giá trị âm đối với các chất lỏng nặng hơn nước tinh khiết.

(b) Bỏ qua trọng lượng của ống kính, lượng chì cần phải được thêm vào ống được xác định từ điều kiện cân bằng giữa trọng lượng của chì và lực đẩy nổi. Khi tỷ trọng kế đang nổi với một nửa của nó chìm trong nước, lực đẩy nổi tác động lên nó là:

$$F_B = \rho_w g V_{sub}$$

Cho F_B bằng trọng lượng của chì, ta có:

$$W = mg = F_B = \rho_w g V_{sub}$$

Từ đó, khối lượng chì cần xác định là:

$$m = \rho_w (\pi R^2 h_{sub}) = \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) [\pi (0.005 m)^2 (0.1 m)] = 0.00785 kg$$

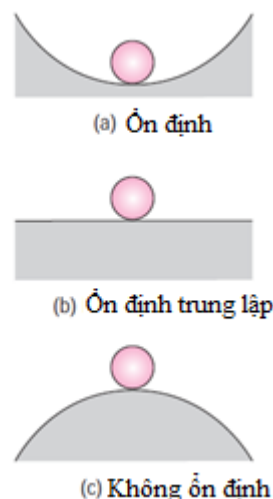
Thảo luận: Lưu ý rằng nếu tỷ trọng kế được yêu cầu để chìm chỉ 5 cm trong nước, khối lượng yêu cầu chì sẽ là một nửa. Ngoài ra, giả thiết rằng trọng lượng của ống kính là không đáng kể cần được kiểm tra bởi vì khối lượng chì cần chỉ là 7.85 g.

3.7.3. Tính ổn định của vật chìm và nổi trong chất lỏng

Một ứng dụng quan trọng của khái niệm đẩy nổi là việc đánh giá sự ổn định của các vật chìm và nổi khi chưa có các tác động từ bên ngoài. Vấn đề này là rất quan trọng trong việc thiết kế tàu thủy và tàu ngầm. Dưới đây chúng ta sẽ thảo luận định tính về tính *ổn định thẳng đứng* và *ổn định quay* (vertical, rotational stability).

Chúng ta sử dụng hình tượng "*bóng trên sàn*" để giải thích khái niệm cơ bản về sự ổn định và không ổn định. Trên Hình 3.43 là ba quả bóng nằm yên trên mặt sàn. Trường hợp (a) là *ổn định* bởi vì bất kỳ xáo trộn nhỏ nào (ai đó di chuyển bóng

sang bên phải hoặc bên trái) đều tạo ra một lực *khôi phục lại* (do trọng lực) để trả nó về vị trí ban đầu. Trường hợp (b) là *ổn định trung lập* (neutrally stable) bởi vì nếu một người nào đó di chuyển bóng sang phải hoặc trái, nó sẽ ở yên tại vị trí mới. Trường hợp (c) là một tình trạng trong đó bóng có thể ở yên tại chỗ vào một thời điểm, nhưng bất kỳ xáo trộn nào, thậm chí nhỏ vô cùng, cũng khiến cho bóng lăn khỏi vị trí của nó và không trở về vị trí ban đầu của nó nữa. Trường hợp này là *không ổn định*. Có thể nói gì về trường hợp quả bóng ở trên một sàn nghiêng? Trường hợp này



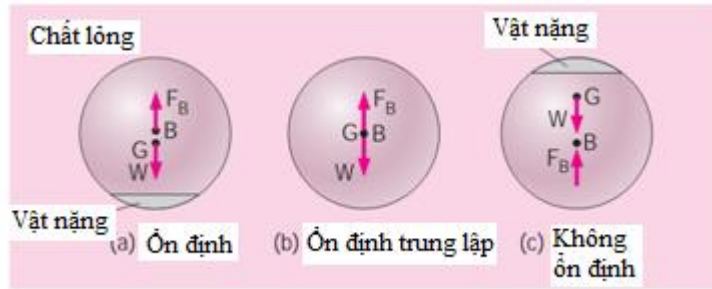
Hình 3.43 Khái niệm ổn định có thể dễ hiểu qua hình tượng "bóng trên sàn".

thực sự là không thích hợp để thảo luận về sự ổn định vì quả bóng không phải đang ở trong một trạng thái cân bằng. Nói cách khác, nó không thể đứng yên được mà sẽ lăn xuống không cần bất kỳ sự xáo trộn nào.

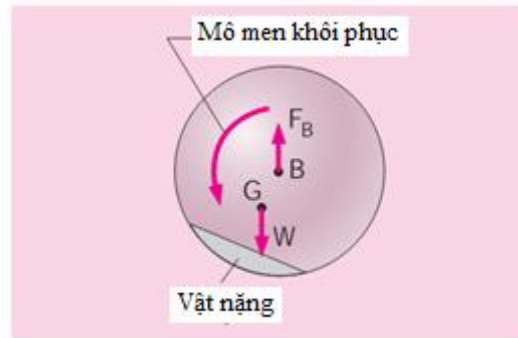
Đối với một vật chìm hoặc nổi trong trạng thái cân bằng tĩnh, trọng lượng và lực đẩy nổi tác dụng lên vật là cân bằng nhau, vật này về bản chất có tính ổn định theo hướng thẳng đứng. Nếu một vật có trạng thái ổn định trung lập, khi được nâng lên hoặc hạ xuống ở độ sâu khác nhau, vật đó sẽ vẫn ở trạng thái cân bằng tại vị trí được mang đến. Nếu một vật nổi được nâng lên hoặc hạ xuống một ít do tác dụng của lực thẳng đứng, vật đó sẽ trở về vị trí ban đầu của nó ngay sau khi các tác động bên ngoài được loại bỏ. Vì vậy, một vật nổi (có mật độ nhỏ hơn mật độ chất lỏng) có tính ổn định theo chiều thẳng đứng, trong khi một vật trung lập (có mật độ bằng mật độ của chất lỏng) có tính ổn định trung lập vì nó không tự trở về vị trí ban đầu sau khi chịu một sự tác động.

Ổn định quay của một vật ngập phụ thuộc vào vị trí tương đối của tâm trọng lực (trọng tâm) G của vật và *tâm đẩy nổi* B (center of buoyancy - là trọng tâm của thể tích chất lỏng bị chiếm chỗ). Một vật ngập là ổn định nếu vật có đáy nặng và do đó điểm G có vị trí ở dưới điểm B (Hình 3.44). Một tác động nhỏ (nhiều) để quay vật trong những trường hợp như vậy tạo ra một mô-men lực có xu hướng đưa vật trở lại vị trí ban đầu ổn định của nó. Do đó, thiết kế ổn định cho một tàu ngầm đòi hỏi xếp đặt các máy móc, trang thiết bị và các cabin cho phi hành đoàn được nằm ở nửa dưới để chuyển sức nặng xuống dưới càng nhiều càng tốt. Kinh khí cầu chứa khí nóng hoặc khí heli (được xem như ngập trong không khí) cũng ổn định bởi vì lồng mang tải nặng nằm ở phía dưới. Một vật ngập mà có tâm trọng lực G ở trên điểm B là không ổn định vì bất kỳ xáo trộn nhỏ nào sẽ làm vật này sẽ đảo lộn. Một vật mà G và B trùng nhau là có tính ổn định trung lập.

Điều gì xảy ra với trường hợp tâm trọng trường không nằm trên đường thẳng đứng với tâm đẩy nổi (Hình 3.45)? Trường hợp này không phải là thích hợp để thảo luận về sự ổn định bởi vì vật không ở trạng thái cân bằng. Nói cách khác, vật không thể đứng yên và sẽ xoay hướng về trạng thái ổn định của nó thậm chí khi không có bất kỳ sự xáo trộn nào. Mô-men khôi phục trong trường hợp Hình 3.45 là ngược chiều kim đồng hồ và làm cho vật xoay ngược chiều kim đồng hồ để đưa điểm G về vị trí thẳng đứng với điểm B.



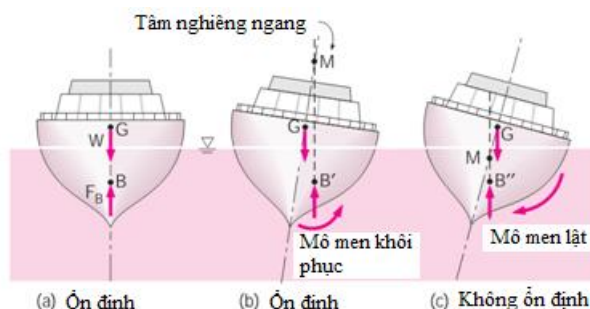
Hình 3.44 Ổn định của vật ngập trong chất lỏng



Hình 3.45 Mô-men khôi phục khi tâm trọng trường và tâm đẩy nổi không nằm trên đường thẳng đứng

Lưu ý rằng có thể có một số dao động xung quanh vị trí ổn định, nhưng cuối cùng vật sẽ đứng yên ở trạng thái cân bằng ổn định của nó như trường hợp (a) của Hình 3.44. Các tiêu chuẩn ổn định quay cũng tương tự đối với các vật nổi. Nếu vật nổi có đáy nặng và trọng tâm G nằm dưới tâm đẩy nổi B, vật luôn ở trạng thái ổn định. Nhưng không giống như trường hợp vật ngập, một vật nổi vẫn có thể ổn định khi G ở vị trí cao trên B (Hình 3.46). Điều này là do trọng tâm của thể tích bị chiếm chỗ chuyển đến điểm B' dưới tác dụng của một nhiễu loạn quay trong khi tâm trọng lực G của vật vẫn không thay đổi. Nếu điểm B' là đủ xa, hai lực này tạo một mô-men khôi phục để đưa vật về vị trí ban đầu. Thước đo cho sự ổn định của vật nổi là độ cao của tâm nghiêng ngang (metacentric) GM (còn gọi là độ cao thế vững của vật nổi), đó là khoảng cách giữa tâm trọng lực G và tâm nghiêng ngang M (giao điểm của các đường tác dụng của lực đẩy nổi trước và sau khi quay). Các tâm nghiêng ngang có thể coi là một điểm cố định cho hầu hết các hình dạng thân tàu đối với lặn góc nhỏ hơn 20° . Một vật nổi là ổn định nếu điểm M nằm cao hơn điểm G, khi đó GM là dương và không ổn định nếu điểm M nằm dưới điểm

G, khi đó GM là âm. Trong trường hợp (c) Hình 3.46, trọng lượng và lực đẩy nổi tác dụng lên vật nghiêng tạo ra một mô-men lật thay vì một mô-men khôi phục, làm cho vật có thể bị lật. Chiều cao GM là một thước đo của sự ổn định: càng lớn vật nổi càng ổn định.



Hình 3.46 Tính ổn định của vật thể nổi

Độ cao tâm nghiêng ngang được xác định bởi công thức [11]:

$$BM = I/V, \quad (3.34)$$

trong đó I là mô men quán tính bề mặt đường nước và V là thể tích của phần chìm.

Như đã thảo luận ở trên, một chiếc thuyền có thể nghiêng một góc tối đa mà không lật, tuy nhiên nếu nghiêng lớn hơn góc đó sẽ bị lật (và chìm). Như vậy, chúng ta có một sự tương tự cuối cùng giữa sự ổn định của các vật nổi và sự ổn định của “bóng trên sàn”. Cụ thể, hãy tưởng tượng quả bóng trong một cái máng giữa hai ngọn đồi (Hình 3.47). Bóng có thể trở lại vị trí cân bằng ổn định của mình sau khi bị nhiễu tác động đến một giới hạn nào đó. Tuy nhiên, nếu biên độ nhiễu là quá lớn, quả bóng vượt qua các ngọn đồi và không quay trở lại vị trí cân bằng của nó. Đây là trạng thái ổn định có giới



Hình 3.47 Quả bóng ở trạng thái ổn định với mức độ nhiễu nhiều giới hạn

hạn với mức độ nhiễu nhất định. Với mức độ nhiễu lớn hơn, vật không còn ở trạng thái không ổn định.

3.8. Chất lỏng trong chuyển động bó cứng (tĩnh tương đối)

Chúng ta đã chỉ ra tại mục 3.1 rằng áp suất tại một điểm có cùng một giá trị theo tất cả các hướng và là một đại lượng vô hướng. Trong phần này, chúng ta sẽ nghiên cứu sự thay đổi của áp suất trong chất lỏng chuyển động như một vật rắn có hoặc không có gia tốc với ứng suất cắt bằng 0 tại mọi điểm (tức là không có chuyển động tương đối giữa các lớp chất lỏng). Khi đó chuyển động của chất lỏng được gọi là *chuyển động bó cứng* (rigid-body motion).

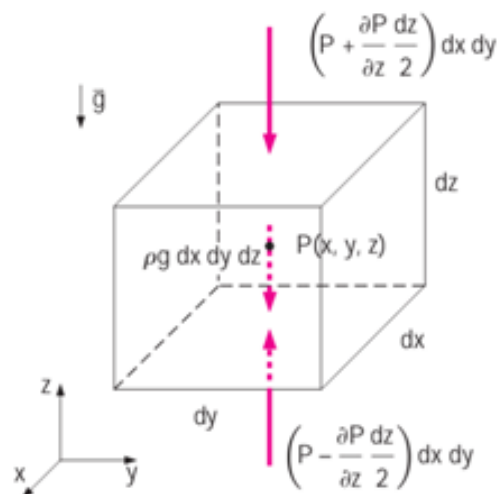
Nhiều chất lỏng như sữa, xăng, dầu... được vận chuyển trong các bồn chứa. Khi bồn chứa tăng tốc, chất lỏng bị dồn về phía sau, ban đầu một phần có thể bị bắn tung tóe lên trên. Tuy nhiên, sau đó một bề mặt tự do mới (thường là không nằm ngang) được hình thành, khi đó mỗi hạt chất lỏng đều có cùng gia tốc và toàn bộ chất lỏng di chuyển giống như một vật rắn. Không có ứng suất cắt phát triển trong chất lỏng vì thế không có biến dạng và do đó không có sự thay đổi về hình dạng. Chuyển động bó cứng của chất lỏng cũng xảy ra khi chất lỏng được chứa trong một bình quay xung quanh một trục.

Hãy xem xét một phần tử nước hình khối chữ nhật có các cạnh dx , dy , dz theo các hướng x , y và z tương ứng, trong đó trục z hướng lên trên theo phương thẳng đứng (Hình 3.48). Giả thiết phần tử chất lỏng ứng xử như một vật rắn, khi đó định luật thứ hai của Newton cho phần tử này có thể viết:

$$\delta \vec{F} = \delta m \cdot \vec{a} \quad (3.35)$$

trong đó $\delta m = \rho dV = \rho dx dy dz$ là khối lượng của phần tử chất lỏng, \vec{a} là gia tốc và $\delta \vec{F}$ là tổng hợp lực tác dụng lên phần tử.

Các lực tác dụng lên phần tử chất lỏng bao gồm các *lực khối* như trọng lực tác dụng tại mọi điểm của phần tử và là tỷ lệ thuận với khối lượng của phần tử (ngoài ra có thể kể đến lực điện trường và từ trường, tuy nhiên các trường hợp này sẽ không được xem xét ở đây) và các *lực mặt* như áp lực (do áp suất) tác dụng lên bề mặt của phần tử và là tỷ lệ thuận với diện tích bề mặt (ứng suất cắt cũng gây ra lực tác dụng lên bề mặt phần tử, nhưng không được xem xét trong trường hợp này vì có giá trị bằng 0).



Hình 3.48 Lực khối và lực bề mặt tác dụng lên một phần tử

Các lực mặt xuất hiện khi phần tử chất lỏng được tách ra khỏi chất lỏng để phân tích và hiệu ứng tách ra được thay thế bởi một lực trên mặt của phần tử. Lưu ý rằng lực mặt đại diện cho lực nén tác dụng lên phần tử chất lỏng do các chất lỏng xung quanh và luôn hướng vào bề mặt của phần tử. Lấy áp suất tại tâm phần tử là P , áp suất tại các bề mặt trên và dưới của phần tử có được là $P + (\partial P / \partial z) dz / 2$ và $P - (\partial P / \partial z) dz / 2$, tương ứng. Nhớ rằng áp lực tác dụng lên một bề mặt bằng áp suất trung bình nhân với diện tích bề mặt, tổng áp lực tác dụng lên phần tử theo hướng z bằng hiệu áp lực tác dụng lên mặt dưới và mặt trên của phần tử:

$$\delta F_{s,z} = \left(P - \frac{\partial P}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy - \left(P + \frac{\partial P}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dx dy = - \frac{\partial P}{\partial z} dx dy dz \quad (3.36)$$

Tương tự, theo hướng x và y:

$$\delta F_{s,x} = -\frac{\partial P}{\partial x} dx dy dz \quad \text{và} \quad \delta F_{s,y} = -\frac{\partial P}{\partial y} dx dy dz \quad (3.37)$$

Vì vậy, lực mặt tác dụng lên phần tử biểu diễn dưới dạng véc tơ là:

$$\begin{aligned} \delta \vec{F}_s &= \delta F_{s,x} \vec{i} + \delta F_{s,y} \vec{j} + \delta F_{s,z} \vec{k} \\ &= -\left(\frac{\partial P}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial P}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial P}{\partial z} \vec{k} \right) dx dy dz = -\vec{\nabla} P dx dy dz \end{aligned} \quad (3.38)$$

Trong đó \vec{i}, \vec{j} và \vec{k} là véc tơ đơn vị của các trục x, y, và z, tương ứng; còn

$$\vec{\nabla} P = \frac{\partial P}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial P}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial P}{\partial z} \vec{k} \quad (3.39)$$

là gradient của trường áp suất P.

Lực khối duy nhất tác dụng lên phần tử chất lỏng là trọng lực tác dụng theo hướng đi xuống ngược với hướng của trục z và giá trị của lực là $\delta F_{B,z} = -g \delta m = -\rho g dx dy dz$ hoặc dưới dạng véc tơ:

$$\delta \vec{F}_{B,z} = -g \delta m \vec{k} = -\rho g dx dy dz \quad (3.40)$$

Vì vậy tổng hợp lực tác dụng lên phần tử có dạng:

$$\delta \vec{F} = \delta \vec{F}_s + \delta \vec{F}_B = -(\vec{\nabla} P + \rho g \vec{k}) dx dy dz \quad (3.41)$$

Thay biểu thức nhận được từ định luật hai Newton $\delta \vec{F} = \delta m \cdot \vec{a} = \rho dx dy dz \cdot \vec{a}$ và khử $dx dy dz$ ở hai vế, phương trình chuyển động bó cứng tổng quát của chất lỏng được xác định như sau:

$$\vec{\nabla} P + \rho g \vec{k} = -\rho \vec{a} \quad (3.42)$$

Phương trình này được viết dưới dạng các trường minh cho các thành phần véc tơ như sau:

$$\frac{\partial P}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial P}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial P}{\partial z} \vec{k} + \rho g \vec{k} = -\rho (a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}) \quad (3.43)$$

Hay dưới dạng vô hướng:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho a_x, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = -\rho a_y \quad \text{và} \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho (g + a_z) \quad (3.44)$$

ở đây a_x, a_y và a_z là các thành phần gia tốc theo các hướng x, y, và z tương ứng.

3.8.1. Trường hợp đặc biệt 1: Chất lỏng ở trạng thái tĩnh không có gia tốc

Đối với chất lỏng tĩnh hoặc chuyển động thẳng với vận tốc không đổi, tất cả các thành phần gia tốc bằng 0, khi đó phương trình (3.43) rút gọn thành:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad \text{và} \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (3.45)$$

Phương trình này xác nhận rằng, trong chất lỏng tĩnh, áp suất không đổi theo hướng nằm ngang (P không phụ thuộc vào tọa độ x và y) và chỉ thay đổi theo

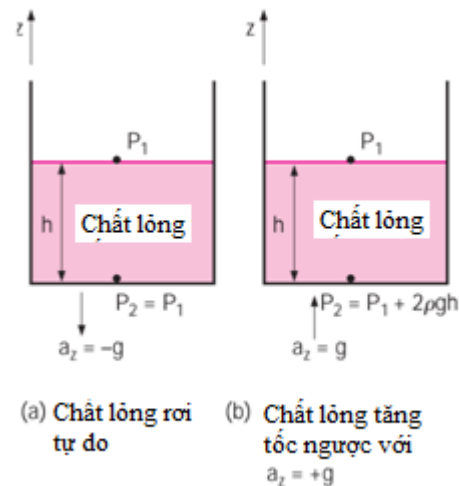
hướng thẳng đứng như là kết quả của trọng trường [do đó có thể viết $P=P(z)$]. Quan hệ này được áp dụng cho cả các chất lỏng nén được và không nén được.

3.8.2. Trường hợp đặc biệt 2: Roi tự do của một bình chứa chất lỏng

Một vật rơi tự do sẽ tăng tốc dưới ảnh hưởng của trọng trường. Khi sức cản không khí là không đáng kể, gia tốc thẳng đứng của vật bằng với tốc trọng trường và gia tốc theo hướng nằm ngang bất kỳ là 0. Vì vậy, $a_x=a_y=0$ và $a_z=-g$ và phương trình (3.43) rút gọn thành:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \rightarrow P = \text{constant} \quad (3.46)$$

Vi vậy, trong hệ quy chiếu chuyển động cùng với chất lỏng, chất lỏng ứng xử như là ở trong môi trường với điều kiện không trọng trường. Trong trường hợp chất lỏng chuyển động ngược lên có gia tốc theo chiều thẳng đứng $a_z=+g$ (bằng cách đặt thùng chứa chất lỏng vào thang máy hoặc tàu không gian đẩy lên bởi một động cơ tên lửa), gradient áp suất theo hướng z khi đó là, $\partial P/\partial z=-2\rho g$. Vì vậy, chênh lệch áp suất qua lớp chất lỏng sẽ tăng gấp đôi so với các trường hợp chất lỏng tĩnh (Hình 3.49).



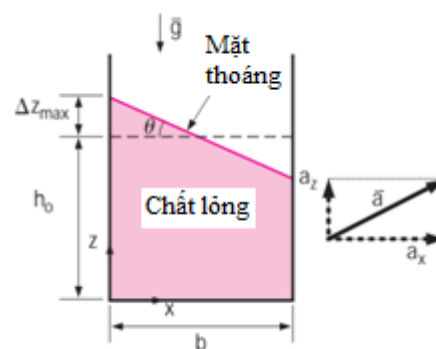
Hình 3.49 Hiệu ứng gia tốc lên phân bố áp suất chất lỏng

3.8.3. Chuyển động có gia tốc trên đường thẳng

Hãy xem xét một bể chứa chất lỏng di chuyển trên đường thẳng với gia tốc không đổi. Chúng ta lấy trục nằm trên mặt phẳng nằm ngang theo hướng chuyển động là trục x và chiều thẳng đứng là trục z , như thể hiện trong Hình 3.50. Thành phần x và thành phần z của gia tốc là a_x và a_z . Không có chuyển động theo hướng y , do đó gia tốc theo hướng đó là 0, $a_y=0$. Vì vậy, các phương trình của chuyển của chất lỏng có gia tốc (3.43) rút gọn thành:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho a_x, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \text{ và } \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho(g + a_z) \quad (3.47)$$

Vi vậy P không phụ thuộc vào y , vì phân toàn phần của P là:



Hình 3.50 Chuyển động bó cứng của chất lỏng trong bể chứa có gia tốc

$$dP = -\rho a_x dx - \rho(g + a_z) dz \quad (3.48)$$

Với $\rho = \text{const}$, lấy tích phân giữa hai điểm bất kỳ 1 và 2 trong chất lỏng, chúng ta nhận được:

$$P_2 - P_1 = -\rho a_x (x_2 - x_1) - \rho(g + a_z)(z_2 - z_1) \quad (3.49)$$

Nếu lấy điểm 1 tại gốc tọa độ ($x=0, z=0$) với áp suất $P=P_0$ và điểm 2 là điểm bất kỳ trong chất lỏng, phân bố áp suất trong chất lỏng có dạng:

$$P = P_0 - \rho a_x x - \rho(g + a_z)z \quad (3.50)$$

Độ hạ thấp chiều cao mặt thoáng từ điểm 1 đến điểm 2 có thể tính được bằng cách chọn điểm 1 và 2 là những điểm trên mặt thoáng ($P_1=P_2$), giải phương trình (3.48) có thể tìm được chênh lệch độ cao z_2-z_1 (Hình 3.51).

Như vậy độ dâng mặt nước trên mặt thoáng được xác định là:

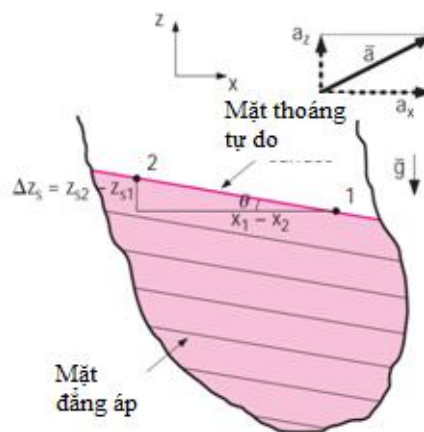
$$\Delta z_s = z_{s2} - z_{s1} = -\frac{a_x}{g+a_z} (x_2 - x_1) \quad (3.51)$$

ở đây z_s là tọa độ z của bề mặt tự do của chất lỏng. Phương trình cho các mặt chất lỏng có áp suất không đổi được gọi là mặt đẳng áp (isobar), thu được từ phương trình (3.47) bằng cách đặt $dP=0$ và thay z bởi z_{isobar} , là tọa độ z của mặt đẳng áp và là một hàm số của x . Như vậy:

$$\frac{dz_{isobar}}{dx} = -\frac{a_x}{g+a_z} = \text{const} \quad (3.52)$$

Đây cũng chính là phương trình xác định độ nghiêng của mặt đẳng áp (cũng là độ nghiêng của mặt thoáng). Góc nghiêng θ so với mặt phẳng nằm ngang được xác định bởi phương trình:

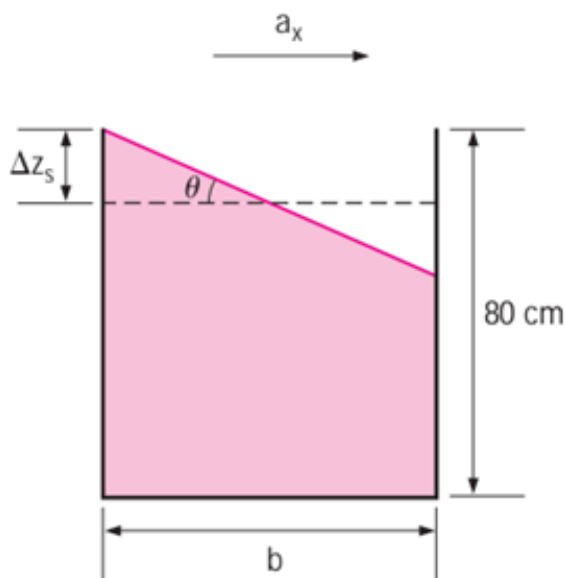
$$\tan \theta = \frac{a_x}{g+a_z} \quad (3.53)$$



Hình 3.51 Các đường đẳng áp và độ dâng chiều cao mặt thoáng Δz_s

3.8.4. Ví dụ 3.11: Nước tràn từ bồn chứa khi tăng tốc

Một bồn chứa cao 80 cm với mặt cắt ngang 2 m x 0.6 m, ban đầu chứa nước được vận chuyển trên một chiếc xe tải (Hình 3.52). Chiếc xe tải tăng tốc từ 0 đến 90 km/h trong 10 s. Hãy xác định chiều cao cột nước ban đầu cho phép để nước không tràn ra khỏi bồn khi tăng tốc. Xem xét cách đặt bồn trên xe tốt nhất để tránh tràn nước, đặt chiều dài hay chiều ngắn của bồn dọc theo hướng chuyển động?



Hình 3.52 Sơ đồ của ví dụ 3.12

Vấn đề: Bồn chứa nước được vận chuyển trên xe tải. Xác định chiều cao cột nước cho phép và hướng đặt bồn tốt nhất để tránh tràn nước khi tăng tốc.

Giả thiết: (1) Đường nằm ngang khi tăng tốc để gia tốc không có thành phần thẳng đứng ($a_z=0$); (2) Ảnh hưởng của độ không bằng phẳng của mặt đường và các sự cố khác có thể làm nước bắn tung tóe là được bỏ qua; (3) Gia tốc của xe là hằng số.

Phân tích: Chúng ta chọn trục x là hướng chuyển động, trục z là hướng thẳng đứng hướng lên trên và gốc tọa độ là góc dưới bên trái của bồn. Xe tải tăng tốc từ 0 đến 90 km/h trong 10 giây, vậy gia tốc của xe tải là:

$$a_x = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{(90 - 0) \frac{km}{h}}{10 s} \left(\frac{1 \frac{m}{s}}{3.6 \frac{km}{h}} \right) = 2.5 \frac{m}{s^2}$$

Góc nghiêng của mặt tự do là:

$$\tan \theta = \frac{a_x}{g + a_z} = \frac{2.5}{9.81 + 0} = 0.255 \rightarrow \theta = 14.3^\circ$$

Độ dâng cao tối đa của bề mặt tự do xảy ra ở thành sau của bồn và trên mặt phẳng thẳng đứng ở giữa bồn thì độ cao mặt nước được giữ nguyên vì đó là mặt phẳng đối xứng. Vì vậy, sự gia tăng độ cao ở thành sau của bồn so với điểm giữa bồn cho hai trường hợp được tính như sau:

Trường hợp 1: Cạnh dài song song với hướng chuyển động

$$\Delta z_{s1} = \left(\frac{b_1}{2}\right) \tan \theta = \left[\frac{2 \text{ m}}{2}\right] \times 0.255 = 0.255 \text{ m} = 25.5 \text{ cm}$$

Trường hợp 2: Cạnh ngắn là song song với hướng chuyển động

$$\Delta z_{s2} = \left(\frac{b_2}{2}\right) \tan \theta = \left[\frac{0.6 \text{ m}}{2}\right] \times 0.255 = 0.076 \text{ m} = 7.6 \text{ cm}$$

Như vậy, nếu việc nâng và đặt bồn không là vấn đề, thì tốt nhất là đặt chiều ngắn của bồn song song với hướng chuyển động. Trong trường hợp này chỉ cần để bồn trống khoảng chiều cao là 7.6 cm là có thể tránh tràn nước khi tăng tốc.

Thảo luận: Lưu ý rằng hướng đặt bể là vấn đề quan trọng trong việc kiểm soát sự gia tăng cột chất lỏng theo chiều thẳng đứng. Ngoài ra, phân tích trên là đúng cho bất kỳ chất lỏng có mật độ là hằng số, không chỉ có nước, vì vậy kết quả trên có thể áp dụng cho bất kỳ chất lỏng nào khác.

3.8.5. Bồn chứa hình trụ quay xung quanh trục

Chúng ta có thể quan sát thấy rằng khi cốc thủy tinh chứa đầy nước được xoay quanh trục của nó, nước sẽ tràn ra bên ngoài do tác dụng của lực ly tâm và bề mặt tự do của chất lỏng trở nên lõm xuống.

Hãy xem xét một chiếc bình hình trụ thẳng đứng chứa chất lỏng. Bình chứa quay quanh trục của nó với vận tốc góc không đổi ω , như thể hiện trong Hình 3.53. Sau thời gian quá độ ban đầu, chất lỏng sẽ chuyển động như một vật rắn cùng với bình chứa. Mỗi hạt chất lỏng trong bình chuyển động với cùng một vận tốc góc.

Vấn đề này được phân tích dễ dàng hơn trong hệ tọa độ trụ (r, θ, z) , với trục z dọc theo đường tâm của bình hướng từ dưới lên về phía bề mặt tự do. Vì bình là hình trụ nên các hạt chất lỏng chuyển động theo một đường tròn. Gia tốc hướng tâm của một hạt chất lỏng quay với một vận tốc góc không đổi ω tại một khoảng cách r từ trục quay là $r\omega^2$ và hướng về phía tâm (ngược chiều trục r). Như vậy, thành phần gia tốc $a_r = -r\omega^2$. Trục z là trục đối xứng và là trục quay, do đó các đại lượng không phụ thuộc vào θ . Vậy chúng ta có: $P = P(r, z)$ và $a_\theta = 0$. Ngoài ra, $a_z = 0$ vì không có chuyển động theo hướng z .

Các phương trình chuyển động của chất lỏng (3.43) được rút gọn thành:

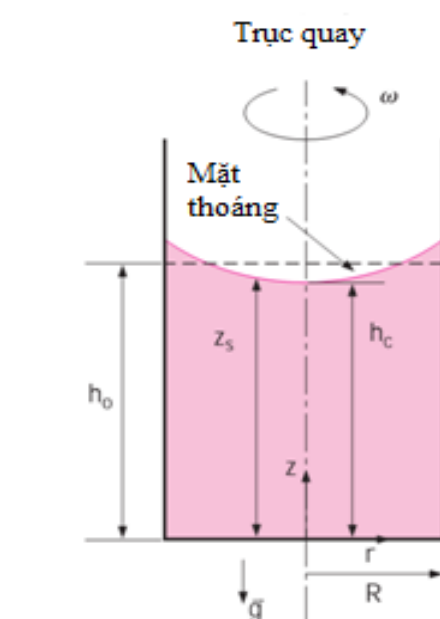
$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial r} &= \rho r \omega^2 \\ \frac{\partial P}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial P}{\partial z} &= -\rho g \end{aligned} \quad (3.54)$$

Từ đó vi phân toàn phần của $P=P(r,z)$ có dạng:

$$dP = \rho r \omega^2 dr - \rho g dz$$

Phương trình mặt đẳng áp với $dP=0$ có dạng:

$$\frac{dz_{isobar}}{dr} = \frac{r \omega^2}{g} \quad (3.55)$$



Hình 3.53 Chuyển động bó cứng của chất lỏng trong hình trụ quay tròn

Tích phân phương trình trên, chúng ta nhận được:

$$z_{isobar} = \frac{\omega^2}{2g} r^2 + C_1 \quad (3.56)$$

là phương trình của một mặt parabol. Vậy bề mặt đẳng áp của chất lỏng chứa trong hình trụ quay tròn là một mặt parabol.

Giá trị của hằng số tích phân C_1 là khác nhau cho các mặt parabol đẳng áp khác nhau. Đối với mặt tự do, đặt $r=0$ trong phương trình (3.56) cho $z_{isobar}(0)=C_1=h_c$, h_c là khoảng cách của bề mặt tự do tới đáy của bình chứa dọc theo trục quay (Hình 3.53). Khi đó phương trình cho bề mặt tự do trở thành:

$$z_s = \frac{\omega^2}{2g} r + h_c \quad (3.57)$$

trong đó z_s là khoảng cách từ bề mặt tự do đến đáy của bình tại điểm có bán kính r . Ở đây cần giả thiết là chất lỏng đủ nhiều để đáy bình chứa vẫn còn được che lấp bằng lớp chất lỏng (nếu khối lượng chất lỏng không đủ, đáy có thể bị cạn do chất lỏng dâng lên xung quanh thành bình).

Thể tích của một phần tử vỏ hình trụ có bán kính r , chiều cao z_s và rộng dr là $dV=2\pi r z_s dr$. Vì vậy, thể tích của paraboloid hình thành bởi bề mặt tự do là:

$$V = \int_0^R 2\pi z_s r dr = 2\pi \int_0^R \left(\frac{\omega^2}{2g} r^2 + h_c \right) r dr = \pi R^2 \left(\frac{\omega^2 R^2}{4g} + h_c \right) \quad (3.58)$$

Vì chất lỏng là không nén được nên thể tích chất lỏng trong bình phải bảo toàn, do đó:

$$V = \pi R^2 h_0 \quad (3.59)$$

Từ đó rút ra giá trị của h_c :

$$h_c = h_0 - \frac{\omega^2 R^2}{4g} \quad (3.60)$$

Vậy phương trình của bề mặt tự do là:

$$z_s = h_0 - \frac{\omega^2}{4g}(R^2 - 2r^2) \quad (3.61)$$

Chiều cao bề mặt tự do tối đa xảy ra ở thành bình khi $r=R$. Chênh lệch độ cao tối đa xảy ra giữa thành bình và tâm của bề mặt tự do được xác định bằng cách tính z_s tại $r=R$ và $r=0$, sau đó lấy hiệu của chúng:

$$\Delta z_{s,max} = z_s(R) - z_s(0) = \frac{\omega^2}{2g} R^2 \quad (3.62)$$

3.8.6. Ví dụ 3.12: Chất lỏng dâng lên trong chuyển động quay

Một bình chứa hình trụ thẳng đứng đường kính 20 cm, cao 60 cm, chứa chất lỏng có độ sâu 50 cm và mật độ 850 kg/m^3 . Bình quay xung quanh trục với tốc độ không đổi. Xác định tốc độ quay để chất lỏng bắt đầu tràn qua thành bình.

Vấn đề: Một bình hình trụ thẳng đứng một phần chứa chất lỏng quay xung quanh trục của nó. Cần xác định tốc độ quay để chất lỏng bắt đầu tràn qua thành.

Giả thiết: (1) Tốc độ quay cần được tăng lên dần dần để chất lỏng trong bình luôn chuyển động bó cứng; (2) Khối lượng chất lỏng trong bình đủ nhiều để đáy bình không bị khô trong khi quay.

Phân tích: Lấy tâm của mặt đáy của hình trụ là gốc tọa độ ($r=0, z=0$), phương trình bề mặt tự do của chất lỏng là:

$$z_s = h_0 - \frac{\omega^2}{4g}(R^2 - 2r^2)$$

Độ cao của chất lỏng trên thành ống $r=R$ là: $z_s(R) = h_0 + \frac{\omega^2 R^2}{4g}$

Với $h_0=0.5 \text{ m}$, $z_s(R)=0.6 \text{ m}$ để chất lỏng dâng lên đến thành bình, vì vậy tốc độ quay ω là:

$$\omega = \sqrt{\frac{4g[z_s(R) - h_0]}{R^2}} = \sqrt{\frac{(4 \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) [(0.6 - 0.5)\text{m}])}{(0.1 \text{ m})^2}} = 19.8 \text{ rad/s}$$

Nhớ rằng một vòng quay là tương ứng với $2\pi \text{ rad}$, do đó tốc độ quay trong đơn vị rpm sẽ là:

$$\dot{n} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{19.8 \text{ rad/s}}{2\pi \text{ rad/rev}} \left(\frac{60\text{s}}{1 \text{ min}}\right) = 189 \text{ rpm}$$

Như vậy tốc độ quay của bình cần nhỏ hơn 189 rpm để chất lỏng không tràn qua thành bình do hiệu ứng ly tâm.

Thảo luận: Lưu ý rằng việc kết quả nhận được là đúng cho bất kỳ chất lỏng nào bởi vì kết quả không phụ thuộc vào mật độ hoặc các tính chất nào khác của chất lỏng. Chúng ta cũng nên xét rằng giả thiết đáy bình không có điểm khô có phù hợp không. Có thể nhận thấy chiều cao chất lỏng nhỏ nhất ở tâm bình là:

$$z_s(0) = h_0 - \frac{\omega^2 R^2}{4g} = (0.5 \text{ m}) - \frac{(19.8 \frac{\text{rad}}{\text{s}})^2 (0.1 \text{ m})^2}{4(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})} = 0.4 \text{ m}$$

Bởi vì $z_s(0) > 0$, vậy giả thiết đáy bình không bị khô là phù hợp.

TỔNG KẾT

Lực tác dụng vuông góc bởi một chất lỏng trên một đơn vị diện tích được gọi là áp suất, đơn vị của áp suất là pascal, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Áp suất so với áp suất chân không tuyệt đối được gọi là áp suất tuyệt đối, sự khác biệt giữa áp suất tuyệt đối với áp suất khí quyển tại chỗ được gọi là áp suất dư. Áp suất dưới áp suất khí quyển được gọi là áp suất chân không. Áp suất dư, áp suất chân không và áp suất tuyệt đối có liên quan với nhau bởi các phương trình:

$$P_{gauge} = P_{abs} - P_{atm}$$

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs}$$

Áp suất tại một điểm trong một chất lỏng có độ lớn như nhau trong tất cả các hướng. Sự biến thiên của áp suất theo độ cao trong chất lỏng tĩnh tuân thủ phương trình:

$$\frac{dP}{dz} = -\rho g$$

ở đây trục thẳng đứng z có chiều hướng lên trên. Khi mật độ của chất lỏng là không đổi, chênh lệch áp suất qua một lớp chất lỏng có độ dày Δz là

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g \Delta z$$

Áp suất tuyệt đối và áp suất dư trong chất lỏng tĩnh ở độ sâu h có bề mặt tự do tiếp xúc với khí quyển là:

$$P = P_{atm} + \rho g h \quad \text{và} \quad P_{gauge} = \rho g h$$

Áp suất trong chất lỏng tĩnh không thay đổi trên mặt phẳng nằm ngang. Định luật Pascal chỉ ra rằng áp lực tác dụng lên một khối chất lỏng làm tăng áp suất tại mọi điểm một giá trị như nhau.

Áp suất khí quyển được đo bằng phong vũ biểu và được cho bởi:

$$P_{atm} = \rho g h$$

trong đó h là chiều cao của cột chất lỏng.

Tĩnh học chất lỏng nghiên cứu các vấn đề liên quan đến chất lỏng ở trạng thái tĩnh. Độ lớn của tổng hợp áp lực tác dụng trên một bề mặt phẳng ngập hoàn toàn trong chất lỏng bằng tích của áp suất tại trọng tâm và diện tích A của bề mặt và được xác định như sau:

$$F_R = (P_0 + \rho g h_c)A = P_c A = P_{ave} A$$

ở đây $h_c = y_c \sin \theta$ là khoảng cách thẳng đứng từ trọng tâm đến bề mặt tự do của chất lỏng. Áp suất P_0 thường là áp suất khí quyển và có thể bỏ qua trong hầu hết các trường hợp kể bởi vì nó tác dụng lên cả hai mặt của tấm. Giao điểm của đường tác dụng của tổng hợp lực và bề mặt tấm được gọi là tâm áp suất. Vị trí của tâm áp suất được xác định bởi:

$$y_P = y_C + \frac{I_{xx,C}}{[y_C + P_0 / (\rho g \sin \theta)]A}$$

ở đây $I_{xx,C}$ là mô-men quán tính của bề mặt đối với trục x đi qua trọng tâm C của tấm.

Chất lỏng tác dụng một lực hướng lên trên lên một vật ngập trong nó. Lực này được gọi là lực đẩy nổi hay là lực Archimedes và được xác định như sau:

$$F_B = \rho_f g V$$

V là thể tích của vật. Hiện tượng này được biết đến như là nguyên lý đẩy nổi Archimedes và được phát biểu như sau: lực đẩy nổi tác dụng lên một vật ngập trong chất lỏng có giá trị bằng trọng lượng chất lỏng bị chiếm chỗ bởi vật và có đường tác dụng đi qua trọng tâm của thể tích chất lỏng bị chiếm chỗ. Với mật độ không đổi, lực đẩy nổi không phụ thuộc vào khoảng cách của vật đến bề mặt tự do. Đối với các vật nổi, tỷ phần thể tích ngập của vật bằng với tỷ lệ mật độ trung bình của vật so với mật độ của chất lỏng.

Phương trình chuyển động tổng quát cho chất lỏng trong chuyển động bó cứng là:

$$\vec{\nabla}P + \rho g \vec{k} = -\rho \vec{a}$$

Khi trọng trường cùng phương với trục z , các phương trình thành phần được viết dưới dạng vô hướng như sau:

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\rho a_x, \quad \frac{\partial P}{\partial y} = -\rho a_y, \quad \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho(g + a_z)$$

ở đây a_x, a_y, a_z là gia tốc theo hướng x, y và z , tương ứng. Trong chuyển động thẳng với gia tốc không đổi trong mặt phẳng xz , phân bố áp suất được xác định như sau:

$$P = P_0 - \rho a_x x - \rho(g + a_z)z$$

Các bề mặt đẳng áp (bao gồm cả bề mặt tự do) trong chất lỏng chuyển động bó cứng với gia tốc không đổi là những mặt song song có góc nghiêng θ trong mặt phẳng xz (so với mặt nằm ngang) được xác định như sau:

$$\tan \theta = \frac{a_x}{g + a_z}$$

Trong chuyển động bó cứng của chất lỏng trong bình hình trụ quay xung quanh trục, bề mặt đẳng áp là mặt parabol. Trong đó phương trình cho bề mặt tự do là:

$$z_s = h_0 - \frac{\omega^2}{4g}(R^2 - 2r^2)$$

ở đây z_s là khoảng cách từ bề mặt tự do tới đáy của bình tại bán kính r và h_0 là chiều cao ban đầu của chất lỏng trong bình.

Câu hỏi và bài tập

Áp suất, áp kế ống và phong vũ biểu

3.1LT Sự khác biệt giữa áp suất dư và áp suất tuyệt đối là gì?

3.2LT Giải thích lý do tại sao một số người bị xuất huyết mũi và một số người khác khó thở ở trên cao.

3.3LT Có người cho rằng áp suất tuyệt đối trong một chất lỏng có mật độ là hằng số tăng gấp đôi khi độ sâu tăng gấp đôi. Bạn có đồng ý không? Giải thích.

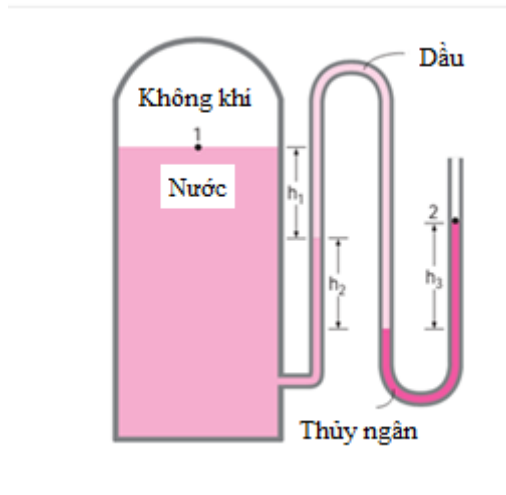
3.4LT Một khối thép nhỏ được treo lơ lửng trong nước bằng một lò xo. Nếu độ dài của các cạnh của khối lập phương là rất nhỏ, làm thế nào bạn có thể so sánh độ lớn của áp suất lên mặt trên, dưới và các mặt cạnh của khối lập phương?

3.5LT Phát biểu nguyên lý Pascal và đưa ra một ví dụ áp dụng trong thực tế.

3.6LT Hãy xem xét hai chiếc quạt giống hệt nhau, một chiếc ở mực nước biển và chiếc khác trên đỉnh một ngọn núi cao, chạy ở tốc độ như nhau. Làm thế nào bạn có thể so sánh (a) lưu lượng thể tích và (b) lưu lượng khối lượng của hai chiếc quạt?

3.7 Một áp kế chân không chỉ vạch 24 kPa khi kết nối với buồng chân không ở một địa điểm có áp suất khí quyển là 92 kPa. Xác định áp suất tuyệt đối trong buồng.

3.8 Bể chứa nước được điều áp bằng không khí và áp suất được đo bằng áp kế ống nhiều chất lỏng như trên Hình P3.8. Xác định áp suất dư của không khí trong bể nếu $h_1=0.2$ m, $h_2=0.3$ m, và $h_3=0.46$ m. Lấy mật độ của nước, dầu và thủy ngân là 1000 kg/m³, 850 kg/m³ và 13.600 kg/m³, tương ứng.



Hình P3.8

3.9 Xác định áp suất khí quyển tại một địa điểm nơi mà phong vũ biểu chỉ 750 mmHg. Lấy mật độ thủy ngân là 13.600 kg/m^3 .

3.10 Áp suất dư trong một chất lỏng ở độ sâu 3 m là 28 kPa. Xác định áp suất dư trong cùng chất lỏng ở độ sâu 12 m.

3.11 Áp suất tuyệt đối trong nước ở độ sâu 5 m là 145 kPa. Xác định (a) áp suất khí quyển tại chỗ và (b) áp suất tuyệt đối ở độ sâu 5 m trong một chất lỏng có tỷ trọng riêng là 0.85 ở cùng một vị trí.

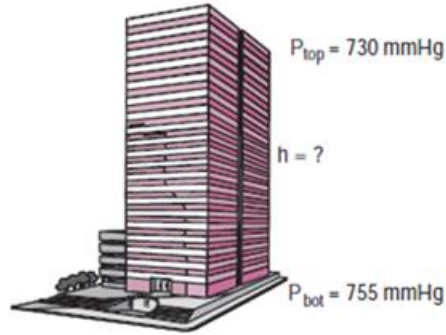
3.12 Một phụ nữ 70 kg có tổng diện tích dấu chân là 400 cm^2 . Cô ta muốn đi bộ trên tuyết, nhưng tuyết không thể chịu được áp suất lớn hơn 0.5 kPa. Xác định kích thước tối thiểu của giày tuyết cần thiết (diện tích dấu mỗi giày) để cho phép cô đi bộ trên tuyết mà không bị lún.

3.13 Một áp kế chân không kết nối với một bể chứa cho áp suất là 30 kPa tại một địa điểm có áp suất khí quyển là 755 mmHg. Xác định áp suất tuyệt đối trong bể chứa. Lấy $\rho_{\text{HG}}=13.590 \text{ kg/m}^3$. *Đáp số: 70.6 kPa*

3.14 Một áp kế kết nối với một bồn chứa có kim chỉ 500 kPa tại một địa điểm có áp suất khí quyển là 94 kPa. Xác định áp suất tuyệt đối trong bồn.

3.15 Phong vũ biểu của một người leo núi chỉ 930 mbar tại điểm đầu một tuyến đường leo núi và 780 mbar ở điểm cuối. Bỏ qua ảnh hưởng của độ cao lên gia tốc trọng trường tại chỗ, xác định chênh lệch độ cao giữa hai điểm. Giả thiết mật độ không khí trung bình là 1.20 kg/m^3 . *Đáp số: 1274 m*

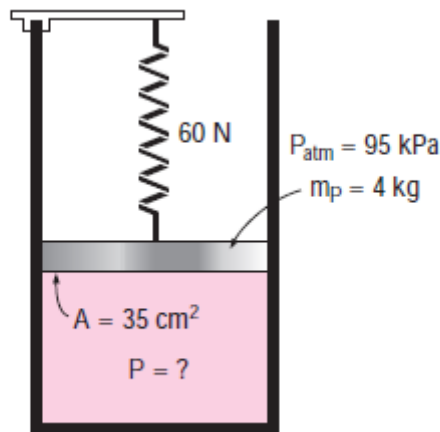
3.16 Phong vũ biểu có thể được sử dụng để đo chiều cao của một tòa nhà. Nếu ở trên đỉnh và ở dưới cùng của một tòa nhà áp kế chỉ 730 và 755 mmHg, tương ứng. Xác định chiều cao của tòa nhà. Giả thiết một mật độ không khí trung bình là 1.18 kg/m^3 (Hình P3.16)



Hình P3.16

3.17 Xác định áp suất tác dụng lên một thợ lặn ở 30 m bên dưới bề mặt tự do của biển. Giả thiết áp suất không khí là 101 kPa và tỷ trọng riêng của nước biển là 1.03. *Đáp số: 404.0 kPa*

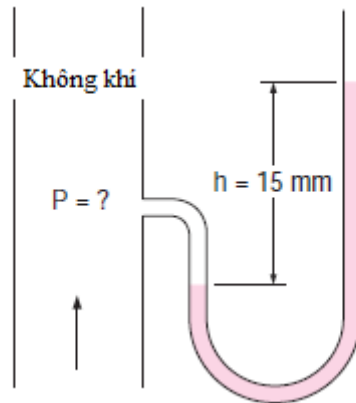
3.18 Một chất khí được chứa trong một thiết bị piston-xilanh thẳng đứng không ma sát. Piston có khối lượng 4 kg và thiết diện ngang 35 cm². Lò xo trên piston tạo nên một lực 60 N trên piston. Nếu áp suất khí quyển là 95 kPa, xác định áp suất bên trong xi lanh (Hình P3.18). *Đáp số: 123.4 kPa*



Hình P3.18

3.19 Một áp kế chứa dầu ($\rho=850 \text{ kg/m}^3$) được gắn vào một bình chứa đầy không khí. Nếu chênh lệch giữa hai cột dầu là 45 cm và áp suất khí quyển là 98 kPa, xác định áp suất tuyệt đối của không khí trong bình. *Đáp số: 101.75 kPa*

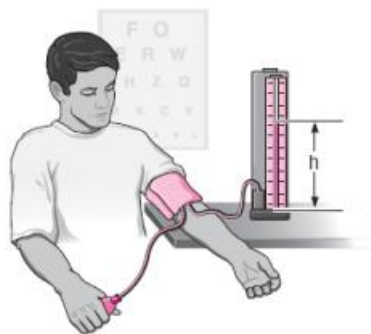
3.20 Một áp kế thủy ngân ($\rho=13.600 \text{ kg/m}^3$) được kết nối với một ống dẫn khí để đo áp suất bên trong. Chênh lệch độ cao cột thủy ngân trong áp kế là 15 mm, áp suất khí quyển là 100 kPa. (a) Từ hình P3.20, đánh giá xem áp suất trong ống là lớn hay nhỏ hơn áp suất khí quyển; (b) xác định áp suất tuyệt đối trong ống.



Hình P3.20

3.21 Huyết áp thường được đo bằng cách quấn một băng kín chứa không khí gắn với áp kế quanh cánh tay của một người đặt ngang độ cao của trái tim. Sử dụng một áp kế thủy ngân và một ống nghe, huyết áp tâm thu (áp suất tối đa khi tim bơm đầy) và huyết áp tâm trương (áp suất tối thiểu khi tim nghỉ ngơi) được đo bằng mmHg. Áp suất tâm thu và tâm trương của một người khỏe mạnh khoảng 120 mmHg và 80 mmHg, tương ứng và thường được ghi là 120/80. Biểu diễn những áp suất dư này theo kPa và mét cột nước.

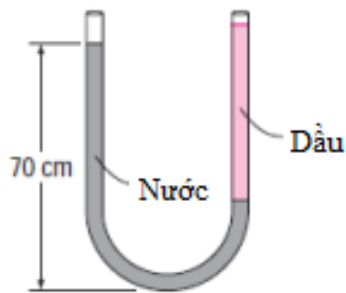
3.22 Huyết áp tối đa trên cánh tay của một người khỏe mạnh là khoảng 120 mmHg. Nếu một ống thẳng đứng hở đầu cuối được kết nối với các tĩnh mạch ở cánh tay của con người, xác định độ cao máu sẽ dâng lên trong ống. Lấy mật độ của máu là 1050 kg/m^3 (Hình P3.22).



Hình P3.22

3.23 Một người đàn ông cao 1.8m đứng thẳng đứng và ngập hoàn toàn trong nước. Xác định độ chênh lệch áp suất giữa đỉnh đầu và bàn chân của người đàn ông này theo kPa.

3.24 Xem xét một ống chữ U có hai đầu mở ra khí quyển. Nước được đổ vào ống chữ U từ một đầu ống và dầu nhẹ ($\rho=790 \text{ kg/m}^3$) từ đầu ống kia. Cột nước trong nửa ống cao 70 cm, trong khi nửa ống bên kia chứa cả nước và dầu với tỷ lệ chiều cao dầu-nước là 6 (Hình P 3.24). Xác định chiều cao của mỗi chất lỏng trong ống.

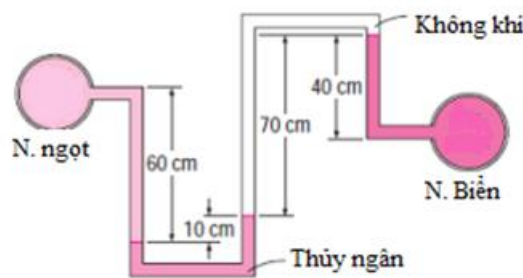


Hình P3.24

3.25 Máy nâng thủy lực tại một cửa hàng sửa chữa xe có đường kính đầu ra là 30 cm cần nâng một chiếc xe nặng 2000 kg. Xác định áp suất dư của chất lỏng cần phải được duy trì ở đầu ra.

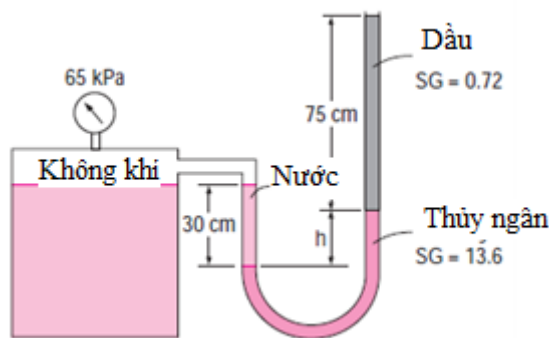
3.26 Nước ngọt và nước biển chảy trong đường ống nằm ngang song song được nối với nhau bằng một áp kế ống, như thể hiện trong Hình P3.26. Xác định chênh lệch áp suất giữa hai đường ống dẫn. Lấy mật độ của nước biển là $\rho=1035 \text{ kg/m}^3$. Bỏ qua mật độ của không khí.

3.27 Lặp lại bài 3.26 bằng cách thay thế không khí với dầu có tỷ trọng riêng là 0.72.



Hình P3.26

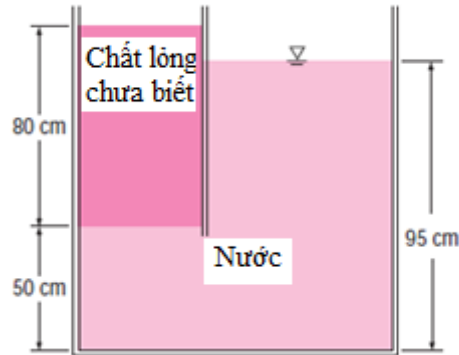
3.28 Áp suất dư của không khí trong bình thể hiện trên Hình P3.28 là 65 kPa. Xác định chênh lệch độ cao h của cột thủy ngân.



Hình P3.28

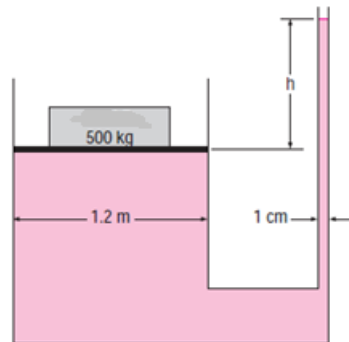
3.29 Lặp lại Bài 3.29 với áp suất dư của không khí trong bình là 45 kPa.

3.30 Phần trên của một bể nước được chia thành hai ngăn, như thể hiện trong Hình P3.30. Một chất lỏng với một mật độ chưa biết được đổ thêm vào một bên và mực nước dâng lên ở phía bên kia do chất lỏng chiếm chỗ trong bình. Dựa vào chiều cao các cột chất lỏng cho trên hình vẽ, xác định mật độ của chất lỏng thêm vào. Giả thiết chất lỏng thêm vào không trộn lẫn với nước.



Hình P3.30

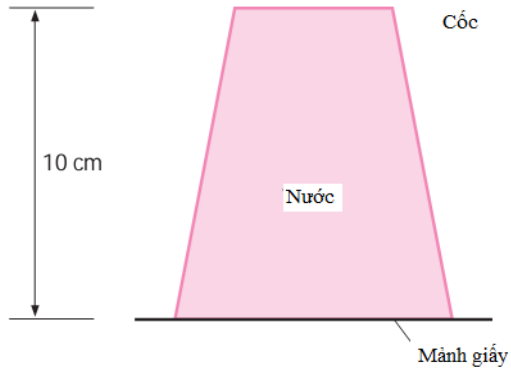
3.31 Một vật nặng 500 kg trên bàn nâng của một máy nâng thủy lực thể hiện trong Hình P3.31 được nâng lên bằng cách đổ dầu ($\rho=780 \text{ kg/m}^3$) vào ống nhỏ. Xác định chiều cao h để vật bắt đầu được nâng lên.



Hình P3.31

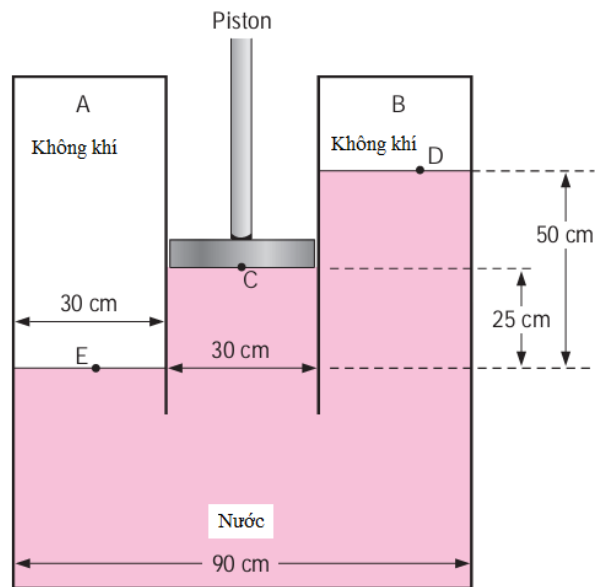
3.32 Áp suất thường được cho như cột chất lỏng và được gọi là "cột cao áp suất". Biểu diễn áp suất tiêu chuẩn khí quyển theo (a) cột thủy ngân ($SG=13.6$), (b) theo nước ($SG=1.0$) và (c) theo glycerin ($SG=1.26$) cột. Giải thích lý do tại sao chúng ta thường sử dụng thủy ngân trong áp kế.

3.33 Một thí nghiệm đơn giản từ lâu đã được sử dụng để minh họa làm thế nào áp suất âm ngăn chặn nước không bị đổ ra ngoài khi lật ngược cốc đựng nước. Một ly nước và được phủ bằng một tờ giấy mỏng được đảo ngược, như thể hiện trong Hình P3.33. Xác định áp suất ở đáy ly, và giải thích lý do tại sao nước không rơi ra ngoài.



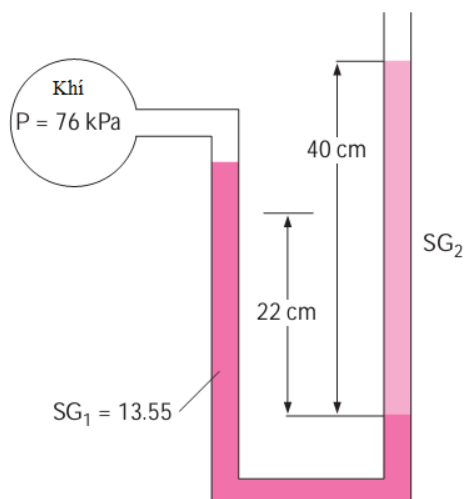
Hình P3.33

3.34 Hai buồng chứa cùng chất lỏng bị ngăn cách bởi một piston có trọng lượng là 25 N, như trên Hình P3.34. Tính áp suất trong buồng A và B.



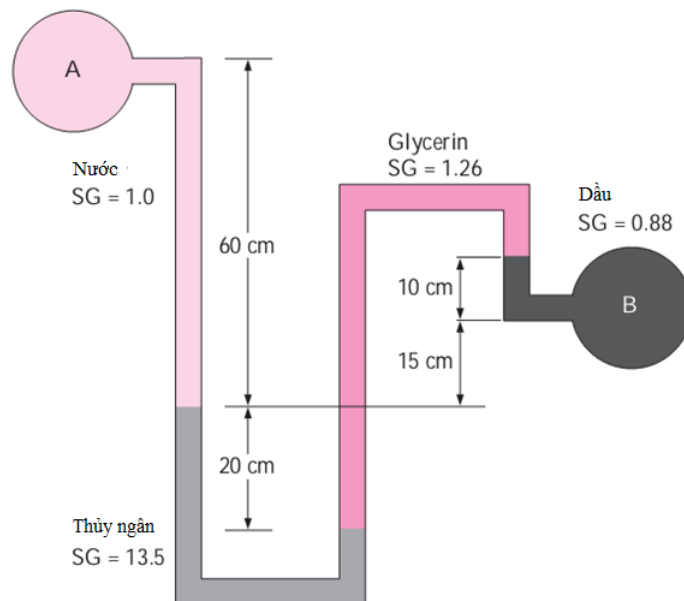
Hình P3.34

3.35 Xem xét một áp kế hai chất lỏng gắn vào một ống dẫn khí Hình P3.358. Nếu tỷ trọng riêng của một chất lỏng là 13.55, xác định tỷ trọng riêng của chất lỏng kia. Cho biết áp suất tuyệt đối khí trong ống và áp suất khí quyển là 100 kPa. Đáp số: 5.0



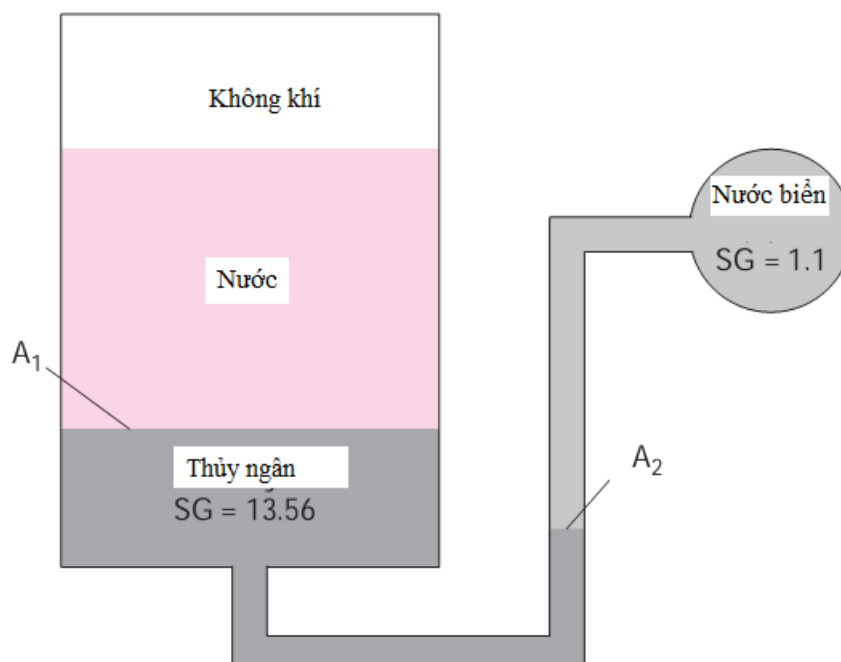
Hình P3.35

3.36 Chênh lệch áp suất giữa một ống dẫn dầu và đường ống nước được đo bằng áp kế hai chất lỏng, như thể hiện trong Hình P3.36. Biết các chiều cao của các chất lỏng và tỷ trọng riêng, tính chênh lệch áp suất $\Delta P = P_B - P_A$.



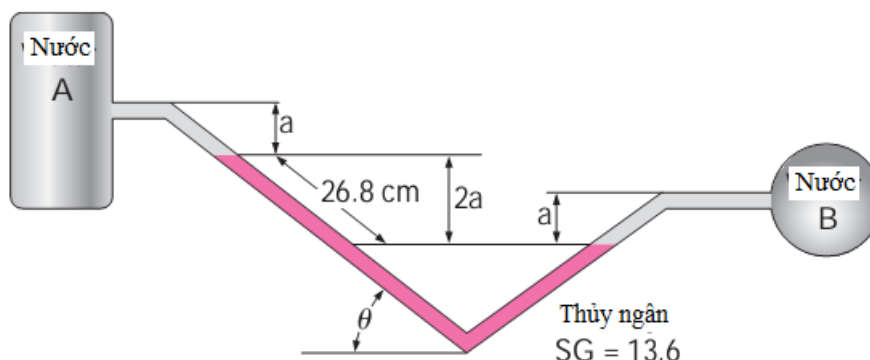
Hình P3.36

3.37 Xem xét hệ thống Hình P3.37. Nếu có thay đổi 0.7 kPa trong áp suất của không khí gây ra mặt phân cách nước-thủy ngân trong cột bên phải xuống 5 mm trong khi áp suất trong đường ống nước biển vẫn không đổi, xác định tỷ lệ diện tích của A_2/A_1 .



Hình P3.37

3.38 Hai bể chứa nước được kết nối với nhau thông qua một áp kế thủy ngân với ống nghiêng, như thể hiện trong Hình P3.38. Nếu chênh lệch áp suất giữa hai bể là 20 kPa, tính a và θ .



Hình P3.38

Áp lực thủy tĩnh lên tấm phẳng và mặt cong

3.39LT Định nghĩa áp lực thủy tĩnh tác dụng lên một bề mặt ngập trong chất lỏng và tâm áp suất.

3.40LT Có thể nhận thấy rằng các đập nước có dày ở phía dưới lớn hơn nhiều ở phía trên. Giải thích lý do tại sao đập được xây dựng theo cách đó.

3.41LT Xem xét một bề mặt cong ngập nước. Giải thích làm thế nào có thể xác định các thành phần nằm ngang của áp lực thủy tĩnh tác động lên bề mặt này.

3.42LT Xem xét một bề mặt cong ngập nước. Giải thích làm thế nào bạn sẽ xác định các thành phần thẳng đứng của lực thủy tĩnh tác động lên bề mặt này.

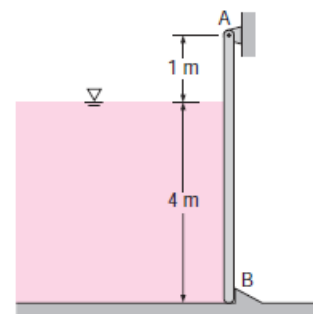
3.43 Xem xét một chiếc xe chìm trong nước trong một hồ nước có đáy phẳng. Cửa phía tài xế của chiếc xe là rộng 1.1 m cao 0.9 m và cạnh trên của cánh cửa ở độ sâu 8 m dưới mặt nước. Xác định các tổng áp lực lượng tác dụng lên cánh cửa (vuông góc với bề mặt của nó) và vị trí của tâm áp suất nếu (a) cửa xe là kín hoàn toàn bên trong chứa không khí ở áp suất khí quyển và (b) xe chứa đầy nước.

3.44 Xem xét một bể bơi dài 4m, rộng 4m và cao 1.5m, đặt trên mặt đất và được đổ đầy nước. (a) Xác định áp lực thủy tĩnh lên mỗi bức thành và vị trí tâm áp suất tính từ mặt đất. (b) Nếu chiều cao của các bức thành của bể bơi được tăng gấp đôi và đầy nước, áp lực thủy tĩnh trên mỗi bức tường tăng gấp đôi hay gấp bốn lần? Tại sao? *Đáp số: (a) 44.1 kN*

3.45 Một phòng ở dưới mực nước của một tàu du lịch có một cửa sổ tròn đường kính 30 cm. Nếu điểm giữa của cửa sổ là 5 m dưới mặt nước, xác định áp lực thủy tĩnh tác dụng lên cửa sổ và tâm áp suất. Biết tỷ trọng riêng của nước biển là 1.025. *Đáp số: 3554 N, 5.001 m*

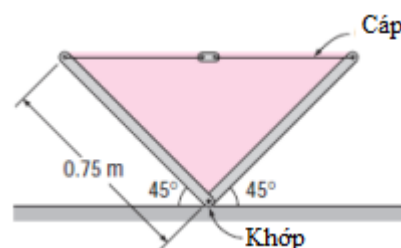
3.46 Mặt chứa nước của một con đập 100 m dài là một phần tư vòng tròn với bán kính 10 m. Xác định áp lực thủy tĩnh lên đập và đường tác dụng của lực khi đập chứa đầy nước.

3.47 Một tấm hình chữ nhật cao 4m, rộng 5 m ở cuối của một kênh nước sâu 4 m, như thể hiện trong Hình P3.47. Tấm được gắn bản lề tại điểm A và được giữ bởi một mố tại điểm B. Xác định lực của mố B tác dụng lên tấm.



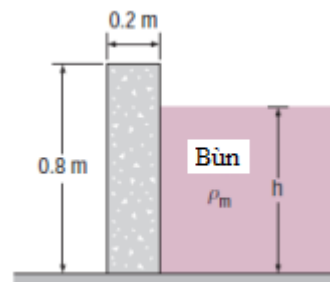
Hình P3.47

3.48 Hai cạnh của một máng nước hình chữ V được khớp với nhau ở phía dưới, như thể hiện trên Hình P3.48, nghiêng một góc 45° so với mặt đất. Mỗi cạnh rộng 0.75 m và hai cạnh này được nối với nhau bằng một dây cáp trên mỗi 6 m dọc theo chiều dài của máng. Tính sức căng của dây cáp khi máng được đổ đầy nước. *Đáp số: 5510 N*



Hình P3.48

3.49 Một tường chắn chống sạt lở bùn là được xây dựng bằng cách đặt các khối bê tông hình chữ nhật cao 0.8 m và rộng 0.2 m ($\rho=2700 \text{ kg/m}^3$) đặt cạnh nhau, như thể hiện trong Hình P3.49. Hệ số ma sát giữa mặt đất và các khối bê tông là $f = 0.3$, mật độ của bùn là 1800 kg/m^3 . Có lo ngại rằng các khối bê tông có thể trượt hoặc lật quanh cạnh dưới bên trái khi bùn dâng lên. Xác định chiều cao bùn mà tại đó (a) khối bê tông sẽ bắt đầu trượt và (b) khối sẽ bị lật đổ.



Hình P3.49

Lực đẩy nổi

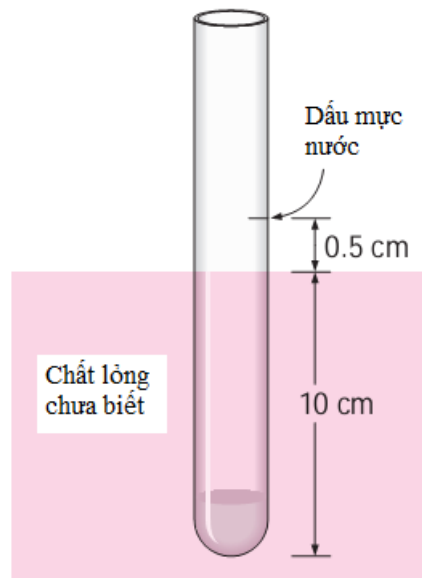
3.50LT Lực đẩy nổi là gì? Nguyên nhân gây ra nó? Độ lớn của lực đẩy nổi tác dụng trên một vật ngập có thể tích là V xác định như thế nào? Xác định hướng và đường tác dụng của lực đẩy nổi?

3.51LT Xem xét hai quả bóng hình cầu giống hệt nhau chìm trong nước ở độ sâu khác nhau. Lực đẩy nổi tác dụng lên hai quả bóng này sẽ giống nhau hay khác nhau? Giải thích.

3.52LT Xem xét hai quả bóng, hình cầu đường kính 5 cm, một quả làm bằng nhôm, quả khác bằng sắt ngập trong nước. Lực đẩy nổi tác dụng lên hai quả bóng này sẽ giống nhau hay khác nhau? Giải thích.

3.53LT Thảo luận về sự ổn định của (a) một vật chìm (b) vật nổi mà trọng tâm của vật ở trên các tâm đẩy nổi.

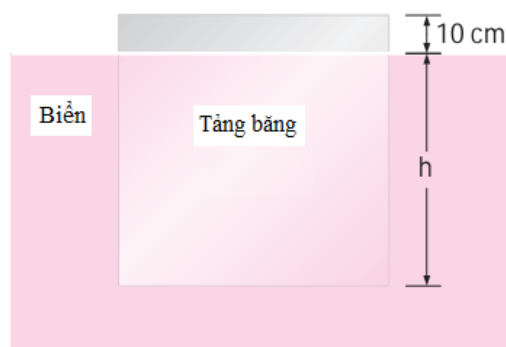
3.54 Mật độ của một chất lỏng được xác định bởi một tỷ trọng kế hình trụ đường kính 1 cm đã cũ, các dấu hiệu phân chia hoàn toàn bị mờ. Tỷ trọng kế là đầu tiên được thả trong nước và mực nước được đánh dấu. Sau đó, tỷ trọng kế được thả vào chất lỏng khác và quan sát thấy rằng dấu hiệu đối với chất lỏng này đã tăng 0.5 cm phía trên mặt giao diện chất lỏng-khí. Nếu chiều cao của dấu mực nước là 10 cm, xác định mật độ của chất lỏng (Hình P3.54).



Hình P3.54

3.55 Thể tích và mật độ trung bình của một vật hình dạng bất kỳ sẽ được xác định bằng cách sử dụng một cân lò xo. Vật nặng 7200 N trong không khí và 4790 N trong nước. Xác định khối lượng và mật độ của vật. Nêu các giả thiết cần có.

3.56 Xem xét một tảng băng hình lập phương trôi nổi trên biển. Tỷ trọng riêng của nước đá và nước biển là 0.92 và 1.025, tương ứng. Nếu phần nổi của khối băng cao 10 cm, xác định chiều cao của khối băng bên dưới bề mặt nước (Hình P3.56). *Đáp số: 87.6 cm*



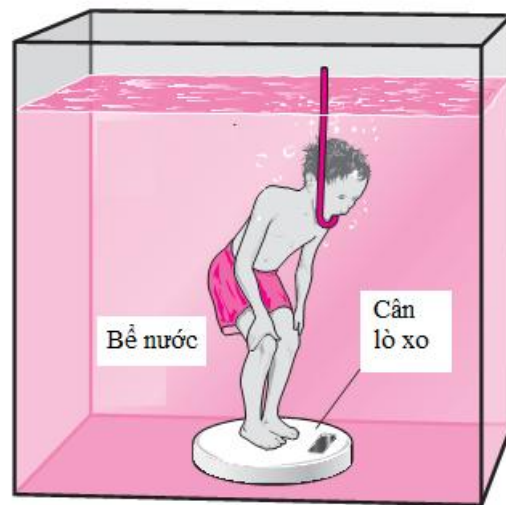
Hình P3.56

3.57 Một khối 170 kg đá granit ($\rho=2700 \text{ kg/m}^3$) được thả xuống một hồ nước. Một người đàn ông nhảy xuống và cố gắng nhắc tảng đá lên. Xác định lực cần thiết phải được tác dụng để nâng khối đá lên từ đáy hồ. Bạn có nghĩ rằng ông ta có thể làm điều đó không?

3.58 Người ta cho rằng Archimedes phát hiện ra nguyên lý của mình trong bồn tắm khi suy nghĩ làm thế nào có thể xác định xem vương miện của vua Hiero có

thực sự được làm bằng vàng nguyên chất không. Trong khi đang ở trong bồn tắm, ông nảy ra ý tưởng rằng có thể xác định mật độ trung bình của một vật hình dạng bất kỳ bằng cách cân nó trong không khí và trong nước. Nếu vương miện nặng 3.20 kgf (=31.4 N) trong không khí và 2.95 kgf (=28.9 N) trong nước, xác định xem chiếc vương miện được làm bằng vàng nguyên chất không? Biết mật độ của vàng là 19300 kg/m³. Thảo luận xem làm thế nào bạn có thể giải quyết vấn đề này mà không cần cân vương miện trong nước, mà bằng cách sử dụng một xô thông thường không có vạch đo thể tích. Tuy nhiên bạn có thể cân bất cứ thứ gì trong không khí.

3.59 Một trong các thủ tục trong chương trình tập thể dục giảm cân là xác định tỷ lệ chất béo và cơ bắp của cơ thể. Điều này được dựa trên nguyên tắc là các mô của cơ bắp là dày đặc hơn so với mô chất béo, do đó mật độ trung bình của cơ thể cao hơn thì phần của các mô cơ là cao hơn. Mật độ trung bình của cơ thể ρ_{ave} có thể được xác định bằng cách cân người trong không khí và trong nước trong (Hình P3.59). Coi tất cả các mô và xương (trừ chất béo) như là cơ bắp với mật độ tương



Hình P3.59

đương là $\rho_{cơ}$, mật độ chất béo là $\rho_{béo}$. Xác định một mối quan hệ cho tỷ phần thể tích chất béo $x_{béo}$ của cơ thể. *Đáp số:* $x_{béo} = (\rho_{cơ} - \rho_{ave}) / (\rho_{cơ} - \rho_{béo})$

3.60 Chiếc thuyền có thể tích chứa đồ là 150 m³ và tổng khối lượng khi chưa có tải là 8560 kg. Xác định tàu có thể mang thêm tải trọng là bao nhiêu mà không chìm (a) trong một hồ nước ngọt và (b) trong nước biển với tỷ trọng riêng là 1.03.

Chất lỏng trong chuyển động bó cứng

3.61LT Trong những điều kiện nào có thể coi chuyển động của chất lỏng như chuyển động bó cứng?

3.62LT Xem xét một ly nước. So sánh các áp suất nước ở đáy ly cho các trường hợp sau đây: (a) ly đứng yên, (b) chuyển động lên với vận tốc không đổi, (c) chuyển động xuống với vận tốc không đổi, và (d) di chuyển theo chiều ngang với vận tốc không đổi.

3.63LT Xem xét hai cốc chứa nước giống hệt nhau, một ở trạng thái đứng yên, cái khác di chuyển trên một mặt phẳng nằm ngang với gia tốc không đổi. Giả sử không có dao động hay tràn xảy ra. Nơi nào có áp suất cao hơn ở (a) điểm trước, (b) điểm giữa, và (c) điểm sau của bề mặt đáy?

3.64LT Xem xét hộp hình trụ thẳng đứng một phần chứa nước. Hình trụ được quay quanh trục của nó với vận tốc góc nhất định, chuyển động bó cứng nhắc của chất lỏng được thiết lập. Thảo luận về ảnh hưởng của áp suất điểm giữa và ở mép cạnh của bề mặt đáy do quay.

3.65 Một bể nước được kéo bởi một chiếc xe tải trên đường bằng phẳng, góc giữa bề mặt tự do của nước với mặt phẳng nằm ngang đo được là 15° . Xác định gia tốc của xe tải.

3.66 Xét hai bể nước chứa đầy nước. Bể thứ nhất cao 8 m và đứng yên, trong khi bể thứ hai cao 2 m và đang chuyển động đi lên với một gia tốc 5 m/s^2 . Bể nào có áp suất đáy cao hơn?

3.67 Một bể nước đang được kéo lên trên một con đường dốc 20° so với mặt phẳng nằm ngang với một gia tốc không đổi là 5 m/s^2 theo hướng chuyển động. Xác định góc của bề mặt tự do của nước với phương nằm ngang. Bề mặt tự do của nước sẽ như thế nào nếu theo hướng chuyển động là đi xuống với cùng gia tốc?

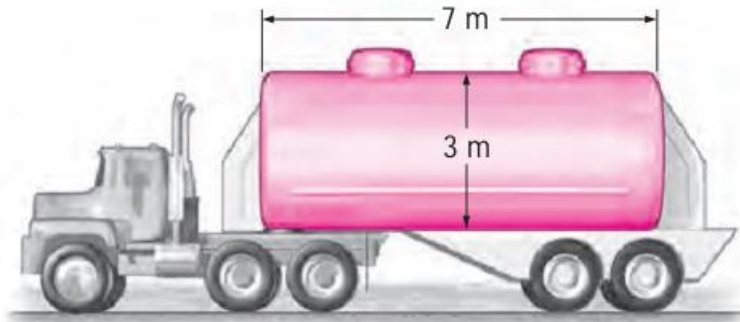
3.68 Bể nước hình trụ cao 60 cm, đường kính 40 cm đang được vận chuyển trên một đường bằng phẳng. Gia tốc cao nhất dự kiến là 4 m/s^2 . Xác định chiều cao nước cho phép trong bể nếu không để nước tràn khi tăng tốc. *Đáp số: 51.8 cm*

3.69 Một hộp hình trụ thẳng đứng đường kính 40 cm, cao 90 cm chứa nước cao 60 cm. Hình trụ quay với tốc độ góc không đổi là 120 rpm. Xác định chất lỏng ở trung tâm hình trụ hạ thấp xuống bao nhiêu do chuyển động quay này.

3.70 Một bể cá có chứa nước cao 40 cm được di chuyển trong cabin thang máy. Xác định áp suất ở dưới đáy bể khi thang máy (a) đứng yên, (b) chuyển động lên với một gia tốc 3 m/s^2 , và (c) chuyển động xuống với gia tốc xuống 3 m/s^2 .

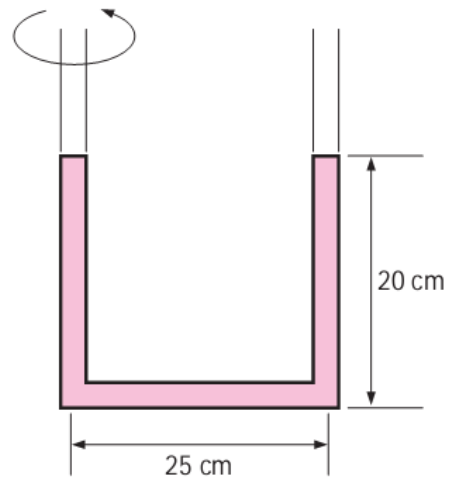
3.71 Bình sữa hình trụ thẳng đứng đường kính 3 m quay ở tốc độ không đổi 12 rpm. Nếu áp suất tại tâm của mặt đáy là 130 kPa, xác định áp suất tại cạnh của bề mặt đáy bể. Lấy mật độ của sữa là 1030 kg/m^3 .

3.72 Sữa với mật độ 1.020 kg/m^3 được vận chuyển trên một đường nằm ngang trong hình trụ tròn hình trụ dài 7 m, đường kính 3 m. Bồn hoàn toàn đầy sữa (không có không gian trống), xe đang tăng tốc với gia tốc 2.5 m/s^2 . Nếu áp suất tối thiểu trong bồn là 100 kPa, xác định áp suất tối đa và vị trí của nó trong bồn (Hình P3.72). *Đáp số: 147.9 kPa*



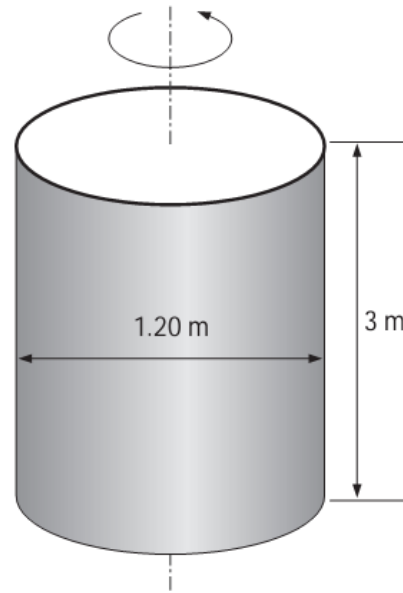
Hình P3.72

3.73 Khoảng cách giữa đường tâm của hai nhánh của một ống chữ U thông với khí quyển là 25 cm, ống chứa rượu cao 20 cm ở cả hai nhánh. Ống chữ U quay xung quanh nhánh trái với vận tốc 4.2 rad/s. Xác định chênh lệch độ cao giữa các bề mặt chất lỏng ở hai nhánh (Hình P3.73).



Hình P3.73

3.74 Một hình trụ thẳng đứng kín đường kính 1.2 m, cao 3 m hoàn toàn đầy xăng có mật độ là 740 kg/m³. Hình trụ quay quanh trục thẳng đứng của nó với tốc độ 70 rpm. Xác định (a) sự khác biệt giữa áp suất ở trung tâm của bề mặt phía dưới và trên và (b) sự khác biệt giữa áp suất của trung tâm và cạnh của bề mặt đáy (Hình P3.74).



Hình P3.74

3.75 Thùng hình trụ đường kính 3m, dài 7 m hoàn toàn đầy nước. Thùng được kéo bởi một chiếc xe tải trên đường bằng phẳng với trục 7m nằm ngang. Xác định chênh lệch áp suất giữa phía trước và phía sau đầu của thùng dọc theo một đường ngang khi xe (a) tăng tốc 3 m/s² và (b) giảm tốc 4 m/s².

Bài ôn tập

3.76 Kinh khí cầu thường chứa đầy khí heli vì nó chỉ nặng khoảng 1/7 lần không khí nặng trong điều kiện như nhau. Lực đẩy nổi, $F_b = \rho_{air} g V_{balloon}$, sẽ đẩy quả kinh khí cầu lên trên. Nếu kinh khí cầu có đường kính 10 m và mang hai người, mỗi người 70 kg, xác định gia tốc của kinh khí cầu bắt đầu xuất phát. Biết mật độ của không khí là $\rho = 1.16 \text{ kg/m}^3$, bỏ qua trọng lượng của kinh khí cầu và lồng vận tải (Hình P3.76). *Đáp số* : 16.5 m/s^2

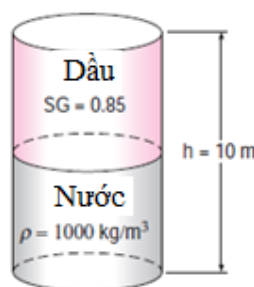


Hình P3.76

3.77 Xác định tải trọng tối đa để kinh khí cầu mô tả trong bài tập 3.76 có thể mang theo. *Đáp số*: 520.6 kg

3.78 Phong vũ biểu có thể được sử dụng như một thiết bị đo độ cao trên máy bay. Khi kiểm soát mặt đất báo khí áp là 753 mmHg, còn trên máy bay phi công đọc được 690 mmHg. Ước tính độ cao của máy bay nếu mật độ không khí trung bình là 1.20 kg/m^3 . *Đáp số*: 714 m

3.79 Phần nửa dưới của một chiếc hộp hình trụ cao 10m chứa đầy nước ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$) còn nửa trên chứa dầu có tỷ trọng riêng là 0.85. Xác định chênh lệch áp suất giữa đỉnh và đáy của hộp (Hình P3.79). *Đáp số*: 90.7 kPa



Hình P3.79

3.80 Thiết bị piston xi-lanh thẳng đứng không ma sát chứa một chất khí ở 500 kPa. Áp suất khí quyển bên ngoài là 100 kPa, và diện tích piston là 30 cm^2 . Xác định khối lượng của piston.

3.81 Nồi áp suất nấu nhanh hơn rất nhiều so với một nồi thông thường vì có thể duy trì một áp suất cao và nhiệt độ bên trong. Nắp nồi áp suất cũng được đóng kín, và hơi nước chỉ có thể thoát ra thông qua một lỗ ở giữa nắp. Một mẫu kim loại, petcock, đặt trên lỗ để ngăn cản hơi nước thoát ra ngoài cho đến khi áp lực bên trong vượt qua

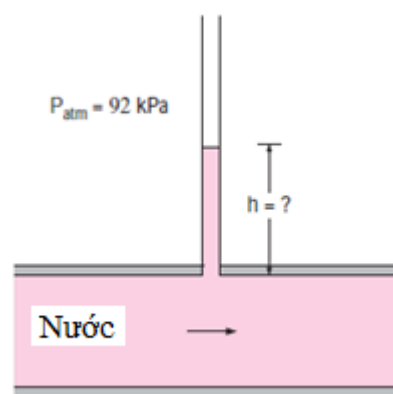


Hình P3.81

trọng lượng của petcock. Việc thoát hơi nước theo cách này ngăn ngừa việc tích tụ áp

lực nguy hiểm và giữ cho áp suất bên trong ở một giá trị không đổi. Xác định khối lượng của petcock của một nồi áp suất có áp suất hoạt động là 100 kPa dư và lỗ thoát hơi có diện tích 4 mm². Biết áp suất khí quyển là 101 kPa (Hình P3.81).
Đáp số: 40.8 g

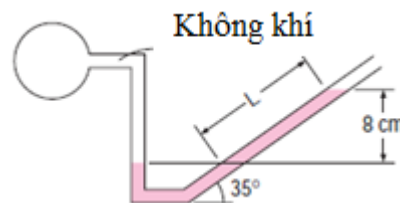
3.82 Một ống kính được gắn vào một ống nước, như trên Hình P3.82. Nếu áp suất nước ở đáy ống kính là 115 kPa và áp suất khí quyển tại chỗ là 92 kPa. Xác định độ cao của nước trong những ống kính theo mét. Biết $g=9.8 \text{ m/s}^2$ tại điểm đó và có mật độ của nước là 1000 kg/m³.



Hình P3.82

3.83 Áp suất khí quyển trung bình trên trái đất là xấp xỉ như một hàm của độ cao bởi phương trình $P_{atm} = 101.325 (1 - 0.02256z)^{5.256}$, ở đây P_{atm} là áp suất khí quyển theo kPa và z là độ cao theo km với $z=0$ trên mặt nước biển. Xác định áp suất khí quyển gần đúng ở Atlanta ($z=306 \text{ m}$), Denver ($z=1610 \text{ m}$), Mexico City ($z=2309 \text{ m}$), đỉnh núi Everest ($z=8848 \text{ m}$) và đỉnh Fansipan ($z=3114 \text{ m}$).

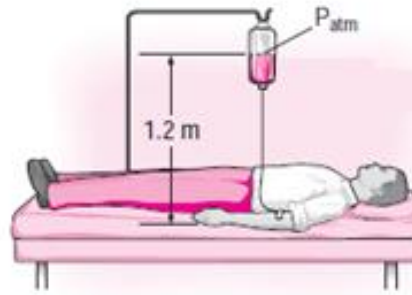
3.84 Khi đo chênh lệch áp suất nhỏ với một áp kế, một nhánh của áp kế thường để nằm để cải thiện tính chính xác của việc đọc chỉ số. (Sự chênh lệch áp suất vẫn tỷ lệ thuận với khoảng cách thẳng đứng mà không chiều dài thực tế của chất lỏng dọc theo ống.) Áp suất



Hình P3.121

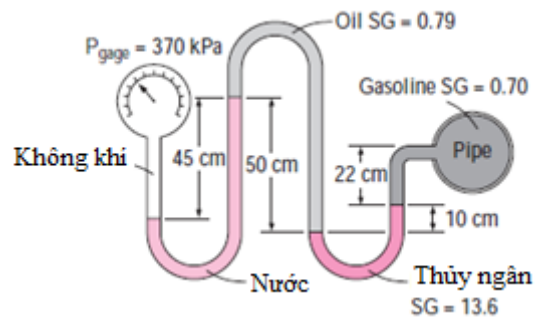
không khí trong ống tròn được đo bằng áp kế có nhánh mở nghiêng 35 ° so với phương ngang, như trong Hình P3.84. Mật độ của chất lỏng trong áp kế là 0.81 kg/L và khoảng cách thẳng đứng giữa các mức chất lỏng trong hai nhánh của áp kế là 8 cm. Xác định áp suất dư của không khí trong ống và chiều dài của cột chất lỏng nhánh nghiêng trên mức chất lỏng trong nhánh thẳng đứng.

3.85 Truyền tĩnh mạch thường được điều khiển bởi trọng lực bằng cách treo chai chất lỏng đủ chiều cao để chống lại áp lực máu trong tĩnh mạch để buộc chất lỏng đi vào cơ thể. Chai được nâng lên cao hơn thì tốc độ dòng chảy của chất lỏng sẽ cao hơn. (a) Nếu quan sát thấy rằng chất lỏng và áp suất máu cân bằng nhau khi chai nước cao 1.2 m trên tầm cánh tay, xác định áp suất dư của máu. (b) Nếu áp suất dư của chất lỏng ở tầm cánh tay cần phải là 20 kPa cho tốc độ dòng chảy đủ, xác định độ cao cần đặt chai. Lấy mật độ của chất lỏng là 1020 kg/m^3 (Hình P3.85).



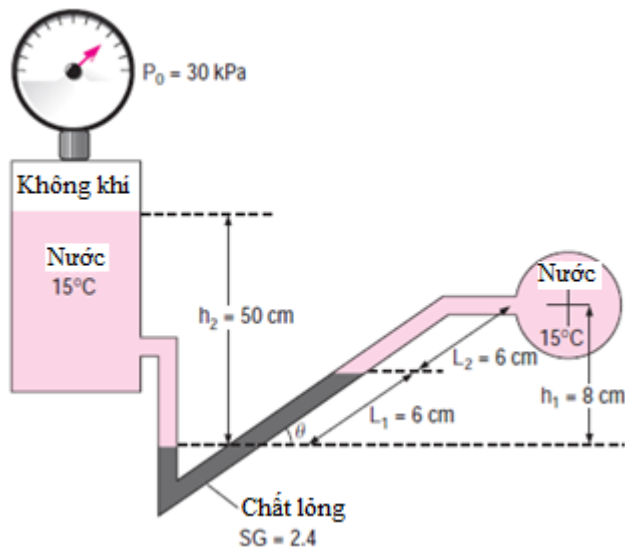
Hình P3.85

3.86 Một ống dẫn xăng được kết nối với một áp kế áp suất dư thông qua một 2 áp kế chữ U, như trên Hình P3.86. Nếu đồng hồ áp kế chỉ 370 kPa, xác định áp suất dư của ống dẫn xăng.



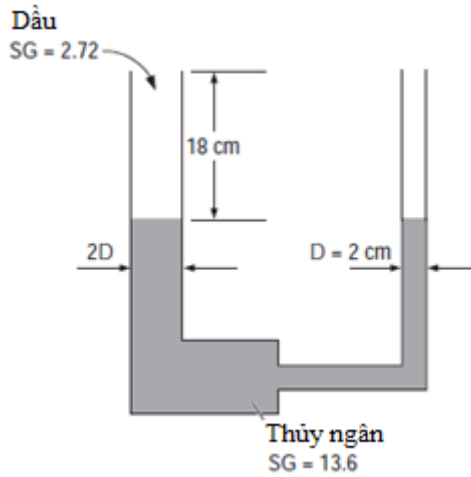
Hình P3.86

3.87 Áp suất nước chảy qua một ống được đo bởi hệ thống trên Hình P3.87. Đối với các giá trị đã cho trên hình vẽ, xác định áp suất trong đường ống.



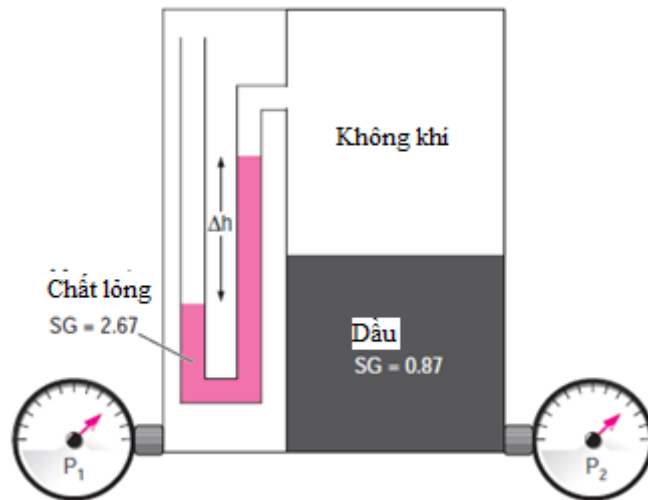
Hình P3.87

3.88 Xem xét một ống chữ U chứa thủy ngân, ngoại trừ phần đầu cao 18cm, như trên Hình P3.88. Đường kính của nhánh phải của ống chữ U là $D=2 \text{ cm}$ và đường kính của nhánh trái lớn gấp hai lần. Dầu có tỷ trọng riêng là 2.72 được đổ vào nhánh trái làm thủy ngân di chuyển từ trái sang phải. Xác định lượng dầu tối đa có thể được thêm vào nhánh trái. *Đáp số: 0.256 L*



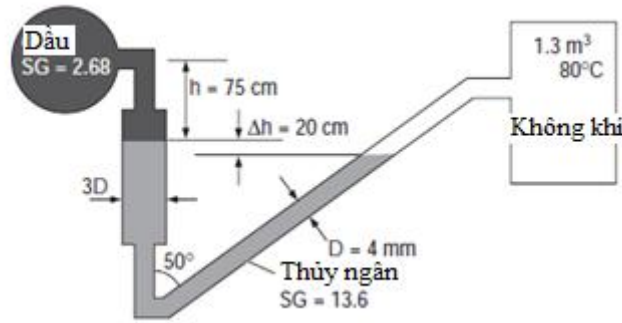
Hình P3.88

3.89 Một hệ thống được trang bị hai áp kế và một ống chữ U như trên Hình P3.89. Với $\Delta h = 8$ cm, xác định chênh lệch áp suất $\Delta P = P_2 - P_1$.



Hình P3.89

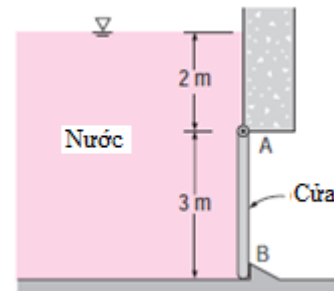
3.90 Một đường ống dẫn dầu và bình khí cứng 1.3 m^3 được kết nối với nhau bởi một áp kế, như trên Hình P3.90. Nếu bình chứa 15 kg không khí ở 80°C , xác định (a) áp lực tuyệt đối trong đường ống và (b) sự thay đổi trong Δh khi nhiệt độ trong bình khí giảm xuống 20°C . Giả thiết áp suất trong đường ống dẫn dầu là không thay đổi, và thể tích không khí trong ống áp kế là không đáng kể so với thể tích của bình.



Hình P3.90

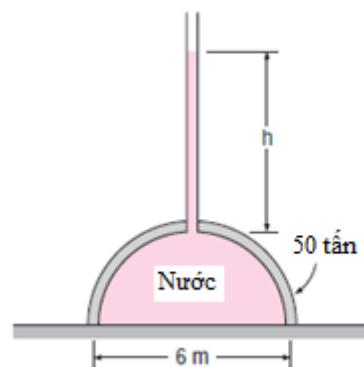
3.91 Mật độ của một vật nổi có thể được xác định bằng cách buộc tải trọng vào vật cho đến khi cả hai vật bị nhấn chìm hoàn toàn, sau đó cân hai vật riêng biệt trong không khí. Hãy xem xét một khúc gỗ có trọng lượng 1540 N trong không khí. Nếu phải mất 34 kg chì ($\rho = 11300 \text{ kg/m}^3$) để hoàn toàn chìm trong nước. Xác định mật độ trung bình của khúc gỗ. *Đáp số: 835 kg/m^3*

3.92 Cửa hình chữ nhật cao 3m, rộng 6 m được giữ bởi bản lề ở đầu trên tại A và một mô cố định tại B, như trên Hình P3.92. Xác định áp lực thủy tĩnh tác dụng lên cánh cổng khi mực nước cao 5m và vị trí của tâm áp suất.



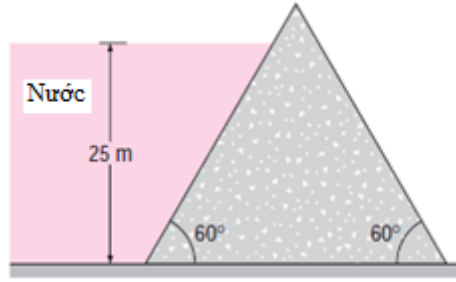
Hình 3.92

3.93 Mái vòm hình bán cầu nặng 50 tấn, đường kính 6 m nằm trên một bề mặt bằng phẳng chứa đầy nước, như trên Hình P3.93. Có người cho rằng có thể nâng mái vòm này sử dụng định luật Pascal bằng cách gắn một ống dài lên đỉnh và đổ đầy nước. Xác định chiều cao cần thiết của nước trong ống để nâng mái vòm. Bỏ qua trọng lượng của ống và nước trong đó. *Đáp số: 0.77 m*



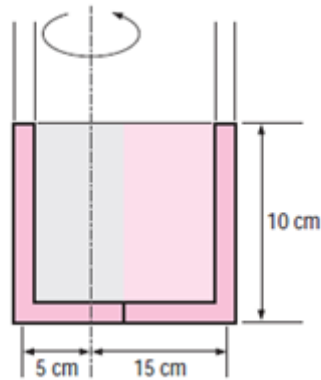
Hình P3.93

3.94 Nước trong bể chứa sâu 25 m được giữ bởi một bức tường dài 150 m, có tiết diện là một tam giác đều, như trên Hình P3.94. Xác định (a) tổng lực (thủy tĩnh và khí quyển) tác dụng lên bề mặt bên trong của bức tường và đường tác dụng của nó và (b) độ lớn của thành phần nằm ngang của lực này. Cho $P_{atm} = 100 \text{ kPa}$.



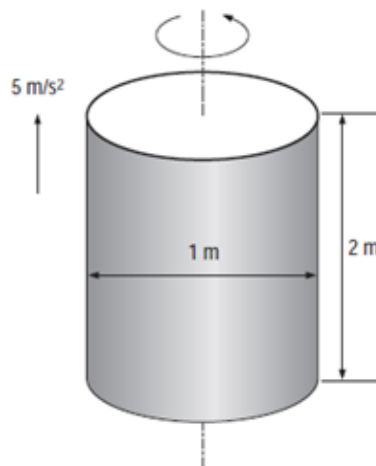
Hình P3.94

3.95 Một ống chữ U chứa nước ở nhánh phải và một chất lỏng ở nhánh trái. Quan sát thấy rằng khi ống quay với tốc độ 30 rpm quanh trục cách nhánh phải 15 cm và nhánh trái 5 cm, các mực chất lỏng ở cả hai nhánh là như nhau. Xác định mật độ của chất lỏng ở cánh tay trái (Hình P3.95).



Hình P3.95

3.96 Hình trụ thẳng đứng đường kính 1m, cao 2m chứa đầy với xăng có mật độ là 740 kg/m^3 . Hình trụ quay quanh trục thẳng đứng của nó với tốc độ 90 rpm, trong khi được tăng tốc lên 5 m/s^2 . Xác định (a) chênh lệch áp suất ở tâm đáy và bề mặt trên và (b) Chênh lệch áp suất ở tâm và cạnh của đáy hình trụ (Hình P3.96).



Hình P3.96

Chương 4. NĂNG LƯỢNG TRONG DÒNG CHẢY ỔN ĐỊNH

Chương này chúng ta xem xét ba phương trình thường xuyên được sử dụng trong Thủy khí động lực học: phương trình bảo toàn khối lượng, phương trình Bernoulli và phương trình năng lượng. Phương trình bảo toàn khối lượng là biểu diễn toán học của nguyên lý bảo toàn khối lượng. Phương trình Bernoulli liên quan tới bảo toàn năng lượng cơ học và sự chuyển đổi các dạng năng lượng (bao gồm động năng, thế năng và công dòng chảy) trong miền dòng chảy mà ảnh hưởng của lực nhớt là không đáng kể (phương trình Bernoulli cho chất lỏng lý tưởng) . Phương trình năng lượng là biểu diễn toán học của nguyên lý bảo toàn năng lượng. Trong Thủy khí động lực học, chúng ta có thể tách năng lượng cơ học khỏi nhiệt năng và xem xét việc chuyển đổi năng lượng cơ học thành nhiệt năng do hiệu ứng ma sát như là tổn thất năng lượng cơ học. Khi đó, phương trình bảo toàn năng lượng có thể coi như phương trình cân bằng năng lượng cơ học.

Chương này sẽ bắt đầu với một tổng quan về mối quan hệ giữa nguyên lý bảo toàn khối lượng và các nguyên lý bảo toàn khác. Tiếp theo, chúng ta sẽ thảo luận về các dạng khác nhau của năng lượng cơ học và hiệu suất làm việc của các thiết bị thủy lực như máy bơm và tua bin. Sau đó, phương trình Bernoulli sẽ được thu nhận trên cơ sở định luật thứ hai Newton cho một phần tử chất lỏng trên đường dòng và một số ứng dụng của phương trình Bernoulli cho các bài toán thực tế sẽ được trình bày. Ở phần tiếp theo, chúng ta sẽ thu nhận phương trình năng lượng tổng quát (còn gọi là phương trình Bernoulli cho chất lỏng thực) với các dạng biểu diễn khác nhau của phương trình này. Cuối cùng, chúng ta sẽ xem xét một vài ứng dụng của phương trình năng lượng cho một số hệ thống kỹ thuật trong thực tế.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này sinh viên có thể:

- Áp dụng phương trình bảo toàn khối lượng trong một hệ thống thủy lực
- Nhận biết các dạng khác nhau của năng lượng cơ học và hiệu suất của việc chuyển đổi năng lượng giữa các dạng khác nhau
- Hiểu được khả năng ứng dụng và các hạn chế của phương trình Bernoulli và áp dụng nó để giải quyết một số bài toán dòng chảy chất lỏng
- Làm việc với các phương trình năng lượng dưới dạng cột năng lượng và sử dụng nó để xác định công suất tua bin và công suất của máy bơm.

4.1. Giới thiệu

Trong chương trình Vật lý ở trường Trung học, chúng ta đã làm quen với các định luật bảo toàn như định luật bảo toàn khối lượng, bảo toàn năng lượng và bảo toàn động lượng. Trong lịch sử, ban đầu các định luật bảo toàn được áp dụng cho một hệ thống có khối lượng vật chất cố định, được gọi là một *hệ thống khép kín* (closed system), sau đó được mở rộng áp dụng cho một thể tích trong không gian được gọi là *thể tích khống chế* (control volume). Các quan hệ bảo toàn cũng được gọi là các *phương trình cân bằng* bởi vì đại lượng bảo toàn phải được cân bằng trong một quá trình. Dưới đây những mô tả ngắn gọn về các phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng.

4.1.1. Bảo toàn khối lượng

Phương trình bảo toàn khối lượng cho một hệ thống khép kín trong một quá trình được thể hiện như sau: $m_{sys}=const$ hoặc $dm_{sys}/dt=0$, điều đó có nghĩa rằng khối lượng của hệ thống là không đổi trong suốt một quá trình. Đối với một thể tích khống chế (CV), phương trình bảo toàn khối lượng được thể hiện dưới dạng:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{cv}}{dt} \quad (4.1)$$

trong đó \dot{m}_{in} và \dot{m}_{out} là tổng lưu lượng vào và ra khỏi thể tích khống chế và dm_{cv}/dt là tốc độ thay đổi của khối lượng bên trong thể tích khống chế. Trong Thủy khí động lực học, phương trình bảo toàn khối lượng dưới dạng vi phân thường được gọi là *phương trình liên tục*.

4.1.2. Bảo toàn động lượng

Tích của khối lượng và vận tốc của một vật được gọi là *động lượng tuyến tính*² (linear momentum), hay đơn giản là *động lượng* của vật. Động lượng của một vật rắn có khối lượng m chuyển động với vận tốc \vec{V} là $m\vec{V}$. Định luật thứ hai của Newton phát biểu rằng gia tốc của một vật tỷ lệ thuận với tổng hợp lực tác dụng lên nó và tỉ lệ nghịch với khối lượng của nó và chỉ ra rằng tốc độ thay đổi động lượng của một vật bằng với tổng hợp lực tác dụng lên vật đó. Do đó, động lượng của một hệ thống là không đổi khi tổng hợp lực tác dụng lên nó bằng 0. Điều đó có nghĩa là động lượng được bảo toàn khi tổng hợp lực ngoài tác dụng lên hệ thống là bằng 0. Đây chính là nguyên lý bảo toàn động lượng. Trong Thủy khí động lực học, định luật thứ hai của Newton thường được gọi là phương trình bảo toàn động lượng hay *phương trình chuyển động*.

4.1.3. Bảo toàn năng lượng

Năng lượng có thể được truyền đến hoặc mất đi từ một hệ thống khép kín bằng truyền nhiệt hoặc công cơ học. Nguyên lý bảo toàn năng lượng cho rằng năng lượng ròng thu nhận hoặc mất đi từ một hệ thống trong một quá trình bằng sự

²Để phân biệt với angular momentum tiếng Việt là *mô-men động lượng* hoặc *xung lượng góc*.

thay đổi năng lượng của hệ thống. Đối với một thể tích khống chế, việc chuyển giao năng lượng còn liên quan đến lưu lượng khối lượng vào và ra khỏi thể tích. Phương trình bảo toàn năng lượng cũng được gọi là phương trình cân bằng năng lượng và được thể hiện như sau:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{dE_{CV}}{dt} \quad (4.2)$$

ở đây \dot{E}_{in} và \dot{E}_{out} là tổng năng lượng truyền vào và ra khỏi thể tích khống chế và dE_{CV}/dt là tốc độ thay đổi năng lượng bên trong thể tích khống chế. Trong Thủy khí động lực học, chúng ta thường giới hạn chỉ xem xét các dạng năng lượng cơ học. Phương trình bảo toàn năng lượng được thảo luận kỹ hơn trong mục 4.6 của Chương này.

4.2. Bảo toàn khối lượng

Nguyên lý bảo toàn khối lượng là một trong những nguyên lý cơ bản nhất trong tự nhiên. Chúng ta đều quen thuộc với nguyên lý này và nó không phải là khó hiểu. Thành ngữ Anh có câu "bạn không thể còn cái bánh khi đã ăn nó rồi" cũng là một cách thể hiện nguyên lý này. Một người không phải là một nhà khoa học cũng có thể tìm ra có bao nhiêu hỗn hợp giấm và dầu sẽ được thu được khi trộn 100 g dầu với 25 g giấm. Ngay cả các phương trình hóa học cũng được cân bằng trên cơ sở nguyên lý bảo toàn khối lượng. Khi 16 kg oxy phản ứng với 2 kg hydro, 18 kg nước được hình thành. Trong quá trình điện phân, 18 kg nước sẽ tách trở lại 2 kg hydro và 16 kg của oxy. Khối lượng, cũng như năng lượng là một tính chất được bảo toàn và nó không thể được tự tạo ra hoặc bị phá hủy trong một quá trình. Tuy nhiên, khối lượng m và năng lượng E có thể được chuyển đổi với nhau theo công thức nổi tiếng do Albert Einstein (1879-1955) đề xuất:

$$E = mc^2 \quad (4.3)$$

trong đó c là vận tốc ánh sáng trong chân không, $c = 2.9979 \times 10^8$ m/s. Phương trình này cho thấy rằng khối lượng của một hệ thống thay đổi khi năng lượng của nó thay đổi. Tuy nhiên, đối với tất cả các tương tác năng lượng gặp phải trong thực tế, trừ ngoại lệ trong phản ứng hạt nhân, sự thay đổi khối lượng là rất nhỏ và không thể được phát hiện bởi ngay cả những thiết bị nhạy cảm nhất. Ví dụ, khi 1 kg nước được hình thành từ oxy và hydro, lượng năng lượng phát ra là 14879 kJ, tương ứng với khối lượng 1.76×10^{-10} kg. Đối với hệ thống khép kín, bảo toàn khối lượng là luôn được thỏa mãn khi khối lượng của hệ thống được coi như không thay đổi trong suốt quá trình. Tuy nhiên, đối với thể tích khống chế, vật chất có thể ra vào qua mặt biên, vì vậy chúng ta phải theo dõi khối lượng vật chất vào và ra khỏi thể tích khống chế.

4.2.1. Lưu lượng khối lượng và lưu lượng thể tích

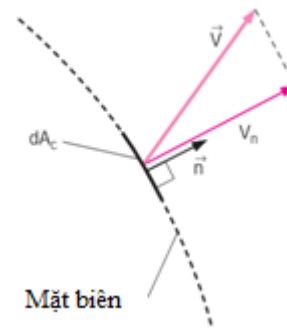
Khối lượng chất lỏng đi qua một mặt cắt ngang trong một đơn vị thời gian được gọi là lưu lượng khối lượng và ký hiệu là \dot{m} . Dấu chấm ở trên một ký hiệu của

một đại lượng được sử dụng để chỉ tốc độ thay đổi của đại lượng đó theo thời gian.

Chất lỏng chảy vào hoặc ra khỏi một thể tích khống chế, thường đi qua một đường ống hoặc kênh dẫn. Lưu lượng khối lượng của chất lỏng chảy qua một phần tử diện tích nhỏ dA_c trong một mặt cắt ngang của dòng chảy là tỷ lệ thuận với dA_c , với mật độ chất lỏng ρ và thành phần của vận tốc vuông góc với phần tử dA_c , được ký hiệu là V_n (Hình 4.3) và được xác định bởi:

$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA_c \quad (4.4)$$

Lưu ý rằng cả hai ký hiệu δ và d được sử dụng để chỉ ra các đại lượng vi phân, nhưng δ thường được sử dụng cho đại lượng (như nhiệt độ, công và khối lượng) là các hàm không có vi phân toàn phần, trong khi d được sử dụng cho đại lượng là các hàm có vi phân toàn phần. Ví dụ, đối với dòng chảy qua một vành khuyên với r_1 là bán kính bên trong và r_2 bán kính bên ngoài, ta có:



Hình 4.3 Thành phần vận tốc vuông góc với bề mặt

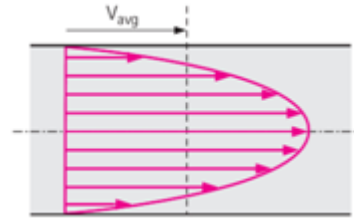
$$\int_1^2 dA_c = A_{c2} - A_{c1} = \pi(r_2^2 - r_1^2)$$

trong khi $\int_1^2 \delta \dot{m} = \dot{m}_{total}$ là tổng lưu lượng khối lượng qua ống, chứ không phải là $\dot{m}_2 - \dot{m}_1$. Lưu lượng khối lượng qua toàn bộ diện tích mặt cắt ngang của một đường ống hoặc kênh dẫn nhận được bằng cách lấy tích phân:

$$\dot{m} = \int_{A_c} \delta \dot{m} = \int_{A_c} \rho V_n dA_c \quad \left(\frac{kg}{s}\right) \quad (4.5)$$

Phương trình (4.5) luôn là chính xác, tuy nhiên nó ít được sử dụng trong tính toán kỹ thuật vì dấu tích phân. Chúng ta sẽ biểu diễn lưu lượng khối lượng thông qua các đại lượng trung bình trên mặt cắt ngang của đường ống. Trong một dòng chảy nén được nói chung, cả ρ và V_n đều thay đổi trong đường ống. Tuy nhiên, trong nhiều ứng dụng thực tế, mật độ chất lỏng cơ bản là không thay đổi trên mặt cắt ngang và chúng ta có thể đưa ρ ra bên ngoài dấu tích phân trong phương trình (4.5). Song vận tốc là không đồng nhất trên mặt cắt ngang do điều kiện bám dính trên thành ống. Thay vào đó,

vận tốc thay đổi từ 0 tại thành ống và tăng dần đến giá trị tối đa ở tâm của đường ống. Chúng ta định nghĩa vận tốc trung bình V_{avg} là giá trị trung bình của V_n trên toàn bộ mặt cắt ngang của đường ống (Hình 4.4):



Hình 4.4 Vận tốc trung bình trên mặt cắt ngang

$$V_{avg} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} V_n dA_c \quad (4.6)$$

Do đó, đối với dòng chảy không nén được hoặc dòng chảy nén được khi mà ρ là không đổi trên A_c , phương trình (4.5) trở thành:

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \rho V A_c \quad (kg/s) \quad (4.7)$$

Để đơn giản, chúng ta có thể bỏ chỉ số ký hiệu vận tốc trung bình (*avg*). Như vậy, trừ khi có quy định khác, V là ký hiệu vận tốc trung bình theo hướng dòng chảy. Ngoài ra, A_c là ký hiệu diện tích mặt cắt vuông góc với hướng dòng chảy. Thể tích của chất lỏng chảy qua một mặt cắt ngang trong một đơn vị thời gian còn gọi là *lưu lượng thể tích* của dòng chảy, ký hiệu là Q và được xác định bởi:

$$Q = \int_{A_c} V_n dA_c = V_{avg} A_c = V A_c \quad \left(\frac{m^3}{s}\right) \quad (4.8)$$

Như vậy, lưu lượng thể tích và lưu lượng khối lượng liên hệ với nhau qua:

$$\dot{m} = \rho Q = \frac{Q}{v} \quad (4.9)$$

4.2.2. Nguyên lý bảo toàn khối lượng

Nguyên lý bảo toàn khối lượng trong một thể tích khống chế được thể hiện như sau: *Khối lượng rò rỉ ra hoặc vào một thể tích khống chế trong một khoảng thời gian Δt bằng với sự thay đổi (tăng hoặc giảm) của tổng khối lượng bên trong thể tích khống chế trong thời gian Δt .* Điều đó được biểu diễn bởi phương trình:

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{CV} \quad (kg) \quad (4.10)$$

trong đó $\Delta m_{CV} = m_{cuối} - m_{banđầu}$ là sự thay đổi tổng khối lượng của thể tích khống chế trong suốt quá trình. Phương trình (4.10) tương đương với dạng vi phân sau:

$$\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = \frac{dm_{CV}}{dt} \quad (kg/s) \quad (4.11)$$

ở đây \dot{m}_{in} và \dot{m}_{out} là lưu lượng khối lượng vào và ra thể tích khống chế và dm_{CV}/dt là tốc độ thay đổi khối lượng bên trong thể tích khống chế. Phương trình (4.10) và (4.11) thường được gọi là phương trình cân bằng khối lượng và có thể được áp dụng cho bất kỳ thể tích khống chế và bất kỳ loại quá trình nào.

Xem xét một thể tích khống chế hình dạng tùy ý, như thể hiện trong Hình 4.7. Khối lượng của một phần tử thể tích dV là $dm=\rho dV$. Toàn bộ khối lượng bên trong thể tích khống chế tại thời điểm t bất kỳ được xác định bởi tích phân:

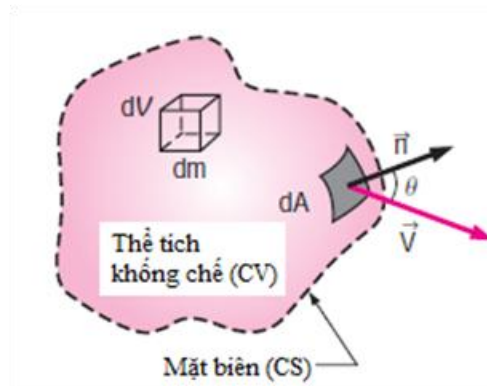
$$m_{CV} = \int_{CV} \rho dV \quad (4.12)$$

Như vậy, tốc độ thay đổi khối lượng trong CV là:

$$\frac{dm_{CV}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV \quad (4.13)$$

Đối với trường hợp đặc biệt khi không có vật chất đi qua bề mặt khống chế (ví dụ, thể tích khống chế là một hệ thống khép kín), nguyên lý bảo toàn khối lượng của hệ thống thể được thể hiện như sau: $dm_{CV}/dt=0$. Phương trình này là luôn đúng, không phụ thuộc thể tích khống chế là cố định, di chuyển, hay biến dạng.

Bây giờ xem xét lưu lượng vào hoặc ra khỏi thể tích khống chế thông qua một phần tử bề mặt dA của một thể tích khống chế cố định. Ký hiệu \vec{n} là véc tơ đơn vị pháp tuyến ngoài của dA (vuông góc với dA) và \vec{V} là vận tốc dòng chảy trên dA trong một hệ tọa độ cố định, như thể hiện trong Hình 4.7. Một cách tổng quát, véc tơ vận tốc trên dA làm thành góc θ với pháp tuyến của dA và lưu lượng khối lượng qua dA sẽ tỷ lệ với thành phần pháp tuyến của vận tốc $V_n = V \cos \theta$



Hình 4.7 Phần tử thể tích dV và phần tử bề mặt dA sử dụng trong các bước thu nhận phương trình bảo toàn khối lượng

có giá trị thay đổi từ giá trị tối đa *dòng ra* khi $\theta=0$ (dòng chảy là vuông góc với dA hướng ra ngoài) đến một giá trị tối thiểu là 0 khi $\theta=90^\circ$ (dòng chảy tiếp tuyến với dA) và đến một giá trị tối đa *dòng vào* khi $\theta=180^\circ$ (dòng chảy vuông góc với dA hướng vào trong). Với khái niệm về tích vô hướng của hai véc tơ, thành phần vận tốc pháp tuyến của dA được viết:

$$V_n = V \cos \theta = \vec{V} \cdot \vec{n} \quad (4.14)$$

Lưu lượng khối lượng qua dA được xác định từ:

$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA = \rho (V \cos \theta) dA = \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (4.15)$$

Như vậy lưu lượng khối lượng ròng vào và ra thể tích khống chế là:

$$\dot{m}_{net} = \int_{CS} \delta \dot{m} = \int_{CS} \rho V_n dA = \int_{CS} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (4.16)$$

Từ (4.11) có thể nhận được phương trình bảo toàn khối lượng cho một thể tích không chế cố định:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad (4.17)$$

Chia tích phân mặt trong (4.17) thành hai phần, một phần cho dòng ra (V_n dương) và một phần cho dòng vào (V_n âm), phương trình bảo toàn khối lượng có thể viết:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV + \sum_{out} \int_A \rho V_n dA - \sum_{in} \int_A \rho V_n dA = 0 \quad (4.18)$$

ở đây A đại diện cho tổng diện tích cửa vào hoặc cửa ra.

Với định nghĩa về lưu lượng khối lượng, phương trình (4.18) có thể viết lại như sau:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad \text{hoặc} \quad \frac{dm_{CV}}{dt} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad (4.19)$$

Lưu ý rằng dấu Σ ở đây có nghĩa là lấy tổng tất cả các cửa ra hoặc cửa vào.

4.2.3. Trường hợp thể tích không chế di chuyển hoặc biến dạng

Phương trình (4.17) và (4.18) cũng đúng cho trường hợp thể tích không chế di chuyển hoặc biến dạng với điều kiện vận tốc tuyệt đối \vec{V} được thay thế bởi các vận tốc tương đối \vec{V}_r , là vận tốc chất lỏng so với bề mặt không chế. Trong trường hợp thể tích không chế không biến dạng, vận tốc tương đối là vận tốc chất lỏng quan sát bởi người di chuyển cùng với thể tích không chế và được thể hiện như $\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_{CV}$, trong đó \vec{V} là vận tốc chất lỏng và \vec{V}_{CV} là vận tốc của thể tích không chế, cả hai vận tốc đều được so với một điểm cố định bên ngoài.

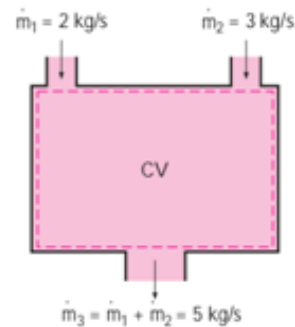
Một số vấn đề thực tế (chẳng hạn như tiêm thuốc qua kim của một ống tiêm bởi chuyển động của piston) liên quan đến sự biến dạng của thể tích không chế. Nguyên lý bảo toàn khối lượng vẫn có thể được sử dụng cho thể tích không chế biến dạng với điều kiện vận tốc của chất lỏng qua phần biến dạng của bề mặt không chế được thay thế bằng vận tốc tương đối so với bề mặt không chế (có nghĩa là, vận tốc chất lỏng được thể hiện trong một hệ quy chiếu gắn với phần biến dạng của bề mặt không chế). Vận tốc tương đối trong trường hợp này tại bất kỳ điểm nào trên bề mặt không chế được thể hiện như $\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_{CS}$, trong đó \vec{V}_{CS} là vận tốc địa phương của các bề mặt không chế tại điểm đó so với một điểm cố định bên ngoài thể tích không chế.

4.2.4. Phương trình cân bằng khối lượng cho dòng chảy ổn định

Trong dòng chảy ổn định, khối lượng chất lỏng chứa trong một thể tích không chế là không thay đổi theo thời gian ($m_{CV} = \text{const}$). Khi đó, nguyên lý bảo toàn khối lượng đòi hỏi tổng khối lượng đi vào thể tích không chế bằng tổng khối lượng đi ra khỏi nó. Ví dụ, đối với một vòi phun nước tưới cây đang hoạt động ổn định,

lượng nước vào vòi phun trên mỗi đơn vị thời gian bằng với lượng nước khỏi vòi phun trong cùng đơn vị thời gian.

Khi làm việc với dòng chảy ổn định, chúng ta không cần quan tâm đến khối lượng chảy vào và ra qua một thiết bị theo thời gian; thay vào đó cần quan tâm đến lưu lượng khối lượng của dòng chảy, nghĩa là khối lượng đi qua mặt cắt ngang của dòng chảy trong đơn vị thời gian. Nguyên lý bảo toàn khối lượng cho một hệ thống ổn định có nhiều cửa vào và ra có thể được thể hiện dưới dạng như sau (Hình 4.10):



Hình 4.10 Nguyên lý bảo toàn cho hệ thống 2 cửa vào 1 cửa ra

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \quad (\text{kg/s}) \quad (4.20)$$

Nhiều thiết bị kỹ thuật như vòi phun, tua bin, máy nén khí, máy bơm,... chỉ có một đầu vào và một đầu ra duy nhất (được gọi là dòng chảy đơn dòng). Đối với trường hợp này, chúng ta ký hiệu đầu vào bởi chỉ số 1 và đầu ra bởi chỉ số 2. Khi đó, phương trình (4.20) cho hệ thống dòng chảy ổn định đơn dòng có dạng:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (4.21)$$

4.2.5. Dòng chảy không nén được

Phương trình bảo toàn khối lượng có thể được đơn giản hóa hơn nữa khi chất lỏng là không nén được. Giả sử mật độ từ cả hai vế của phương trình cho dòng chảy ổn định [sau khi triển khai (4.20)], ta nhận được :

$$\sum_{in} Q = \sum_{out} Q \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (4.22)$$

Đối với dòng chảy ổn định đơn dòng:

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (4.23)$$

Tuy nhiên, phải luôn ghi nhớ rằng không có nguyên lý "bảo toàn thể tích". Do đó, lưu lượng thể tích vào và ra của một thiết bị hoạt động ổn định có thể khác nhau. Lưu lượng thể tích tại các cửa ra của một máy nén khí là ít hơn nhiều so với lưu lượng thể tích đầu vào mặc dù lưu lượng khối lượng không khí qua máy nén khí là không đổi (Hình 4.11). Điều này là do mật độ cao của không khí ở cửa ra của máy nén khí.



Hình 4.11 Lưu lượng thể tích có thể không được bảo toàn trong dòng chảy ổn định

4.3. Năng lượng cơ học và hiệu suất

4.3.1. Năng lượng cơ học

Nhiều hệ thống chất lỏng được thiết kế để vận chuyển chất lỏng từ một địa điểm này đến một địa điểm khác với lưu lượng, vận tốc và chênh lệch độ cao cho trước. Hệ thống có thể tạo ra công cơ học như tua bin hoặc có thể tiêu thụ công cơ học như máy bơm hoặc quạt trong quá trình hoạt động. Những hệ thống này không liên quan đến việc chuyển đổi năng lượng hạt nhân, hóa học hoặc nhiệt năng để tạo ra năng lượng cơ học. Ngoài ra, trao đổi nhiệt ở các thiết bị là không đáng kể và chủ yếu hoạt động ở nhiệt độ không đổi. Hệ thống như vậy có thể được phân tích thuận tiện bằng cách chỉ xem xét các dạng năng lượng cơ học và các hiệu ứng ma sát gây ra sự mất năng lượng cơ học (tức là, được chuyển đổi thành năng lượng nhiệt mà thường không thể được sử dụng cho bất kỳ mục đích hữu ích nào).

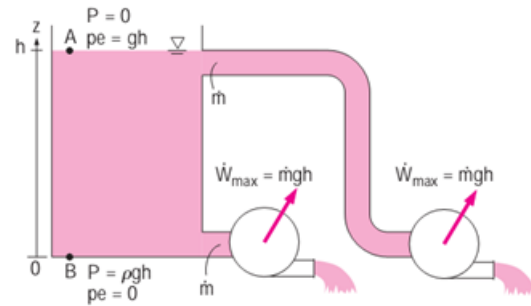
Năng lượng cơ học được định nghĩa là dạng năng lượng có thể được chuyển đổi sang công cơ học toàn bộ và trực tiếp bởi một *thiết bị cơ khí lý tưởng* như một tua bin lý tưởng. Động năng và thế năng là những dạng quen thuộc của năng lượng cơ học. Tuy nhiên, nhiệt năng không phải là năng lượng cơ học, vì nó không thể được chuyển đổi sang công cơ học trực tiếp và toàn bộ (định luật thứ hai của nhiệt động lực học).

Máy bơm chuyển năng lượng cơ học vào dòng chảy chất lỏng bằng cách tăng áp suất/vận tốc của dòng chảy và một tua bin thu năng lượng cơ học từ dòng chảy chất lỏng bằng cách làm giảm áp suất của nó. Do đó, áp suất của dòng chảy chất lỏng là liên quan đến năng lượng cơ học của nó. Trong thực tế, đơn vị áp suất Pa là tương đương với $Pa = N/m^2 = N \cdot m / m^3 = J/m^3$, đó là năng lượng trên một đơn vị thể tích và tích Pv hoặc tương đương P/ρ có đơn vị là J/kg, là năng lượng trên một đơn vị khối lượng. Lưu ý rằng bản thân áp suất không phải là một dạng năng lượng. Tuy nhiên, áp lực tác dụng lên chất lỏng chuyển động qua một khoảng cách sinh ra công cơ học và được gọi là *công của dòng chảy* và có giá trị là P/ρ trên một đơn vị khối lượng chất lỏng. Công của dòng chảy được coi như là một tham số dòng chảy và có thể xem như là một phần của năng lượng của chất lỏng trong dòng chảy và được gọi là *năng lượng dòng chảy*³. Vì vậy, năng lượng cơ học của một chất lỏng trong dòng chảy trên một đơn vị có khối lượng có thể được thể hiện như sau: $e_{mech} = \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz$. Trong đó P/ρ là năng lượng dòng chảy, $V^2/2$ là động năng và gz là thế năng của chất lỏng trên một đơn vị khối lượng. Do đó, sự thay đổi năng lượng cơ học của một chất lỏng trong dòng chảy không nén được, được viết như sau:

$$\Delta e_{mech} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad \left(\frac{J}{kg}\right) \quad (4.24)$$

³ Cần phân biệt với năng lượng của *chất lỏng chuyển động*, năng lượng này là tổng năng lượng của dòng chảy bao gồm thế năng, động năng và năng lượng dòng chảy.

Vì vậy, năng lượng cơ học của một chất lỏng không thay đổi trong dòng chảy của nó nếu áp suất, mật độ, vận tốc và độ cao không thay đổi. Trong trường hợp không có bất kỳ tổn thất nào khác, sự thay đổi năng lượng cơ học đại diện cho các công cơ học được cung cấp cho chất lỏng (nếu $\Delta e_{mech} > 0$) hoặc lấy đi từ chất lỏng (nếu $\Delta e_{mech} < 0$).



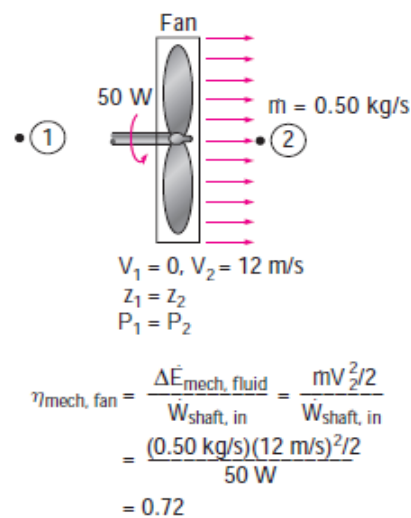
Hình 4.15 Năng lượng cơ học của nước là như nhau ở khắp nơi trong bình chứa

Xem xét một bể chứa có chiều cao h chứa đầy nước, như thể hiện trong Hình 4.15, với mặt tham chiếu là mặt đáy bể. Áp suất dư và thế năng trên một đơn vị khối lượng là: $P_A=0$ và $pe_A=gh$ tại điểm A trên bề mặt tự do và $P_B=\rho gh$ và $pe_B=0$ tại điểm B trên mặt đáy của bể. Do đó, một tua bin lý tưởng sẽ tạo ra cùng một công trên một đơn vị khối lượng $w_{tuabin}=gh$ không phụ thuộc nó nhận nước từ trên mặt tự do hoặc từ đáy của bể chứa. Lưu ý rằng chúng ta đã giả thiết có dòng chảy lý tưởng qua các ống dẫn đến tua bin. Do đó, tổng năng lượng cơ học của nước ở đáy bình là tương đương với năng lượng ở trên mặt tự do.

4.3.2. Truyền năng lượng cơ học và hiệu suất

Việc truyền năng lượng cơ học thường được thực hiện thông qua một trục quay, vì vậy công cơ học thường được nói đến như công của trục quay.

Máy bơm hoặc quạt máy nhận công trục quay (thường là từ một động cơ điện) và truyền cho chất lỏng năng lượng cơ học. Trong khi đó, tua bin chuyển đổi năng lượng cơ học của chất lỏng thành công trục quay. Trong trường hợp không có bất kỳ quá trình không thuận nghịch nào như ma sát, năng lượng cơ học có thể được chuyển đổi hoàn toàn từ một dạng này sang một dạng năng lượng cơ học khác. *Hiệu suất cơ học* của một thiết bị hoặc một quá trình được định nghĩa như sau (Hình 4.16):



Hình 4.16 Hiệu suất cơ học của chiếc quạt gió

$$\eta_{mech} = \frac{\text{Năng lượng cơ học đầu ra}}{\text{Năng lượng cơ học đầu vào}} = \frac{E_{mec\ h,out}}{E_{mec\ h,in}} = 1 - \frac{E_{mec\ h,loss}}{E_{mec\ h,in}} \quad (4.25)$$

Hiệu suất chuyển đổi nhỏ hơn 100% chỉ ra rằng chuyển đổi là không hoàn hảo và một số tổn thất đã xảy ra trong quá trình chuyển đổi. Hiệu suất cơ học 97% chỉ ra

rằng 3% của năng lượng cơ học đầu vào đã được chuyển thành nhiệt năng do ma sát và sẽ làm gia tăng nhiệt độ của chất lỏng.

Trong các hệ thống chất lỏng, chúng ta thường quan tâm đến việc gia tăng áp suất, vận tốc và/hoặc độ cao của chất lỏng. Điều này được thực hiện bằng cách cung cấp năng lượng cơ học cho chất lỏng bằng máy bơm, quạt gió hay máy nén.... Hoặc chúng ta quan tâm đến quá trình ngược lại là thu nhận năng lượng cơ học từ dòng chảy chất lỏng bằng tua bin và sản xuất năng lượng cơ học dưới dạng công trực quay để làm quay máy phát điện hoặc bất kỳ thiết bị quay nào khác. Mức độ hoàn hảo của quá trình chuyển đổi giữa công cơ học cung cấp hoặc thu nhận và năng lượng cơ học của chất lỏng được thể hiện bằng hiệu suất của máy bơm hoặc tua bin, được định nghĩa như sau:

$$\eta_{pump} = \frac{\text{Năng lượng cơ học tăng lên của chất lỏng}}{\text{Năng lượng cơ học đầu vào}} = \frac{\Delta \dot{E}_{meh,fluid}}{\dot{W}_{shaft,in}} = \frac{\dot{W}_{pump,u}}{\dot{W}_{pump}} \quad (4.26)$$

trong đó $\Delta \dot{E}_{meh,fluid} = \dot{E}_{meh,in} - \dot{E}_{meh,out}$ là tốc độ gia tăng năng lượng cơ học của chất lỏng, được gọi là công suất bơm hữu ích $\dot{W}_{pump,u}$ cung cấp cho chất lỏng, còn

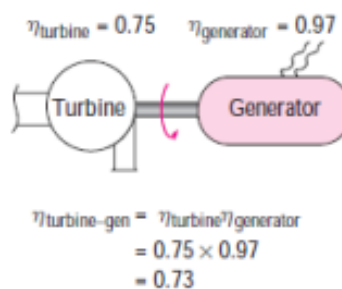
$$\eta_{turbine} = \frac{\text{Năng lượng cơ học đầu ra}}{\text{Giảm năng lượng cơ học của chất lỏng}} = \frac{\dot{W}_{shaft,out}}{|\Delta \dot{E}_{meh,fluid}|} = \frac{\dot{W}_{turbine}}{\dot{W}_{turbine,e}} \quad (4.27)$$

ở đây $|\Delta \dot{E}_{meh,fluid}| = \dot{E}_{meh,in} - \dot{E}_{meh,out}$ là tốc độ giảm năng lượng cơ học của chất lỏng, tương đương với công suất cơ năng được thu nhận từ dòng chảy chất lỏng bởi tua bin $\dot{W}_{turbine,e}$. Không nên nhầm lẫn giữ hiệu suất cơ học với hiệu suất động cơ và hiệu suất phát điện. Chúng được định nghĩa như sau:

$$\eta_{motor} = \frac{\text{Năng lượng cơ học đầu ra}}{\text{Năng lượng điện đầu vào}} = \frac{\dot{W}_{shaft,out}}{\dot{W}_{elect,in}} \quad (4.28)$$

$$\eta_{generator} = \frac{\text{Năng lượng điện đầu ra}}{\text{Năng lượng cơ học đầu vào}} = \frac{\dot{W}_{elect,out}}{\dot{W}_{shaft,in}} \quad (4.29)$$

Một máy bơm thường được gắn với động cơ và một tua bin được gắn với máy phát điện. Do đó, chúng ta thường quan tâm đến *hiệu suất kết hợp* hoặc *hiệu suất tổng thể* của cặp máy bơm-động cơ và tua bin-máy phát điện (Hình 4.17), chúng được định nghĩa như sau:



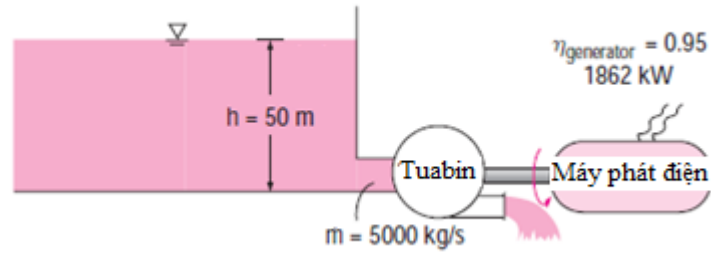
Hình 4.17 Hiệu suất tổng thể của cặp tuabin-máy phát điện

$$\eta_{pump-motor} = \eta_{pump} \eta_{motor} = \frac{\dot{W}_{pump,u}}{\dot{W}_{elect,in}} = \frac{\Delta \dot{E}_{meh,fluid}}{\dot{W}_{elect,in}} \quad (4.30)$$

$$\eta_{turbine-gen} = \eta_{turbine} \eta_{generator} = \frac{\dot{W}_{elect,out}}{\dot{W}_{turbine,e}} = \frac{\dot{W}_{elect,out}}{|\Delta \dot{E}_{meh,fluid}|} \quad (4.31)$$

4.3.3. Ví dụ 4.3: Hiệu suất của cặp Tua bin-Máy phát điện

Một hồ nước lớn chứa nước để phát điện thông qua tua bin thủy lực đặt ở độ sâu 50 m (Hình 4.18). Nước được cung cấp với lưu lượng 5000 kg/s. Nếu công suất phát điện đo được là 1862 kW và hiệu suất phát điện là 95%,



Hình 4.18 Sơ đồ cho ví dụ 4.3

xác định (a) hiệu suất tổng thể của máy phát điện-tua bin, (b) hiệu suất cơ học của tua bin và (c) công suất trục quay cung cấp bởi tua bin cho máy phát điện.

Vấn đề: Một hệ thống thủy lực tua bin-máy phát điện sản xuất điện từ nước của một hồ nước. Xác định hiệu suất tổng thể, hiệu suất tua bin và công suất trục quay của tua bin.

Giả thiết: (1) Độ cao mặt nước hồ không thay đổi; (2) Năng lượng cơ học của nước tại cửa ra tua bin là không đáng kể.

Tính chất: Mật độ của nước được xem là $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$.

Phân tích: (a) Chúng ta lấy đáy hồ làm độ cao tham chiếu cho thuận tiện. Vì vậy, tại đáy hồ động năng và thế năng của nước là 0 và sự thay đổi năng lượng cơ học trên một đơn vị khối lượng là:

$$e_{mech,in} - e_{mech,out} = \frac{P}{\rho} - 0 = gh = \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (50 m) \left(\frac{1 \frac{kJ}{kg}}{1000 \frac{m^2}{s^2}}\right) = 0.491 \text{ kJ/kg}$$

Như vậy năng lượng cơ học hồ nước có thể cung cấp cho tua bin và hiệu suất tổng thể là

$$|\Delta \dot{E}_{mech,Fluid}| = \dot{m}(e_{mech,in} - e_{mech,out}) = \left(5000 \frac{kg}{s}\right) \left(0.491 \frac{kJ}{kg}\right) = 2455 \text{ kW}$$

$$\eta_{overall} = \eta_{turbine-gen} = \frac{\dot{W}_{elect,out}}{|\Delta \dot{E}_{mech,fluid}|} = \frac{1862 \text{ kW}}{2455 \text{ kW}} = 0.76$$

(b) Khi biết hiệu suất tổng thể và hiệu suất máy phát điện thì hiệu suất tua bin được xác định như sau:

$$\eta_{turbine-gen} = \eta_{turbine} \eta_{generaor} \rightarrow \eta_{turbine} = \frac{\eta_{turbine-gen}}{\eta_{generaor}} = \frac{0.76}{0.95} = 0.8$$

(c) Công suất trục quay được xác định từ định nghĩa về hiệu suất cơ học:

$$\dot{W}_{shaft,out} = \eta_{turbine} |\Delta \dot{E}_{mech,fluid}| = (0.80)(2455 \text{ kW}) = 1964 \text{ kW}$$

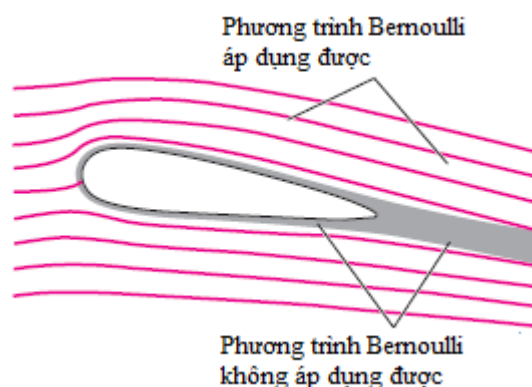
Thảo luận: Lưu ý rằng hồ chứa cung cấp 2455kW năng lượng cơ học cho tua bin, tua bin chuyển đổi thành 1964kW công trực quay để quay máy phát điện, máy phát điện cung cấp 1862 kW công suất điện năng. Như vậy năng lượng bị tổn thất qua mỗi bộ phận và các quá trình tổn thất năng lượng này là các quá trình không đảo ngược.

4.4. Phương trình Bernoulli

Phương trình Bernoulli biểu diễn mối quan hệ gần đúng giữa áp suất, vận tốc và độ cao, có thể áp dụng trong các miền dòng chảy ổn định, không nén được và hiệu ứng của các lực ma sát là không đáng kể (Hình 4.21). Mặc dù tính đơn giản của nó, phương trình Bernoulli đã được chứng minh là một công cụ rất mạnh mẽ trong Thủy khí động lực học. Trong phần này, chúng ta thu nhận phương trình Bernoulli bằng cách áp dụng các nguyên lý bảo toàn và chỉ ra khả năng áp dụng và những hạn chế của nó.

Giả thiết quan trọng của phương trình Bernoulli nguyên gốc là hiệu ứng nhớt là không đáng kể so với hiệu ứng quán tính, hấp dẫn và áp suất. Vì tất cả các chất lỏng đều có độ nhớt (trong thực tế không có "chất lỏng không nhớt" hay "chất lỏng lý tưởng") cho nên, giả thiết này không thể đúng cho tất cả các miền dòng chảy trong thực tế. Nói cách khác, chúng ta không thể áp dụng phương trình Bernoulli ở khắp mọi nơi trong một dòng chảy nào đó, cho dù độ nhớt của chất lỏng là rất nhỏ. Tuy nhiên, có thể chỉ ra rằng giả thiết không nhớt là hợp lý trong nhiều khu vực nhất định của dòng chảy thực tế. Chúng ta đề cập đến những vùng có thể coi như vùng không nhớt của dòng chảy và cần nhấn mạnh rằng đó không phải là những khu vực nơi bản thân chất lỏng là không nhớt hay không có ma sát, mà là khu vực có hiệu ứng lực nhớt và ma sát là không đáng kể so với các lực khác tác dụng lên các hạt chất lỏng.

Vì vậy, cần phải cẩn thận khi áp dụng phương trình Bernoulli vì đó là một xấp xỉ chỉ được áp dụng cho các miền không nhớt của dòng chảy. Nói chung, các hiệu ứng ma sát là rất quan trọng ở gần tường rắn (các lớp biên) và ngay sau các vật thể (khu vực vết dòng chảy). Như vậy, phương trình Bernoulli được áp dụng trong khu vực dòng chảy bên ngoài lớp biên và ngoài khu vực vết dòng chảy, nơi mà chất



Hình 4.21 Ví dụ về khu vực dòng chảy nơi có thể và không thể áp dụng phương trình Bernoulli

lỏng chuyển động bởi các tác dụng chủ yếu của các lực áp suất và trọng lực.

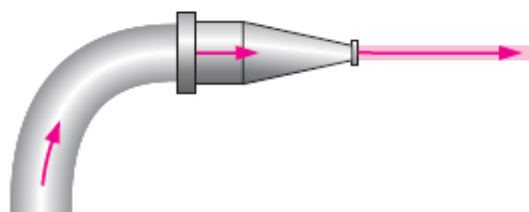
Chuyển động của một hạt chất lỏng và đường đi của nó được mô tả bởi véc tơ vận tốc như là một hàm số của thời gian, không gian và vị trí ban đầu của hạt. Khi dòng chảy là ổn định (không thay đổi theo thời gian tại điểm cho trước), tất cả các hạt đi qua cùng một điểm đều đi theo cùng một con đường (gọi là đường dòng) và véc tơ vận tốc luôn tiếp tuyến với đường dòng ở mọi điểm.

4.4.1. Gia tốc của hạt chất lỏng

Để thuận tiện, chuyển động của một hạt thường được mô tả theo khoảng cách s của nó và bán kính cong R dọc theo đường dòng. Vận tốc của hạt được xác định từ phương trình $V=ds/dt$. Trong dòng chảy hai chiều, gia tốc có thể được phân tách thành hai thành phần: gia tốc dọc theo đường dòng a_s và gia tốc vuông góc với đường dòng a_n , với $a_n=V^2/R$. Lưu ý rằng gia tốc dọc theo đường dòng là do sự thay đổi tốc độ, còn gia tốc vuông góc với đường dòng là do sự thay đổi về hướng của vận tốc. Đối với các hạt di chuyển dọc theo một đường thẳng, $a_n=0$ vì bán kính cong là lớn vô cùng và do đó không có sự thay đổi theo hướng. Phương trình Bernoulli là kết quả của sự cân bằng lực dọc theo đường dòng.

Người ta có thể dễ bị ngộ nhận rằng gia tốc là bằng 0 trong dòng chảy ổn định vì gia tốc là tốc độ thay đổi của vận tốc theo thời gian và trong dòng chảy ổn định thì không có thay đổi nào theo thời gian. Tuy nhiên, một ví dụ về vòi phun nước cho chúng ta thấy rằng sự hiểu biết này là không chính xác. Ngay cả trong dòng chảy ổn định và lưu lượng khối lượng là hằng số, nước vẫn tăng tốc khi đi qua vòi phun (Hình 4.22). Ổn định chỉ đơn giản có nghĩa là không thay đổi theo

thời gian tại một vị trí nhất định, nhưng giá trị của một đại lượng có thể thay đổi từ một địa điểm này tới địa điểm khác. Trong trường hợp của vòi phun, vận tốc của nước vẫn không đổi ở một điểm nhất định, nhưng nó thay đổi từ cửa vào đến cửa ra (nước tăng tốc dọc theo vòi phun).



Hình 4.22 Trong dòng chảy ổn định, chất lỏng không tăng tốc theo thời gian nhưng có thể tăng tốc trong không gian

Về mặt toán học, điều này có thể được chứng minh như sau. Giả sử chúng ta có vận tốc V của một hạt chất lỏng là hàm của s và t . Lấy vi phân toàn phần của $V(s, t)$ và chia cả hai vế cho dt , chúng ta nhận được:

$$dV = \frac{\partial V}{\partial s} ds + \frac{\partial V}{\partial t} dt \quad \text{và} \quad \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial s} \frac{ds}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (4.33)$$

Trong dòng chảy ổn định, $\partial V/\partial t=0$ và $V=V(s)$. Gia tốc theo hướng s là:

$$a_s = \frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial s} \frac{ds}{dt} = \frac{\partial V}{\partial s} V = V \frac{dV}{ds} \quad (4.34)$$

ở đây $V=ds/dt$ khi mà chúng ta đi theo hạt chất lỏng dọc theo đường dòng. Có thể thấy rằng nếu V thay đổi theo s có nghĩa là $dV/ds \neq 0$ do đó $a_s \neq 0$. Vì vậy gia tốc ở trong dòng chảy ổn định là khác không là do vận tốc thay đổi theo vị trí.

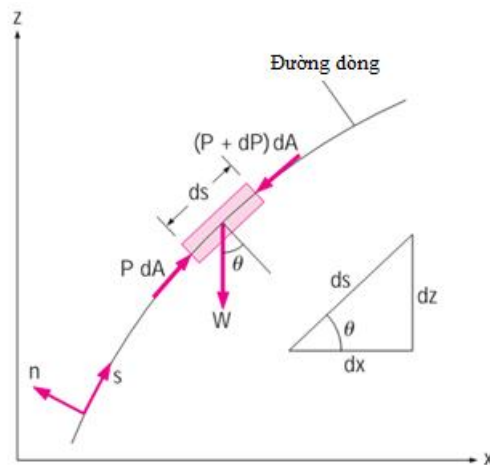
4.4.2. Thu nhận phương trình Bernoulli

Xem xét chuyển động của một hạt chất lỏng trong một trường dòng chảy ổn định. Áp dụng định luật thứ hai của Newton theo hướng s của hạt chuyển động dọc theo đường dòng, ta có:

$$\sum F_s = ma_s \quad (4.35)$$

Trong khu vực dòng chảy nơi mà lực ma sát là không đáng kể, các lực tác dụng theo hướng s là áp lực (tác dụng lên cả hai mặt) và thành phần trọng lực của hạt theo hướng s (Hình 4.23).

Do đó, phương trình (4.35) trở thành:



Hình 4.23 Các lực tác dụng lên hạt chất lỏng dọc theo đường dòng

$$P dA - (P + dP) dA - W \sin \theta = m V \frac{dV}{ds} \quad (4.36)$$

ở đây θ là góc giữa pháp tuyến của đường dòng và trục z tại điểm xem xét, $m = \rho V = \rho ds dA$ là khối lượng, $W = mg = \rho g dA ds$ là trọng lượng của hạt chất lỏng và $\sin \theta = dz/ds$. Thay vào (4.36) ta nhận được:

$$-dP dA - \rho g dA ds \frac{dz}{ds} = \rho dA ds V \frac{dV}{ds} \quad (4.37)$$

Giản ước dA ở hai vế phương trình, ta nhận được:

$$-dP - \rho g dz = \rho V dV \quad (4.38)$$

Chú ý rằng $V dV = 0.5 d(V^2)$ và chia 2 vế cho ρ , ta có:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{1}{2} d(V^2) + g dz = 0 \quad (4.39)$$

Tích phân cả hai vế của phương trình, ta nhận được phương trình cho dòng ổn định:

$$\int \frac{dP}{\rho} + \frac{V^2}{2} + g z = \text{const} \quad (\text{dọc theo đường dòng}) \quad (4.40)$$

Trong trường hợp của dòng chảy không nén được, ta có:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + g z = \text{const} \quad (\text{dọc theo đường dòng}) \quad (4.41)$$

Đây chính là phương trình Bernoulli nổi tiếng thường được sử dụng trong Thủy khí động lực học cho dòng chảy ổn định của chất lỏng không nén được, trên đường dòng trong vùng không nhót. Các giá trị của hằng số có thể được xác định

ở bất kỳ điểm nào trên đường dòng khi mà áp suất, mật độ, vận tốc và độ cao tại điểm đó đã được biết. Phương trình Bernoulli cũng có thể được viết giữa hai điểm bất kỳ trên đường dòng như sau:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \quad (4.42)$$

Phương trình Bernoulli thu nhận được từ định luật bảo toàn động lượng cho hạt chất lỏng chuyển động dọc theo đường dòng. Phương trình này cũng có thể thu nhận từ định luật thứ nhất của nhiệt động lực học hoặc phương trình tổng quát chuyển động của chất lỏng như phương trình Navier-Stokes.

Phương trình Bernoulli đã được phát biểu lần đầu tiên bởi nhà toán học người Thụy Sĩ Daniel Bernoulli (1700-1782) trong một văn bản được viết vào năm 1738 khi ông đang làm việc tại St. Petersburg, Nga. Sau đó nó được đưa ra dưới dạng dạng phương trình bởi người đồng nghiệp của ông là Leonard Euler năm 1754. Chúng ta nhận thấy $V^2/2$ là động năng, gz là thế năng và P/ρ là năng lượng dòng chảy, tất cả đều được tính trên một đơn vị khối lượng. Do đó, phương trình Bernoulli có thể được xem như là sự thể hiện của cân bằng năng lượng cơ học và có thể được phát biểu như sau: *Tổng động năng, thế năng và năng lượng dòng chảy của một hạt chất lỏng là không đổi dọc theo đường dòng trong dòng chảy ổn định khi hiệu ứng nén và ma sát là không đáng kể.*

Động năng, thế năng và năng lượng dòng chảy là các dạng năng lượng cơ học, như đã thảo luận trong mục 4.3 và phương trình Bernoulli có thể được xem là "nguyên lý bảo toàn cơ năng". Điều này tương đương với nguyên lý bảo toàn năng lượng tổng quát cho hệ thống khi không có bất kỳ sự chuyển đổi nào giữa năng lượng cơ học và nhiệt năng. Phương trình Bernoulli cho rằng trong dòng chảy ổn định không nén được với hiệu ứng ma sát không đáng kể, các dạng khác nhau của cơ năng được chuyển đổi với nhau, nhưng tổng cơ năng là không đổi. Nói cách khác, không có tiêu tán năng lượng cơ học trong dòng chảy như vậy vì không có ma sát để chuyển đổi năng lượng cơ học thành nhiệt năng (nội năng).

Nhớ lại rằng năng lượng được truyền cho một hệ thống như công năng khi một lực tác dụng vào hệ thống trên một khoảng cách nào đó. Như vậy phương trình Bernoulli cũng có thể được hiểu như là: Các công được thực hiện bởi các áp lực và lực trọng trường trên các hạt chất lỏng bằng sự gia tăng động năng của các hạt.

Mặc dù có những giả thiết hạn chế được sử dụng trong quá trình thu nhận phương trình, phương trình Bernoulli thường được sử dụng trong thực tế bởi vì các dòng chảy thực tế có thể được phân tích bằng phương trình Bernoulli với độ chính xác chấp nhận được. Điều này có được là do nhiều dòng chảy trong kỹ thuật là dòng ổn định, có hiệu ứng nén và ma sát là không đáng kể trong khu vực nghiên cứu.

4.4.3. Áp suất tĩnh, áp suất động lực và áp suất điểm dừng

Phương trình Bernoulli cho rằng tổng năng lượng dòng chảy, động năng và thế năng của một hạt chất lỏng theo đường dòng là không đổi. Do đó, động năng và thế năng của chất lỏng có thể được chuyển đổi thành năng lượng dòng chảy (và ngược lại) gây ra sự thay đổi áp suất. Điều này có thể được thấy rõ ràng hơn bằng cách nhân phương trình Bernoulli bởi mật độ ρ ,

$$P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g z = \text{constant} \quad (4.45)$$

Mỗi số hạng trong phương trình này có đơn vị áp suất. Như vậy, có thể cho rằng mỗi số hạng đại diện cho một loại áp suất khác nhau:

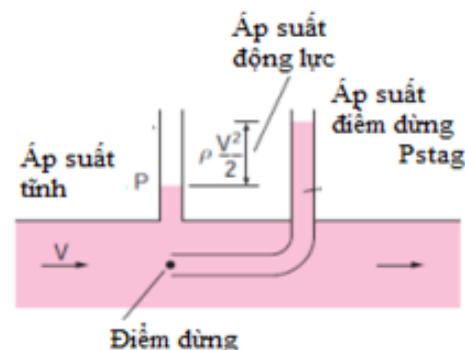
- P là *áp suất tĩnh* (không liên quan đến các hiệu ứng động lực), đại diện cho áp suất nhiệt động lực của chất lỏng. Đây là áp suất được sử dụng trong nhiệt động lực và trong các bảng tính chất của chất lỏng.
- $\rho V^2/2$ là *áp suất động lực*, đại diện cho sự gia tăng áp suất khi chất lỏng chuyển động được đưa đến trạng thái dừng đẳng entropy (isentropically-không mất năng lượng do ma sát, trao đổi nhiệt).
- $\rho g z$ là *áp suất thủy tĩnh*, nó không phải là áp suất đúng nghĩa bởi vì giá trị của nó phụ thuộc vào mặt phẳng tham chiếu. Áp suất thủy tĩnh đại diện cho các hiệu ứng độ cao, tức là ảnh hưởng của trọng lượng chất lỏng đến áp suất. Khái niệm "áp suất thủy tĩnh" đúng nghĩa áp suất thường được hiểu là áp suất của cột chất lỏng ở trạng thái tĩnh.

Tổng áp suất tĩnh, áp suất động lực và áp suất thủy tĩnh được gọi là *áp suất toàn phần*. Vì vậy, phương trình Bernoulli có thể phát biểu như sau: *Áp suất toàn phần trên một đường dòng là không đổi.*

Tổng áp suất tĩnh và áp suất động lực được gọi là áp suất điểm dừng (hay áp suất dòng hãm trong khí động học), được xác định như sau:

$$P_{stag} = P + \rho \frac{V^2}{2} \quad (kPa) \quad (4.46)$$

Áp suất điểm dừng đại diện cho áp suất tại một điểm mà chất lỏng được đưa đến một điểm dừng ($V=0$) bằng quá trình đẳng entropy (không mất năng lượng do ma sát và trao đổi nhiệt). Các áp suất tĩnh, áp suất động lực và áp suất điểm dừng được thể hiện trong Hình 4.27. Khi áp suất tĩnh và áp suất điểm dừng được đo tại một vị trí nhất định, vận tốc chất lỏng tại vị trí đó có thể được tính từ công thức:

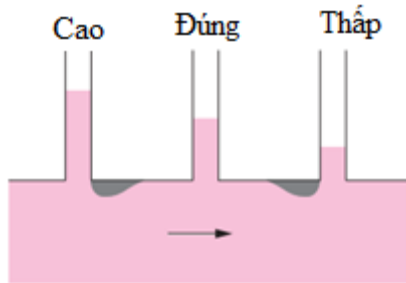


Hình 4.27 Áp suất tĩnh, áp suất động lực và áp suất điểm dừng

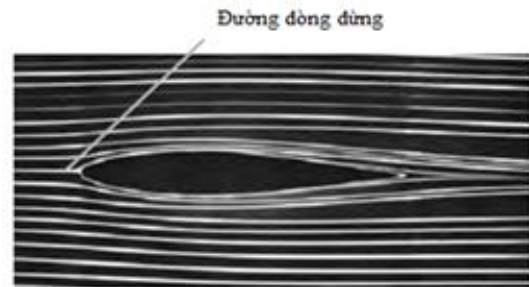
$$V = \sqrt{\frac{2(P_{stag} - P)}{\rho}} \quad (4.47)$$

Phương trình (4.47) là hữu ích trong việc đo vận tốc dòng chảy bằng sự kết hợp của một ống áp suất tĩnh (piezometer) và một ống Pitot, như minh họa trong Hình 4.27. Một ống áp suất tĩnh đơn là một lỗ nhỏ được khoan vào thành ống sao cho miệng của lỗ song song với hướng dòng chảy. Ống Pitot là một ống nhỏ với miệng ống đặt vuông góc với dòng chảy để cảm nhận được đầy đủ áp lực tác động của chất lỏng chảy. Ống Pitot được sử dụng để đo áp suất điểm dừng.

Khi áp suất tĩnh được đo bằng cách khoan một lỗ trên thành ống, cần phải lưu ý rằng việc mở các lỗ trên bề mặt tường sao cho dòng chảy trước hoặc sau khi lỗ không thay đổi (Hình 4.29). Nếu không, kết quả đo sẽ bị ảnh hưởng bởi một số hiệu ứng động lực và do đó nó sẽ có những sai số đáng kể.



Hình 4.29 Lỗ khoan của ống áp suất tĩnh có thể gây ra sai số đáng kể khi đo áp suất



Hình 4.30 Đường dòng dừng trong dòng chảy bao cánh

Khi một vật ngập trong dòng chảy, chất lỏng được đưa đến một điểm dừng ở mũi của vật (điểm dừng). Đường dòng phía thượng lưu điểm dừng được gọi là đường dòng dừng (Hình 4.30). Trong dòng chảy không nén được, vận tốc dòng chảy giảm dần từ giá trị ban đầu ở xa vật để có giá trị bằng 0 tại điểm dừng trong một quá trình đẳng entropy và do đó áp suất tại điểm dừng là áp suất dừng.

4.4.4. Những hạn chế trong việc sử dụng phương trình Bernoulli

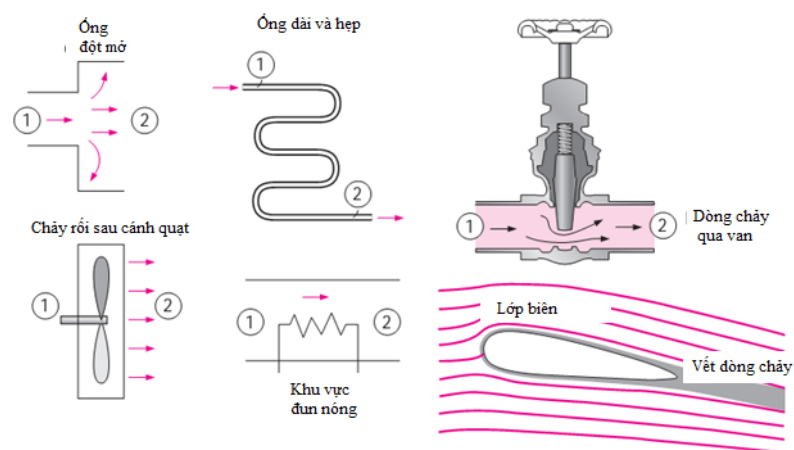
Phương trình Bernoulli (4.41) là một trong những phương trình thường xuyên được sử dụng nhất và cũng bị lạm dụng nhiều nhất trong Thủy khí động lực học. Tính đa dụng, đơn giản và dễ sử dụng làm cho nó là một công cụ rất có giá trị để sử dụng trong phân tích dòng chảy, nhưng cũng chính vì vậy mà nó cũng dễ bị sử dụng sai. Do đó, điều quan trọng là phải hiểu rõ những hạn chế và khả năng ứng dụng của nó, như được giải thích ở dưới đây:

1. *Dòng chảy ổn định*: Hạn chế đầu tiên của phương trình Bernoulli là nó chỉ được áp dụng cho dòng chảy ổn định. Vì vậy, nó không nên được sử dụng cho các quá trình khởi động và sau thời gian dừng hoạt động của một thiết bị hoặc trong giai đoạn thay đổi một điều kiện nào đó trong dòng chảy. Lưu ý rằng có những dạng không ổn định của phương trình Bernoulli, tuy nhiên trong giáo trình này, vấn đề đó sẽ không được đề cập chi tiết.

2. *Dòng chảy không ma sát*: Mỗi dòng chảy đều ít nhiều liên quan đến ma sát. Tuy nhiên vấn đề ở chỗ là các hiệu ứng ma sát có thể bỏ qua hay không thể bỏ qua. Nói chung, các hiệu ứng ma sát là không đáng kể đối với miền dòng chảy gần với mặt cắt ngang lớn. Hiệu ứng ma sát thường đáng kể trong dòng chảy dài và hẹp, trong khu vực vết dòng chảy sau vật thể và trong dòng chảy qua ống phân kỳ do hiện tượng tách dòng. Hiệu ứng ma sát cũng là đáng kể ở gần mặt các tường rắn. Do đó phương trình Bernoulli thường được áp dụng dọc theo đường dòng trong vùng lõi của dòng chảy, chứ không phải ở trên đường dòng gần với bề mặt tường rắn (Hình 4.31). Những tác động làm thay đổi cấu trúc của dòng chảy, kéo theo là sự hình thành xoáy, rối và các dòng ngược, như khu vực cửa vào nhiều góc cạnh của một ống dẫn hoặc cửa van trong dòng chảy, có thể làm cho phương trình Bernoulli không áp dụng được.

3. *Không có công trực quay*: Phương trình Bernoulli được thu nhận từ phương trình cân bằng lực cho một hạt lỏng chuyển động dọc theo một đường dòng. Do đó, phương trình Bernoulli không được áp dụng cho phần dòng chảy có liên quan đến máy bơm, tuabin, quạt, ..., bởi vì các thiết bị như vậy phá hủy các đường dòng và thực hiện các tương tác năng lượng với các hạt chất lỏng. Tuy nhiên, phương trình Bernoulli vẫn có thể được áp dụng cho một phần dòng chảy trước hoặc sau một thiết bị. Trong trường hợp này, hằng số của phương trình Bernoulli thay đổi từ thượng nguồn đến hạ nguồn của thiết bị.

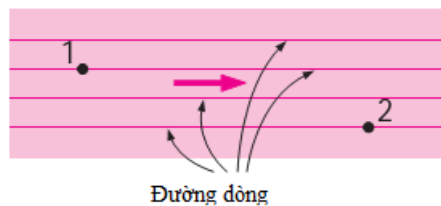
4. *Dòng chảy không nén được*: Một trong những giả thiết được sử dụng để thu nhận phương trình Bernoulli là mật độ chất lỏng là hằng số, do đó dòng chảy là không nén được. Điều kiện này hoàn toàn được thỏa mãn đối với chất lỏng và chất khí ở tốc độ số Mach nhỏ hơn 0.3. Tuy nhiên cần lưu ý rằng có một số dạng phương trình Bernoulli cho dòng chảy nén được [ví dụ phương trình (4.40)], tuy nhiên các dạng này ít được sử dụng.



Hình 4.31 Một số ví dụ về miền dòng chảy không phù hợp cho việc áp dụng phương trình Bernoulli

5. Không có trao đổi nhiệt: Mật độ của một chất khí tỉ lệ nghịch với nhiệt độ và do đó phương trình Bernoulli không nên được sử dụng cho các dòng chảy có thay đổi nhiệt độ lớn như phần dòng chảy được sưởi ấm hoặc làm mát.

6. Dòng chảy dọc theo một đường dòng: Nói đúng ra, phương trình Bernoulli $P/\rho + V^2/2 + gz=C$ được áp dụng trên một đường dòng, giá trị hằng số C, nói chung, là khác nhau cho các đường dòng khác nhau. Tuy nhiên, có thể chứng minh rằng đối với dòng chảy không xoáy, hằng số C là không đổi trong toàn miền dòng chảy (Hình 4.32). Do đó, chúng ta có thể áp dụng phương trình Bernoulli giữa hai điểm bất kỳ trong khu vực không xoáy của dòng chảy.



$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

Hình 4.32 Đối với dòng không xoáy, phương trình Bernoulli có thể áp dụng cho hai điểm bất kỳ trong miền dòng chảy

4.4.5. Đường Đo áp và Đường Năng

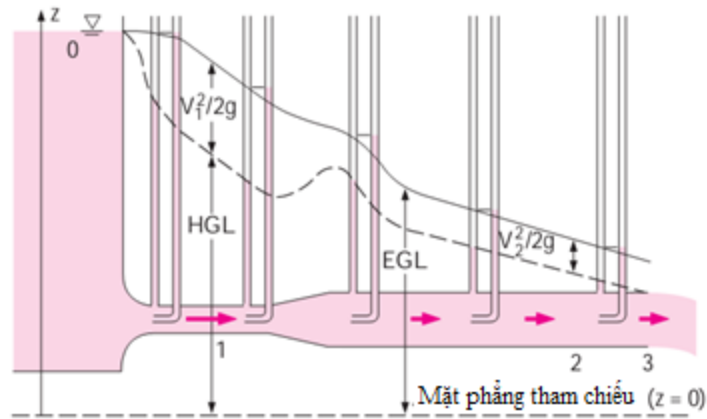
Để thuận tiện, có thể biểu diễn các mức năng lượng cơ học bằng đồ họa trực quan sử dụng các *cột cao năng lượng* của các số hạng khác nhau của phương trình Bernoulli. Điều này được thực hiện bằng cách chia từng số hạng của phương trình Bernoulli cho gia tốc g để nhận được:

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = H = \text{constant} \quad (\text{dọc theo đường dòng}) \quad (4.48)$$

Mỗi số hạng trong phương trình này đều có thứ nguyên là chiều dài và đại diện cho một số loại "cột cao" năng lượng của dòng chảy chất lỏng.

- $P/\rho g$ là *cột cao áp suất* (pressure head), đại diện cho chiều cao của một cột chất lỏng tạo ra áp suất tĩnh P.
- $V^2/2g$ là *cột cao vận tốc* (velocity head), đại diện cho độ cao cần thiết cho một hạt chất lỏng đạt vận tốc V trong khi rơi tự do không ma sát.
- z là *cột cao cao độ* (elevation head), đại diện cho thế năng chất lỏng.

Cột cao H được gọi là *cột cao toàn phần* (total head) của dòng chảy. Do đó, phương trình Bernoulli có thể được phát biểu theo các *cột cao* như sau: Tổng cột cao áp suất, vận tốc và cao độ trên một đường dòng là không đổi trong dòng chảy ổn định khi hiệu ứng nén và ma sát là không đáng kể.



Hình 4.34 Đường Đo áp và Đường năng trong ống dẫn từ bồn chứa

Nếu ống piezometer (đo áp suất tĩnh) được gắn vào một đường ống, như trên Hình 4.34, chất lỏng sẽ dâng lên đến độ cao $P/\rho g$ phía trên đường trung tâm của ống. Đường mức thủy lực (HGL- Hydraulic Grade Line) còn gọi là *đường đo áp* [9] nhận được bằng cách nối một số điểm dọc theo đường ống qua các cột cao chất lỏng trong những ống áp suất tĩnh. Khoảng cách thẳng đứng dọc theo trục ống là thước đo của áp suất tĩnh trong đường ống. Tương tự như vậy, nếu một ống Pitot (đo áp suất tĩnh + áp suất động lực) được gắn vào thành một đường ống, chất lỏng sẽ dâng lên đến một độ cao $P/\rho g + V^2/2g$ trên đường trục của ống, hoặc một khoảng cách $V^2/2g$ trên HGL. Đường mức năng lượng (EGL- Energy Grade Line) còn gọi là *đường năng* [9] nhận được bằng cách nối một số điểm dọc theo đường ống từ những cột cao chất lỏng trong những ống Pito.

Các đường HGL và EGL có thể được định nghĩa như sau: đường cong biểu diễn tổng độ cao áp suất tĩnh và độ cao cao độ, $P/\rho g + z$, được gọi là *Đường mức Thủy lực (đường Đo áp)*; đường cong biểu diễn độ cao toàn phần năng lượng của chất lỏng, $P/\rho g + V^2/2g + z$, được gọi là *Đường mức Năng lượng (Đường Năng)*. Sự khác biệt giữa các đường EGL và HGL là cột cao động năng, $V^2/2g$.

Bây giờ chúng ta xem xét Hình 4.34 kỹ hơn. Tại vị trí 0 (trên bề mặt bể chứa chất lỏng), EGL và HGL trùng với bề mặt chất lỏng vì không có dòng chảy ở đó. HGL giảm nhanh khi chất lỏng tăng tốc vào đường ống. Tuy nhiên, EGL giảm rất chậm qua cửa ống đã được làm tròn. EGL tiếp tục giảm theo hướng dòng chảy do tổn thất ma sát và tổn thất này là không thể đảo ngược trong dòng chảy (quá trình không thuận nghịch). EGL không thể tăng theo hướng dòng chảy trừ khi năng lượng được cung cấp cho chất lỏng. HGL có thể tăng hay giảm theo hướng dòng chảy, nhưng không bao giờ có thể vượt quá EGL. HGL tăng lên ở phần ống mở rộng khi vận tốc giảm và áp suất tĩnh được phục hồi phần nào; áp suất toàn phần không tăng và EGL luôn giảm qua phần ống mở rộng. Sự khác biệt giữa EGL và HGL là $V_1^2/2g$ tại điểm 1, và $V_2^2/2g$ tại điểm 2. Bởi vì $V_1 > V_2$ nên sự khác biệt giữa hai đường mức tại điểm 1 lớn hơn tại điểm 2. Độ dốc của cả hai đường mức EGL và HGL lớn hơn cho các đoạn ống có đường kính nhỏ hơn vì tại đây hiệu ứng ma sát lớn hơn. Cuối cùng, HGL trùng với bề mặt chất lỏng tại cửa ra bởi vì áp suất

tại đây là áp suất khí quyển. Tuy nhiên, EGL vẫn cao hơn HGL một đại lượng $V^2/2g$ bởi vì $V_3=V_2$ tại cửa ra.

Cần lưu ý về các đường HGL và EGL như sau:

- Các đường EGL luôn ở trên các đường HGL một khoảng cách là $V^2/2g$. Hai đường này đến gần nhau khi vận tốc giảm đi và xa nhau ra khi vận tốc tăng. Chiều cao của HGL giảm khi vận tốc tăng, và ngược lại.

- Trong một dòng chảy Bernoulli lý tưởng, EGL là nằm ngang có chiều cao không đổi. Tương tự đối với HGL khi vận tốc dòng chảy là không đổi (Hình 4.35).

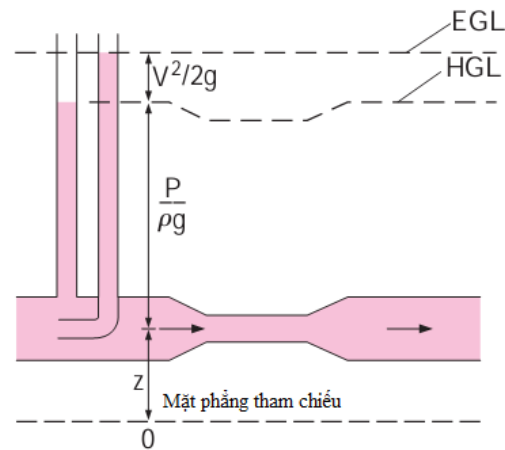
- Đối với dòng chảy kênh hở, HGL trùng với bề mặt tự do của chất lỏng và EGL ở trên bề mặt tự do một khoảng cách là $V^2/2g$.

- Tại một cửa ra của đường ống, cột cao áp suất là bằng 0 (bằng áp suất khí quyển) và do đó HGL trùng với cửa ra của ống (vị trí 3 trên Hình 4.34).

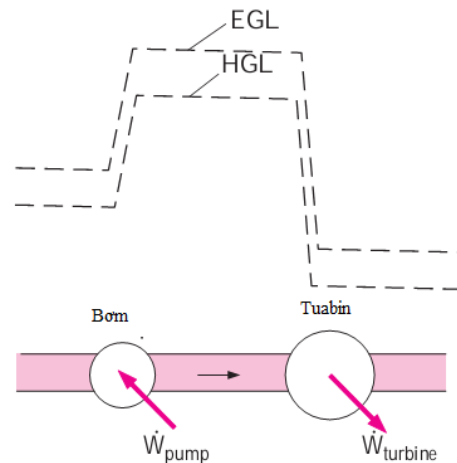
- Các tổn thất năng lượng cơ học do hiệu ứng ma sát (chuyển đổi thành năng lượng nhiệt) làm cho các đường EGL và HGL thấp dần theo hướng dòng chảy. Độ dốc là thước đo của tổn thất cột áp trong đường ống. Một số bộ phận trong đường ống có thể tạo ra các hiệu ứng ma sát đáng kể như thiết bị van có thể gây ra sự giảm đột ngột cho cả EGL và HGL.

- Một sự gia tăng đột ngột xảy ra cho EGL và HGL khi cơ năng được thêm vào chất lỏng (ví dụ bằng một máy bơm). Tương tự, sự giảm mạnh xảy ra cho EGL và HGL khi cơ năng được lấy đi từ chất lỏng (ví dụ bằng tuabin), như thể hiện trong Hình 4.36.

- Áp suất dư của chất lỏng là bằng 0

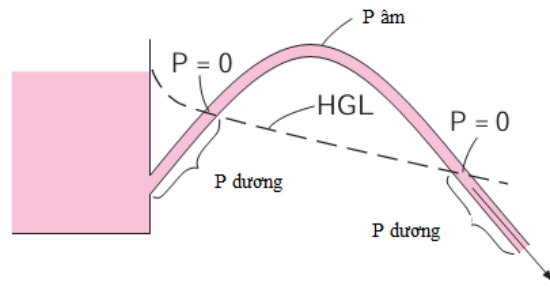


Hình 4.35 Các đường HGL và EGL trong dòng chảy lý tưởng



Hình 4.36 Sự gia tăng và giảm đột ngột của EGL và HGL khi công cơ học được thêm vào hay lấy đi từ dòng chảy

tại giao điểm giữa HGL và đường ống. Áp suất dư trong phần dòng chảy nằm phía trên HGL là có giá trị âm và áp suất trong phần nằm dưới HGL là dương (Hình 4.37). Do đó, một bản vẽ chính xác của hệ thống đường ống và đường HGL có thể được sử dụng để xác định các khu vực nơi mà áp suất trong đường ống là âm (dưới áp suất khí quyển).



Hình 4.37 Trường hợp áp suất dư có giá trị âm trong đường ống

4.5. Ứng dụng phương trình Bernoulli

Trong phần 4. 4, chúng ta đã thảo luận về các khía cạnh cơ bản của phương trình Bernoulli. Trong phần này, chúng ta sẽ trình bày các ứng dụng khác nhau của phương trình Bernoulli thông qua các ví dụ.

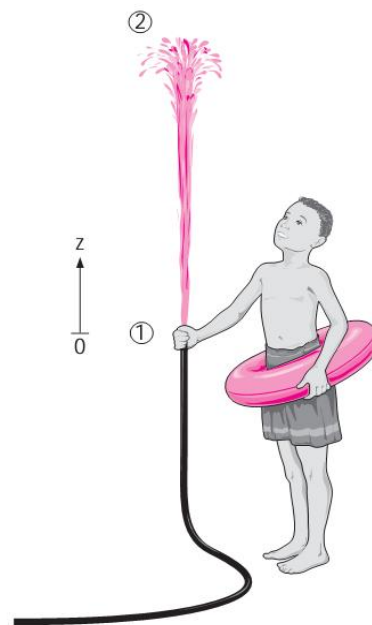
4.5.1. Ví dụ 4.5: Vòi phun vào không khí

Nước chảy ra từ một ống gắn liền với một bể chứa nước có áp suất dư 400 kPa (Hình 4.38). Một đứa trẻ đặt ngón tay bịt vào đầu vòi tạo ra một tia nước mạnh có vận tốc lớn. Nếu vòi được hướng thẳng đứng, tính chiều cao tối đa mà tia nước đạt được?

Vấn đề: Nước phun theo hướng thẳng đứng vào không khí từ một vòi phun gắn với bể chứa áp lực. Xác định chiều cao tối đa của tia nước.

Giả thiết: (1) Dòng chảy vào không khí là ổn định, không nén được và không xoáy (để phương trình Bernoulli được áp dụng); (2) Áp suất nước trong ống gần cửa ra bằng với áp suất trong bể; (3) Hiệu ứng sức căng bề mặt là không đáng kể; (4) Ma sát giữa nước và không khí là có thể bỏ qua; (5) Bỏ qua tất cả các tổn thất khác.

Tính chất: Lấy mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .



Hình 4.38 Sơ đồ cho ví dụ 4. 5

Phân tích: Vấn đề này liên quan đến việc chuyển đổi năng lượng dòng chảy, động năng và thế năng mà không cần đến các thiết bị như máy bơm, tua bin và không có tổn thất năng lượng lớn do ma sát, do đó phù hợp cho việc sử dụng phương

trình Bernoulli. Chiều cao nước sẽ là tối đa với các giả thiết đã nêu trên. Vận tốc chất lỏng trong ống là tương đối thấp ($V_1 \cong 0$) vì miệng ống bị bịt chỉ để hở một lỗ nhỏ. Chúng ta lấy độ cao miệng ống là mức tham chiếu ($z_1 = 0$). Ở phía trên của tia nước $V_2 = 0$ và áp suất bằng áp suất khí quyển. Phương trình Bernoulli được đơn giản hoá như sau:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow \frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_2$$

Rút ra z_2 và thế giá trị số, ta nhận được:

$$z_2 = \frac{P_1 - P_{atm}}{\rho g} = \frac{P_{1,gage}}{\rho g} = \frac{400 \text{ kPa}}{\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} \left(\frac{1000 \text{ N}}{\text{m}^2}\right) \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{1 \text{ N}}\right) = 40.8 \text{ m}$$

Vậy, trong trường hợp này tia nước có thể dâng cao 40.8 m vào không khí.

Thảo luận: Kết quả thu được bằng cách áp dụng phương trình Bernoulli với các giả thiết đã nêu. Điều đó cho chúng ta biết rằng nước không thể dâng cao hơn 40.8 m, và trong mọi trường hợp, sự dâng cao sẽ nhỏ hơn 40.8 m do những tổn thất mà chúng ta đã bỏ qua.

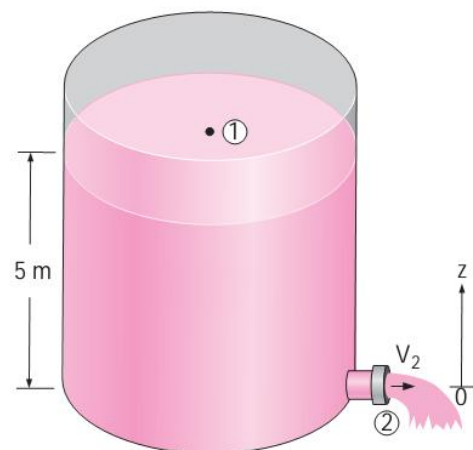
4.5.2. Ví dụ 4.6: Nước chảy qua vòi từ một bể chứa lớn

Một bể chứa lớn thông với khí quyển, chứa nước lên độ cao 5 m tính từ độ cao của vòi xả (Hình 4.39). Vòi nước ở gần đáy bể đang mở để nước chảy ra qua miệng ống tròn và tròn. Xác định vận tốc nước tại cửa ra.

Vấn đề: Một vòi nước gần đáy bể chứa nước được mở ra. Xác định vận tốc nước chảy ra tại miệng vòi.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là không nén được và không xoáy; (2) Dòng chảy đủ nhỏ để có thể được giả thiết là ổn định.

Phân tích: Vấn đề này liên quan đến việc chuyển đổi năng lượng dòng chảy, động năng và thế năng mà không cần đến các thiết bị như máy bơm, tuabin và không có tổn thất năng lượng lớn do ma sát, do đó phù hợp cho việc sử dụng phương trình



Hình 4.39 Sơ đồ cho ví dụ 4. 6

Bernoulli. Chúng ta lấy điểm 1 tại bề mặt tự do của nước sao cho $P_1 = P_{atm}$ (bình mở ra khí quyển), $V_1 \cong 0$ (vì bể chứa là rất lớn so với cửa ra), và $z_1 = 5 \text{ m}$ và $z_2 = 0$ (lấy mức tham chiếu là đường trung tâm của vòi). Ngoài ra, $P_2 = P_{atm}$ (nước xả ra khí quyển).

Từ đó, phương trình Bernoulli được đơn giản hoá như sau:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow z_1 = \frac{V_2^2}{2g}$$

Giải cho V_2 và thay giá trị số, ta nhận được:

$$V_2 = \sqrt{2gz_1} = \sqrt{2(9.81 \frac{m}{s^2})(5m)} = 9.9 \text{ m/s}$$

Công thức $V = \sqrt{2gz}$ được gọi là phương trình Toricelli.

Vậy, nước chảy ra khỏi bể với vận tốc ban đầu là 9.9 m/s. Đây là tốc độ tương tự mà một vật rắn được thả xuống từ một khoảng cách 5 m trong trường hợp không có ma sát không khí.

Thảo luận: Nếu lỗ vòi không được làm tròn và không tròn, khi đó dòng chảy có thể bị tác động bởi ma sát và xáo trộn dòng chảy và vận tốc sẽ nhỏ hơn 9.9 m/s. Cần lưu ý khi áp dụng phương trình Bernoulli trong trường hợp đường ống mở rộng hoặc thu hẹp đột ngột bởi vì khi đó tổn thất do ma sát và xáo trộn dòng chảy có thể là đáng kể.

4.5.3. Ví dụ 4.8: Đo vận tốc dòng chảy bằng ống Pitot

Một ống piezometer và một ống Pitot được gắn vào thành một ống nước nằm ngang, như trên Hình 4.41 để đo áp suất tĩnh và áp suất điểm dừng (áp suất tĩnh+áp suất động lực). Với các chiều cao cột nước đã cho, xác định vận tốc tại trục của đường ống.

Vấn đề: Áp suất tĩnh và áp suất điểm dừng trong ống nằm ngang đã được đo. Xác định vận tốc chất lỏng tại trung tâm của đường ống.

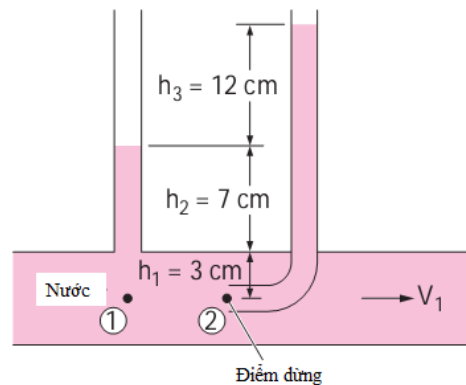
Giả thiết:(1)Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) điểm 1 và 2 là đủ gần với nhau để tổn thất năng lượng giữa hai điểm này là không đáng kể (do đó chúng ta có thể sử dụng phương trình Bernoulli).

Phân tích: Chúng ta lấy các điểm 1 và 2 dọc theo trục của đường ống, với điểm 1 ở ngay dưới ống piezometer và điểm 2 ở đầu mũi của ống Pitot. Áp suất dư tại điểm 1 và 2 được xác định như sau:

$$P_1 = \rho g(h_1 + h_2)$$

$$P_2 = \rho g(h_1 + h_2 + h_3)$$

Điểm 2 là một điểm dừng, do đó $V_2= 0$, ngoài ra $z_1= z_2$, áp dụng phương trình Bernoulli giữa điểm 1 và 2 cho:



Hình 4.40 Sơ đồ cho ví dụ 4.8

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g}$$

Thay thế các biểu thức của P_1 và P_2 vào phương trình, ta nhận được:

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} = \frac{\rho g(h_1 + h_2 + h_3) - \rho g(h_1 + h_2)}{\rho g} = h_3$$

Giải cho V_1 và thay các giá trị số, ta có:

$$V_1 = \sqrt{2gh_3} = \sqrt{2(9.81 \frac{m}{s^2})(0.12 m)} = 1.53 m/s$$

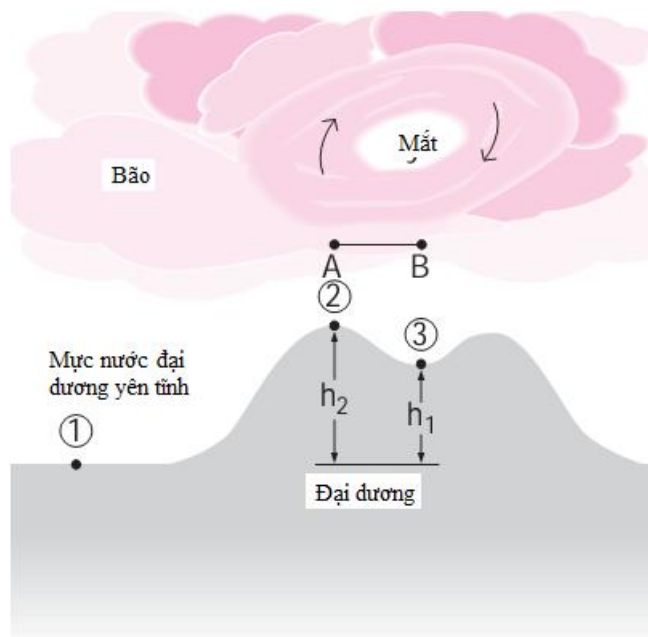
Thảo luận: Lưu ý rằng để xác định vận tốc dòng chảy, chúng ta chỉ cần biết chiều cao dư ra của cột chất lỏng trong ống Pitot (phần cao hơn so với trong ống piezometer).

4.5.4. Ví dụ 4.9: Nước dâng trên biển do bão

Bão nhiệt đới được hình thành trên đại dương do áp suất khí quyển thấp. Khi bão đến gần đất liền, thường kèm theo những cơn sóng đại dương với mực nước biển dâng cao. Một cơn bão cấp 5 là khi gió vượt quá 155 mph (cấp 5 ở Mỹ), tuy nhiên vận tốc gió tại các trung tâm "mắt" bão lại rất thấp. Hình 4.42 mô tả một cơn bão lơ lửng trên đại dương và những cơn sóng ở dưới. Áp suất khí quyển ở khoảng cách 200 dặm từ mắt bão là 30.0 in Hg (tại điểm 1, là điều kiện bình thường trên bề mặt các đại dương) và ở đây gió là bình thường. Áp suất không khí tại mắt bão là 22.0 in Hg. Ước tính độ cao cồn sóng đại dương ở (a) mắt bão tại điểm 3 và (b) tại điểm 2 với vận tốc gió là 155 mph. Lấy mật độ của nước biển và thủy ngân là 64 lbm/ft³ và 848 lbm/ft³, tương ứng, mật độ không khí ở áp suất khí quyển và nhiệt độ trên mặt biển trong điều kiện bình thường là 0.076 lbm/ft³.

Vấn đề: Một cơn bão đang di chuyển trên đại dương. Xác định độ cao cồn sóng đại dương ở mắt bão và ở các khu vực hoạt động của cơn bão.

Giả thiết: (1) Dòng chảy không khí trong bão là ổn định, không nén được và không xoáy (để phương trình Bernoulli được áp dụng). (Điều này chắc chắn là một giả thiết có vấn đề bởi vì trong bão có các chuyển động xoáy rất hỗn loạn); (2) Ảnh hưởng của hiện tượng nước kéo theo vào không khí là không



Hình 4.42 Sơ đồ cho ví dụ 4.9

đáng kể.

Tính chất: Mật độ của không khí, nước biển và thủy ngân ở điều kiện bình thường được cho là 0.076 lbm/ft^3 , 64 lbm/ft^3 và 848 lbm/ft^3 , tương ứng.

Phân tích: (a) Áp suất khí quyển trên mặt nước giảm làm bề mặt nước dâng cao. Vì vậy, áp suất giảm tại điểm 2 so với điểm 1 làm cho nước biển dâng tại điểm 2. Tương tự đối với điểm 3, nơi mà tốc độ không khí là không đáng kể. Chênh lệch áp suất theo chiều cao cột thủy ngân có thể được biểu diễn theo chiều cao cột nước biển như sau:

$$\Delta P = (\rho g h)_{Hg} = (\rho g h)_{SW} \rightarrow h_{SW} = \frac{\rho_{Hg}}{\rho_{SW}} h_{Hg}$$

Vì vậy chênh lệch áp suất giữa các điểm 1 và 3 biểu diễn theo chiều cao cột nước biển là:

$$h_1 = \frac{\rho_{Hg}}{\rho_{SW}} h_{Hg} = \left(\frac{848 \text{ lbm/ft}^3}{64 \text{ lbm/ft}^3} \right) [(30 - 20) \text{ in Hg}] \left(\frac{1 \text{ ft}}{12 \text{ in}} \right) = 8.83 \text{ ft}$$

Độ cao này tương đương với cột nước dâng ở mắt bão vì vận tốc gió ở đây là không đáng kể và không có các hiệu ứng động lực.

(b) Để xác định nước dâng bổ sung tại điểm 2 do có gió lớn tại điểm này, chúng ta viết phương trình Bernoulli giữa các điểm A và B, là các điểm phía trên của các điểm 2 và 3, tương ứng. Ghi nhận rằng $V_B \cong 0$ (vùng mắt của cơn bão là tương đối tĩnh) và $z_A = z_B$, phương trình Bernoulli được đơn giản hoá như sau:

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + z_A = \frac{P_B}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2g} + z_B \rightarrow \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B - P_A}{\rho g}$$

Thay giá trị số vào phương trình, ta nhận được:

$$\frac{P_B - P_A}{\rho g} = \frac{V_A^2}{2g} = \frac{(155 \text{ mph})^2}{2(32.2 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2})} \left(\frac{1.4667 \text{ ft/s}}{(1 \text{ mph})} \right)^2 = 803 \text{ ft}$$

trong đó ρ là mật độ của không khí trong bão. Cần lưu ý rằng mật độ của khí lý tưởng ở nhiệt độ không đổi là tỷ lệ thuận với áp suất tuyệt đối và mật độ không khí ở áp suất khí quyển bình thường là $14.7 \text{ psia} \cong 30 \text{ in Hg}$ là 0.076 lbm/ft^3 , mật độ không khí trong bão là:

$$\rho_{air} = \frac{P_{air}}{P_{atm \ air}} = \left(\frac{20 \text{ in Hg}}{30 \text{ in Hg}} \right) (0.076 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}) = 0.056 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$$

Sử dụng kết quả ở trên trong phần (a), chiều cao cột nước biển tương đương với 803 ft chiều cao cột không khí là:

$$h_{dynamic} = \frac{\rho_{air}}{\rho_{SW}} h_{air} = \left(\frac{0.056 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}}{64 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}} \right) (803 \text{ ft}) = 0.7 \text{ ft}$$

Do đó, áp suất tại điểm 2 là 0.70 ft cột nước biển thấp hơn so với áp suất tại điểm 3 do vận tốc gió cao gây ra mực nước đại dương tăng thêm 0.70 ft. Vì vậy, tổng nước dâng bão tại điểm 2 là:

$$h_2 = h_1 + h_{dynamic} = 8.83 + 0.70 = 9.53 \text{ ft}$$

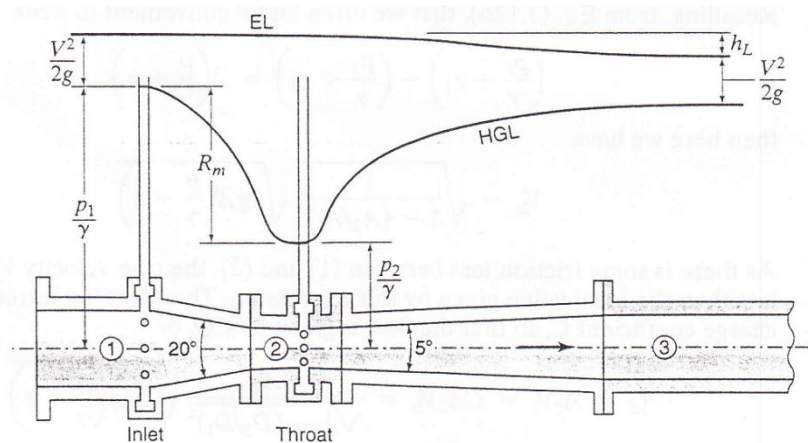
Thảo luận: Vấn đề này liên quan đến dòng chảy rối, các đường dòng bị phá vỡ mạnh, do đó khả năng ứng dụng của phương trình Bernoulli trong phần (b) là có vấn đề. Hơn nữa, dòng chảy trong mắt bão không phải là không xoáy và các hằng số của phương trình Bernoulli sẽ thay theo đường dòng. Áp dụng phương trình Bernoulli có thể được coi như là một hạn chế cho trường hợp đã được lý tưởng hóa. Tuy nhiên kết quả cũng cho thấy rằng sự dâng lên của nước biển do gió, trong trường hợp này không thể cao hơn 0.70 ft.

Sức gió của cơn bão không phải là nguyên nhân duy nhất thiệt hại cho các vùng ven biển. Ngập lụt và xói lở từ nước dâng cũng là vấn đề rất nghiêm trọng khi sóng cao được tạo ra bởi năng lượng bão.

4.5.5. Ống Venturi

Theo định luật Bernoulli, có thể nhận thấy rằng khi chất lỏng chuyển động trong đường ống thu hẹp dần, độ cao áp suất sẽ được biến đổi thành độ cao vận tốc. Ngược lại, trong ống mở rộng dần độ cao vận tốc sẽ biến đổi thành độ cao áp suất. Hai loại đường ống này được kết hợp sẽ tạo ra ống Venturi, mang tên nhà vật lý học người Ý Giovanni B. Venturi (1746-1822). Ống Venturi được sử dụng để đo lưu lượng dòng chảy.

Hình 4.42 chỉ ra sơ đồ cấu tạo của một ống Venturi.



Hình 4.42 Cấu tạo của ống Venturi

Viết phương trình Bernoulli cho mặt cắt 1 và 2, bỏ qua mọi tổn thất, ta có:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Từ phương trình bảo toàn khối lượng ta có:

$$V_1 = V_2 \frac{A_2}{A_1}$$

Thế vào phương trình Bernouli, vận tốc V_2 (trong trường hợp lý tưởng) được tính theo công thức:

$$V_{2i} = \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \sqrt{2g \left[\left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) \right]}}$$

Để thuận tiện, V_{2i} có thể viết dưới dạng:

$$V_{2i} = \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} \sqrt{2g \Delta \left(\frac{P}{\gamma} + z\right)}}$$

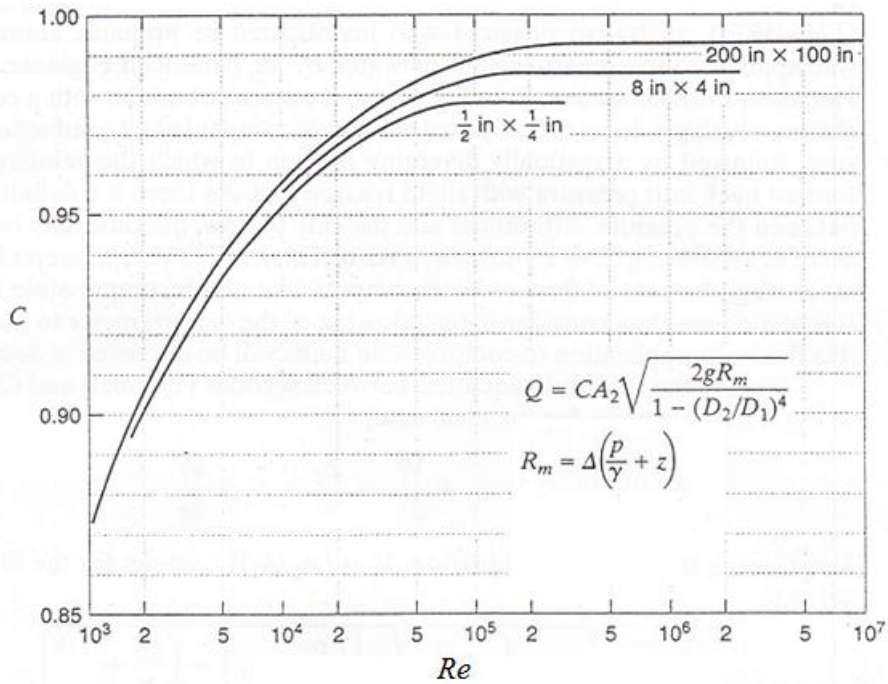
trong đó:

$$\Delta \left(\frac{P}{\gamma} + z\right) = \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) = R_m$$

Trong thực tế, khi có tổn thất ma sát giữa hai mặt cắt 1 và 2, giá trị thực của V_2 sẽ nhỏ hơn một ít. Vì vậy để tính lưu lượng, người ta sử dụng hệ số lưu lượng C , do đó trong thực tế ta có:

$$Q = A_2 V_2 = C A_2 V_{2i} = \frac{C A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^4}} \sqrt{2g \Delta \left(\frac{P}{\gamma} + z\right)} \quad (4.49)$$

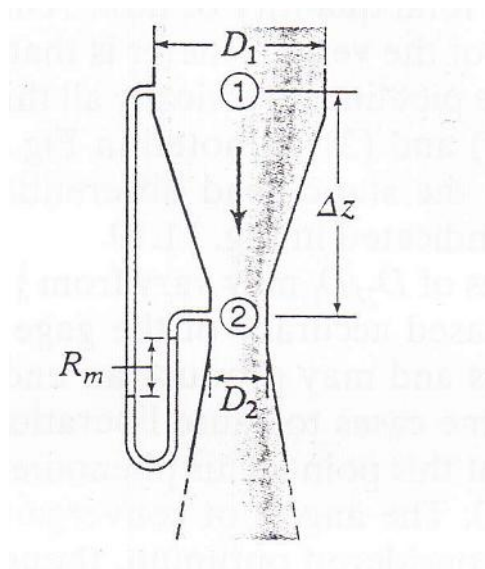
Hệ số lưu lượng C phụ thuộc vào số Reynold và đường kính ống, thường được xác định từ thực nghiệm (Hình 4.42). Trong trường hợp không có chỉ dẫn cụ thể, có thể lấy $C=0.99$ đối với đường ống lớn và 0.97-0.98 đối với đường ống kích thước nhỏ.



Hình 4.42 Hệ số lưu lượng phụ thuộc số $Re = \frac{D_2 V_2 \rho_2}{\mu_2}$ và đường kính D_1 và D_2 .

4.5.6. Ví dụ 4.10: Tính lưu lượng qua ống Venturi

Tính lưu lượng nước ở nhiệt độ 20°C chảy qua ống Venturi như chỉ ra trên Hình 4.42. Với $D_1=800$ mm, $D_2=400$ mm, $\Delta z=2.0$ m và $R_m=150$ mm Hg. Biết hệ số lưu lượng $C=0.988$.



Hình 4.42 Sơ đồ cho ví dụ 4.10

Vấn đề: Tính lưu lượng qua ống Venturi khi biết số đo của áp kế ống.

Tính chất: Tỷ trọng riêng của thủy ngân ở 20°C là $SG_{Hg}=13.55$.

Phân tích: Trong trường hợp này ta có:

$$\Delta \left(\frac{P}{\gamma} + z \right) = \left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2 \right) = R_m \left(\frac{SG_H g}{SG_{H2O}} - 1 \right)$$

Áp dụng công thức tính lưu lượng:

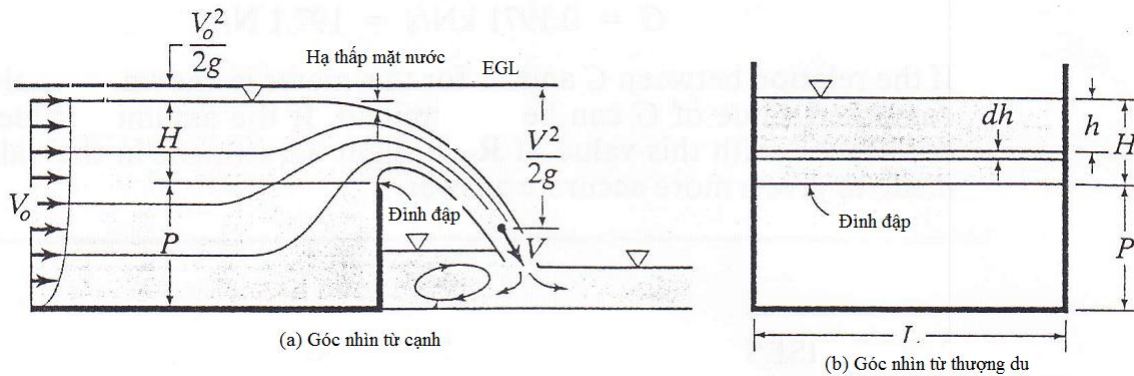
$$Q = \frac{CA_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}} \sqrt{2g\Delta \left(\frac{P}{\gamma} + z \right)}$$

Thay số vào ta nhận được:

$$Q = \frac{0.988\pi \left(\frac{0.4}{2} \right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{400}{800} \right)^4}} \sqrt{2(9.81)0.15 \left(\frac{13.55}{1} - 1 \right)} = 0.779 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.5.7. Dòng chảy qua đập tràn hình chữ nhật

Xem xét đập tràn hình chữ nhật như trình bày trên Hình 4.44. Khi nước chảy qua đập tràn, mặt nước trong kênh dẫn hạ thấp dần do vận tốc dòng chảy tăng lên. Chúng ta sẽ xác định lưu lượng chảy qua đập tràn dựa trên độ cao H tính từ đỉnh đập đến mặt thoáng được đo khoảng cách khoảng 4 lần độ sâu mực nước trên mặt đập. Độ sâu hạ thấp mặt nước trên mặt đập thường có giá trị $0.15H$.



Hình 4.44 Dòng chảy qua đập hình chữ nhật

Để thu nhận phương trình lưu lượng chảy tràn qua đập hình chữ nhật có bề rộng L , chúng ta xem xét phần tử diện tích $dA=Ldh$ trong mặt phẳng thẳng đứng trên đỉnh đập (Hình 4.44b). Dòng chảy qua phần tử này có thể coi như dòng chảy qua vòi nhỏ, trong trường hợp lý tưởng, vận tốc được tính bằng $\sqrt{2gh}$. Vì vậy lưu lượng qua phần tử này được xác định như sau:

$$dQ_i = Ldh\sqrt{2gh} = L\sqrt{2g}h^{1/2}dh$$

Lấy tích phân từ 0 đến H , chúng ta thu nhận được lưu lượng lý tưởng chảy qua đập tràn hình chữ nhật:

$$Q_i = \sqrt{2g}L \int_0^H h^{1/2}dh = \frac{2}{3}\sqrt{2g}LH^{3/2}$$

Trong thực tế, lưu lượng qua đập tràn nhỏ hơn lưu lượng lý tưởng do tổn thất ma sát và diện tích chảy bị thu hẹp. Các hiệu ứng này được xác định từ thực nghiệm thông qua hệ số lưu lượng C_d , vì vậy:

$$Q = C_d \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{3/2}$$

Hệ số C_d cho các đập mỏng mép nhọn thường dao động từ 0.62 cho $H/P=0.1$ và 0.75 cho $H/P=2.0$.

4.5.8. Dòng chảy qua đập tràn hình chữ V

Xem xét đập hình chữ V với góc mở θ như trình bày trên Hình 4.45. Vận tốc dòng chảy lý tưởng qua phần tử diện tích có chiều cao dh sẽ là $\sqrt{2gh}$. Phần tử diện tích dA được xác định như sau:

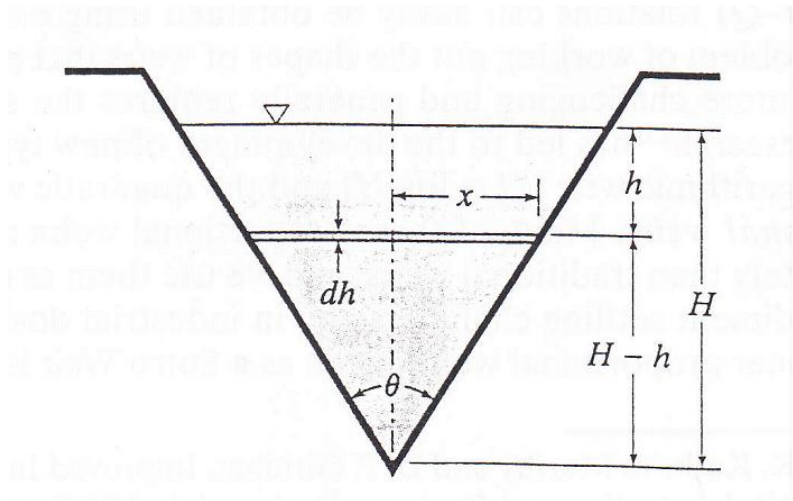
$$dA = 2xdh$$

Mặt khác ta có:

$$\frac{x}{H-h} = \tan \frac{\theta}{2}$$

Do đó

$$dA = 2(H-h) \tan \frac{\theta}{2} dh$$

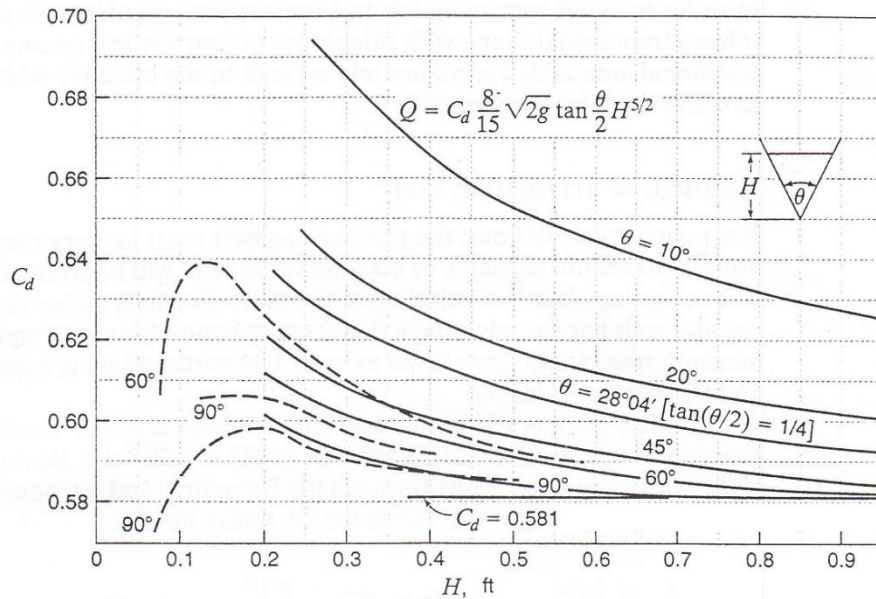


Hình 4.45 Đập hình chữ V

Vậy lưu lượng thực tế chảy qua đập hình chữ V được xác định như sau:

$$Q = C_d 2\sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \int_0^H (H-h)h^{1/2} dh = C_d \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} H^{5/2}$$

Hệ số C_d cho đập hình chữ V được xác định bằng thực nghiệm phụ thuộc vào góc mở θ và độ cao H . Hình 4.45 trình bày một số kết quả thực nghiệm. Có thể nhận thấy, khi độ cao H nhỏ, giá trị C_d biến đổi bất thường do những thay đổi về hình học dòng chảy và hiệu ứng ma sát.

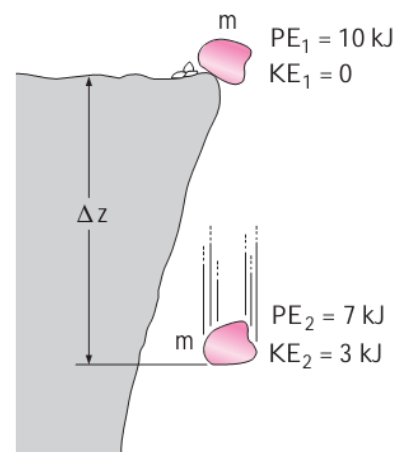


Hình 4.45 Một số kết quả thực nghiệm xác định hệ số lưu lượng cho đập tràn hình chữ V.

4.6. Phương trình năng lượng tổng quát

Một trong những quy luật cơ bản nhất trong tự nhiên là định luật thứ nhất của nhiệt động lực học, còn được gọi là nguyên lý bảo toàn năng lượng. Nguyên lý này cung cấp một nền tảng vững chắc cho việc nghiên cứu mối quan hệ và sự tương tác giữa các dạng năng lượng khác nhau. Nguyên lý này cho rằng năng lượng không thể tự tạo ra và cũng không tự mất đi trong một quá trình mà chỉ có thể chuyển đổi từ dạng này sang dạng khác. Vì vậy, tất cả các “mảnh nhỏ” của năng lượng phải được tính đến trong suốt một quá trình.

Ví dụ, một tảng đá rơi xuống từ một vách núi, tốc độ của tảng đá tăng dần là kết quả của thế năng được chuyển đổi thành động năng (Hình 4.43). Các số liệu thực nghiệm cho thấy rằng mức giảm thế năng bằng mức tăng động năng khi sức cản không khí là không đáng kể, do đó nguyên lý bảo toàn năng lượng được xác nhận. Trong đời thường, nguyên lý bảo toàn năng lượng cũng là nguyên tắc chính trong chế độ ăn kiêng: một người có một năng lượng đầu vào (khẩu phần ăn) lớn hơn so với năng lượng tiêu thụ (lao động, tập thể dục...) sẽ tăng cân (do năng lượng thừa sẽ được lưu trữ trong cơ thể dưới dạng mỡ)

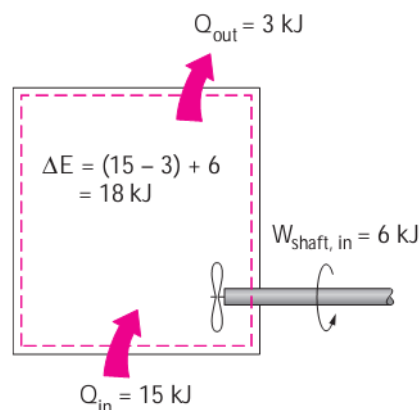


Hình 4.43 Ví dụ minh họa nguyên lý bảo toàn năng lượng

và một người có một năng lượng đầu vào nhỏ hơn so với năng lượng tiêu thụ thì sẽ giảm cân. Sự thay đổi năng lượng của hệ thống phải bằng với chênh lệch giữa năng lượng đầu vào và năng lượng đầu ra, vì vậy nguyên lý bảo toàn năng lượng cho hệ thống bất kỳ có thể được thể hiện đơn giản như sau:

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E$$

Đối với một hệ thống, việc chuyển giao một đại lượng bất kỳ (như là khối lượng, động lượng và năng lượng) được ghi nhận nhận tại mặt biên như là *thông lượng* của đại lượng đó đi qua mặt biên. Một thông lượng được cho là nhập vào một hệ thống nếu nó vượt qua biên từ bên ngoài vào bên trong và thoát khỏi hệ thống nếu nó di chuyển theo hướng ngược lại. Một thông lượng di chuyển từ nơi này đến nơi khác trong phạm vi hệ thống không được xem như một thông lượng chuyển giao vì nó không đi vào hoặc thoát ra khỏi hệ thống. Do đó, điều quan trọng là phải xác định hệ thống một cách rõ ràng, có nghĩa là xác định rõ các mặt biên của nó trước khi các phân tích kỹ thuật được thực hiện.



Hình 4.44 Minh họa trao đổi năng lượng của một hệ thống

Năng lượng của một khối lượng vật chất cố định (một hệ thống khép kín) có thể được thay đổi bằng hai cơ chế: chuyển giao nhiệt Q và chuyển giao công W . Vì vậy, nguyên lý bảo toàn năng lượng cho một khối lượng vật chất cố định có thể được biểu diễn dưới dạng tốc độ chuyển giao như sau (Hình 4.44):

$$\dot{Q}_{net \text{ in}} + \dot{W}_{net \text{ in}} = \frac{dE_{sys}}{dt} \quad \text{hoặc} \quad \dot{Q}_{net \text{ in}} + \dot{W}_{net \text{ in}} = \frac{d}{dt} \int_{sys} \rho e \, dV \quad (4.49)$$

ở đây $\dot{Q}_{net \text{ in}} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}$ là tốc độ ròng truyền nhiệt vào hệ thống (có giá trị âm, nếu ra khỏi hệ thống), $\dot{W}_{net \text{ in}} = \dot{W}_{in} - \dot{W}_{out}$ là năng lượng ròng vào hệ thống ở các dạng khác nhau (có giá trị âm, nếu năng lượng ra) và dE_{sys}/dt là tốc độ thay đổi lượng năng toàn phần của hệ thống. Các ký hiệu *chấm trên* là ký hiệu của tốc độ (thay đổi theo thời gian). Đối với hệ thống nén đơn giản, năng lượng toàn phần bao gồm nội năng, động năng và thế năng trên một đơn vị khối lượng, được tính như sau:

$$e = u + ke + pe = u + \frac{v^2}{2} + gz \quad (4.50)$$

Lưu ý rằng năng lượng toàn phần là một tính chất và giá trị của nó không thay đổi trừ phi trạng thái của hệ thống thay đổi.

4.6.1. Chuyển giao năng lượng bằng nhiệt lượng, Q

Trong cuộc sống hàng ngày, chúng ta thường xuyên tiếp xúc với các dạng năng lượng nhận biết được và dạng năng lượng tiềm ẩn (*sensible and latent forms*) của nội năng như là nhiệt lượng và thường nói về nhiệt độ của một vật. Tên khoa học cho các dạng năng lượng này là *nhiệt năng* (thermal energy). Đối với vật chất ở trạng thái đơn pha, sự thay đổi nhiệt năng của một khối lượng cho trước tương ứng với một thay đổi về nhiệt độ, do đó nhiệt độ là một đại diện tốt cho nhiệt năng. Nhiệt năng có xu hướng di chuyển tự nhiên theo hướng nhiệt độ giảm và việc chuyển giao nhiệt năng từ một hệ thống sang một hệ thống khác là kết quả của sự khác biệt về nhiệt độ được gọi là *truyền nhiệt* (heat transfer). Do đó, một sự trao đổi năng lượng là truyền nhiệt chỉ xảy ra khi có sự khác biệt về nhiệt độ. Sự nóng lên của một hộp thức uống ướp lạnh trong một căn phòng là một ví dụ về sự truyền nhiệt (Hình 4.45). Mức độ truyền nhiệt theo thời gian được gọi là tốc độ truyền nhiệt (heat transfer rate) và được ký hiệu là \dot{Q} .

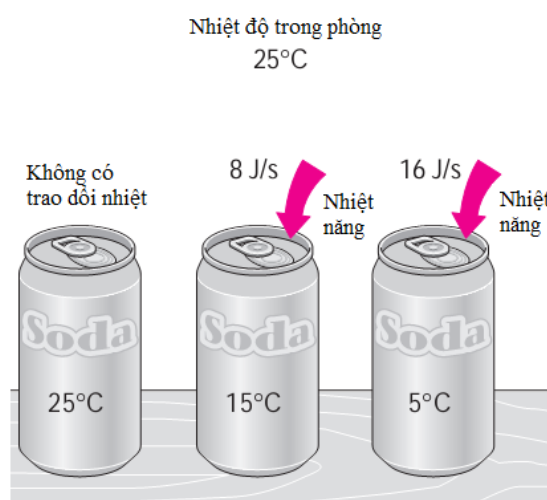
Hướng truyền nhiệt luôn đi từ vật ở nhiệt độ cao hơn đến một vật ở nhiệt độ thấp hơn. Khi cân bằng nhiệt độ được thiết lập, truyền nhiệt dừng lại. Không có truyền nhiệt giữa hai hệ thống (hoặc một hệ thống và môi trường xung quanh) ở cùng một nhiệt độ.

Một quá trình trong đó không có truyền nhiệt được gọi là quá trình đoạn nhiệt. Một quá trình có thể đoạn nhiệt theo hai cách: (1) hệ thống được cách nhiệt tốt, chỉ có một lượng không đáng kể của nhiệt lượng có thể vượt qua mặt biên của hệ thống, hoặc

(2) hệ thống và môi trường xung quanh không có động lực (chênh lệch nhiệt độ) để truyền nhiệt. Không nên nhầm lẫn quá trình đoạn nhiệt với quá trình đẳng nhiệt. Mặc dù không có truyền nhiệt trong một quá trình đoạn nhiệt, nhưng một thành phần năng lượng nào đó và do đó nhiệt độ của một hệ thống vẫn có thể được thay đổi bằng các phương thức khác, ví dụ như chuyển giao công cơ học.

4.6.2. Chuyển giao năng lượng bằng công cơ học, W

Năng lượng là công cơ học nếu liên quan đến lực tác dụng trên một khoảng cách. Ví dụ khi kéo piston lên hay quay một trục quay đều liên quan đến tác động của



Hình 4.45 Chênh lệch nhiệt độ là động lực truyền nhiệt

công cơ học. Tốc độ theo thời gian của việc thực hiện công được gọi là công suất và được kí hiệu là \dot{W} . Động cơ xe, tua bin thủy lực, tua bin hơi và tua bin khí tạo ra công cơ học, trong khi máy nén khí, máy bơm, quạt và máy trộn khuấy thì tiêu thụ công cơ học.

Các thiết bị tiêu thụ công cơ học chuyển giao năng lượng cho chất lỏng, do đó làm tăng năng lượng của chất lỏng. Ví dụ, một quạt máy trong một căn phòng, đẩy không khí và làm tăng động năng của nó. Năng lượng điện tiêu thụ bởi quạt được chuyển đổi sang năng lượng cơ học của động cơ làm cánh quạt quay, sau đó năng lượng cơ học này được truyền cho không khí làm gia tăng tốc độ của không khí. Quá trình truyền năng lượng cho không khí không có gì liên quan đến nhiệt độ, vì vậy có thể nói ở đây không có quá trình truyền nhiệt. Vậy, năng lượng phải được truyền bằng công cơ học. Luồng không khí chuyển động do quạt tạo ra cuối cùng rồi cũng đến một điểm dừng, có nghĩa là năng lượng cơ học của nó đã mất. Đó là kết quả của ma sát giữa các hạt không khí có vận tốc khác nhau. Tuy nhiên, đây không phải là "mất năng lượng" mà chỉ đơn giản là sự chuyển hóa năng lượng cơ học thành nhiệt năng theo nguyên lý bảo toàn năng lượng. Nếu quạt chạy một thời gian dài trong một căn phòng kín, chúng ta có thể cảm nhận được sự tích tụ nhiệt năng khi thấy nhiệt độ không khí tăng lên trong phòng.

Một hệ thống có thể bao gồm nhiều dạng công cơ học khác nhau và tổng số công cơ học được biểu diễn như sau:

$$W_{total} = W_{shaft} + W_{pressure} + W_{viscous} + W_{other} \quad (4.51)$$

ở đây W_{shaft} là công truyền bởi một trục quay, $W_{pressure}$ là công thực hiện bởi các lực áp suất lên các bề mặt, $W_{viscous}$ là công thực hiện bởi các thành phần pháp tuyến và tiếp tuyến của các lực nhớt trên bề mặt và W_{other} là công được thực hiện bởi các lực khác như điện, từ trường, sức căng bề mặt..., thường là không đáng kể và không được xem xét trong giáo trình này.

4.6.3. Công trục quay

Nhiều hệ thống thủy lực liên quan đến các loại máy như máy bơm, tua bin, quạt máy, hoặc máy nén khí có trục quay. Chuyển giao công cơ học liên quan đến các thiết bị như vậy thường được thông qua một trục quay và được gọi đơn giản là công trục quay W_{shaft} . Công suất truyền qua trục quay là tỷ lệ thuận với mô-men xoắn trục quay T_{shaft} và được biểu diễn như sau:

$$\dot{W}_{shaft} = \omega T_{shaft} = 2\pi n \dot{T}_{shaft} \quad (4.52)$$

trong đó ω là tốc độ góc của trục theo rad/s và n là số vòng quay của trục trên đơn vị thời gian, thường được biểu diễn theo vòng/phút ký hiệu là rpm (revolutions per minute).

4.6.4. Công thực hiện bởi các áp lực

Xem xét một chất khí được nén trong thiết bị piston xi-lanh Hình 4.46a. Khi piston di chuyển xuống một khoảng cách vi phân ds dưới tác dụng của áp lực PA , trong đó A là diện tích mặt cắt ngang của piston, công thực hiện trên biên của hệ thống là:

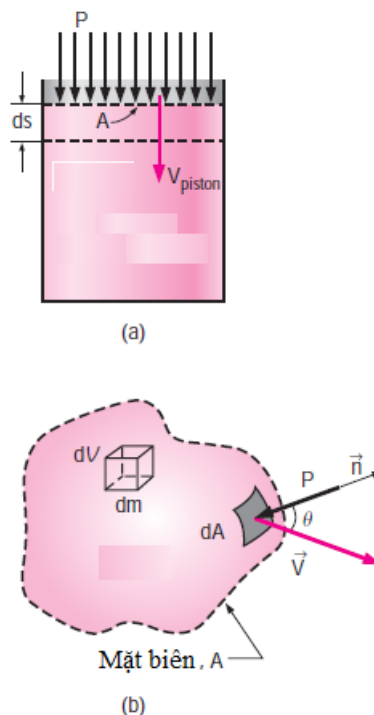
$$dW_{boundary} = PAds$$

Chia cả hai vế của phương trình cho dt , ta nhận được tốc độ thực hiện công trên biên (tức là công suất),

$$\dot{W}_{pressure} = \delta\dot{W}_{boundary} = PA\dot{V}_{piston}$$

ở đây $\dot{V}_{piston} = ds/dt$ là tốc độ của piston, là vận tốc của chuyển động mặt biên trùng với mặt piston.

Bây giờ hãy xem xét một khối vật chất của chất lỏng (một hệ thống) có hình dạng tùy ý di chuyển với dòng chảy và có thể tự do biến dạng dưới tác động của áp lực, như thể hiện trong Hình 4.46b. Áp lực luôn tác dụng hướng vào trong và vuông góc với bề mặt và áp lực tác dụng lên một diện tích vi phân dA là PdA . Tốc độ thực hiện công của áp lực trên dA là:



Hình 4.46 Áp lực tác dụng lên (a) Mặt biên di chuyển của hệ piston-xi lanh; (b) phần tử vi phân dA của khối chất lỏng có hình dạng bất kỳ

$$\delta\dot{W}_{pressure} = -PdAV_n = -PdA(\vec{V} \cdot \vec{n}) \quad (4.53)$$

ở đây thành phần pháp tuyến của vận tốc trên dA là $V_n = V\cos\theta = \vec{V} \cdot \vec{n}$. Lưu ý rằng \vec{n} là véc tơ pháp tuyến đơn vị ngoài của dA , do đó đại lượng $\vec{V} \cdot \vec{n}$ là dương khi thể tích nở rộng ra và âm khi thể tích bị nén lại. Dấu âm trong phương trình (4.53) đảm bảo rằng công được thực hiện bởi các áp lực là dương khi nó được thực hiện lên hệ thống và là âm khi nó được thực hiện bởi hệ thống. Tổng công suất thực hiện bởi các áp lực nhận được bằng cách lấy tích phân $\delta\dot{W}_{pressure}$ trên toàn bộ bề mặt A ,

$$\dot{W}_{pressure, net in} = -\int_A P(\vec{V} \cdot \vec{n})dA = -\int_A \frac{P}{\rho}\rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (4.54)$$

Như vậy, tổng công suất trao đổi có thể biểu diễn dưới dạng:

$$\dot{W}_{net in} = \dot{W}_{shaft,net in} + \dot{W}_{pressure,net in} = \dot{W}_{shaft,net in} - \int_A P(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (4.55)$$

Từ (4.49), nguyên lý bảo toàn năng lượng cho một hệ thống kín có thể viết dưới dạng tốc độ trao đổi như sau:

$$\dot{Q}_{net in} + \dot{W}_{shaft,net in} + \dot{W}_{pressure,net in} = \frac{dE_{sys}}{dt} \quad (4.56)$$

Để nhận được phương trình bảo toàn năng lượng cho một thể tích khối chế, chúng ta sử dụng định lý vận chuyển Reynolds (xem [2] mục 4.5) bằng cách thay B bởi năng lượng toàn phần E , b bằng mật độ năng lượng toàn phần e , với $e = u + k_e + p_e = u + V^2/2 + gz$ (Hình 4.47) để nhận được:

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CS} e \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (4.57)$$

Thay vế trái của phương trình (4.56) vào phương trình (4.57), phương trình năng lượng tổng quát (cho các loại thể tích khối chế: cố định, chuyển động, biến dạng) nhận được có dạng:

$$\dot{Q}_{net in} + \dot{W}_{shaft,net in} + \dot{W}_{pressure,net in} = \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CS} e \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (4.58)$$

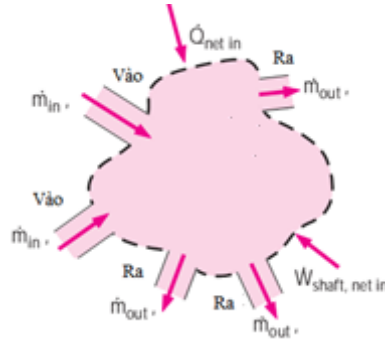
Phương trình này có thể phát biểu như sau: (Tổng nhiệt năng và công cơ học ròng được truyền vào CV) = (Thay đổi năng lượng toàn phần trong CV) + (Tổng dòng năng lượng ròng ra khỏi mặt biên của CV theo khối lượng vật chất), ở đây $\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_{CS}$ là vận tốc chất lỏng so với mặt biên của thể tích khối chế và tích số $\rho \vec{V}_r \cdot \vec{n} dA$ là lưu lượng khối lượng vào hoặc ra qua

Hình 4.47 Phương trình bảo toàn năng lượng thu nhận từ định lý vận chuyển Reynolds

diện tích dA . Nhắc lại rằng \vec{n} là véc tơ pháp tuyến đơn vị ngoài của dA và đại lượng $\vec{V}_r \cdot \vec{n}$ là dương tương ứng với dòng khối lượng ra và âm tương ứng với dòng vào. Thay biểu thức tính công áp suất (4.54) vào (4.58) và sắp xếp lại tích phân bề mặt để nhận được:

$$\dot{Q}_{net in} + \dot{W}_{shaft,net in} = \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CS} \left(\frac{p}{\rho} + e \right) \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (4.60)$$

Phương trình này không phải là dạng thuận tiện cho việc giải quyết các vấn đề kỹ thuật thực tế vì các dấu tích phân và do đó cần được viết lại với các giá trị trung bình của vận tốc và lưu lượng khối lượng trên các cửa vào và ra. Nếu $P/\rho + e$ là gần như hằng số trên bề mặt, chúng ta có thể đưa ra ngoài dấu tích phân. Nhận thấy rằng nếu biết



Hình 4.48 Trong vấn đề kỹ thuật thường gặp, thể tích không chế có thể có nhiều cửa vào và cửa ra

lưu lượng khối lượng tại cửa vào hay cửa ra thì dòng chảy năng lượng thông qua các bề mặt đó có thể được xấp xỉ bằng $\dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + e \right)$. Vì vậy, phương trình năng lượng có thể được viết (Hình 4.48):

$$\dot{Q}_{net in} + \dot{W}_{shaft, net in} = \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \sum_{out} \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + e \right) - \sum_{in} \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + e \right) \quad (4.61)$$

trong đó $e = u + V^2/2 + gz$ là năng lượng toàn phần trên một đơn vị khối lượng. Vì vậy,

$$\begin{aligned} & \dot{Q}_{net in} + \dot{W}_{shaft, net in} \\ &= \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \sum_{out} \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + u + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{in} \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + u + \frac{V^2}{2} + gz \right) \end{aligned} \quad (4.62)$$

Hoặc

$$\dot{Q}_{net in} + \dot{W}_{shaft, net in} = \frac{d}{dt} \int_{CV} e \rho dV + \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (4.63)$$

ở đây định nghĩa enthalpy h đã được sử dụng $h = u + Pv = u + P/\rho$.

Hai phương trình cuối cùng là biểu thức tổng quát của nguyên lý bảo toàn năng lượng, tuy nhiên việc sử dụng còn giới hạn cho thể tích không chế cố định, dòng chảy đều tại các cửa vào ra và bỏ qua hiệu ứng của lực nhớt và một số hiệu ứng khác.

4.7. Phân tích năng lượng đối với dòng chảy dừng

4.7.1. Các thành phần trong phương trình năng lượng tổng quát

Đối với dòng chảy dừng, thay đổi năng lượng trong thể tích không chế cố định, phương trình (4.63) được đơn giản hoá thành:

$$\dot{Q}_{net in} + \dot{W}_{shaft, net in} = \sum_{out} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{in} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (4.64)$$

Có nghĩa rằng tổng năng lượng ròng truyền đến một thể tích không chế bởi nhiệt năng và công cơ học bằng hiệu số năng lượng ra khỏi và vào qua các cửa vào ra theo dòng chảy.

Nhiều vấn đề thực tế chỉ liên quan đến một đầu vào và một đầu ra (Hình 4.49). Khi đó phương trình (4.64) được rút gọn thành:

$$\dot{Q}_{net\ in} + \dot{W}_{shaft,\ net\ in} = \dot{m}[(h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)] \quad (4.65)$$

ở đây chỉ số 1 và 2 tương ứng đầu vào và đầu ra. Phương trình năng lượng cho dòng chảy ổn định trên cơ sở đơn vị khối lượng thu được bằng cách chia (4.65) cho lưu lượng khối lượng \dot{m} ,

$$q_{net\ in} + w_{shaft,\ net\ in} = h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (4.66)$$

ở đây $q_{net\ in} = \dot{Q}_{net\ in}/\dot{m}$ là nhiệt lượng ròng truyền cho chất lỏng trên một đơn vị khối lượng và $w_{shaft,\ net\ in} = \dot{W}_{shaft,\ net\ in}/\dot{m}$ là công trục quay ròng truyền cho chất lỏng trên một đơn vị khối lượng. Sử dụng định nghĩa của enthalpy $h = u + P/\rho$ và sắp xếp lại, phương trình năng lượng dòng chảy ổn định có dạng:

$$w_{shaft,\ net\ in} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + (u_2 - u_1 - q_{net\ in}) \quad (4.67)$$

ở đây u là nội năng, P/ρ là năng lượng dòng chảy, $V^2/2$ là động năng và gz là thế năng của chất lỏng trên một đơn vị khối lượng. Phương trình này có giá trị cho cả dòng chảy nén được và không nén được.

Bên trái của phương trình (4.67) đại diện cho năng lượng cơ học đầu vào, trong khi ba số hạng đầu tiên ở phía bên phải đại diện cho năng lượng cơ học đầu ra. Nếu dòng chảy là lý tưởng không có các tổn thất không thuận nghịch như ma sát, tổng năng lượng cơ học phải được bảo toàn và đại lượng trong ngoặc đơn ($u_2 - u_1 - q_{net\ in}$) phải bằng 0. Từ đó,

$$q_{net\ in} = u_2 - u_1 \quad (4.58)$$

Nếu $u_2 - u_1$ lớn hơn $q_{net\ in}$ thì điều đó có nghĩa là một phần năng lượng cơ học đã chuyển hóa thành nhiệt năng (tổn thất không thuận nghịch), do đó $u_2 - u_1 - q_{net\ in}$ đại diện cho tổn thất năng lượng cơ học. Vậy:

$$e_{mech,\ loss} = u_2 - u_1 - q_{net\ in} \quad (4.59)$$

Đối với một chất đơn pha (chất lỏng hoặc khí), ta có $u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$, trong đó c_v nhiệt dung riêng đẳng tích (constant-volume specific heat) của chất.

Phương trình năng lượng cho dòng chảy ổn định trên cơ sở đơn vị khối lượng có thể viết dưới dạng cân bằng năng lượng như sau:

$$e_{mech,\ in} = e_{mech,\ out} + e_{mech,\ loss} \quad (4.70)$$

Hoặc

$$W_{shaft, net in} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + e_{mech, loss} \quad (4.71)$$

Nhận thấy rằng $W_{shaft, net in} = W_{shaft, in} - W_{shaft, out} = W_{pump} - W_{turbine}$, phương trình cân bằng năng lượng cơ học có thể được viết tường minh hơn:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 + w_{pump} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 + w_{turbine} + e_{mech, loss} \quad (4.72)$$

ở đây w_{pump} là công cơ học đầu vào (do sự hiện diện của một máy bơm, quạt, máy nén khí, vv) và $w_{turbine}$ là công cơ học đầu ra. Khi dòng chảy là không nén được, áp suất tuyệt đối hay áp suất dư đều có thể được sử dụng bởi vì số hạng P_{atm}/ρ sẽ xuất hiện trên cả hai bên và sẽ bị triệt tiêu.

Nhân hai vế phương trình (4.72) với lưu lượng khối lượng \dot{m} , ta nhận được:

$$\dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gZ_1 \right) + \dot{W}_{pump} = \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gZ_2 \right) + \dot{W}_{turbine} + \dot{E}_{mech, loss} \quad (4.73)$$

ở đây \dot{W}_{pump} là công suất trục quay đầu vào qua trục của máy bơm, $\dot{W}_{turbine}$ là công suất trục quay đầu ra qua trục của tuabin và $\dot{E}_{mech, loss}$ là tổng tổn thất năng lượng cơ học, bao gồm tổn thất của bơm và tua bin cũng như những tổn thất ma sát trong hệ thống đường ống. Vậy,

$$\dot{E}_{mech, loss} = \dot{E}_{mech, loss, pump} + \dot{E}_{mech, loss, turbine} + \dot{E}_{mech, loss, piping}$$

Thông thường, tổn thất của bơm và tua bin được xử lý riêng so với tổn thất do các thành phần khác của hệ thống đường ống. Vì vậy, phương trình năng lượng có thể được biểu diễn dưới dạng phổ biến nhất theo các số hạng cột cao như sau (Hình 4.51):

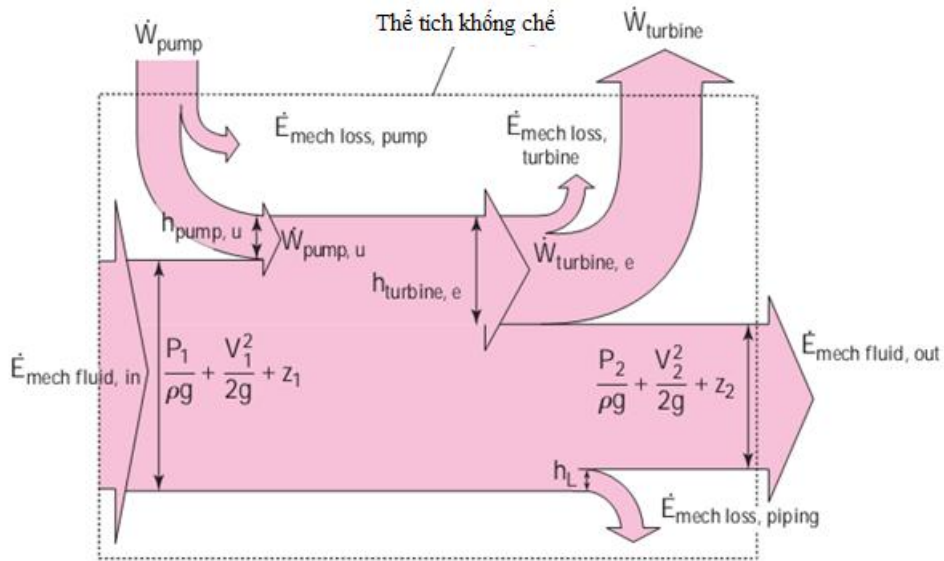
$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{pump, u} = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{turbine, e} + h_L \quad (4.74)$$

ở đây: $h_{pump, u} = \frac{w_{pump, u}}{g} = \frac{W_{pump, u}}{\dot{m}g} = \frac{\eta_{pump} \dot{W}_{pump}}{\dot{m}g}$ là cột cao năng lượng hiệu dụng cung cấp bởi máy bơm;

$h_{turbine, e} = \frac{w_{turbine, e}}{g} = \frac{W_{turbine, e}}{\dot{m}g} = \frac{W_{turbine, e}}{\eta_{turbine} \dot{m}g}$ là cột cao năng lượng chất lỏng cung cấp cho tuabin;

$h_L = \frac{e_{mech, loss, piping}}{g} = \frac{E_{mech, loss, piping}}{\dot{m}g}$ là tổn thất năng lượng dọc theo đường ống, không bao gồm tổn thất do máy bơm và tuabin.

Phương trình (4.74) còn được gọi là phương trình Bernoulli cho chất lỏng thực.



Hình 4.51 Sơ đồ năng lượng trong dòng chảy của hệ thống bao gồm máy bơm và tuabin.

4.7.2. Dòng chảy không nén được, không có thiết bị cơ học và bỏ qua ma sát

Khi tổn thất đường ống là không đáng kể, không có sự mất mát đáng kể năng lượng cơ học thành năng lượng nhiệt, khi đó $h_L = e_{mech\ loss, piping}/g \cong 0$. Ngoài ra, $h_{pump, u} = h_{turbine, e} = 0$ khi không có thiết bị cơ học làm việc như quạt, máy bơm, hoặc tua bin. Do đó, phương trình (4.74) rút gọn thành:

$$\frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad \text{hoặc} \quad \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constant} \quad (4.75)$$

Đây chính là phương trình Bernoulli cho dòng chảy lý tưởng đã thu nhận ở trên.

4.7.3. Hệ số hiệu chỉnh động năng, α

Vận tốc trung bình dòng chảy V_{avg} được định nghĩa sao cho giá trị $\rho V_{avg} A$ cho giá trị của lưu lượng khối lượng thực tế. Vì vậy, không cần có hệ số điều chỉnh cho lưu lượng khối lượng. Tuy nhiên, như Gaspard Coriolis (1792-1843) nhận thấy, động năng của một dòng chất lỏng thu được từ $V^2/2$ là không giống như động năng thực tế của dòng chất lỏng bởi vì bình phương của một tổng không bằng tổng các bình phương của các thành phần (Hình 4.52). Sai số này có thể được khắc phục bằng cách thay thế số hạng động năng $V^2/2$ trong phương trình năng lượng bằng $\alpha V_{avg}^2/2$, trong đó α là hệ số hiệu chỉnh động năng (còn gọi là hệ số sửa chữa động năng). Bằng cách sử dụng phương trình phân bố vận tốc theo bán kính, có thể được chỉ ra rằng hệ số điều chỉnh là 2.0 cho dòng tầng trong ống trụ, hệ số này dao động trong khoảng 1.04 và 1.11 cho dòng chảy rối phát triển đầy đủ trong một ống trụ tròn.

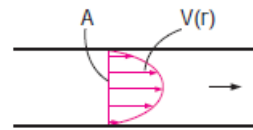
Hệ số hiệu chỉnh động năng thường bị bỏ qua (tức là, cho bằng 1) bởi vì (1) hầu hết các dòng chảy gặp phải trong thực tế là dòng chảy rối, mà hệ số hiệu chỉnh là xấp xỉ 1, và (2) số hạng động năng thường tương đối nhỏ so với các số hạng khác

trong phương trình năng lượng, khi nhân chúng với một thừa số nhỏ hơn 2.0 không gây ra nhiều sự khác biệt. Ngoài ra, khi vận tốc lớn tức là động năng lớn thì dòng chảy lại là dòng chảy rối thì hệ số điều chỉnh lại xấp xỉ bằng 1. Tuy nhiên, trong một số trường hợp cần lưu ý đến hệ số điều chỉnh động lượng, đặc biệt là khi các dòng chảy là chảy tầng. Khi các hệ số điều chỉnh động lượng được tính đến, các phương trình năng lượng cho dòng chảy ổn định, không nén được (4.73) và (4.74) được viết lại như sau:

$$\dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{W}_{pump} = \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{W}_{turbine} + \dot{E}_{mech,loss} \quad (4.76)$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + gz_1 + h_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + h_{turbine,e} + h_L \quad (4.76)$$

Hệ số hiệu chỉnh động năng đối với dòng chảy đối xứng trục trong hình trụ với $V=V(r)$ được xác định như sau (Hình 4.52):



Hình 4.52 Dòng chảy đối xứng trục trong hình trụ

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A$$

$$\rho = \text{constant}$$

$$KE_{act} = \int ke \delta \dot{m} = \int_A \frac{1}{2} V^2(r) [\rho V(r) dA] = \frac{1}{2} \rho \int_A \frac{1}{2} V^3(r) dA$$

$$KE_{avg} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{avg}^2 = \frac{1}{2} \rho A V_{avg}^3$$

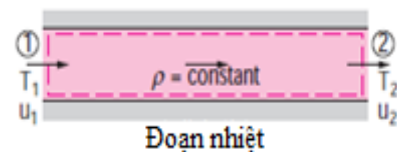
$$\alpha = \frac{KE_{act}}{KE_{avg}} = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{V(r)}{V_{avg}} \right)^3 dA$$

4.7.4. Ví dụ 4.11: Ảnh hưởng của ma sát lên nhiệt độ chất lỏng và tổn thất cột áp

Chỉ ra rằng trong dòng chảy ổn định, không nén được và đoạn nhiệt của một chất lỏng (a) nhiệt độ không đổi và không có tổn thất cột áp khi hiệu ứng ma sát được bỏ qua và (b) nhiệt độ tăng và có tổn thất cột áp khi hiệu ứng ma sát được xét đến. Thảo luận xem nhiệt độ chất lỏng có thể giảm trong dòng chảy như vậy không (Hình 4.53).

Vấn đề: Xem xét dòng chảy ổn định, không nén được và đoạn nhiệt. Xác định ảnh hưởng của ma sát đến nhiệt độ và tổn thất cột áp.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Dòng chảy là đoạn nhiệt và do đó không có trao đổi nhiệt, $q_{netin} = 0$.



Hình 4.53 Sơ đồ cho ví dụ 4. 11

Phân tích: Mật độ của một chất lỏng không đổi trong dòng chảy không nén được và sự thay đổi entropy là:

$$\Delta S = C_V \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Phương trình này biểu diễn sự thay đổi entropy của chất lỏng trên một đơn vị khối lượng khi đi chảy qua khu vực dòng chảy từ trạng thái 1 ở đầu vào đến trạng thái 2 tại cửa ra. Entropy thay đổi là do hai tác dụng: (1) truyền nhiệt và (2) các quá trình không thuận nghịch. Vì vậy, trong trường hợp không truyền nhiệt, thay đổi entropy chỉ do các quá trình không thuận nghịch và hiệu quả là entropy luôn tăng.

(a) Sự thay đổi entropy của chất lỏng trong phần dòng chảy đoạn nhiệt ($q_{net\ in}=0$) bằng 0 khi quá trình này không liên quan đến bất kỳ quá trình không thuận nghịch như ma sát và xoáy, do đó chúng ta có:

$$\Delta S = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} = 0 \rightarrow T_2 = T_1$$

Tổn thất năng lượng cơ học là:

$$e_{mech\ loss, \text{ piping}} = u_2 - u_1 - q_{net\ in} = C_V(T_2 - T_1) - q_{net\ in} = 0$$

Tổn thất cột áp là:
$$h_L = \frac{e_{mech\ loss, \text{ piping}}}{g} = 0$$

Vì vậy, chúng ta kết luận rằng khi truyền nhiệt và các hiệu ứng ma sát là không đáng kể, (1) nhiệt độ của chất lỏng vẫn không đổi, (2) không có cơ năng được chuyển thành nhiệt năng và (3) không có tổn thất cột áp.

(b) Khi các quá trình không thuận nghịch như ma sát được tính đến, sự thay đổi entropy là dương, chúng ta có:

$$\Delta S = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} > 0 \rightarrow T_2 > T_1$$

Tổn thất năng lượng cơ học là:

$$e_{mech\ loss, \text{ piping}} = u_2 - u_1 - q_{net\ in} = C_V(T_2 - T_1) > 0$$

Tổn thất cột áp là:

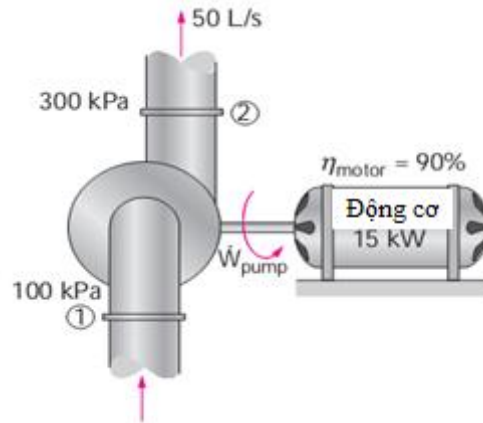
$$h_L = e_{mech\ loss, \text{ piping}} / g > 0$$

Do đó, chúng ta kết luận rằng khi các dòng chảy là đoạn nhiệt và có tính đến hiệu ứng ma sát, (1) nhiệt độ của chất lỏng tăng, (2) một số cơ năng được chuyển đổi thành năng lượng nhiệt và (3) có tổn thất cột áp ở đầu ra.

Thảo luận: Trong dòng chảy ổn định, không nén được, đoạn nhiệt nhiệt độ chất lỏng không thể giảm vì điều này đòi hỏi entropy của một hệ thống giảm, điều đó trái với định luật thứ hai của nhiệt động lực học.

4.7.5. Ví dụ 4.12: Công suất máy bơm và nhiệt ma sát trong máy bơm

Máy bơm của hệ thống phân phối nước được cung cấp bởi một động cơ điện 15 kW có hiệu suất là 90% (Hình 4.54). Lưu lượng dòng nước qua bơm là 50 L/s. Đường kính của đường ống vào ra là như nhau và chênh lệch độ cao trên máy bơm là không đáng kể. Nếu áp suất ở đầu vào và đầu ra của bơm được xác định là 100 kPa và 300 kPa (tuyệt đối), tương ứng, xác định (a) hiệu suất cơ học của máy bơm và (b) sự gia tăng nhiệt độ của nước khi chảy qua bơm do sự kém hiệu quả cơ học.



Hình 4.54 Sơ đồ cho ví dụ 4. 12

Vấn đề: Áp suất ở đầu vào và đầu ra ở máy bơm đã cho. Xác định hiệu suất cơ học của máy bơm và sự gia tăng nhiệt độ của nước.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Máy bơm được điều khiển bởi một động cơ bên ngoài, do đó lượng nhiệt sinh ra bởi động cơ bị tiêu tan vào khí quyển; (3) Chênh lệch độ cao ở cửa vào và cửa ra của bơm là không đáng kể, $z_1 \cong z_2$; (4) Cửa vào và cửa ra có đường kính là như nhau, do đó vận tốc và hệ số hiệu chỉnh động năng của đầu ra và đầu vào bằng nhau, $V_1 = V_2$ và $\alpha_1 = \alpha_2$.

Tính chất: Mật độ của nước là $1 \text{ kg/L} = 1000 \text{ kg/m}^3$ và nhiệt dung riêng của nước là $4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

Phân tích: (a) Lưu lượng nước qua máy bơm là:

$$\dot{m} = \rho Q = (1 \text{ kg/L})(50 \text{ L/s}) = 50 \text{ kg/s}$$

Động cơ tiêu thụ 15 kW điện với hiệu quả 90%. Do đó, công suất trục quay cung cấp cho bơm là:

$$\dot{W}_{\text{pump, shaft}} = \eta_{\text{motor}} \dot{W}_{\text{electric}} = (0.90)(15 \text{ kW}) = 13.5 \text{ kW}$$

Để xác định hiệu quả cơ học của máy bơm, chúng ta cần phải biết sự gia tăng năng lượng cơ học của chất lỏng khi chảy qua bơm:

$$\Delta \dot{E}_{\text{mech, fluid}} = \dot{E}_{\text{mech, out}} - \dot{E}_{\text{mech, in}} = \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + g z_2 \right) - \dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + g z_1 \right)$$

Đơn giản hóa cho trường hợp cụ thể này và thay thế các giá trị đã cho, ta nhận được:

$$\Delta \dot{E}_{\text{mech, fluid}} = \dot{m} \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} \right) = (50 \text{ kg/s}) \left(\frac{1 \text{ kJ}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3} \right) = 10 \text{ kW}$$

Hiệu suất cơ học của máy bơm là:

$$\eta_{pump} = \frac{\dot{W}_{pump,u}}{\dot{W}_{pump,shaft}} = \frac{\Delta \dot{E}_{mech,fluid}}{\dot{W}_{pump,shaft}} = \frac{10 \text{ kW}}{13.5 \text{ kW}} = 0.741 \text{ or } 74.1 \%$$

(b) Trong công suất cơ học 13.5 kW cung cấp cho máy bơm, chỉ có 10 kW được truyền cho chất lỏng như là năng lượng cơ học. Còn lại 3.5 kW được chuyển thành nhiệt năng do hiệu ứng ma sát, và sự "mất" năng lượng cơ học này được thể hiện như một hiệu ứng nhiệt trong chất lỏng. Sự gia tăng nhiệt độ của nước do tổn thất năng lượng cơ học được xác định từ phương trình cân bằng năng lượng nhiệt, $\dot{E}_{mech,loss} = \dot{m}(u_2 - u_1) = \dot{m}c\Delta T$.

Giải cho ΔT , ta có:

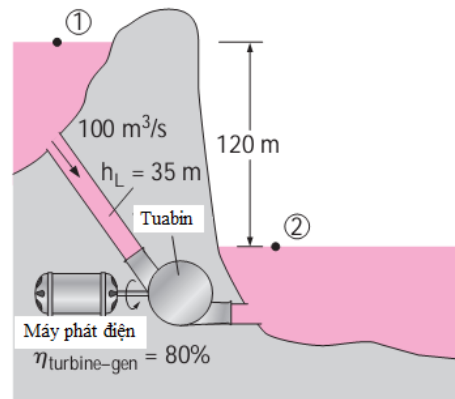
$$\Delta T = \frac{e_{mech,loss}}{\dot{m}c} = \frac{3.5 \text{ kW}}{(50 \text{ kg/s}) \left(4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}\right)} = 0.017^\circ\text{C}$$

Vậy, nước tăng nhiệt độ thêm 0.017°C do tổn thất năng lượng cơ học, sự gia tăng này là rất nhỏ khi nước chảy qua máy bơm.

Thảo luận: Trong thực tế, sự gia tăng nhiệt độ của nước còn có thể ít hơn do một phần của nhiệt sinh ra sẽ được truyền cho vỏ của máy bơm và từ vỏ đến không khí xung quanh. Nếu toàn bộ động cơ máy bơm bị ngập trong nước thì 1.5 kW sẽ ra tiêu tan vào không khí do tổn thất của động cơ cũng sẽ được truyền vào nước xung quanh. Điều này sẽ làm cho nhiệt độ nước tăng cao hơn một ít nữa.

4.7.6. Ví dụ 4.13: Công suất phát điện từ một đập thủy điện

Trong một nhà máy thủy điện, nước chảy với lưu lượng $100 \text{ m}^3/\text{s}$ từ độ cao 120 m đến một tua bin để tạo ra điện năng (Hình 4.55). Tổng tổn thất cột áp của các quá trình không thuận nghịch đầu trong hệ thống đường ống từ điểm 1 đến điểm 2 (không bao gồm các tổ máy tua bin) được xác định là 35 m. Nếu hiệu quả tổng thể của hệ thống tua bin-máy phát điện là 80%, ước tính công suất phát điện của nhà máy.



Hình 4.55 Sơ đồ cho ví dụ 4.13

Vấn đề: Cột nước, lưu lượng dòng chảy, tổn thất cột áp và hiệu suất của tua bin thủy điện được biết. Xác định công suất phát điện.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Mực nước ở hồ chứa và bể xả là không đổi.

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Lưu lượng khối lượng của nước qua tua bin là:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = (1000 \text{ kg/m}^3)(100 \text{ m}^3/\text{s}) = 10^5 \text{ kg/s}$$

Chúng ta lấy cao độ điểm 2 làm mức tham chiếu, do đó $z_2=0$. Ngoài ra, cả hai điểm 1 và 2 đều tiếp xúc với khí quyển ($P_1=P_2=P_{atm}$) và vận tốc dòng chảy là không đáng kể ở cả hai điểm ($V_1=V_2=0$). Do đó, phương trình năng lượng:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbine,e} + h_L$$

được rút gọn thành:

$$h_{turbine,e} = z_1 - h_L$$

Thay thế giá trị số đã cho, ta nhận được cột áp tua bin hiệu dụng và công suất tuabin tương ứng là:

$$h_{turbine,e} = z_1 - h_L = 120 - 35 = 85 \text{ m}$$

$$\dot{W}_{turbine,e} = \dot{m}gh_{turbine,e} = \left(10^5 \frac{\text{kg}}{\text{s}}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (85 \text{ m}) \left(\frac{1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{1000 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}\right) = 83400 \text{ kW}$$

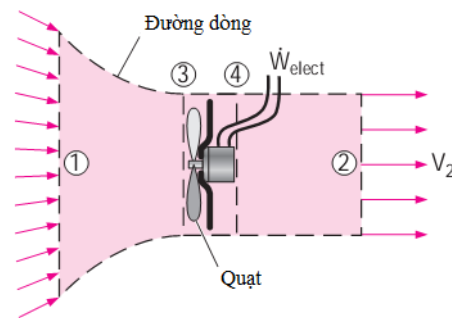
Vậy, một tổ hợp tua bin-máy phát điện hoàn hảo sẽ tạo ra 83400 kW điện từ đập nước này. Điện năng thực tế nhận được sẽ là:

$$\dot{W}_{electric} = \eta_{turbine-gen} \dot{W}_{turbine,e} = (0.80)(83.4 \text{ MW}) = 66.7 \text{ MW}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng công suất phát điện tăng gần 1 MW cho mỗi cải thiện 1% hiệu suất của tổ hợp máy tua bin-máy phát điện.

4.7.7. Ví dụ 4.14: Lựa chọn quạt làm mát cho máy tính

Quạt cần lựa chọn để làm mát case máy tính có kích thước là 12 cm x 40 cm x 40 cm (Hình 4.56). Một nửa thể tích trong case dự kiến sẽ được lấp đầy bởi các linh kiện và nửa còn lại là để trống. Một lỗ đường kính 5 cm có sẵn ở mặt sau của case phục vụ cho việc lắp đặt quạt để thay thế không khí trong khoảng trống của case một giây một lần. Các bộ quạt sẵn có trên thị trường có hiệu suất ước tính là 30%. Xác định (a) công suất động cơ của quạt làm mát cần mua và (b) chênh lệch áp suất qua quạt. Lấy mật độ không khí là 1.20 kg/m³.



Hình 4.56 Sơ đồ cho ví dụ 4.14

Vấn đề: Cần chọn quạt để làm mát một case máy tính bằng cách thay thế toàn bộ không khí bên trong trong thời gian 1 giây. Xác định công suất của quạt và chênh lệch áp suất qua quạt.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Tổn thất khác so với tổn thất về hiệu suất của động cơ quạt là không đáng kể ($h_L=0$); (3) Dòng chảy tại đầu ra của quạt khá đồng đều trừ khu vực trung tâm (do vết dòng chảy sau động cơ quạt), lấy hệ số hiệu chỉnh động năng tại đầu ra là 1.1.

Tính chất: Mật độ không khí là 1.20 kg/m^3 .

Phân tích: (a) Bởi vì một nửa thể tích case bị chiếm bởi các linh kiện, thể tích không khí trong case máy tính là:

$$V=0.5 (12 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm})= 9600 \text{ cm}^3$$

Do đó, lưu lượng khối lượng và lưu lượng thể tích không khí đi qua case là:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{9600 \text{ cm}^3}{1 \text{ s}} = 9600 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} = 9.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\dot{m} = \rho Q = (1.20 \text{ kg/m}^3)(9.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}) = 0.0115 \text{ kg/s}$$

Diện tích mặt cắt ngang của cửa mở trong case và tốc độ không khí trung bình qua cửa ra là:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.05)^2}{4} = 1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{9.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 4.9 \text{ m/s}$$

Chúng ta lấy thể tích khối chế xung quanh quạt sao cho cả hai đầu vào và đầu ra là ở áp suất khí quyển ($P_1= P_2=P_{atm}$), như thể hiện trong Hình 4.56 và cửa vào 1 là lớn và xa quạt để vận tốc dòng chảy ở phần đầu vào là không đáng kể ($V_1 \cong 0$). Nhận thấy $z_1=z_2$ và tổn thất ma sát trong dòng chảy được bỏ qua, tổn thất năng lượng cơ học chỉ bao gồm tổn thất của quạt và phương trình năng lượng (4.76):

$$\dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{W}_{fan} = \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{W}_{turbine} + \dot{E}_{mech loss, fan}$$

được đơn giản hoá như sau:

$$\dot{W}_{fan} - \dot{E}_{mech loss, fan} = \dot{m} \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} = \dot{W}_{fan, u}$$

Thay số vào, ta có:

$$\dot{W}_{fan, u} = \dot{m} \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} = \left(0.0115 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) (1.10) \frac{\left(4.90 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) = 0.152 \text{ W}$$

Vậy công suất quạt cần mua là:

$$\dot{W}_{elect} = \frac{\dot{W}_{fan,u}}{\eta_{fan-motor}} = \frac{0.152 W}{0.3} = 0.506 W$$

(b) Để xác định chênh lệch áp suất qua quạt, chúng ta hãy lấy điểm 3 và 4 ở hai bên của quạt trên một đường nằm ngang. Từ đó ta có $z_3 = z_4$ và $V_3 = V_4$ và phương trình năng lượng rút gọn thành:

$$\dot{m} \frac{P_3}{\rho} + \dot{W}_{fan} = \dot{m} \frac{P_4}{\rho} + \dot{E}_{mech\ loss, fan} \rightarrow \dot{W}_{fan,u} = \dot{m} \frac{P_4 - P_3}{\rho}$$

Thay số để tính chênh lệch áp suất, ta nhận được:

$$P_4 - P_3 = \frac{\rho \dot{W}_{fan,u}}{\dot{m}} = \frac{\left(1.2 \frac{kg}{m^3}\right) (0.152 W)}{0.0115 \frac{kg}{s}} \left(\frac{1 Pa \cdot m^3}{1 Ws}\right) = 14.8 Pa$$

Thảo luận: Hiệu suất của động cơ quạt là 30%, có nghĩa là 30 phần trăm năng lượng điện tiêu thụ bởi quạt được chuyển thành năng lượng cơ học hữu ích trong khi phần còn lại (70%) là "bị tổn thất" và chuyển đổi thành nhiệt năng. Ngoài ra, quạt mạnh hơn sẽ cần thiết trong thực tế để khắc phục tổn thất do ma sát bên trong case máy tính. Còn cần lưu ý rằng nếu chúng ta bỏ qua hệ số điều chỉnh động năng tại cửa ra, công suất và chênh lệch áp suất sẽ thấp hơn 10% (0.460 W và 14.4 Pa).

4.7.8. Ví dụ 4.15: Tổn thất cột áp và công suất trong quá trình bơm

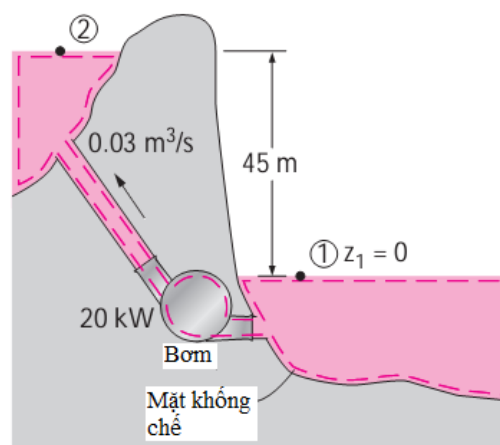
Nước được bơm từ hồ chứa thấp hơn lên một hồ chứa cao hơn bằng một máy bơm với công suất hữu ích là 20 kW (Hình 4.57). Chênh lệch độ cao bề mặt tự do của 2 hồ chứa là 45 m. Nếu lưu lượng dòng chảy là $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$, xác định tổn thất cột áp của các quá trình không thuận nghịch của hệ thống và tổn thất công suất cơ học trong quá trình này.

Vấn đề: Nước được bơm từ hồ chứa thấp lên một hồ cao hơn. Xác định tổn thất cột áp và công suất liên quan đến quá trình này.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Chênh lệch độ cao mặt nước giữa hai hồ chứa là không đổi.

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Lưu lượng khối lượng nước qua hệ thống là:



Hình 4.57 Sơ đồ cho ví dụ 4. 15

$$\dot{m} = \rho Q = \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(0.03 \frac{m^3}{s}\right) = 30kg/s$$

Chúng ta lựa chọn các điểm 1 và 2 trên các bề mặt tự do của các hồ chứa trên và dưới, tương ứng và lấy bề mặt của hồ chứa thấp hơn làm mức tham chiếu ($z_1=0$). Cả hai điểm đều mở ra không khí ($P_1= P_2=P_{atm}$) và vận tốc tại cả hai điểm là không đáng kể ($V_1=V_2=0$).

Khi đó, phương trình năng lượng cho dòng chảy không nén được, ổn định giữa 1 và 2:

$$\dot{m} \left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{W}_{pump} = \dot{m} \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{W}_{turbine} + \dot{E}_{mec h,loss}$$

được rút gọn thành:

$$\dot{W}_{pump} = m\dot{g}z_2 + \dot{E}_{mec h,loss}$$

Hay

$$\dot{E}_{mec h,loss} = \dot{W}_{pump} - m\dot{g}z_2$$

Thay số vào, ta nhận được:

$$\dot{E}_{mec h,loss} = 20 kW - \left(30 \frac{kg}{s}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) \left(\frac{1 N}{1 kg \cdot \frac{m}{s^2}}\right) \left(\frac{1 kW}{1000 N \cdot m/s}\right) = 6.76 kW$$

Trong trường hợp này, toàn bộ tổn thất năng lượng cơ học là do ma sát trong đường ống, do đó:

$$\dot{E}_{mec h,loss} = \dot{E}_{mec h,loss,piping}$$

Vậy:

$$h_L = \frac{\dot{E}_{mec h,loss,piping}}{\dot{m}g} = \frac{6.76 kW}{\left(30 \frac{kg}{s}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right)} \left(\frac{1 kg \cdot m/s^2}{1 N}\right) \left(\frac{1000 N \cdot m/s}{1 kW}\right) = 23.0 m$$

Thảo luận: Tổn thất công suất 6.76 kW là do hiệu ứng ma sát trong hệ thống đường ống. Máy bơm có thể nâng nước thêm 23 m nếu không có tổn thất không thuận nghịch trong hệ thống.

TỔNG KẾT

Chương này trình bày về các phương trình bảo toàn khối lượng, năng lượng, Bernoulli, và các ứng dụng của chúng. Khối lượng vật chất chảy qua một mặt cắt trong một đơn vị thời gian được gọi là lưu lượng khối lượng và được xác định như sau:

$$\dot{m} = \rho V A_c = \rho Q$$

trong đó ρ là mật độ, V là vận tốc trung bình, Q là lưu lượng thể tích của chất lỏng và A_c là diện tích mặt cắt ngang vuông góc với hướng dòng chảy. Nguyên lý bảo toàn khối lượng cho một thể tích khối chế được biểu diễn bởi các phương trình sau:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0 \quad \text{hoặc} \quad \frac{dm_{CV}}{dt} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m}$$

Có nghĩa là: Tốc độ thay đổi khối lượng bên trong thể tích khối chế cộng với lưu lượng khối lượng đi qua các mặt biên của thể tích khối chế là bằng 0.

Đối với dòng chảy ổn định, nguyên lý bảo toàn khối lượng tương đương với:

$$\sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m}$$

Đối với dòng chảy đơn dòng (1 cửa ra và một cửa vào):

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

Đối với dòng ổn định không nén được:

$$\sum_{in} Q = \sum_{out} Q$$

Đối với dòng ổn định, không nén được, đơn dòng:

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Năng lượng cơ học là dạng năng lượng liên quan đến vận tốc, độ cao, và áp suất của chất lỏng và nó có thể được chuyển đổi sang công cơ học hoàn toàn và trực tiếp bởi một thiết bị cơ học lý tưởng. Hiệu suất của các thiết bị khác nhau được định nghĩa như sau:

$$\eta_{pump} = \frac{\Delta \dot{E}_{mech,fluid}}{\dot{W}_{shaft,in}} = \frac{\dot{W}_{pump,u}}{\dot{W}_{pump}}$$

$$\eta_{turbine} = \frac{\dot{W}_{shft,out}}{|\Delta \dot{E}_{mech,fluid}|} = \frac{\dot{W}_{turbine}}{\dot{W}_{turbine,e}}$$

$$\eta_{motor} = \frac{\text{công suất cơ học đầu ra}}{\text{công suất cơ học đầu vào}} = \frac{\dot{W}_{shaft,out}}{\dot{W}_{elect,in}}$$

$$\eta_{generator} = \frac{\text{công suất điện đầu vào}}{\text{công suất cơ học đầu vào}} = \frac{\dot{W}_{elect,out}}{\dot{W}_{shaft,in}}$$

$$\eta_{pump-motor} = \eta_{pump} \eta_{motor} = \frac{\Delta \dot{E}_{mech,fluid}}{\dot{W}_{elect,in}} = \frac{\dot{W}_{pump,u}}{\dot{W}_{elect,in}}$$

$$\eta_{turbine-gen} = \eta_{turbine} \eta_{generator} = \frac{\dot{W}_{elect\ out}}{|\Delta \dot{E}_{mech,fluid}|} = \frac{\dot{W}_{elect\ out}}{\dot{W}_{turbine,e}}$$

Phương trình Bernoulli thể hiện mối quan hệ giữa áp suất, vận tốc và độ cao cho dòng chảy ổn định, không nén được trên một đường dòng khi hiệu ứng nhớt là không đáng kể. Ta có:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = constant$$

Phương trình Bernoulli giữa 2 điểm trên một đường dòng có dạng:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

Phương trình Bernoulli thể hiện nguyên lý bảo toàn năng lượng và có thể phát biểu như sau: Tổng động năng, thế năng và năng lượng dòng chảy của phần tử chất lỏng trên một đường dòng là không đổi. Nhân phương trình Bernoulli với mật độ, ta nhận được:

$$P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho gz = constant$$

trong đó P là áp suất tĩnh, đại diện cho áp suất thực tế của chất lỏng; $\rho V^2/2$ là áp suất động lực, đại diện cho sự gia tăng áp lực khi chất lỏng chuyển động bị buộc dừng lại; và ρgz là *áp suất thủy tĩnh*, thể hiện ảnh hưởng của trọng lượng chất lỏng đến áp suất. Tổng áp suất tĩnh, áp suất động lực và áp suất thủy tĩnh được gọi là áp suất toàn phần. Phương trình Bernoulli cho rằng áp suất toàn phần trên cùng một đường dòng là không đổi. Tổng áp suất tĩnh và áp suất động lực được gọi là áp suất điểm dừng, đại diện cho áp suất tại một điểm mà chất lỏng được đưa đến một điểm dừng hoàn toàn không ma sát. Phương trình Bernoulli cũng có thể hiện theo "cột áp" bằng cách chia từng số hạng cho g,

$$\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = H = constant$$

trong đó $P/\rho g$ là cột cao áp suất tĩnh, $V^2/2g$ là cột cao vận tốc và z là cột cao thế năng, H là tổng cột áp của dòng chảy. Đồ thị biểu diễn tổng cột cao áp suất tĩnh và cột cao thế năng, $P/\rho g + z$, được gọi là đường mức thủy lực (HGL), đồ thị biểu diễn tổng cột áp của chất lỏng, $P/\rho g + V^2/2g + z$, được gọi là đường mức năng lượng (EGL). Phương trình năng lượng cho dòng chảy ổn định, không nén được, được thể hiện như sau:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{pump,e} + h_L$$

trong đó
$$h_{pump,u} = \frac{w_{pump,u}}{g} = \frac{\dot{W}_{pump,u}}{\dot{m}g} = \frac{\eta_{pump} \dot{W}_{pump}}{\dot{m}g}$$

$$h_{turbine,e} = \frac{W_{turbine,e}}{g} = \frac{\dot{W}_{turbine,e}}{\dot{m}g} = \frac{\dot{W}_{turbine,e}}{\eta_{turbine} \dot{m}g}$$

$$h_L = \frac{e_{mech loss, piping}}{g} = \frac{\dot{E}_{mech loss, piping}}{\dot{m}g}$$

$$e_{mech loss} = u_2 - u_1 - q_{net in}$$

Câu hỏi và bài tập

Bảo toàn khối lượng

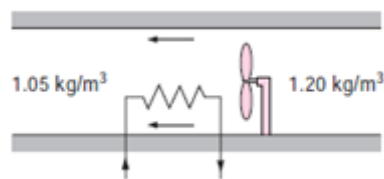
4.1 LT Liệt kê bốn đại lượng vật lý được bảo toàn và hai đại lượng không được bảo toàn trong một quá trình.

4.2 LT Định nghĩa lưu lượng khối lượng và lưu lượng thể tích dòng chảy. Chúng liên quan với nhau như thế nào?

4.3 LT Xem xét một thiết bị với một đầu vào và một đầu ra. Nếu lưu lượng dòng chảy ở đầu vào và đầu ra là như nhau, dòng chảy qua thiết bị này có nhất thiết phải ổn định không? Tại sao?

4.4 Không khí đi vào một vòi phun ổn định với mật độ 2.21 kg/m^3 và vận tốc 30 m/s tại đầu vào và tại đầu ra 0.762 kg/m^3 và 180 m/s . Nếu diện tích đầu vào của vòi phun là 80 cm^2 , xác định (a) lưu lượng khối lượng qua vòi phun, và (b) diện tích cửa ra của vòi phun. *Đáp số: (a) 0.530 kg/s , (b) 38.7 cm^2*

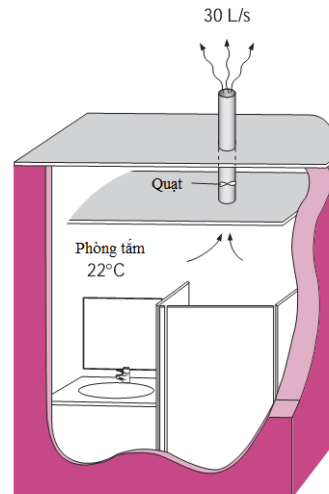
4.5 Một máy sấy tóc cơ bản là một ống dẫn liên tục, trong đó có một sợi điện trở. Một quạt nhỏ thổi không khí đi qua các điện trở để được hâm nóng. Nếu mật độ của không khí là 1.20 kg/m^3 ở đầu vào và 1.05 kg/m^3 ở cửa ra, xác định tỷ lệ tăng vận tốc của không khí khi đi qua máy sấy (Hình P4.5).



Hình P4.5

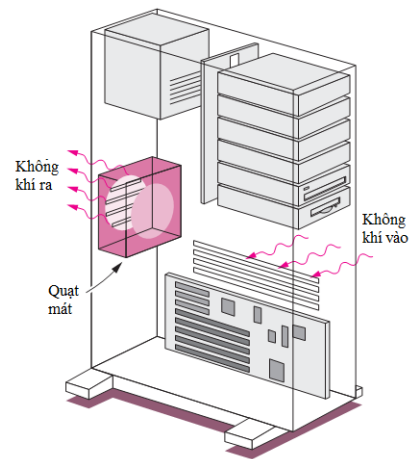
4.6 Một bể cứng có thể tích 1 m^3 ban đầu chứa không khí có mật độ là 1.18 kg/m^3 . Bể được kết nối với một đường ống áp suất cao qua một cửa van. Van được mở ra và không khí được bơm vào bể cho đến khi mật độ trong bể tăng lên đến 7.20 kg/m^3 . Xác định khối lượng của không khí đã vào bể. *Đáp số: 6.02 kg*

4.7 Quạt thông gió trong phòng tắm của một tòa nhà có lưu lượng 30 L/s và chạy liên tục. Nếu mật độ không khí bên trong là 1.20 kg/m^3 , xác định khối lượng của không khí thông hơi ra trong một ngày (Hình P4.7).



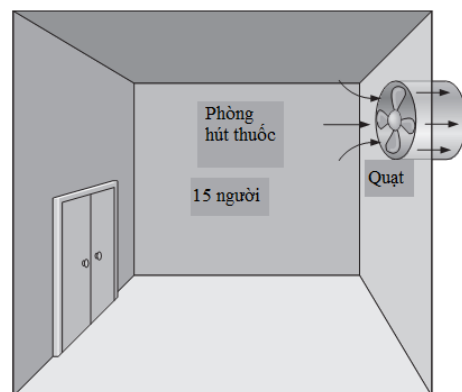
Hình P4.7

4.8 Máy tính để bàn là được làm mát bằng một quạt có lưu lượng gió là $0.34 \text{ m}^3/\text{phút}$. Xác định lưu lượng khối lượng không khí qua quạt ở độ cao 3400 m nơi có mật độ không khí là 0.7 kg/m^3 . Ngoài ra, nếu vận tốc trung bình của không khí là không quá $110 \text{ m}/\text{phút}$, xác định đường kính cửa ra của quạt (Hình P4.8). *Đáp số: $0.238 \text{ kg}/\text{phút}$, 0.063 m*



Hình P4.8

4.9 Một phòng chờ hút thuốc cho 15 người nghiện thuốc lá. Yêu cầu tối thiểu không khí sạch cho phòng hút thuốc được quy định là 30 L/s mỗi người (ASHRAE Standard 62, 1989). Xác định lưu lượng tối thiểu của không khí sạch cần phải được cung cấp cho phòng chờ và đường kính của ống quạt nếu tốc độ không khí không vượt quá 8 m/s (Hình P4.9).



Hình P4.9

4.10 Yêu cầu tối thiểu không khí sạch của một tòa nhà dân cư được quy định là 0.35 thay đổi mỗi giờ (ASHRAE Standard 62, 1989). Có nghĩa là, 35% không khí chứa trong một nơi cư trú cần được thay thế bởi không khí tươi ngoài trời mỗi giờ. Nếu yêu cầu thông gió của ngôi nhà cao 2.7 m , rộng 200 m^2 là được đáp ứng hoàn toàn bởi một quạt thông gió, xác định lưu lượng gió của quạt theo $\text{L}/\text{phút}$ và đường kính của ống nếu tốc độ không khí không vượt quá 6 m/s .

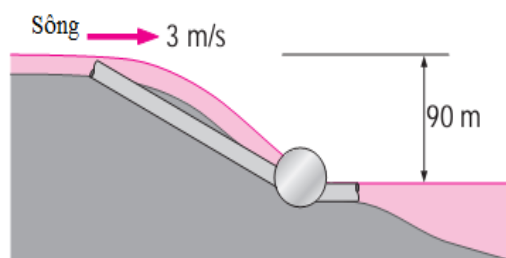
Năng lượng cơ học và hiệu suất

4.11LT Năng lượng cơ học là gì? Nó khác với năng lượng nhiệt như thế nào? Liệt kê các dạng năng lượng cơ học của một dòng chảy chất lỏng?

4.12LT Hiệu suất cơ học là gì? Nói một tuabin thủy lực có hiệu suất cơ học 100% là có nghĩa như thế nào?

4.13LT Làm thế nào để xác định hiệu suất kết hợp của hệ thống máy bơm-động cơ? Hiệu suất của hệ thống máy bơm-động cơ kết hợp có thể lớn hơn hiệu suất của riêng máy bơm hay của động cơ?

4.14 Xem xét một dòng sông chảy về phía một hồ nước với vận tốc trung bình 3 m/s và lưu lượng 500 m³/s tại một vị trí 90 m cao hơn mặt hồ. Xác định tổng năng lượng cơ học trên một đơn vị khối lượng và công suất phát điện tiềm năng của dòng chảy (Hình P4.14).



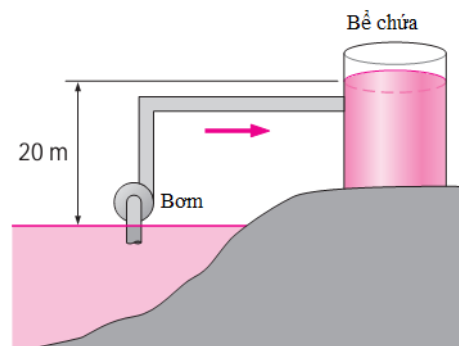
Hình P4.14

Đáp số: 444 MW

4.15 Điện năng được tạo ra bằng hệ thống tuabin-máy phát điện tại vị trí 70 m dưới bề mặt tự do của một hồ chứa nước lớn có thể cung cấp nước với lưu lượng là 1500 kg/s liên tục. Nếu công suất cơ học đầu ra của tua bin là 800 kW và công suất phát điện điện là 750 kW, xác định hiệu suất của tua bin và hiệu suất kết hợp tua bin-máy phát điện của nhà máy thủy điện. Bỏ qua các tổn thất trong đường ống.

4.16 Tại một vị trí, gió thổi đều với vận tốc 12 m/s. Xác định năng lượng cơ học của không khí trên một đơn vị khối lượng và tiềm năng phát điện của một tuabin gió với cánh đường kính 50 m tại vị trí đó. Đồng thời xác định công suất phát điện thực tế nếu hiệu suất tổng thể của tua bin gió là 30%. Lấy mật độ không khí là 1.25 kg/m³.

4.17 Nước được bơm từ hồ vào một bể chứa cao 20 m với lưu lượng 70 L/s tiêu thụ 20.4 kW điện. Bỏ qua tổn thất ma sát trong ống dẫn và thay đổi về động năng, xác định (a) hiệu suất tổng thể của hệ thống máy bơm-động cơ và (b) sự chênh lệch áp suất giữa đầu vào và đầu ra của máy bơm (Hình P4.17).

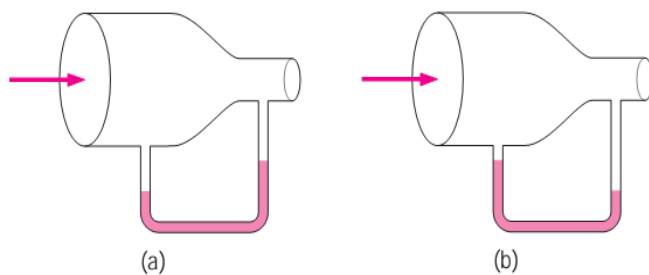


Hình P4.17

Phương trình Bernoulli

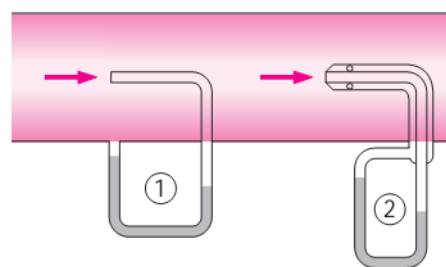
- 4.18 LT Gia tốc dọc theo đường dòng là gì? Nó khác với gia tốc hướng tâm như thế nào? Một hạt chất lỏng có thể tăng tốc trong dòng chảy ổn định không?
- 4.19 LT Biểu diễn phương trình Bernoulli theo ba cách khác nhau sử dụng (a) năng lượng, (b) áp suất, và (c) cột áp.
- 4.20 LT Ba giả thiết chính được sử dụng để thu nhận phương trình Bernoulli là gì?
- 4.21 LT Định nghĩa áp suất tĩnh, áp suất động lực và áp suất thủy tĩnh. Trong điều kiện nào tổng của chúng không đổi theo đường dòng trong dòng chảy?
- 4.22 LT Áp suất điểm dừng là gì? Làm thế nào có thể đo được nó.
- 4.23 LT Định nghĩa cột cao áp suất, cột cao vận tốc và cột cao cao độ và biểu diễn chúng theo áp suất P , vận tốc V và độ cao z trong dòng chảy chất lỏng.
- 4.24 LT Đường mức thủy lực là gì? Nó khác gì với đường mức năng lượng? Khi nào cả hai đường trùng với bề mặt tự do của một chất lỏng?
- 4.25 LT Đường mức thủy lực cho dòng chảy kênh hở được xác định thế nào? Xác định độ cao đường mức thủy lực tại cửa ra của một ống xả vào khí quyển.

4.26 LT Một áp kế thủy tĩnh với dầu là chất lỏng làm việc được kết nối với một ống dẫn không khí như trên Hình P4.26. Dầu sẽ di chuyển trong áp kế như trong Hình P4.26 (a) hay (b)? Giải thích. Điều gì sẽ xảy ra là nếu dòng chảy theo hướng ngược lại?



Hình P4.26

4.27 LT Vận tốc của chất lỏng chảy trong một đường ống được đo bởi hai áp kế thủy ngân Pitot loại khác nhau thể hiện trong Hình P4.27. Bạn có mong chờ cả hai áp kế cho cùng một vận tốc dòng chảy không? Nếu không, áp kế nào chính xác hơn? Giải thích. Sẽ ra sao nếu không khí chảy trong đường ống thay vì nước?

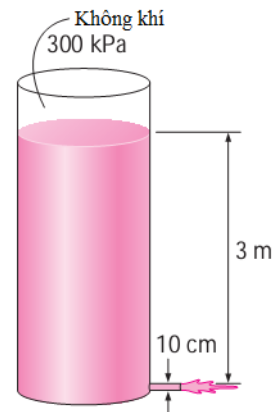


Hình P4.27

4.28 Một đường ống dẫn nước bị thủng một lỗ nhỏ và tia nước bắn lên cao 34 m. Ước tính áp suất dư trong đường ống. Nêu giả thiết và thảo luận xem áp suất thực tế là lớn hơn hay nhỏ hơn so với giá trị đã tính.

4.29 Một áp kế Pitot được sử dụng để đo vận tốc của máy bay đang bay ở độ cao 3000 m. Nếu chênh lệch áp suất trong áp kế là 3 kPa, xác định vận tốc của máy bay.

4.30 Một bể áp lực chứa nước có một vòi đường kính 10 cm ở phía dưới xả vào khí quyển. Mức nước trên ổ cắm vòi cao 3 m. Áp suất không khí trong bể là 300 kPa (tuyệt đối) trong khi áp suất khí quyển là 100 kPa. Bỏ qua các hiệu ứng ma sát, xác định lưu lượng xả ban đầu của nước từ bể (Hình P4.30). *Đáp số: $0.168 \text{ m}^3/\text{s}$*



Hình P4.30

Phương trình năng lượng

4.31 LT Xem xét dòng chảy đoạn nhiệt ổn định của một chất lỏng không nén được. Nhiệt độ của chất lỏng có thể giảm theo dòng chảy không? Giải thích.

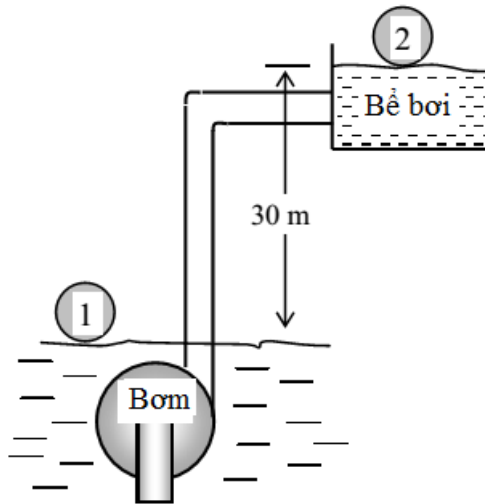
4.32 LT Xem xét dòng chảy đoạn nhiệt ổn định của một chất lỏng không nén được. Nếu nhiệt độ của chất lỏng không đổi trong dòng chảy, có thể nói rằng những hiệu ứng ma sát là không đáng kể?

4.33 LT Cột áp hữu ích của bơm là gì? Nó liên quan thế nào đến công suất đầu vào của máy bơm?

4.34 LT Hệ số hiệu chỉnh động năng là gì? Nó có ý nghĩa quan trọng không?

4.35 LT Mức nước trong bể là cao 20 m so với mặt đất. Một ống dẫn được nối với đáy bể và vòi phun ở cuối ống hướng thẳng lên. Những dòng nước từ vòi phun được quan sát lên cao 25 m so với mặt đất. Giải thích tại sao nước từ vòi phun có thể có độ cao trên mức nước trong bể.

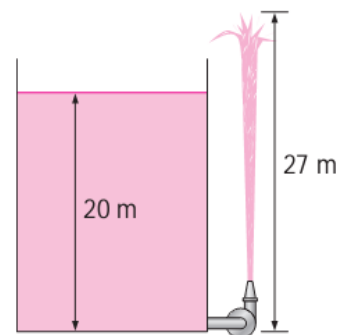
4.36 Nước ở hồ chứa được bơm bằng bơm chìm công suất 3 kW với hiệu suất 70% vào một bể bơi có bề mặt tự do cao 30 m trên mức nước hồ chứa. Đường kính của ống là 7 cm ở phía hút và 5 cm ở phía bên xả. Xác định (a) lưu lượng dòng chảy tối đa và (b) sự chênh lệch áp suất qua bơm. Giả thiết chênh lệch độ cao giữa cửa vào và cửa ra của bơm và ảnh hưởng hệ số điều chỉnh động năng là không đáng kể.



4.37 Nước được bơm từ một hồ nước lớn lên bồn chứa cao 25 m với lưu lượng 25 L/s bởi một máy bơm công suất 10 kW. Nếu tổn thất của hệ thống đường ống là 7 m, xác định hiệu suất cơ học của máy bơm. *Đáp số: 78.5%*

4.38 Nước chảy với lưu lượng $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ trong một ống nằm ngang có đường kính giảm từ 15 cm đến 8 cm. Nếu áp suất ở đường tâm được đo là 470 kPa và 440 kPa trước và sau khi giảm, xác định tổn thất cột năng lượng giữa hai mặt cắt. Lấy hệ số điều chỉnh động năng là 1.05. *Đáp số: 0.68 m*

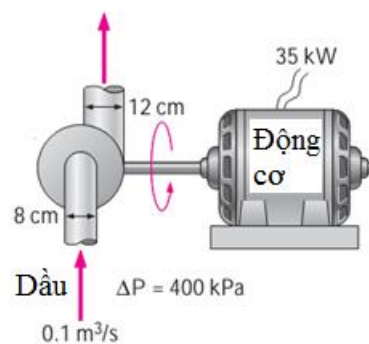
4.39 Mực nước trong bể là 20 m so với mặt đất. Một ống được nối với đáy bể và vòi phun ở cuối của ống là chỉ thẳng lên. Bể được đặt ở độ cao mực nước biển và mặt thoáng của nước là mở ra khí quyển. Ống từ bể đến vòi được nối với một máy bơm, làm tăng áp lực của nước. Nếu tia nước từ vòi đạt đến chiều cao 27 m, xác định sự gia tăng áp suất tối thiểu cung cấp bởi bơm cho dòng nước (Hình P4.39).



Hình P4.39

4.40 Vận tốc dòng chảy rối trong một ống tròn thường được xấp xỉ như $u(r)=u_{max}(1-r/R)^{1/n}$, trong đó $n=7$. Xác định hệ số điều chỉnh động năng của dòng chảy này. *Đáp số: 1.06*

4.41 Một máy bơm dầu công suất 35 kW, bơm dầu với $\rho=860 \text{ kg/m}^3$ và lưu lượng là $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Các cửa đầu vào và đầu ra có đường kính là 8 cm và 12 cm, tương ứng. Nếu sự gia tăng áp suất dầu trong bơm đo được là 400



Hình P4.41

kPa và hiệu suất động cơ là 90%, xác định hiệu suất cơ học của máy bơm. Lấy số hiệu chỉnh động năng là 1.05 (Hình P4.41).

Chương 5. NGUYÊN LÝ ĐỘNG LƯỢNG VÀ LỰC TRONG DÒNG CHẢY

Khi giải quyết các vấn đề kỹ thuật, chúng ta luôn mong muốn có được lời giải nhanh chóng và chính xác với chi phí tối thiểu. Hầu hết các vấn đề kỹ thuật, bao gồm cả những vấn đề liên quan đến dòng chảy chất lỏng, có thể được giải quyết bằng một trong ba phương pháp tiếp cận cơ bản: vi phân, thực nghiệm và thể tích khối chế. Trong *tiếp cận vi phân*, vấn đề được mô tả chính xác thông qua các đại lượng vi phân, tuy nhiên phương pháp giải các phương trình vi phân là khó khăn, thường đòi hỏi việc sử dụng các phương pháp số phức tạp và công cụ tính toán mạnh. Phương pháp *tiếp cận thực nghiệm* với phân tích thứ nguyên cho kết quả chính xác và tin cậy, nhưng chúng thường đòi hỏi nhiều thời gian và kinh phí. Phương pháp *thể tích khối chế* mô tả trong chương này là phương pháp cho kết quả nhanh và đơn giản với độ chính xác chấp nhận được cho nhiều vấn đề kỹ thuật. Do đó, mặc dù có những hạn chế nhất định, phương pháp thể tích khối chế vẫn là một công cụ không thể thiếu được đối với các kỹ sư Cơ học kỹ thuật.

Trong Chương 4, những phân tích bằng phương pháp thể tích khối chế cho khối lượng và năng lượng của hệ thống dòng chảy chất lỏng đã được trình bày. Trong chương này, chúng ta xem xét phân tích động lượng của dòng chảy bằng phương pháp thể tích khối chế. Trước tiên, chúng ta sẽ ôn lại các định luật Newton và các phương trình bảo toàn động lượng và mô-men động lượng. Sau đó, bằng cách sử dụng định lý vận chuyển Reynolds, chúng ta thu nhận các phương trình động lượng và mô-men động lượng cho thể tích khối chế và sử dụng chúng để xác định các lực và mô-men xoắn liên quan đến dòng chảy chất lỏng. Trong tài liệu [2], phương trình động lượng và phương trình mô-men động lượng thu nhận trong chương này còn được gọi tương ứng là định lý Euler 1 và định lý Euler 2.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này sinh viên có thể:

- Xác định các loại lực và mô-men lực khác nhau tác dụng lên một thể tích khối chế
- Sử dụng phương pháp phân tích thể tích khối chế để xác định các lực tác dụng liên quan đến dòng chảy chất lỏng
- Sử dụng phương pháp phân tích thể tích khối chế để xác định mô-men lực tác dụng và mô-men xoắn được truyền bởi dòng chảy chất lỏng

5.1. Các định luật Newton và bảo toàn động lượng

Các định luật Newton mô tả mối quan hệ giữa chuyển động của vật thể và các lực tác dụng lên chúng. Định luật thứ nhất của Newton nói rằng một vật ở trạng

thái tĩnh vẫn ở trạng thái tĩnh và một vật chuyển động vẫn chuyển động với cùng một vận tốc theo đường thẳng khi tổng hợp lực tác dụng lên nó là bằng 0. Điều đó có nghĩa là một vật luôn có xu hướng bảo toàn trạng thái *quán tính* của nó. Định luật thứ hai của Newton nói rằng gia tốc của một vật tỷ lệ thuận với tổng lực tác dụng lên nó và tỉ lệ nghịch với khối lượng của nó. Định luật thứ ba của Newton nói rằng khi một vật tác dụng một lực lên một vật thứ hai, vật này tác dụng lại vật đó một lực có giá trị tương đương và hướng ngược lại.

Đối với một vật rắn khối lượng m , định luật thứ hai của Newton được thể hiện như sau:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} \quad (5.1)$$

ở đây \vec{F} là tổng hợp lực tác dụng lên vật, \vec{a} là gia tốc của vật có được do tác dụng của lực \vec{F} . Phương trình (5.1) còn gọi là định lý biến thiên động lượng [9].

Tích số của khối lượng và vận tốc của một vật được gọi là động lượng *tuyến tính* hay đơn giản là động lượng của vật. Động lượng của một vật rắn có khối lượng m chuyển động với vận tốc \vec{v} là $m\vec{v}$. Do đó định luật Newton thứ hai thể hiện trong phương trình (5.1) có thể được phát biểu như sau: Tốc độ thay đổi động lượng của một vật bằng tổng hợp lực tác dụng lên vật. Hệ quả của định luật thứ hai Newton là: Động lượng của một hệ thống không đổi khi tổng hợp lực tác dụng lên nó bằng 0, khi đó động lượng của hệ thống được bảo toàn. Điều này còn được gọi là nguyên lý bảo toàn động lượng. Nguyên lý này là một công cụ rất hữu ích khi phân tích va chạm giữa những quả bóng; giữa bóng và vợt, ...; giữa các nguyên tử hoặc các hạt hạ nguyên tử; trao đổi động lượng trong các vụ nổ xảy ra trong khi phóng các tên lửa và bắn đạn súng.... Ví dụ, tổng động lượng của một khẩu súng và viên đạn phải bằng không sau khi bắn vì nó bằng 0 trước khi bắn, do đó khẩu súng phải có một động lượng tương đương với viên đạn theo hướng ngược lại để tổng véc tơ của cả hai là bằng 0.

Lưu ý rằng động lượng, gia tốc, vận tốc và lực là các đại lượng véc tơ, như vậy chúng được xác định bởi hướng và độ lớn. Ngoài ra, động lượng là tích của vận tốc với một đại lượng vô hướng do đó động lượng là véc tơ có hướng trùng với hướng của vận tốc. Một phương trình véc tơ bất kỳ có thể được viết ở dạng vô hướng theo một hướng cho trước bằng sử dụng độ lớn hình chiếu của các véc tơ, ví dụ, $F_x = ma_x = d(mv_x)/dt$ là phương trình (5.1) viết theo hướng x .

Đối với vật thể quay xung quanh một trục, định luật thứ hai của Newton có dạng $\vec{M} = I\vec{\alpha}$, trong đó \vec{M} là mô-men quay (xoắn), I là mô-men quán tính của vật đối với trục quay và $\vec{\alpha}$ là gia tốc góc. Phương trình này còn có thể được biểu diễn theo tốc độ thay đổi của mô-men động lượng $d\vec{H}/dt$ như sau:

$$\vec{M} = I\vec{\alpha} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} = \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (5.2)$$

ở đây $\vec{\omega}$ là vận tốc góc. Đối với một vật rắn quay xung quanh trục x cố định, phương trình mô-men động lượng có thể được viết ở dạng vô hướng như sau:

$$M_x = I_x \frac{d\omega_x}{dt} = \frac{dH_x}{dt} \quad (5.3)$$

Vì vậy, phương trình mô-men động lượng có thể được phát biểu như sau: *tốc độ thay đổi của mô-men động lượng của một vật có giá trị bằng với mô-men xoắn tác dụng lên vật*. Phương trình (5.2) còn gọi là định lý biến thiên mô-men động lượng [9].

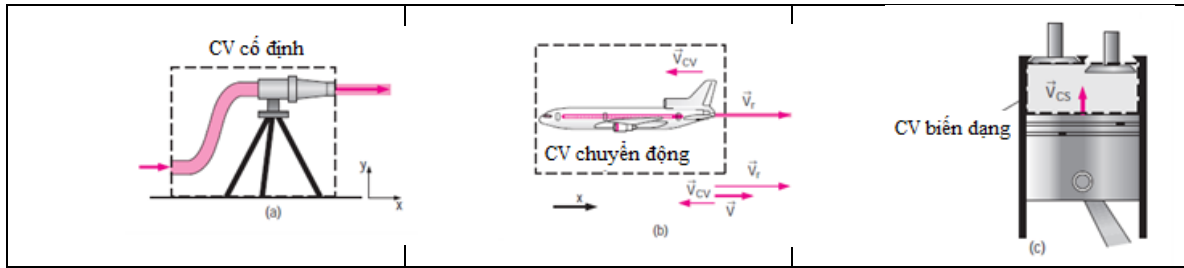
Tổng mô-men động lượng của một vật quay là không đổi khi mô-men xoắn tác dụng lên nó bằng 0, khi đó mô-men động lượng của hệ thống được bảo toàn. Điều này được gọi là nguyên lý bảo toàn mô-men động lượng và là tương đương với $I\vec{\omega}$ không thay đổi. Nhiều hiện tượng thú vị quan sát thấy có thể được giải thích một cách dễ dàng nhờ nguyên lý bảo toàn mô-men xoắn, như trường hợp người trượt băng nghệ thuật quay nhanh hơn khi họ thu tay lại gần cơ thể hoặc các cầu thủ nhảy cầu quay nhanh hơn khi họ cuộn tròn sau khi nhảy (trong cả hai trường hợp, mô men quán tính I là giảm khi các bộ phận của cơ thể trở nên gần với trục quay hơn và do đó vận tốc góc $\vec{\omega}$ tăng).

5.2. Thể tích khối chế

5.2.1. Lựa chọn thể tích khối chế

Bây giờ chúng ta sẽ thảo luận ngắn gọn về cách chọn một thể tích khối chế phù hợp. Một thể tích khối chế được lựa chọn có thể là một vùng bất kỳ trong không gian có dòng chảy chất lỏng chảy qua, bề mặt biên của nó có thể cố định, di chuyển, thậm chí bị làm biến dạng trong dòng chảy. Việc áp dụng một định luật bảo toàn đơn giản chỉ là một thủ tục thống kê thông lượng vào và ra qua mặt biên, chính vì vậy các mặt biên của thể tích khối chế cần được xác định chính xác. Đây là vấn đề vô cùng quan trọng trong phân tích dòng chảy bằng phương pháp thể tích khối chế. Ngoài ra, thông lượng của bất kỳ đại lượng nào vào hoặc ra khỏi thể tích khối chế phụ thuộc vào vận tốc tương đối của dòng chảy so với bề mặt khối chế, do đó cần biết rõ thể tích khối chế là đứng yên hay chuyển động.

Đối với các hệ thống dòng chảy liên quan đến những bề mặt cố định, hệ thống này được phân tích tốt nhất khi sử dụng thể tích khối chế cố định. Ví dụ, khi xác định phản lực tác dụng lên giá đỡ vòi phun nước, sự lựa chọn tự nhiên cho thể tích khối chế với một mặt biên vuông góc với dòng chảy tại cửa vòi phun và một mặt đi qua dưới các chân giá đỡ (Hình 5.4a). Đây là một thể tích khối chế cố định, trong đó vận tốc nước so với một điểm cố định trên mặt đất là bằng với vận tốc nước so với mặt phẳng cửa ra của vòi phun.



Hình 5.4 Ví dụ về các loại thể tích khống chế (CV)

Khi phân tích các hệ thống dòng chảy đang di chuyển hoặc biến dạng, thường thuận tiện hơn nếu sử dụng thể tích khống chế chuyển động hoặc biến dạng. Ví dụ, khi xác định lực đẩy của động cơ phản lực của máy bay đang bay ở vận tốc không đổi, sự lựa chọn khôn ngoan cho thể tích khống chế là thể tích chứa máy bay có mặt biên cắt sau đuôi máy bay (Hình 5.4b). Thể tích khống chế trong trường hợp này di chuyển với vận tốc \vec{V}_{CV} là vận tốc bay của máy bay so với một điểm cố định trên mặt đất. Khi xác định lưu lượng dòng khí qua ống phụt, vận tốc sử dụng là vận tốc của khí thải so với miệng ống phụt, đó chính là vận tốc tương đối \vec{V}_r . Bởi vì toàn bộ thể tích khống chế chuyển động với vận tốc \vec{V}_{CV} , vận tốc tương đối là $\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_{CV}$, ở đây \vec{V} là vận tốc tuyệt đối của khí thải, tức là vận tốc tương đối đối với một điểm cố định trên mặt đất. Lưu ý rằng \vec{V}_r là vận tốc chất lỏng trong hệ tọa độ chuyển động cùng với thể tích khống chế. Ngoài ra, đây là phương trình véc tơ và vận tốc theo hướng ngược nhau là có dấu ngược lại. Ví dụ, nếu máy bay đang bay với vận tốc 500 km/h sang bên trái, vận tốc của khí thải là 800 km/h so với mặt đất thì vận tốc của khí so với cửa ống phụt là:

$$\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_{CV} = 800\vec{i} - (-500\vec{i}) = 1300\vec{i} \text{ km/h}$$

Như vậy, khí thải ra khỏi ống phụt với vận tốc 1300 km/h so với cửa ống phụt (theo hướng ngược lại với máy bay); vận tốc này cần được sử dụng khi tính toán dòng chảy khí thải qua mặt biên của thể tích khống chế (Hình 5.4b).

Khi phân tích khí thải ra từ động cơ đốt trong, sự lựa chọn khôn ngoan cho thể tích khống chế là không gian giữa mặt đầu piston và mặt đầu xi lanh (Hình 5.4c). Đây là một thể tích khống chế biến dạng, do một phần của bề mặt biên di chuyển tương đối so với các thành phần khác. Vận tốc tương đối cho cửa vào hoặc cửa ra trên bề mặt biên biến dạng được cho bởi $\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_{CS}$ ở đây \vec{V} là vận tốc tuyệt đối của chất lỏng và \vec{V}_{CS} là vận tốc của bề mặt biên, cả hai đều so với một điểm cố định trên thể tích khống chế. Lưu ý rằng $\vec{V}_{CS} = \vec{V}_{CV}$ cho thể tích khống chế chuyển động không biến dạng và $\vec{V}_{CS} = \vec{V}_{CV} = 0$ cho thể tích khống chế cố định.

5.2.2. Lực tác dụng lên thể tích khống chế

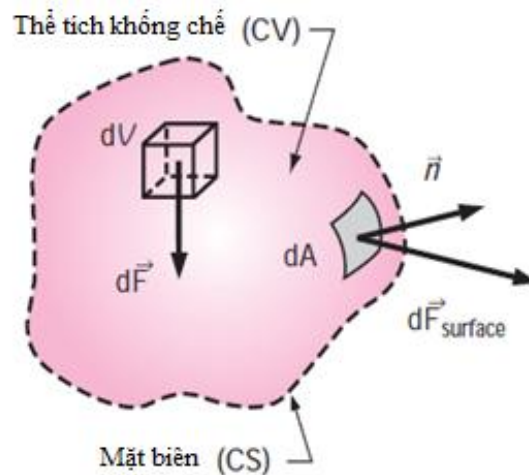
Các lực tác dụng lên một thể tích khống chế bao gồm các lực khối tác dụng lên mọi điểm trong thể tích khống chế (như trọng lực, lực điện trường và lực từ trường) và các lực tác dụng lên bề mặt biên (như áp lực do áp suất, các lực nhớt và phản lực tại các mặt tiếp xúc).

Trong phân tích thể tích khối chế, tổng của tất cả các lực tác dụng lên thể tích khối chế tại một thời điểm cụ thể được biểu diễn bởi $\Sigma \vec{F}$ như sau:

$$\Sigma \vec{F} = \Sigma \vec{F}_{body} + \Sigma \vec{F}_{surface} \quad (5.4)$$

Lực khối tác dụng lên mỗi phần thể tích bất kỳ của tích thể tích khối chế.

Lực khối tác dụng lên một phần tử vi phân thể tích dV trong tích thể tích khối chế được biểu diễn trên Hình 5.5 và cần phải lấy tích phân khối trên toàn bộ thể tích khối chế để thu nhận tổng hợp lực khối tác dụng lên toàn bộ tích thể khối chế.

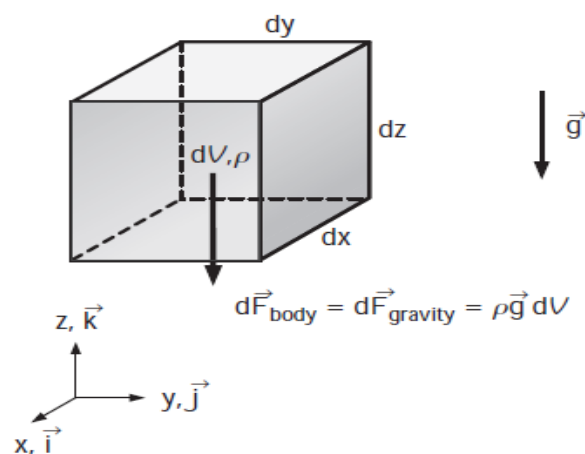


Hình 5.5 Minh họa các lực tác dụng lên thể tích khối chế

Các lực mặt tác dụng lên từng phần của bề mặt biên của thể tích khối chế. Hình 5.5 thể hiện một phần tử vi phân của

mặt biên có diện tích dA và véc tơ pháp tuyến đơn vị bên ngoài \vec{n} cùng với lực mặt tác dụng lên nó. Chúng ta cần phải lấy tích phân mặt trên toàn bộ mặt biên để nhận được tổng hợp lực mặt tác dụng lên mặt biên của thể tích khối chế. Các lực mặt có thể tác dụng theo hướng không trùng với hướng của véc tơ pháp tuyến ngoài.

Các lực khối thường gặp nhất là trọng lực, tác dụng theo hướng xuống dưới lên tất cả các phần tử của thể tích khối chế. Trong khi các lực khối khác, chẳng hạn như các lực điện và điện từ, có thể là quan trọng trong một số vấn đề khác, tuy nhiên ở đây chúng ta sẽ chỉ xem xét đến lực trọng trường. Phần tử vi phân lực khối $d\vec{F}_{body}=d\vec{F}_{gravity}$ tác dụng lên thể tích vi phân dV trên Hình 5.6 chỉ là trọng



Hình 5.6 Lực khối trọng trường tác dụng lên một phần tử vi phân dV

lượng của nó, được xác định như sau :

$$d\vec{F}_{gravity} = \rho \vec{g} dV \quad (5.5)$$

trong đó ρ là mật độ trung bình của phần tử và \vec{g} là vector trọng trường.

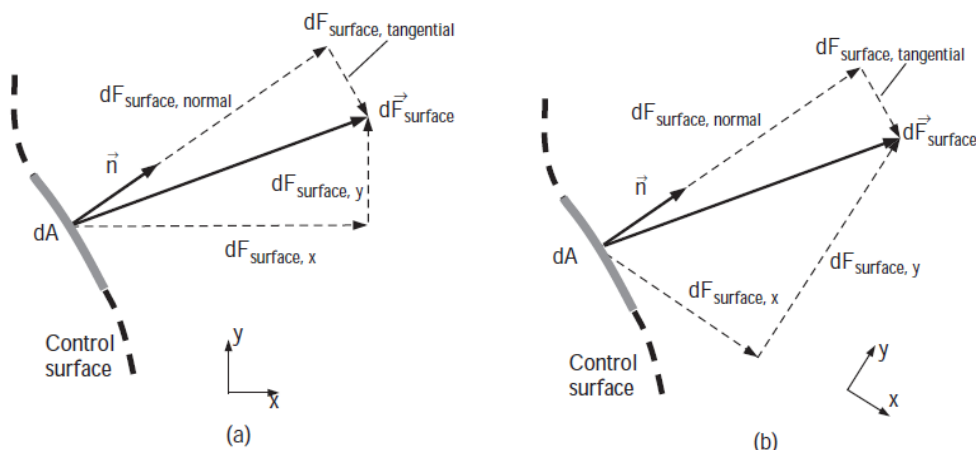
Trong tọa độ Đề các, chúng ta quy ước trọng trường tác dụng ngược hướng với trục z như trong Hình 5.6, do đó:

$$\vec{g} = -g\vec{k} \quad (5.6)$$

Trên trái đất ở mực nước biển, hằng số hấp dẫn g có giá trị bằng 9.807 m/s^2 . Bởi vì lực hấp dẫn là lực khối duy nhất được xem xét, tích phân phương trình (5.5) có dạng:

$$\Sigma \vec{F}_{body} = \int_{CV} \rho \vec{g} dV = m_{CV} \vec{g} \quad (5.7)$$

Không đơn giản để lấy phân tích lực mặt vì chúng bao gồm các thành phần pháp tuyến và tiếp tuyến. Ngoài ra, một lực vật lý tác dụng lên một bề mặt là độc lập với định hướng của hệ tọa độ và các thành phần của lực thay đổi theo định hướng của hệ tọa độ (Hình 5.7). Hơn nữa, chúng ta hiếm khi có đủ may mắn để có mỗi phần tử của bề mặt có hướng trùng với một trong các trục của hệ tọa độ. Chính vì vậy, các tọa độ trong không gian 3 chiều là không đủ để xác định các lực mặt tác dụng lên các mặt khác nhau trong chất lỏng. Mà chúng ta cần phải sử dụng một ten so bậc hai gọi là ten so ứng suất σ_{ij} để mô tả đầy đủ các thành phần ứng suất bề mặt tại một điểm trong dòng chảy.



Hình 5.7 Khi hệ tọa độ quay từ (a) sang (b) các thành phần lực của lực mặt thay đổi

Trong hệ tọa độ Đề các, ten so ứng suất có thể viết dưới dạng:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (5.8)$$

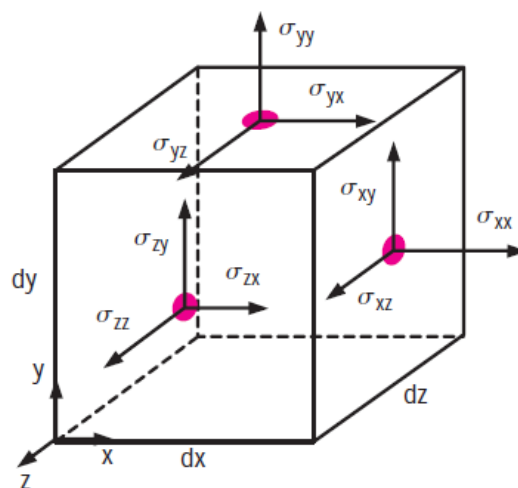
Các thành phần đường chéo của ten so ứng suất, σ_{xx} , σ_{yy} và σ_{zz} , được gọi là ứng suất pháp tuyến; chúng bao gồm áp suất (luôn tác dụng vuông góc với bề mặt) và ứng suất nhót. Các thành phần khác đường chéo, σ_{xy} , σ_{xz} ,..., được gọi là ứng

suất cắt; bởi vì áp suất chỉ có thể tác dụng vuông góc với bề mặt, nên ứng suất cắt được tạo thành hoàn toàn bởi ứng suất nhót.

Trong phương trình (5.8), σ_{ij} là thành phần ứng suất (lực trên một đơn vị diện tích) theo hướng j tác dụng lên một mặt có pháp tuyến theo hướng i . Ví dụ, σ_{xy} được xác định là dương với ứng suất tác dụng theo hướng y lên bề mặt có pháp tuyến theo hướng x . Thành phần này của các ten so ứng suất, cùng với tám thành phần khác, được thể hiện trong Hình 5.8 cho trường hợp của một phần tử vi phân của chất lỏng trong hệ tọa độ Đề các.

Tất cả các thành phần trong Hình 5.8 được thể hiện trên các mặt dương (phải, trên và phía trước) và định hướng dương của chúng theo định nghĩa. Các thành phần ứng suất trên các mặt đối lập của các phần tử chất lỏng (không hiển thị trên hình) có hướng hoàn toàn ngược lại.

Lực tác dụng lên một phần tử vi phân bề mặt có thể được xác định dễ dàng bằng cách sử dụng tích chấm giữa ten so và véc tơ:



Hình 5.8 Các thành phần ten so ứng suất trong hệ tọa độ Đề Các

$$d\vec{F}_{surface} = \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA \quad (5.9)$$

Tổng hợp lực tác dụng lên bề mặt sẽ là:

$$\sum \vec{F}_{surface} = \int_{CS} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA \quad (5.10)$$

Thay các biểu thức (5.7) và (5.10) vào (5.4), chúng ta nhận được :

$$\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_{body} + \sum \vec{F}_{surface} = \int_{CV} \rho \vec{g} dV + \int_{CS} \sigma_{ij} \cdot \vec{n} dA \quad (5.11)$$

Một lựa chọn tốt thể tích khối cho phép chúng ta viết tổng hợp các lực tác dụng lên thể tích khối, $\sum \vec{F}$, là tổng của các đại lượng sẵn có như lực trọng trường, lực áp suất và phản lực. Chúng ta xem xét cách phân tích tổng hợp lực như sau:

$$\underbrace{\sum \vec{F}}_{\text{tổng hợp lực}} = \underbrace{\sum \vec{F}_{gravity}}_{\text{lực khối}} + \underbrace{\sum \vec{F}_{pressure} + \sum \vec{F}_{viscous} + \sum \vec{F}_{other}}_{\text{lực bề mặt}} \quad (5.12)$$

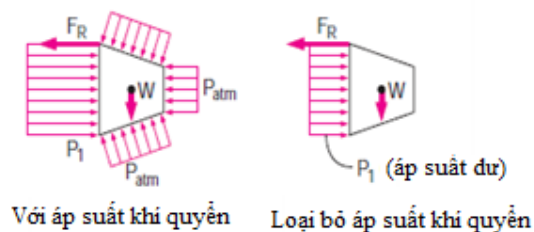
Số hạng đầu tiên bên phải của phương trình (5.12) là trọng lực của vật, bởi vì lực hấp dẫn là lực khối duy nhất được xem xét. Ba số hạng tiếp theo là các lực mặt bao gồm áp lực, lực nhót và các lực "khác". $\sum \vec{F}_{other}$ gồm các phản lực tạo dòng chảy; lực tại bu lông, dây cáp, thanh chống, hoặc các tường thành trên bề mặt kiểm soát....

Tất cả lực mặt xuất hiện khi thể tích khối chế được "cách ly" với môi trường xung quanh và ảnh hưởng của đối tượng bị "cách ly" được thay thế bởi một lực tại vị trí đó. Chúng ta nên chọn thể tích khối chế sao cho các lực không quan tâm ẩn bên trong để không làm phức tạp quá trình phân tích. Một thể tích khối chế được lựa chọn tốt chỉ cho thấy các lực cần phải xác định (chẳng hạn như phản lực) và một số lượng tối thiểu của các lực khác.

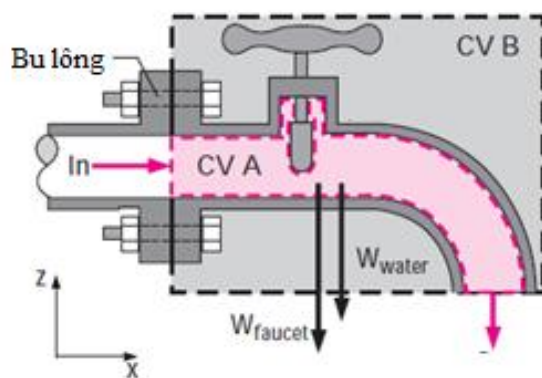
Một đơn giản hóa phổ biến khi áp dụng định luật hai Newton là loại bỏ áp suất khí quyển và làm việc với áp suất dư. Điều này có được là do áp suất khí quyển tác dụng theo tất cả các hướng và ảnh hưởng của nó bị triệt tiêu (Hình 5.9). Như vậy chúng ta cũng có thể bỏ qua áp lực ở phần cửa ra khi chất lỏng được xả vào khí quyển bởi vì áp suất tại đó rất gần với áp suất khí quyển (trong trường hợp khi vận tốc là dưới âm).

Chúng ta xem xét phân tích thể tích khối chế cho bài toán nước chảy qua một vòi nước với van đóng một phần (Hình 5.10) như một ví dụ làm thế nào để chọn thể tích khối chế một cách khôn ngoan. Cần tính toán tổng hợp lực tác dụng lên mặt bích để đảm bảo rằng các bu lông mặt bích là đủ chắc. Có rất nhiều lựa chọn tốt cho thể tích khối chế. Các kỹ sư có thể chọn thể tích khối chế là bản thân chất lỏng, như được chỉ ra bởi CV A. Với thể tích khối chế

này các lực tác dụng lên thể tích khối chế bao gồm: áp lực thay đổi dọc theo bề mặt khối chế, lực nhót dọc theo thành ống và tại các điểm bên trong van và lực khối, cụ thể là, trọng lượng của nước trong thể tích khối chế. Tuy nhiên, để tính toán tổng hợp lực trên mặt bích, chúng ta không cần phải tính riêng áp lực và lực nhót dọc theo bề mặt khối chế. Thay vào đó, chúng ta có thể gộp các lực này với nhau thành một phản lực, đại diện cho tổng hợp lực của các bức thành tác dụng lên bề mặt nước. Lực này, cộng với trọng lượng của vòi và nước sẽ cân bằng với tổng hợp lực tác dụng lên mặt bích.



Hình 5.9 Áp suất khí quyển tác dụng lên mọi hướng và ảnh hưởng của nó bị triệt tiêu



Hình 5.10 Minh họa cách chọn thể tích khối chế "khôn ngoan": Thể tích khối chế CV B thuận tiện hơn CV A

Khi lựa chọn một thể tích khống chế, chúng ta không cần giới hạn để nó ở trong lòng chất lỏng. Thường thì là thuận tiện hơn để chọn thể tích khống chế cắt qua các vật thể rắn như tường, thanh chống, hoặc bu lông như minh họa bởi CV B trong Hình 5.10. Thể tích khống chế B là một sự lựa chọn "khôn ngoan" bởi vì chúng ta không quan tâm đến bất kỳ chi tiết của dòng chảy hoặc thậm chí hình học bên trong thể tích khống chế. Đối với trường hợp của CV B, chúng ta chỉ cần xác định *phản lực* tác dụng lên một phần của bề mặt biên cắt qua mặt bích. Vì vậy, điều chúng ta cần phải biết là áp suất dư của nước tại mặt bích (đầu vào của thể tích khống chế), trọng lượng của nước và của vòi. Áp suất ở mọi nơi khác dọc theo bề mặt biên là áp suất khí quyển (áp suất dư bằng 0) tác dụng triệt tiêu lẫn nhau.

5.3. Phương trình nguyên lý động lượng

Định luật thứ hai của Newton cho một hệ thống khối lượng m chịu tác dụng của lực \vec{F} thể hiện như sau:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d}{dt} (m\vec{V}) \quad (5.13)$$

ở đây $m\vec{V}$ là động lượng tuyến tính của hệ thống. Cần lưu ý rằng cả hai mật độ và vận tốc có thể thay đổi từ điểm này sang điểm khác trong hệ thống, do đó định luật thứ hai của Newton cần được biểu diễn ở dạng tổng quát hơn ở dạng tích phân như sau:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{sys} \rho \vec{V} dV \quad (5.14)$$

ở đây $\delta m = \rho dV$ là khối lượng của phần tử dV và $\rho \vec{V} dV$ là động lượng của nó. Định luật thứ hai của Newton có thể được phát biểu như sau: tổng của tất cả các lực ngoài tác dụng lên một hệ thống bằng với tốc độ thay đổi động lượng tuyến tính của hệ thống.

Định luật này được áp dụng trong hệ tọa độ cố định hoặc di chuyển với vận tốc không đổi, được gọi là *hệ quy chiếu quán tính*.

Sử dụng định lý vận chuyển Reynolds [2] với $b = \vec{V}$, $B = m\vec{V}$ (Hình 5.11), chúng ta nhận được:

Hình 5.11 Thay thế b và B trong định lý vận chuyển Reynolds cho phương trình động lượng

$$\frac{d(m\vec{V})_{sys}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \vec{V} dV + \int_{CS} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (5.15)$$

Từ phương trình (5.13) ta nhận được dạng tổng quát của phương trình mô-men động lượng tuyến tính áp dụng cho thể tích khối chế cố định, di chuyển, hoặc biến dạng:

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \vec{V} dV + \int_{CS} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (5.16)$$

ở đây $\vec{V}_r = \vec{V} - \vec{V}_{CS}$ là vận tốc chất lỏng so với bề mặt biên của thể tích khối chế. Tích số $\rho(\vec{V}_r \cdot \vec{n})dA$ đại diện cho thông lượng khối lượng vào hoặc ra khỏi thể tích khối chế qua diện tích dA .

Đối với thể tích khối chế cố định, $\vec{V}_r = \vec{V}$, do đó:

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \vec{V} dV + \int_{CS} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (5.17)$$

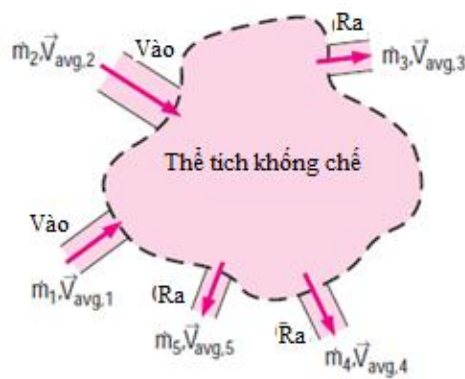
Trong hầu hết các trường hợp lực \vec{F} bao gồm trọng lượng, áp lực, và các phản lực. Phương trình nguyên lý động lượng thường được sử dụng để tính toán các lực gây ra bởi dòng chảy.

5.3.1. Các trường hợp đặc biệt

Trong dòng chảy ổn định, động lượng bên trong thể tích khối chế là không đổi, do đó tốc độ thay đổi của động lượng của thể tích khối chế (số hạng thứ hai của phương trình (5.16)) là bằng 0. Do đó ta có:

$$\Sigma \vec{F} = \int_{CS} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (5.18)$$

Phương trình (5.17) là tổng quát cho một thể tích khối chế cố định, tuy nhiên nó không thuận lợi để giải quyết các vấn đề kỹ thuật thực tế vì có các dấu tích các tích phân. Thay vào đó, như chúng ta đã làm với phương trình bảo toàn khối lượng, chúng ta sẽ viết lại phương trình (5.17) theo vận tốc và lưu lượng trung bình qua các cửa vào và ra của thể tích khối chế. Trong nhiều ứng dụng thực tế, chất lỏng đi qua mặt biên của thể tích khối chế qua một hoặc nhiều cửa vào ra và



Hình 5.13 Thể tích khối chế có thể bao gồm nhiều cửa vào ra trên mặt biên

động lượng được trao đổi với bên ngoài qua các cửa đó. Để đơn giản, chúng ta vẽ mặt biên của thể tích khối chế bao gồm những mặt cắt vuông góc với dòng chảy tại các cửa vào và cửa ra của chất lỏng (Hình 5.13).

Lưu lượng khối lượng \dot{m} vào hoặc ra khỏi thể tích khối chế qua một cửa vào hoặc cửa ra với mật độ ρ là hằng số được xác định như sau:

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \rho V_{avg} A_c \quad (5.19)$$

Nếu phân bố vận tốc tại các cửa vào ra là đều ($\vec{V} = \vec{V}_{avg}$), động lượng tại đó được xác định bởi:

$$\int_{A_c} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA = \rho V_{avg} A_c \vec{V}_{avg} = \dot{m} \vec{V}_{avg} \quad (5.20)$$

Xấp xỉ phân bố vận tốc đều có thể áp dụng trong nhiều trường hợp trong thực tế: tại các cửa vào, cửa ra đã được làm tròn, trong các tia chất lỏng phun ra ngoài không khí ...

5.3.2. Hệ số hiệu chỉnh động lượng β

Trong thực tế, vận tốc tại hầu hết các cửa vào, cửa ra trong kỹ thuật là không có phân bố đều. Tuy nhiên, chúng ta vẫn có thể chuyển đổi tích phân trên bề mặt biên của phương trình (5.17) thành dạng đại số thông qua một hệ số hiệu chỉnh β , được gọi là *hệ số hiệu chỉnh động lượng*, được đề xuất đầu tiên bởi nhà khoa học người Pháp Joseph Boussinesq (1842-1929). Theo đó, dạng đại số của phương trình (5.17) cho một thể tích khối chế cố định được viết như sau:

$$\Sigma \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \vec{V} dV + \Sigma_{out} \beta \dot{m} \vec{V}_{avg} - \Sigma_{in} \beta \dot{m} \vec{V}_{avg} \quad (5.21)$$

ở đây một giá trị duy nhất của hệ số hiệu chỉnh động lượng được áp dụng cho mỗi cửa vào và cửa ra trên bề mặt biên. Lưu ý rằng $\beta=1$ cho trường hợp của dòng chảy đều. Đối với trường hợp tổng quát, chúng ta xác định β sao cho:

$$\int_{A_c} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA_c = \beta \dot{m} \vec{V}_{avg} \quad (5.22)$$

Trong trường hợp mật độ là không đổi tại các cửa vào hoặc cửa ra và \vec{V} là cùng hướng với \vec{V}_{avg} , từ phương trình (5.22) chúng ta có:

$$\beta = \frac{\int_{A_c} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA_c}{\dot{m} \vec{V}_{avg}} = \frac{\int_{A_c} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA_c}{\rho V_{avg} A_c A_{avg}} \quad (5.23)$$

Trong trường hợp mặt biên vuông góc với hướng dòng chảy, chúng ta có $(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA_c = V dA_c$, (5.23) đơn giản thành:

$$\beta = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} \left(\frac{V}{V_{avg}} \right)^2 dA_c \quad (5.24)$$

Có thể nhận thấy rằng với phân bố vận tốc bất kỳ, $\beta > 1$.

5.3.3. Ví dụ 5.1: Hệ số hiệu chỉnh động lượng cho dòng chảy tầng

Xem xét dòng chảy tầng chảy trong ống trụ tròn. Có thể chỉ ra rằng phân bố vận tốc trong mặt cắt ngang có dạng parabol (Hình 5.15), với thành phần vận tốc dọc trục là:

$$V = 2V_{avg} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (1)$$

trong đó R là bán kính bên trong của ống và V_{avg} là vận tốc trung bình. Tính hệ số hiệu chỉnh động lượng qua một mặt cắt ngang của đường ống đại diện cho một cửa ra của thể tích khống chế, như trên Hình 5.15.

Vấn đề: Tính hệ số hiệu chỉnh động lượng với phân bố vận tốc cho trước.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là không nén được và ổn định; (2) Thể tích khống chế có mặt biên vuông góc với trục ống như vẽ trên Hình 5.15.

Phân tích: Chúng ta thay thế biểu thức vận tốc cho trước vào phương trình (5.24) và lấy tích phân, lưu ý rằng $dA_c = 2\pi r dr$

$$\beta = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} \left(\frac{V}{V_{avg}} \right)^2 dA_c = \frac{4}{\pi R^2} \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2 dr \quad (2)$$

Định nghĩa biến mới $y = 1 - r^2/R^2$, từ đó $dy = -2r dr/R^2$. Thực hiện tích phân, ta nhận được giá trị của hệ số điều chỉnh động lượng:

$$\beta = -4 \int_1^0 y^2 dy = -4 \left[\frac{y^3}{3} \right]_1^0 = \frac{4}{3} \quad (3)$$

Thảo luận: Chúng ta xác định được hệ số β cho cửa ra của thể tích khống chế. Tuy nhiên, trong trường hợp tương tự, hệ số β là như nhau đối với cửa vào của thể tích khống chế.

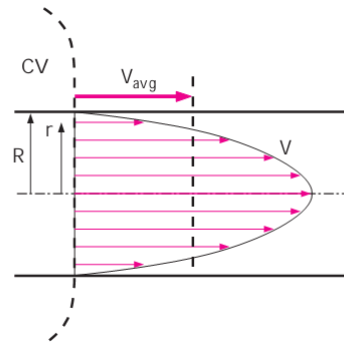
Từ ví dụ 5.1, chúng ta thấy rằng β không phải là rất gần giá trị 1 đối với dòng chảy tầng và việc bỏ qua β có thể có dẫn đến sai số lớn. Tuy nhiên đối với dòng chảy rối, có thể chỉ ra rằng β có giá trị trong khoảng 1.01-1.04. Bởi vì giá trị này rất gần 1, vì vậy có thể bỏ qua hệ số hiệu chỉnh động lượng trong dòng chảy rối.

5.4. Ứng dụng của nguyên lý động lượng

Nếu dòng chảy là ổn định, đạo hàm theo thời gian trong phương trình (5.11) triệt tiêu, chúng ta có :

$$\sum \vec{F} = \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V} \quad (5.25)$$

Để đơn giản, ở đây chúng ta đã bỏ chỉ số "avg" cho vận tốc trung bình. Phương trình (5.25) chỉ ra rằng tổng hợp lực tác dụng lên thể tích khống chế trong dòng chảy ổn định bằng hiệu số giữa thông lượng động lượng đi ra và đi vào. Lưu ý rằng phương trình (5.25) là phương trình véc tơ vì vậy có thể được áp dụng cho bất kỳ hướng nào.



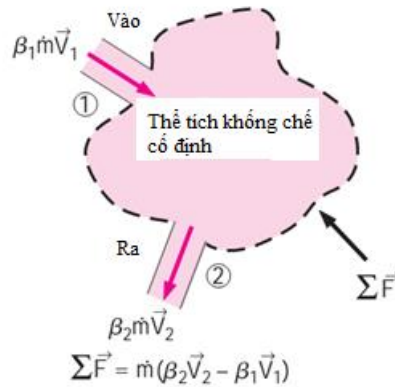
Hình 5.15 Phân bố vận tốc trong dòng chảy tầng trong ống trụ tròn

5.4.1. Lưu lượng ổn định với hệ thống một cửa vào và một cửa ra

Nhiều vấn đề thực tiễn liên quan đến hệ thống với một cửa vào và một cửa ra (Hình 5.17). Lưu lượng khối lượng tại cửa ra và cửa vào cho hệ thống *đơn dòng* là như nhau và phương trình (5.25) đơn giản thành:

$$\Sigma \vec{F} = \dot{m}(\beta_2 \vec{V}_2 - \beta_1 \vec{V}_1) \quad (5.26)$$

ở đây chúng ta áp dụng quy ước thông thường, theo đó chỉ số 1 ký hiệu cửa vào và chỉ số 2 là cửa ra.



Hình 5.17

Cần nhấn mạnh một lần nữa rằng phương trình (5.26) là phương trình dạng véc tơ và phương trình này có thể được viết cho hình chiếu của các véc tơ trên một trục bất kỳ. Ví dụ, phương trình (5.26) có thể được viết theo các tọa độ trên trục x là:

$$\Sigma F_x = \dot{m}(\beta_2 V_{2,x} - \beta_1 V_{1,x}) \quad (5.27)$$

5.4.2. Dòng chảy không có ngoại lực tác dụng

Một tình huống thú vị xảy ra khi không có các lực bên ngoài như trọng lượng, áp suất và phản lực tác dụng vật thể - đây là tình huống chung cho các phương tiện không gian và vệ tinh. Đối với một thể tích khối chế nhiều cửa, phương trình (5.21) đơn giản thành:

$$0 = \frac{d(m\vec{V})_{CV}}{dt} + \Sigma_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \Sigma_{in} \beta \dot{m} \vec{V} \quad (5.28)$$

Đây là một biểu thức của nguyên lý bảo toàn động lượng khi không có các lực lượng bên ngoài. Tốc độ thay đổi của động lượng của một thể tích khối chế bằng hiệu giữa thông lượng động lượng vào và ra.

Khi khối lượng m của thể tích khối chế gần như hằng số, số hạng đầu tiên của phương trình (5.28) đơn giản thành tích của khối lượng và gia tốc. Do đó, thể tích khối chế trong trường hợp này có thể được coi như một vật thể rắn, với một tổng hợp lực hay lực đẩy xác định như sau:

$$\vec{F}_{body} = m_{body} \vec{a} = \Sigma_{in} \beta \dot{m} \vec{V} - \Sigma_{out} \beta \dot{m} \vec{V} \quad (5.29)$$

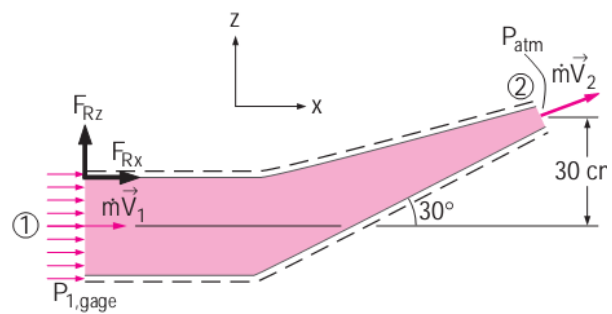
tác dụng lên vật thể. Bằng cách tiếp cận này, chúng ta có thể xác định gia tốc của phương tiện không gian khi được phóng lên bằng một tên lửa (Hình 5.19).



Hình 5.19 Lực đẩy cho tàu không gian có thể được xác định bằng nguyên lý động lượng

5.4.3. Ví dụ 5.2: Lực tác dụng lên đường ống gấp khúc khúc hướng dòng

Một ống gấp khúc được sử dụng để hướng dòng chảy với lưu lượng 14 kg/s trong một ống nằm ngang lên trên 30° (Hình 5.20). Ống xả nước vào khí quyển. Diện tích mặt cắt ngang của ống là 113 cm² ở đầu vào và 7 cm² tại đầu ra. Chênh lệch độ cao giữa các cửa là 30 cm. Trọng lượng của ống gấp khúc



Hình 5.20 Sơ đồ cho Ví dụ 5.2

và nước ở trong đó được coi là không đáng kể. Xác định (a) áp suất dư ở đầu vào của ống gấp khúc và (b) lực cần thiết để giữ ống gấp khúc cố định.

Vấn đề: Một ống gấp khúc hướng dòng nước lên trên và thải với khí quyển. Xác định áp suất ở đầu vào của ống và lực cần thiết để giữ cho ống ở vị trí cố định.

Giả thiết: (1) Dòng chảy ổn định và các hiệu ứng ma sát là không đáng kể; (2) Trọng lượng của ống gấp khúc và nước trong nó là không đáng kể; (3) Nước được xả vào khí quyển, do đó áp suất dư tại đầu ra là 0; (4) Dòng chảy là rối và đã phát triển hoàn toàn ở cả đầu vào và đầu ra, do đó chúng ta có thể lấy hệ số điều chỉnh động lượng là 1.03.

Tính chất: Lấy mật độ của nước là 1000 kg/m³.

Phân tích: (a) Lấy ống gấp khúc làm thể tích khống chế và ký hiệu đầu vào bằng chỉ số 1 và đầu ra là chỉ số 2. Lấy hệ tọa độ (x,z) như trên Hình (5.19). Phương trình liên tục cho hệ thống một đầu vào, một lối ra với dòng chảy ổn định là $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = 14 \text{ kg/s}$. Với $\dot{m} = \rho AV$, vận tốc tại các cửa vào và ra được xác định như sau:

$$V_1 = \frac{\dot{m}}{\rho A_1} = \frac{14 \text{ kg/s}}{(1000 \text{ kg/m}^3)(0.0113 \text{ m}^2)} = 1.24 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{\dot{m}}{\rho A_2} = \frac{14 \text{ kg/s}}{(1000 \text{ kg/m}^3)(7 \times 10^{-4} \text{ m}^2)} = 20 \text{ m/s}$$

Viết phương trình Bernoulli từ điểm 1 đến điểm 2 và thay các đại lượng đã biết vào phương trình, ta có:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

$$P_1 - P_2 = \rho g \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + z_2 - z_1 \right)$$

Hay

$$P_1 - P_{atm} = \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) (9.81 \text{ m/s}^2) \times \left(\frac{(20 \text{ m/s})^2 - (1.24 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} + 0.3 - 0 \right) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right)$$

Vậy:

$$P_{1, \text{gage}} = 202.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 202.2 \text{ kPa}$$

(b) Phương trình động lượng cho dòng chảy một chiều ổn định có dạng:

$$\sum \vec{F} = \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V}$$

Viết phương trình này theo các trục x và z ta có:

$$F_{Rx} + P_{1, \text{gage}} A_1 = \beta \dot{m} V_2 \cos \theta - \beta \dot{m} V_1$$

$$F_{Rz} = \beta \dot{m} V_2 \sin \theta$$

Từ đó ta tìm được:

$$F_{Rx} = \beta \dot{m} (V_2 \cos \theta - V_1) - P_{1, \text{gage}} A_1$$

$$= 1.03 (14 \text{ kg/s}) [(20 \cos 30^\circ - 1.24) \text{ m/s}] - \left(202,200 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) (0.0113 \text{ m}^2)$$

$$= 232 - 2285 = -2053 \text{ N}$$

$$F_{Rz} = \beta \dot{m} V_2 \sin \theta = (1.03) \left(14 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) (20 \sin 30^\circ \text{ m/s}) = 144 \text{ N}$$

Kết quả cho F_{Rx} giá trị âm chỉ ra rằng F_{Rx} tác dụng ngược chiều so với trục x .

Thảo luận: Có phân bố áp suất khác 0 dọc theo thành bên trong ống gấp khúc, nhưng bởi vì thể tích khối chế nằm ngoài ống cho nên những áp suất này không cần tính đến. Giá trị thực tế của P_1 sẽ cao hơn so với giá trị đã tính ở đây vì tổn thất ma sát trong đường ống đã bị bỏ qua.

5.4.4. Ví dụ 5.3: Lực tác dụng lên đường ống hình chữ U

Ống gấp khúc trong Ví dụ 5.2 được thay thế bằng một ống hình chữ U như thể hiện trên Hình 5.21. Chênh lệch độ cao giữa các tâm của cửa vào và cửa ra là 0.3 m. Xác định lực neo cần thiết để giữ cho ống cố định.

Phân tích: Các giá trị vận tốc chất lỏng tại cửa vào, cửa ra và áp suất tại cửa vào có giá trị như trong ví dụ 5.2. Thành phần lực theo phương thẳng đứng $F_{Rz}=0$ vì

bỏ qua trọng lượng của ống và nước trong ống. Thành phần lực theo phương x được xác định theo phương trình:

$$F_{Rx} + P_{1,gage} A_1 = \beta_2 \dot{m}(-V_2) - \beta_1 \dot{m}V_1 = -\beta \dot{m}(V_2 - V_1)$$

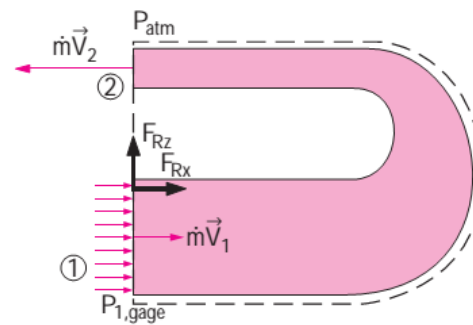
Giải cho F_{Rx} và thay số vào, ta nhận được:

$$\begin{aligned} F_{Rx} &= -\beta \dot{m}(V_2 + V_1) - P_{1,gage} A_1 \\ &= -(1.03) \left(14 \frac{kg}{s} \right) \left[\frac{(20 + 1.24)m}{s} \right] \left(\frac{1 N}{1 kg \cdot \frac{m}{s^2}} \right) \\ &\quad - (202,200 \frac{N}{m^2})(0.0113 m^2) = -306 - 2285 = -2591 N \end{aligned}$$

Như vậy lực tác dụng lên đoạn ống hình chữ U là 2591 N ngược hướng với trục x (ống chữ U bị đẩy ra khỏi đường ống). Như vậy khớp (bu lông hoặc ren) nối đoạn ống chữ U với đường ống phải đủ khỏe để giữ đoạn ống cố định.

Thảo luận: Lực tác dụng lên đoạn ống hình chữ U lớn hơn lực tác dụng lên đoạn ống gấp khúc ở Ví dụ 5.2 bởi vì dòng chảy phải "quay" một góc lớn hơn. Trong trường hợp ống thẳng, lực tác dụng sẽ là nhỏ nhất và được xác định theo phương trình:

$$F_{Rx} + P_{1,gage} A_1 = \beta \dot{m}V_2 - \beta \dot{m}V_1 \rightarrow F_{Rx} = \beta \dot{m}(V_2 - V_1) - P_{1,gage} A_1$$

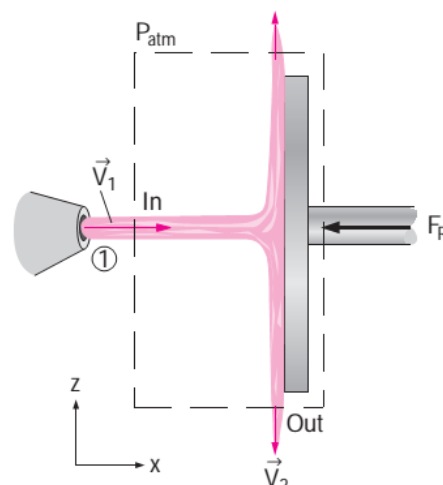


Hình 5.21 Sơ đồ cho Ví dụ 5.3

5.4.5. Ví dụ 5.4: Lực tác dụng của tia nước tác dụng lên tấm phẳng

Nước được tăng tốc bởi một vòi phun đến tốc độ trung bình 20 m/s và đập vào một tấm thẳng đứng yên với lưu lượng 10 kg/s và vận tốc thẳng góc là 20 m/s (Hình 5.22). Sau khi đập vào mặt tấm, dòng nước dàn đều theo tất cả các hướng trên mặt phẳng của tấm. Xác định lực cần thiết để giữ tấm đứng yên.

Vấn đề: Một tia nước đập vào một tấm phẳng đứng yên theo hướng vuông góc. Xác định lực cần thiết để giữ tấm phẳng cố định.



Hình 5.22 Sơ đồ cho Ví dụ 5.4

Giả thiết: (1) Dòng chảy của nước ở cửa ra vòi phun là ổn định; (2) Nước phân tán trên tấm phẳng theo hướng vuông góc với hướng tiếp cận của tia nước; (3) Các tia nước được tiếp xúc với không khí, do đó áp suất của tia nước và dòng nước dàn trên tấm phẳng khi ra khỏi thể tích khống chế là áp suất khí quyển, lực tác dụng do áp suất khí quyển có thể bỏ qua vì nó tác dụng lên toàn bộ hệ thống; (4) Các lực thẳng đứng và động lượng trên tấm phẳng là không ảnh hưởng đến phản lực theo phương nằm ngang; (5) Hệ số hiệu chỉnh động lượng $\beta=1$.

Phân tích: Chúng ta chọn thể tích khống chế cho bài toán sao cho nó bao toàn bộ tấm phẳng và cắt tia nước vuông góc. Phương trình nguyên lý động lượng cho bài toán có dạng:

$$\sum \vec{F} = \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V}$$

Viết phương trình cho trục x (cần chú ý đến dấu của các thành phần lực và vận tốc theo trục x) và lưu ý rằng $V_{1,x} = V_1$ và $V_{2,x} = 0$, ta nhận được:

$$-F_R = 0 - \beta \dot{m} V$$

Từ đó:

$$F_R = \beta \dot{m} V = (1) \left(10 \frac{kg}{s} \right) \left(20 \frac{m}{s} \right) \left(\frac{1 N}{1 kg \cdot \frac{m}{s^2}} \right) = 200 N$$

Vậy phải tác dụng một lực 200 N (tương đương với trọng lượng của khối lượng 20 kg) theo phương nằm ngang ngược chiều với hướng trục x (hướng ngược lại chiều của tia) để giữ tấm phẳng cố định.

5.4.6. Ví dụ 5.5: Công suất phát điện và tải trọng gió của tua bin gió

Một máy phát điện gió với đường kính cánh 30 ft làm việc với tốc độ gió tối thiểu là 7 mph, khi đó tua bin có công suất phát điện là 0.4 kW (Hình 5.23). Xác định (a) hiệu suất của hệ thống tua bin-máy phát điện và (b) xác định lực nằm ngang tác dụng bởi gió lên cột của tua bin gió. Tính công suất phát điện và lực tác dụng khi vận tốc gió tăng gấp đôi lên 14 mph. Giả thiết hiệu suất là không đổi và mật độ không khí là 0.076 lbm/ft³.

Vấn đề: Phân tích về công suất và tải trọng gió của một tua bin gió. Xác định hiệu suất của hệ thống và lực tác dụng lên cột đỡ, nghiên cứu ảnh hưởng khi vận tốc gió tăng gấp đôi.

Giả thiết: (1) Dòng gió là ổn định và không nén được; (2) Hiệu suất của tua bin-máy phát điện là không phụ thuộc vào tốc độ gió; (3) Các hiệu ứng ma sát là không đáng kể; (4) Vận tốc trung bình của không khí qua tua bin là bằng với vận tốc gió (trên thực tế, là nhỏ hơn); (5) Dòng gió là đều và do đó hệ số hiệu chỉnh động lượng là $\beta \approx 1$.

Tính chất: Mật độ không khí là 0.076 lbm /ft³.

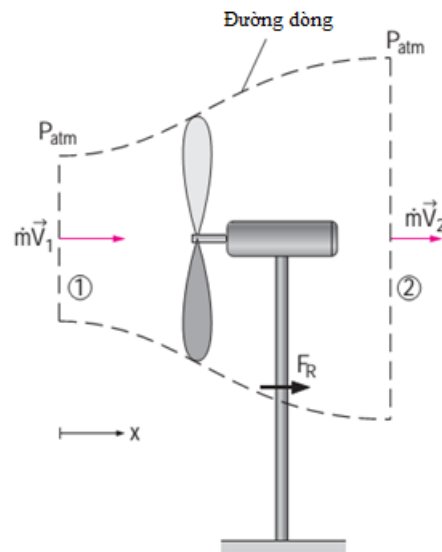
Phân tích: Động năng là một dạng năng lượng cơ học, do đó nó có thể được chuyển đổi sang công cơ học hoàn toàn. Vì vậy, công suất tiềm năng của gió là tỷ lệ thuận với động năng của nó, tức là tỷ lệ thuận $V^2/2$. Công suất tối đa của gió với lưu lượng khối lượng \dot{m} là $\dot{m}V^2/2$. Ta có:

$$V_1 = (7 \text{ mph}) \left(\frac{1.4667 \frac{\text{ft}}{\text{s}}}{1 \text{ mph}} \right) = 10.27 \text{ ft/s}$$

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_1 V_1 \frac{\pi D^2}{4} = \left(0.076 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3} \right) (10.27 \text{ ft/s}) \frac{\pi (30 \text{ ft})^2}{4} = 551.7 \text{ lbm/s}$$

$$\begin{aligned} \dot{W}_{\max} &= \dot{m} k e_1 = \dot{m} \frac{V_1^2}{2} \\ &= \left(551.7 \frac{\text{lbm}}{\text{s}} \right) \frac{(10.27 \text{ ft/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ lbf}}{32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kW}}{737.56 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s}} \right) \\ &= 1.225 \text{ kW} \end{aligned}$$

Vậy, công suất tiềm năng của tuabin gió là 1.225 kW ở tốc độ gió 7 mph. Do đó hiệu suất của hệ thống tua bin-máy phát điện là:



Hình 5.23 Sơ đồ cho Ví dụ 5.5

$$\eta_{wind\ turbine} = \frac{\dot{W}_{act}}{\dot{W}_{max}} = \frac{0.4\ kW}{1.225\ kW} = 0.327 \quad (\text{hay } 32.7\ \%)$$

(b) Các hiệu ứng ma sát được giả thiết là không đáng kể, do đó các phần *động năng đến* không chuyển đổi sang điện mà ra khỏi tua bin gió (được gọi là *động năng đi*). Cần lưu ý rằng lưu lượng khối lượng là không đổi, như vậy vận tốc ra khỏi được xác định như sau:

$$\dot{m}ke_2 = \dot{m}ke_1(1 - \eta_{wind\ turbine}) \rightarrow \dot{m}\frac{V_2^2}{2} = \dot{m}\frac{V_1^2}{2}(1 - \eta_{wind\ turbine})$$

Hay

$$V_2 = V_1\sqrt{1 - \eta_{wind\ turbine}} = (10.27\ \text{ft/s})\sqrt{1 - 0.327} = 8.43\ \text{ft/s}$$

Chọn thể tích khối xung quanh tua bin gió sao hướng gió vuông góc với mặt biên vào và ra và toàn bộ mặt biên ở áp suất khí quyển. Phương trình nguyên lý động lượng cho dòng chảy một chiều ổn định là:

$$\sum \vec{F} = \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V}$$

Viết phương trình này dọc theo trục x và lưu ý rằng $\beta=1$, $V_{1x}=V_1$ và $V_{2x}=V_2$, ta nhận được:

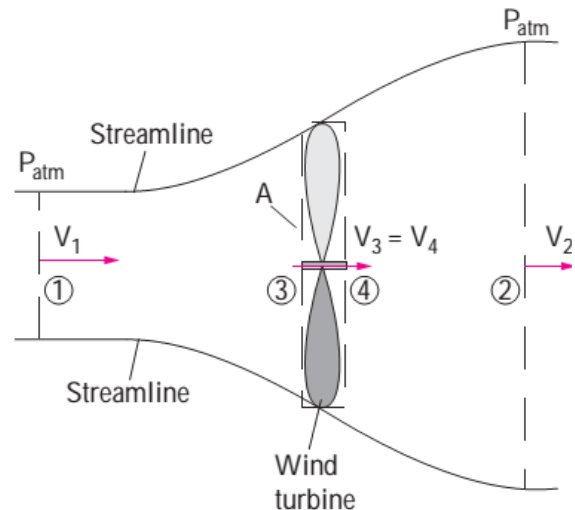
$$F_R = \dot{m}V_2 - \dot{m}V_1 = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

Thay thế các giá trị đã biết, cho thấy:

$$F_R = \dot{m}(V_2 - V_1) = \left(551.7 \frac{\text{lbm}}{\text{s}}\right) (8.43 - 10.27\ \text{ft/s}) \left(\frac{1\ \text{lbm}}{32.2\ \text{lbm} \cdot \frac{\text{ft}}{\text{s}^2}}\right) = -31.5\ \text{lbf}$$

Dấu âm cho thấy rằng phản lực tác dụng ngược chiều hướng x. Vì vậy, lực tác dụng của gió lên cột là $F_{mast} = -F_R = 31.5\ \text{lbf}$. Công suất tạo ra là tỷ lệ với V^3 bởi vì lưu lượng khối lượng tỷ lệ thuận với V và động năng tỷ lệ thuận với V^2 . Do đó, khi tốc độ gió tăng gấp đôi lên 14 mph sẽ làm tăng công suất phát điện lên $2^3 = 8$ lần, có nghĩa là lên $0.4 \times 8 = 3.2\ \text{kW}$. Lực tác dụng của gió trên cột là tỉ lệ với V^2 . Do đó, khi tốc độ gió tăng gấp đôi lên 14 mph lực sẽ tăng theo hệ số $2^2 = 4$, lên $31.5 \times 4 = 126\ \text{lbf}$.

Thảo luận: Để có được cái nhìn sâu sắc hơn về các hoạt động của các thiết bị với cánh quạt hoặc tua bin như máy bay trực thăng, tua bin gió, tua bin thủy lực, và động cơ phản lực, chúng ta xem xét lại tuabin gió và vẽ sơ đồ gồm 2 đường dòng, như thể hiện trên Hình 5.24. (Trong trường hợp của các thiết bị tiêu thụ điện như quạt và máy bay trực thăng, các đường dòng sẽ là hội tụ bởi vì vận tốc đầu ra sẽ lớn hơn và do đó cửa ra sẽ nhỏ hơn). Đường dòng trên



Hình 5.24 Các thể tích không chế cho tua bin gió

cao và dưới thấp có thể được xem xét như một "ống ảo" cho dòng chảy của không khí qua tuabin. Mặt cắt 1 và 2 là đủ xa để có $P_1 = P_2 = P_{atm}$. Phương trình nguyên lý động lượng cho thể tích không chế giữa mặt cắt 1 và 2 có dạng:

$$F_R = \dot{m}(V_2 - V_1) \quad (1)$$

Xem xét thể tích không chế nhỏ hơn bao quanh tua bin giữa mặt cắt 3 và 4, ta có $A_3 = A_4 = A$ và $V_3 = V_4$ vì nó là rất mỏng. Tua bin là thiết bị gây ra sự thay đổi áp suất, do đó áp suất P_3 và P_4 là khác nhau. Phương trình động lượng áp dụng cho thể tích không chế này có dạng:

$$F_R + P_3A - P_4A = 0 \quad \rightarrow F_R = (P_4 - P_3)A \quad (2)$$

Phương trình Bernoulli không áp dụng được giữa các mặt cắt 1 và 2 bởi vì đường dòng đi qua tua bin, nhưng có thể được áp dụng một cách riêng biệt giữa mặt cắt 1 và 3 và mặt cắt 4 và 2:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 \quad \text{và} \quad \frac{P_4}{\rho g} + \frac{V_4^2}{2g} + z_4 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Cộng hai phương trình và chú ý rằng $z_1 = z_2 = z_3 = z_4$, $V_3 = V_4$, và $P_1 = P_2 = P_{atm}$, ta có:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{P_4 - P_3}{\rho} \quad (3)$$

Thay $\dot{m} = \rho AV_3$ vào phương trình (1), kết hợp với (2) và (3), ta nhận được:

$$V_3 = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (4)$$

Do đó chúng ta kết luận rằng vận tốc trung bình của chất lỏng đi qua tua bin là trung bình cộng của các vận tốc thượng lưu và hạ lưu. Tất nhiên, kết quả này được giới hạn bởi khả năng ứng dụng của phương trình Bernoulli. Vận tốc qua tua bin có thể được thể hiện như $V_3 = V_1(1-a)$, với $a < 1$ bởi vì $V_3 < V_1$. Kết hợp biểu

thức này với phương trình (4) cho $V_2=V_1(1-2a)$. Lưu lượng khối lượng qua tua bin trở thành $\dot{m} = \rho AV_3 = \rho AV_1(1 - a)$. Khi các hiệu ứng ma sát và tổn thất được bỏ qua, công suất tạo ra bởi tua bin gió chỉ đơn giản là sự chênh lệch động năng đầu vào và động năng lượng đầu ra:

$$\begin{aligned} \dot{W} &= \dot{m}(ke_1 - ke_2) = \frac{\dot{m}(V_1^2 - V_2^2)}{2} = \frac{\rho AV_1(1 - a)[V_1^2 - V_1^2(1 - 2a)^2]}{2} \\ &= 2\rho AV_1^3 a(1 - a)^2 \end{aligned}$$

Chia hai vế phương trình cho công suất tiềm năng của gió $\dot{W}_{max} = \dot{m}V_1^2/2$, ta nhận được hiệu suất của các tua bin gió như là hàm của a :

$$\eta_{wind\ turbine} = \frac{\dot{W}}{\dot{W}_{max}} = \frac{2\rho AV_1^3 a(1 - a)^2}{(\rho AV_1)V_1^2/2}$$

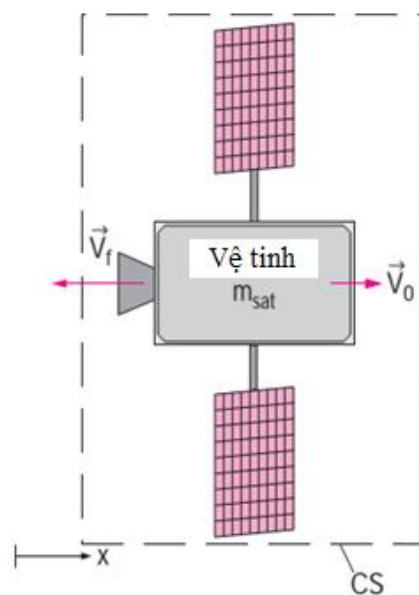
Giá trị tối đa của hiệu suất nhận được khi đạo hàm theo a là bằng 0. Dễ dàng tìm thấy $a=1/3$. Thay thế giá trị này của a vào biểu thức trên, ta nhận được $\eta_{tuabin\ wind} = 16/27=0.593$, đây là giới hạn trên đối với hiệu suất của tua bin gió được gọi là *giới hạn Betz*. Hiệu suất của tuabin gió thực tế là khoảng một nửa giá trị lý tưởng này.

5.4.7. Ví dụ 5.6: Định vị vệ tinh

Một vệ tinh trên quỹ đạo có khối lượng $m_{sat}= 5000$ kg và di chuyển với vận tốc không đổi V_0 . Để thay đổi quỹ đạo, một tên lửa gắn liền xả ra $m=100$ kg khí từ phản ứng của nhiên liệu rắn với vận tốc $V_f=3000$ m/s so với vệ tinh theo hướng ngược với V_0 (Hình 5.25). Lưu lượng xả nhiên liệu là không đổi trong 2s. Xác định (a) gia tốc của các vệ tinh trong thời gian 2s này, (b) sự thay đổi của vận tốc của vệ tinh trong khoảng thời gian này và (c) các lực đẩy tác dụng lên vệ tinh.

Vấn đề: Tên lửa của vệ tinh bắn theo hướng ngược lại chuyển động của vệ tinh. Xác định gia tốc, thay đổi vận tốc và lực đẩy.

Giả thiết: (1) Dòng chảy của khí đốt là ổn định và một chiều trong thời gian bắn; (2) Không có ngoại lực tác động lên vệ tinh và ảnh hưởng của các lực áp suất ở cửa ra ống phun là không đáng kể; (3) Khối lượng của nhiên liệu thải ra là không đáng kể so với khối lượng của vệ tinh, do đó các vệ tinh có thể được coi như một vật rắn với khối lượng không đổi; (4) Ống phụt có thiết kế tốt sao cho ảnh hưởng của các hệ số hiệu chỉnh động lượng là không đáng kể và do đó $\beta \approx 1$.



Hình 5.25 Sơ đồ cho Ví dụ 5.6

Phân tích: (a) Chúng ta chọn hệ quy chiếu trong đó thể tích không chế di chuyển cùng với vệ tinh. Khi đó, vận tốc của dòng chất lỏng là vận tốc so với vệ tinh. Chọn hướng chuyển động của vệ tinh là dương theo chiều trục x. Không có ngoại lực tác dụng lên vệ tinh và khối lượng của nó là gần như không đổi. Do đó, vệ tinh có thể được coi như một vật thể rắn có khối lượng không đổi, phương trình động lượng trong trường hợp này đơn giản là (5.28):

$$0 = \frac{d(m\vec{V})_{CV}}{dt} + \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V} \rightarrow m_{sat} \frac{d\vec{V}_{sat}}{dt} = -\dot{m}_f \vec{V}_f$$

Để ý rằng chuyển động của vệ tinh là theo đường thẳng và dòng khí chuyển động ngược với trục x, chúng ta có thể viết phương trình động lượng dưới dạng vô hướng như sau:

$$m_{sat} \frac{dV_{sat}}{dt} = \dot{m}_f V_f \rightarrow \frac{dV_{sat}}{dt} = \frac{\dot{m}_f}{m_{sat}} V_f = \frac{m_f/\Delta t}{m_{sat}} V_f$$

Gia tốc của vệ tinh trong 2s đầu được xác định là:

$$a_{sat} = \frac{dV_{sat}}{dt} = \frac{m_f/\Delta t}{m_{sat}} V_f = \frac{\frac{100 \text{ kg}}{2 \text{ s}}}{5000 \text{ kg}} \left(3000 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 30 \text{ m/s}^2$$

(b) Khi đã biết gia tốc và gia tốc là hằng số, sự thay đổi vận tốc của vệ tinh trong 2 giây đầu tiên được xác định từ các định nghĩa gia tốc $a_{sat}=dV_{sat}/dt$:

$$dV_{sat} = a_{sat} dt \rightarrow \Delta V_{sat} = a_{sat} \Delta t = (30 \text{ m/s}^2)(2 \text{ s}) = 60 \text{ m/s}$$

(c) Lực đẩy tác dụng lên vệ tinh xác định từ biểu thức (5.29):

$$F_{sat} = 0 - \dot{m}_f(-V_f) = -\left(\frac{100 \text{ kg}}{2 \text{ s}}\right) \left(-3000 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}\right) = 150 \text{ kN}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng nếu vệ tinh được gắn ở đầu đó, nó sẽ tác dụng một lực là 150 kN (tương đương với trọng lượng của vật có khối lượng 15 tấn) vào giá đỡ.

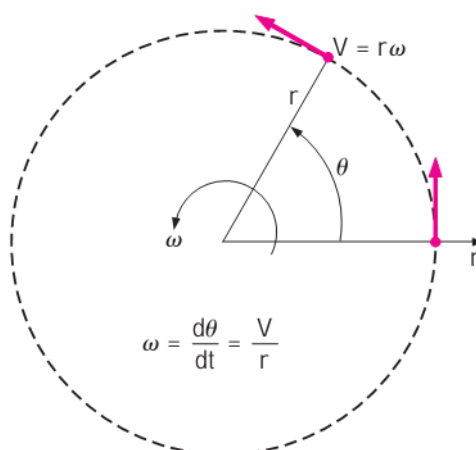
5.5. Ôn lại chuyển động quay và mô-men động lượng

Chuyển động của một vật rắn có thể được coi là sự kết hợp của chuyển động tịnh tiến của trọng tâm và chuyển quay xung quanh trọng tâm. Chuyển động tịnh tiến có thể được mô tả bằng cách sử dụng phương trình động lượng tuyến tính, phương trình (5.16). Trước tiên, chúng ta sẽ thảo luận về chuyển động quay trong đó tất cả các điểm của vật di chuyển theo một vòng tròn xung quanh trục quay. Chuyển động quay được mô tả bởi các đại lượng góc, như góc quay θ (còn gọi khoảng cách góc), vận tốc góc ω và gia tốc góc α .

Quãng đường quay của một điểm được thể hiện theo góc θ , quét bởi một đoạn thẳng có độ dài r nối điểm đó đến trục quay và vuông góc với trục. Góc θ được tính bằng radian (rad), là chiều dài cung tròn tương ứng với góc θ trên một vòng tròn bán kính đơn vị. Cần lưu ý rằng chu vi của một vòng tròn bán kính r là $2\pi r$, khoảng cách góc quét bởi bất kỳ điểm nào của vật trong một vòng quay là 2π rad.

Khoảng cách vật lý đi được của một điểm trên đường tròn là $l = \theta r$, trong đó r là khoảng cách vuông góc của điểm đến trục quay và θ là khoảng cách góc tính bằng rad. Lưu ý rằng 1 rad tương ứng với $360/(2\pi) = 57.3^\circ$.

Vận tốc góc ω là khoảng cách góc đi được trong mỗi đơn vị thời gian và gia tốc góc α là tốc độ thay đổi của vận tốc góc. Chúng được xác định như sau (Hình 5.27):



Hình 5.27 Mối quan hệ giữa góc quay θ , vận tốc góc ω , và vận tốc dài V

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(l/r)}{dt} = \frac{1}{r} \frac{dl}{dt} = \frac{V}{r} \quad \text{và} \quad \alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{r} \frac{dV}{dt} = \frac{a_t}{r} \quad (5.30)$$

hay

$$V = r\omega \quad \text{và} \quad a_t = r\alpha \quad (5.31)$$

V là vận tốc dài và a_t là gia tốc dài theo hướng tiếp tuyến tại điểm nằm ở khoảng cách r đến trục quay. Lưu ý rằng ω và α là như nhau cho tất cả các điểm của một vật rắn quay, nhưng V và a_t không là hằng số (chúng tỷ lệ thuận với r).

Theo định luật thứ hai của Newton, cần phải có một lực tác dụng theo hướng tiếp tuyến để gây ra gia tốc góc. Độ lớn của hiệu ứng quay được gọi là mô-men xoắn, tỷ lệ với độ lớn của lực tác dụng và khoảng cách đến trục quay. Khoảng cách vuông góc từ trục quay đến đường tác dụng của lực được gọi là cánh tay đòn và mô-men xoắn M tác dụng lên một điểm khối lượng m ở khoảng cách r vuông góc với trục quay được biểu diễn như sau:

$$M = rF_t = rma_t = mr^2\alpha \quad (5.32)$$

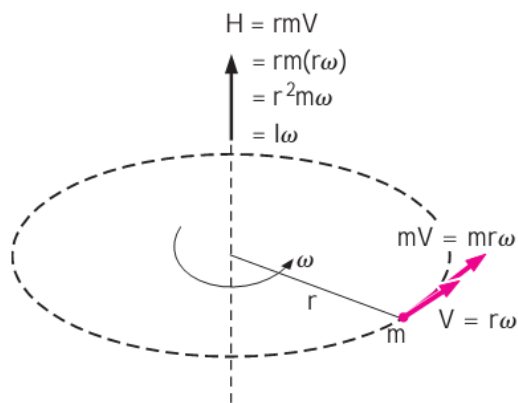
Tổng mô-men xoắn tác dụng lên một vật rắn quay quanh một trục có thể được xác định bằng cách lấy tích phân mô-men xoắn tác dụng lên khối lượng vi phân dm trên toàn bộ vật thể:

$$M = \int_{mass} r^2 \alpha dm = \left[\int_{mass} r^2 dm \right] \alpha = I\alpha \quad (5.33)$$

trong đó I là mô-men quán tính của vật thể đối với trục quay, là thước đo quán tính của một vật thể chống lại chuyển động quay. Mối quan hệ $M=I\alpha$ là tương ứng với định luật thứ hai của Newton, với mô-men quay thay thế lực tác dụng, mô-men quán tính thay thế khối lượng và gia tốc góc thay thế gia tốc dài. Lưu ý

rằng, không giống như khối lượng, mô-men quán tính của vật thể còn phụ thuộc vào phân bố khối lượng của vật thể đối với trục quay. Vì vậy, một vật thể có khối lượng tập trung về trục quay có quán tính nhỏ hơn chống lại gia tốc góc, trong khi một vật thể có khối lượng tập trung xa trục hơn có quán tính lớn hơn.

Động lượng của một vật có khối lượng m , vận tốc V là mV và hướng của động lượng là trùng với hướng của vận tốc. Cần lưu ý rằng, mô-men của một lực là tích số của lực và khoảng cách vuông góc, *mô-men động lượng*, còn được gọi là *xung lượng góc*, của một điểm có khối lượng m đối với một trục quay được biểu diễn như sau: $H=rmV=r^2m\omega$, trong đó r là khoảng cách vuông góc từ trục quay đến đường tác dụng của véc tơ động lượng (Hình 5.29).



Hình 5.29 Mô-men động lượng và động lượng

Vậy tổng mô-men động lượng của một vật rắn quay có thể được xác định bằng cách lấy tích phân:

$$H = \int_{mass} r^2 \omega dm = \left[\int_{mass} r^2 dm \right] \omega = I\omega \quad (5.34)$$

ở đây, như đã biết I là mô-men quán tính của vật đối với trục quay. Mô-men động lượng được biểu diễn dưới dạng véc tơ như sau:

$$\vec{H} = I\vec{\omega} \quad (5.35)$$

Lưu ý rằng các vận tốc góc $\vec{\omega}$ là như nhau ở mọi điểm của một vật thể cứng.

Định luật thứ hai Newton $\vec{F} = m\vec{a}$ được thể hiện theo tốc độ thay đổi động lượng trong phương trình (5.1): $\vec{F} = d(m\vec{V})/dt$. Tương tự như vậy, định luật thứ hai của Newton về vật thể quay là $\vec{M} = I\vec{\alpha}$ được thể hiện trong phương trình (5.2) theo tốc độ thay đổi của mô-men động lượng như sau:

$$\vec{M} = I\vec{\alpha} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} = \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (5.36)$$

ở đây \vec{M} là mô-men xoắn của vật đối với trục quay.

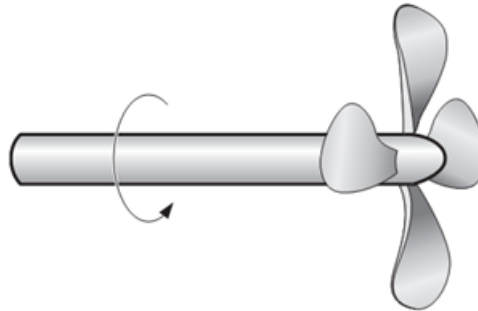
Vận tốc góc thường được biểu diễn bằng rpm (số vòng quay trên phút) và ký hiệu là n . Lưu ý rằng, vận tốc là khoảng cách di chuyển trên mỗi đơn vị thời gian và khoảng cách góc đi trong một vòng là 2π , vận tốc góc theo radian là $\omega = 2\pi n$ rad/phút, từ đó ta có:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (rad/s) \quad (5.37)$$

Xem xét một lực F không đối tác dụng theo hướng tiếp tuyến trên bề mặt ngoài của một trục quay (shaft) có bán kính r quay với tốc độ rpm là n . Cần nhớ rằng,

công W là lực nhân với quãng đường và công suất \dot{W} là công thực hiện trong một đơn vị thời gian và là lực nhân với vận tốc, do đó chúng ta có: $\dot{W}_{shaft} = FV = Fr\omega = M\omega$. Vậy, công suất truyền bởi một trục quay với n theo rpm dưới ảnh hưởng của mô-men quay M là (Hình. 5.30):

$$\dot{W}_{shaft} = \omega M = \frac{2\pi n}{60} M \quad (W) \quad (5.38)$$



Hình 5.30 Mối liên hệ giữa công suất trục quay và vận tốc góc

Động năng của một vật khối lượng m trong chuyển động tịnh tiến là $KE=mV^2$. Ghi nhận rằng $V=r\omega$, do đó động năng quay của một vật thể khối lượng m tại một khoảng cách r từ trục quay là $KE=mr^2\omega^2$. Tổng động năng quay của một vật rắn quay quanh một trục có thể được xác định bằng cách lấy tích phân động năng quay của phần tử vi phân dm trên toàn vật thể, khi đó:

$$KE_r = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (5.39)$$

trong đó, I là mô-men quán tính của vật và ω là vận tốc góc.

Trong chuyển động quay, hướng vận tốc thay đổi ngay cả khi độ lớn của nó vẫn không đổi. Vận tốc là một đại lượng véc tơ, do đó sự thay đổi hướng tạo thành một sự thay đổi vận tốc theo thời gian khi đó gia tốc sẽ khác không và được gọi là gia tốc hướng tâm. Giá trị của nó là:

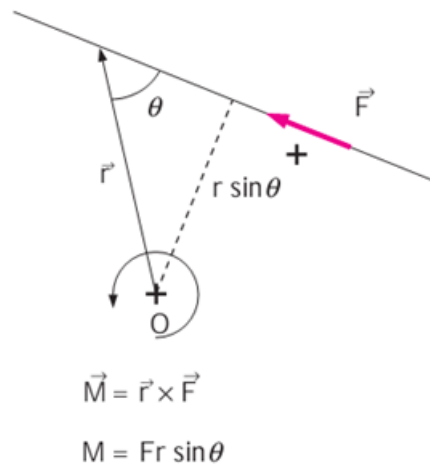
$$a_r = \frac{V^2}{r} = r\omega^2$$

Gia tốc hướng tâm hướng về phía trục quay (ngược hướng với gia tốc ly tâm), do đó gia tốc ly tâm có giá trị âm. Lưu ý rằng, gia tốc là cùng chiều với lực tác dụng, gia tốc hướng tâm là kết quả của một lực tác dụng lên vật thể theo hướng về trục quay, được gọi là lực hướng tâm, có độ lớn là $F_r = mV^2/r$. Gia tốc tiếp tuyến và hướng tâm là vuông góc với nhau (do hướng tâm và tiếp tuyến là vuông góc), gia tốc dài tổng được xác định bằng tổng véc tơ của chúng, $\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_r$.

5.6. Phương trình mô-men động lượng

Phương trình động lượng tuyến tính được thảo luận trong Phần 5.4 rất hữu ích trong việc xác định mối quan hệ giữa động lượng tuyến tính của dòng chảy và

tổng hợp lực tác dụng. Trong thực tế, nhiều vấn đề kỹ thuật liên quan đến mô-men động lượng của dòng chảy và các hiệu ứng quay. Các vấn đề như vậy được phân tích theo phương trình mô-men động lượng. Một loại thiết bị thủy lực quan trọng, được gọi là máy turbo (turbomachines), bao gồm máy bơm ly tâm, các loại tua bin và quạt máy... được phân tích bằng phương trình mô-men động lượng.



Hình 5.31 Mô-men của lực F đối với điểm O

Mô-men của một lực F đối với điểm O là tích có hướng của hai véc tơ (tích chéo) (Hình 5.31):

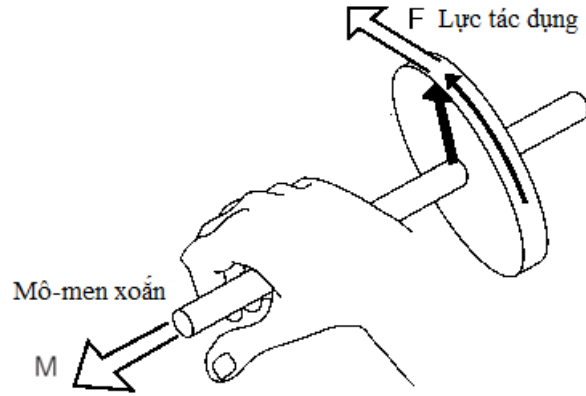
$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \quad (5.40)$$

ở đây \vec{r} là véc tơ vị trí từ điểm O đến bất kỳ điểm nào trên đường tác động của \vec{F} . Tích có hướng của hai véc tơ là một véc tơ có hướng trùng với pháp tuyến của mặt phẳng chứa hai véc tơ thành phần (\vec{r} và \vec{F}) và độ lớn được xác định như sau:

$$M = Fr \sin \theta \quad (5.41)$$

ở đây θ là góc giữa hai véc tơ \vec{r} và \vec{F} .

Vi vậy, độ lớn của mô-men lực đối với điểm O bằng độ lớn của lực nhân với khoảng cách vuông góc tới đường tác động của lực từ điểm O . Chiều của véc tơ mô-men \vec{M} được xác định bởi quy tắc bàn tay phải: khi các ngón tay phải cong theo hướng của lực, ngón tay cái sẽ chỉ hướng của véc tơ mô-men lực (Hình 5.32). Lưu ý rằng một lực có đường tác động đi qua điểm O tạo ra mô-men có giá trị bằng 0.



Hình 5.32 Xác định hướng của mô-men xoắn bằng quy tắc bàn tay phải

Thay thế véc tơ \vec{F} Trong phương trình (5.40) bởi véc tơ động lượng $m\vec{V}$ để nhận được mô-men động lượng, còn gọi là xung lượng góc, đối với điểm O như sau:

$$\vec{H} = \vec{r} \times m\vec{V} \quad (5.42)$$

Có thể nhận thấy $\vec{r} \times \vec{V}$ biểu diễn mô-men động lượng của một đơn vị khối lượng và mô-men động lượng của một khối lượng vi phân $dm = \rho dV$ là $d\vec{H} = (\vec{r} \times \vec{V})\rho dV$.

Vì vậy mô-men động lượng của một hệ thống sẽ được xác định bởi tích phân:

$$\vec{H}_{sys} = \int_{sys} (\vec{r} \times \vec{V})\rho dV \quad (5.43)$$

Tốc độ thay đổi của mô-men động lượng là:

$$\frac{d\vec{H}_{sys}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{sys} (\vec{r} \times \vec{V})\rho dV \quad (5.44)$$

Phương trình mô-men động lượng (5.2) trở thành có dạng:

$$\Sigma \vec{M} = \frac{d\vec{H}_{sys}}{dt} \quad (5.45)$$

Phương trình (5.45) phát biểu rằng tốc độ thay đổi mô-men động lượng của một hệ thống bằng tổng mô-men xoắn tác dụng lên hệ thống. Phương trình này đúng với hệ thống có khối lượng không đổi ở trong hệ quy chiếu quán tính, có nghĩa là trong hệ quy chiếu cố định hoặc chuyển động với vận tốc cố định.

Từ định lý vận chuyển Reynolds, phương trình mô-men động lượng cho một thể tích khối chế CV bất kỳ có thể nhận được dưới dạng:

$$\frac{d\vec{H}_{sys}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{CV} (\vec{r} \times \vec{V})\rho dV + \int_{CS} (\vec{r} \times \vec{V})\rho(\vec{V}_r \cdot \vec{n})dA \quad (5.46)$$

Từ (5.45) ta có:

$$\Sigma \vec{M} = \frac{d}{dt} \int_{CV} (\vec{r} \times \vec{V})\rho dV + \int_{CS} (\vec{r} \times \vec{V})\rho(\vec{V}_r \cdot \vec{n})dA \quad (5.47)$$

Đối với thể tích khối chế cố định (không chuyển động, không biến dạng), phương trình mô-men động lượng trở thành có dạng:

$$\Sigma \vec{M} = \frac{d}{dt} \int_{CV} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho dV + \int_{CS} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (5.48)$$

Cần lưu ý rằng, các lực tác dụng lên thể tích khối chế bao gồm lực khối tác dụng lên toàn bộ thể tích ví dụ như lực trọng trường và các lực mặt tác dụng lên mặt biên của thể tích khối chế ví dụ như lực tác dụng do áp suất và phản lực tại các điểm tiếp xúc. Như vậy, tổng mô-men xoắn bao gồm mô-men của các lực kể trên và mô-men của các lực khác áp đặt thêm lên thể tích kiểm tra.

5.6.1. Các trường hợp đặc biệt

Trong dòng chảy ổn định, mô-men động lượng trong thể tích khối chế là không thay đổi, vì vậy tốc độ thay đổi của mô-men động lượng trong thể tích kiểm soát là bằng 0. Vậy, đối với dòng chảy ổn định, ta có:

$$\Sigma \vec{M} = \int_{CS} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA \quad (5.49)$$

Trong nhiều ứng dụng thực tế, chất lỏng đi qua mặt biên của thể tích khối chế qua các cửa vào và cửa ra, khi đó để thuận tiện hơn có thể thay thế biểu thức tích phân bằng một biểu thức đại số thông qua các đại lượng trung bình trên các mặt cắt ngang mà chất lỏng đi vào hoặc đi ra. Trong những trường hợp như vậy, tốc độ thay đổi mô-men động lượng có thể được biểu diễn như là sự hiệu giữa mô-men động lượng đi vào và đi ra khỏi thể tích khối chế. Hơn nữa, trong nhiều trường hợp, cánh tay đòn r hoặc là không đổi trên cửa vào hoặc cửa ra (như trong dòng chảy tua bin hướng tâm) hoặc là lớn hơn nhiều so với đường kính của cửa vào hoặc cửa ra. Vì vậy giá trị trung bình của r được sử dụng cho toàn bộ diện tích mặt cắt ngang của cửa vào hoặc cửa ra. Khi đó biểu thức gần đúng của phương trình mô-men động lượng theo các giá trị trung bình trên các cửa vào và cửa ra sẽ có dạng:

$$\Sigma \vec{M} = \frac{d}{dt} \int_{CV} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho dV + \Sigma_{out} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} - \Sigma_{in} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} \quad (5.50)$$

Trong trường hợp dòng chảy ổn định, phương trình này có dạng:

$$\Sigma \vec{M} = \Sigma_{out} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} - \Sigma_{in} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} \quad (5.51)$$

Như vậy, có thể phát biểu rằng: Trong dòng chảy ổn định, tổng mô-men xoắn tác dụng lên thể tích khối chế bằng hiệu giữa mô-men động lượng của dòng ra và dòng vào.

5.6.2. Dòng chảy không có mô-men lực ngoài

Khi không có mô-men lực ngoài tác dụng, phương trình (5.50) đơn giản thành:

$$0 = \frac{d\vec{H}_{CV}}{dt} + \Sigma_{out} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} - \Sigma_{in} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} \quad (5.51)$$

Đây là phương trình bảo toàn mô-men động lượng, có thể được phát biểu như sau: tốc độ thay đổi mô-men động lượng của một thể tích khối chế bằng hiệu số giữa thông lượng mô-men động lượng vào và ra.

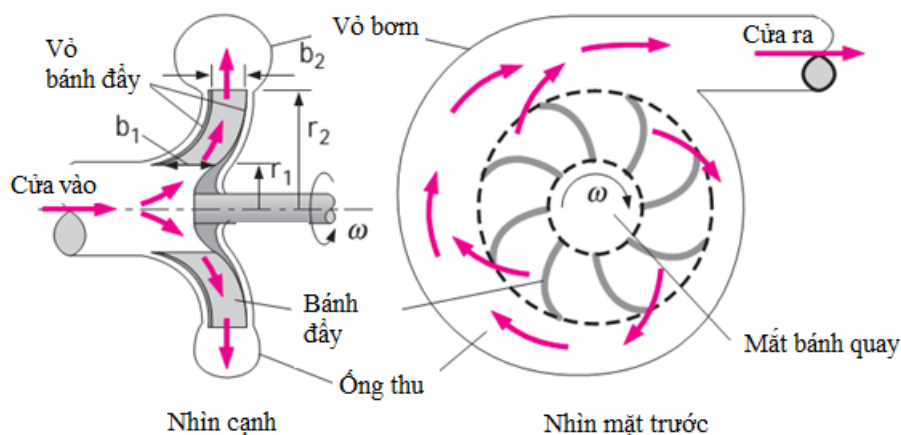
Khi mà mô-men quán tính I của thể tích khối chế là không đổi, số hạng đầu tiên của phương trình được biểu diễn bằng tích số của mô-men quán tính và gia tốc góc. Khi đó, thể tích khối chế có thể coi như một vật rắn với mô-men xoắn là:

$$\vec{M} = I\vec{\alpha} = \sum_{in} \vec{r} \times m\vec{V} - \sum_{out} \vec{r} \times m\vec{V} \quad (5.54)$$

tác dụng lên nó. Đây là cách tiếp cận có thể sử dụng để tính gia tốc góc cho các thiết bị không gian hoặc tên lửa được tăng tốc bằng bản rốc két theo hướng khác với hướng chuyển động.

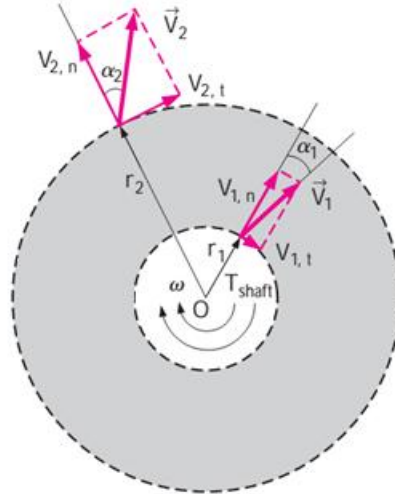
5.6.3. Các thiết bị ly tâm

Nhiều thiết bị thủy lực như máy bơm ly tâm và quạt máy có dòng chảy ly tâm vuông góc với trục quay và được gọi là các thiết bị ly tâm. Ví dụ như trong một máy bơm ly tâm, chất lỏng đi vào thiết bị theo hướng trục qua "mắt" của bánh quay, đổi hướng ra ngoài chảy trên cánh của bánh quay, tập trung vào trong ống thu và được chảy ra ngoài theo hướng tiếp tuyến, như thể hiện trên Hình 5.35.



Hình 5.35 Sơ đồ dòng chảy bơm ly tâm

Để phân tích bơm ly tâm, chúng ta chọn vùng hình khuyên bao quanh phần bánh quay làm thể tích khối chế, như thể hiện trên Hình 5.36. Lưu ý rằng vận tốc dòng chảy trung bình có các thành phần pháp tuyến và tiếp tuyến ở cả đầu vào và đầu ra của phần cánh quạt. Khi trục quay có vận tốc góc là ω thì cánh quạt bánh quay có vận tốc có giá trị là ωr_1 ở cửa vào và ωr_2 ở cửa ra.



Hình 5.36 Thể tích không chế hình vành khuyên cho bơm ly tâm.

Có thể nhận thấy rằng chỉ thành phần vận tốc tiếp tuyến là có ảnh hưởng đến mô-men xoắn, vì vậy từ phương trình mô-men động lực:

$$\sum M = \sum_{out} r \dot{m} V - \sum_{in} r \dot{m} V$$

Ta nhận được:

$$T_{shaft} = \dot{m}(r_2 V_{2,t} - r_1 V_{1,t}) \quad (5.57)$$

Công thức này được gọi là **công thức O le cho tua bin**. Vậy, trong trường hợp lý tưởng, ta có:

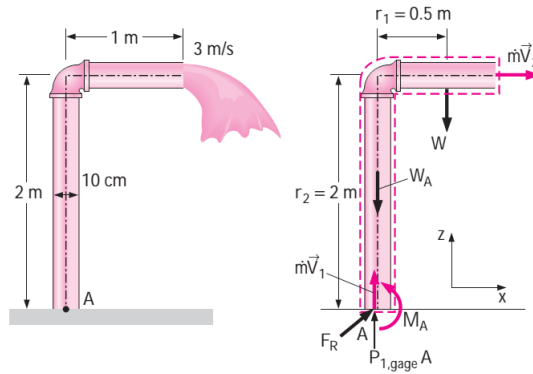
$$T_{shaft,ideal} = \dot{m} \omega (r_2^2 - r_1^2)$$

Khi đó, công suất trục quay sẽ là:

$$\dot{W}_{shaft} = \omega T_{shaft} = 2\pi n T_{shaft}$$

5.6.4. Ví dụ 5.7: Mô-men uốn tác dụng lên giá đỡ của ống nước

Nước được bơm đến độ cao mong muốn qua đường ống 10 cm đường kính, dài 2 m đứng và dài 1 m nằm ngang, như hình 5.37. Nước xả ra không khí với vận tốc trung bình là 3 m/s, khối lượng của đoạn ống nằm ngang khi chứa nước là 12 kg/mét. Đường ống được giữ trên mặt đất bởi một giá đỡ bê tông. Xác định mô-men uốn tác động tại chân của ống (điểm A) và chiều dài cần có của đoạn nằm ngang để mô-men tại điểm A bằng không.



Hình 5.37 Sơ đồ của ví dụ 5.8

Vấn đề: Nước được bơm qua đường ống. Xác định mô-men tác dụng tại chân đế và chiều dài của đoạn nằm ngang để mô-men tác dụng bằng 0.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định; (2) Nước được xả vào khí quyển, do đó áp suất ở đầu ra là bằng 0; (3) Đường kính ống nhỏ so với cánh tay đòn, do đó có thể sử dụng giá trị trung bình của bán kính và vận tốc tại cửa ra.

Tính chất: Lấy mật độ nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Lấy toàn bộ đường ống hình chữ L làm thể tích khống chế, ký hiệu của vào bởi chỉ số 1 và cửa ra là 2. Lấy các tọa độ x và z như thể hiện Hình 5.37. Thể tích khống chế là cố định.

Do thiết diện ống A_c là không đổi nên vận tốc chất lỏng V qua tất cả các mặt cắt là như nhau. Lưu lượng khối lượng qua đường ống và trọng lượng của đoạn ống nằm ngang là:

$$\dot{m} = \rho A_c V = \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left[\pi \frac{(0.1 \text{ m})^2}{4}\right] \left(3 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = 23.56 \text{ kg/s}$$

$$W = mg = \left(12 \frac{\text{kg}}{\text{m}}\right) (1 \text{ m}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 118 \text{ N}$$

Để xác định mô-men tác dụng lên ống tại điểm A, cần phải tính mô-men của tất cả các lực đối với điểm đó. Do dòng chảy ổn định và tất cả các lực và động lượng dòng chảy nằm trong cùng một mặt phẳng. Do đó, phương trình mô-men động lượng trong trường hợp này có thể được biểu diễn bằng:

$$\sum M = \sum_{out} r \dot{m} V - \sum_{in} r \dot{m} V$$

trong đó r là cánh tay đòn và V là vận tốc trung bình. Mô-men lực ngược chiều kim đồng hồ được quy ước là dương và theo chiều kim đồng hồ là âm.

Lưu ý rằng mô-men của tất cả các lực và động lượng dòng chảy đi qua điểm A là bằng 0. Lực duy nhất tạo ra mô-men tại A là trọng lượng W của đoạn ống nằm ngang và động lượng dòng chảy tại cửa ra, do đó:

$$M_A - r_1 W = -r_2 \dot{m} V_2$$

Từ đó:

$$\begin{aligned} M_A &= r_1 W - r_2 \dot{m} V_2 \\ &= (0.5 \text{ m})(118 \text{ N}) - (2 \text{ m}) \left(23.56 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left(3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = -82.5 \text{ N.m} \end{aligned}$$

Dấu âm chứng tỏ giả thiết dấu của M_A là sai và cần phải đổi ngược lại. Như vậy thể tích khối chế tác dụng lên chân của đường ống mô-men 82.5 N.m ngược chiều kim đồng hồ và chân đế phải tác dụng một mô-men 82.5 N.m theo chiều kim đồng hồ để cân bằng.

Để $M_A=0$, ta có:

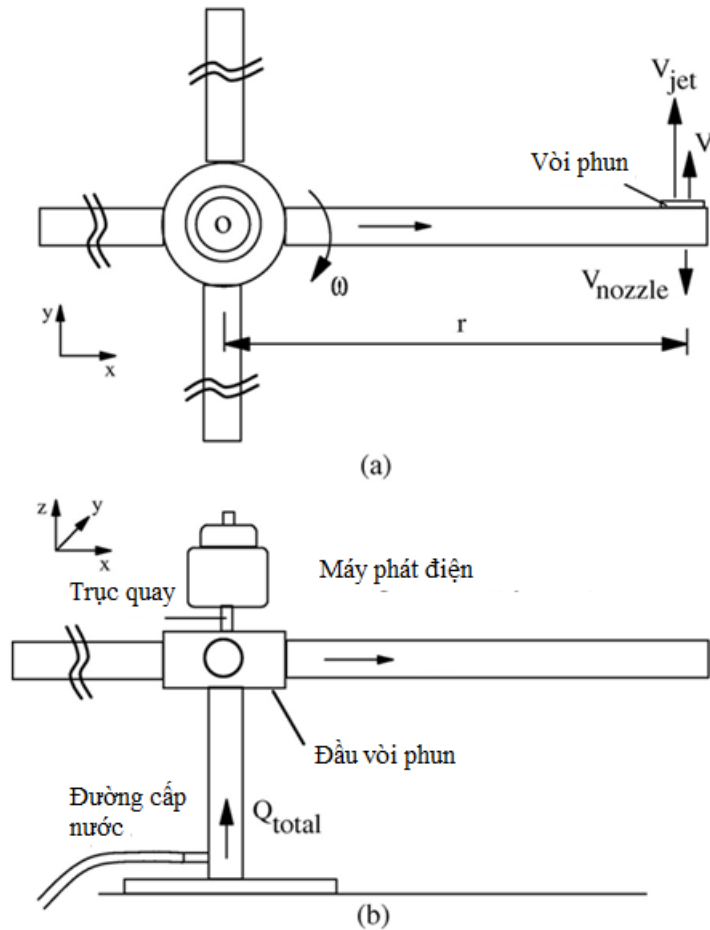
$$0 = r_1 W - r_2 \dot{m} V_2 \quad \rightarrow \quad 0 = \left(\frac{L}{2} \right) Lw - r_2 \dot{m} V_2$$

Vậy:

$$L = \sqrt{\frac{2r_2 \dot{m} V_2}{w}} = \sqrt{\frac{2 \times 141.4 \text{ M.m}}{118 \text{ N/m}}} = 2.4 \text{ m}$$

5.6.5. Ví dụ 5.8: Máy phát điện bằng hệ thống vòi phun

Một vòi phun nước với bốn cánh tay giống hệt nhau sẽ hoạt động như một tuabin để tạo ra điện năng bằng cách gắn một máy phát điện vào đầu quay của nó, như hình 5.38. Nước chảy vào vòi phun từ chân đế dọc theo trục quay với lưu lượng 20 L/s và ra khỏi các vòi phun theo hướng tiếp tuyến. Các vòi phun nước quay với tốc độ 300 vòng/phút trong một mặt phẳng ngang. Đường kính của mỗi vòi phun là 1 cm, khoảng cách giữa trục quay và miệng của mỗi vòi phun là $r=0.6$ m. Tính công suất phát điện.



Hình 5.38 Sơ đồ cho ví dụ 5.9

Vấn đề: Một vòi phun nước có bốn cánh tay được sử dụng để tạo ra điện năng. Cho lưu lượng và tốc độ quay, xác định công suất phát điện.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định (trong hệ quy chiếu quay cùng với đầu vòi phun nước); (2) Nước được xả vào khí quyển, do đó áp suất dư ở đầu vòi phun là 0; (3) Bỏ qua các loại tổn thất; (4) Đường kính vòi phun nhỏ so với cánh tay tròn, do đó có thể sử dụng giá trị trung bình của bán kính và vận tốc tại cửa ra.

Tính chất: Mật độ nước là $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ kg/L}$.

Phân tích: Lấy vòng đĩa bao quanh các vòi phun nước làm thể tích khống chế. Khi đó thể tích khống chế là cố định.

Áp dụng định luật bảo toàn khối lượng trong dòng chảy ổn định và nhận xét rằng 4 vòi phun là tương đương, ta có: $\dot{m}_{nozzle} = \dot{m}_{total} / 4$. Từ đó, vận tốc trung bình của tia nước phun ra từ miệng (so với ống cố định) là:

$$V_{jet} = \frac{Q_{nozzle}}{A_{jet}} = \frac{5 \text{ L/s}}{\left[\pi \frac{(0.01 \text{ m})^2}{4}\right]} = 63.66 \text{ m/s}$$

Vận tốc góc và vận tốc tiếp tuyến của vòi phun là:

$$\omega = 2\pi n = 2\pi(300 \text{ rpm}) = 31.42 \text{ rad/s}$$

$$V_{jet} = r\omega = (0.6) \left(31.42 \frac{rad}{s} \right) = 18.85 \text{ m/s}$$

Như vậy miệng vòi phun chuyển động ngược với hướng nước phun ra với vận tốc là 18.85 m/s. Khi đó vận tốc tia nước so với thể tích không chế (cố định) là:

$$V_r = V_{jet} - V_{nozzle} = 63.66 - 18.85 = 44.81 \text{ m/s}$$

Tất cả mô-men lực và mô-men động lượng dòng chảy đi qua trục quay là bằng không, do đó từ phương trình:

$$\sum M = \sum_{out} r\dot{m}V - \sum_{in} r\dot{m}V$$

Ta nhận được:

$$T_{shaft} = r\dot{m}_{total} V_r$$

Thay số vào, ta có:

$$T_{shaft} = r\dot{m}_{total} V_r = (0.6 \text{ m}) \left(20 \frac{kg}{s} \right) \left(44.81 \frac{m}{s} \right) = 537.7 \text{ N.m}$$

Mặt khác:

$$\dot{m}_{total} = \rho Q_{total} = \left(1 \frac{kg}{L} \right) \left(20 \frac{L}{s} \right) = 20 \text{ kg/s}$$

Vậy:

$$\dot{W} = 2\pi n T_{shaft} = \omega T_{shaft} = \left(31.42 \frac{rad}{s} \right) (537.7 \text{ N.m}) = 16.9 \text{ kW}$$

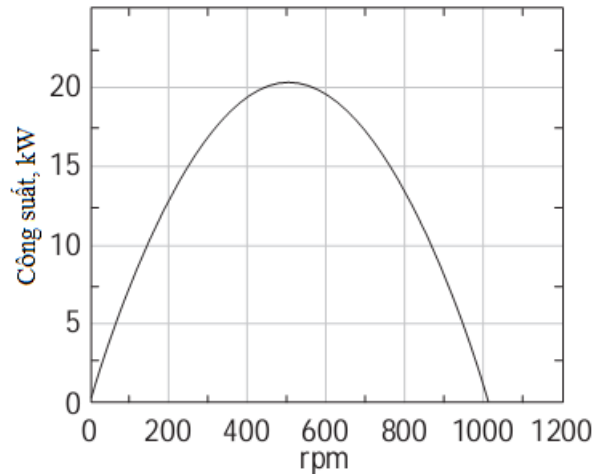
Thảo luận: Xét trường hợp, vòi phun bị giữ đứng yên. Khi đó ta có $V_{nozzle}=0$, do đó: $V_{jet}=V_r=63.66 \text{ m/s}$. Do đó, $T_{shaft}=T_{shaf, max}=764 \text{ (N.m)}$. Công suất phát điện lúc này bằng 0.

Xét trường hợp giới hạn thứ 2, khi không gắn máy phát điện. Khi đó ta có $V_{jet}=V_{nozzle}$ và $V_r=0$. Tốc độ quay của vòi phun sẽ là:

$$\dot{n} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{V_{nozzle}}{2\pi r} = \frac{63.66 \frac{m}{s}}{2\pi(0.6 \text{ m})} \left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} \right) = 1013 \text{ rpm}$$

Ở tốc độ này, công suất phát điện cũng bằng 0.

Nếu thay đổi tốc độ quay của vòi phun từ 0 đến 1013 rpm, ta nhận được đồ thị của công suất phát điện phụ thuộc tốc độ quay (hình 5.39). Công suất đạt cực đại 20 kW khi vòng quay là 500 rpm.



Hình 5.39. Phụ thuộc công suất phát điện vào tốc độ quay.

TỔNG KẾT

Chương này đề cập đến định luật bảo toàn động lượng đối với thể tích khối chế. Các lực tác dụng lên thể tích khối chế bao gồm lực khối tác dụng trên toàn khối lượng của thể tích khối chế (như lực hấp dẫn, điện lực và từ lực) và các lực bề mặt tác dụng trên bề mặt của thể tích khối chế (như lực áp suất và lực phản ứng tại các điểm tiếp xúc). Tổng của tất cả các lực tác dụng lên thể tích khối chế tại một thời điểm cụ thể được thể hiện bằng:

$$\underbrace{\sum \vec{F}}_{\text{tổng hợp lực}} = \underbrace{\sum \vec{F}_{\text{gravity}}}_{\text{lực khối}} + \underbrace{\sum \vec{F}_{\text{pressure}} + \sum \vec{F}_{\text{viscous}} + \sum \vec{F}_{\text{other}}}_{\text{lực bề mặt}}$$

Từ định luật thứ 2 của Newton, có thể nhận được phương trình động lượng tuyến tính cho một thể tích khối chế như sau:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \vec{V} dV + \int_{CS} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA$$

Trong các trường hợp đặc biệt phương trình này có dạng:

Trường hợp các cửa vào và ra qua mặt biên có các đại lượng thay đổi không đáng kể (dạng đại số thay cho dạng tích phân):

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \vec{V} dV + \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V}_{avg} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V}_{avg}$$

Đối với dòng chảy dừng:

$$\sum \vec{F} = \int_{CS} \rho \vec{V} (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA$$

Dạng đại số:

$$\sum \vec{F} = \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V}$$

Đối với trường hợp khi thể tích không chế quay quanh một trục (mô-men động lượng khác 0). Phương trình mô-men động lượng cho thể tích không chế có dạng:

$$\sum \vec{M} = \frac{d}{dt} \int_{CV} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho dV + \int_{CS} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA$$

Trong các trường hợp đặc biệt phương trình này có dạng:

Trường hợp các cửa vào và ra qua mặt biên có các đại lượng thay đổi không đáng kể (dạng đại số thay cho dạng tích phân):

$$\sum \vec{M} = \frac{d}{dt} \int_{CV} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho dV + \sum_{out} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V}$$

Đối với dòng chảy dừng:

$$\sum \vec{M} = \int_{CS} (\vec{r} \times \vec{V}) \rho (\vec{V}_r \cdot \vec{n}) dA$$

Dạng đại số:

$$\sum \vec{M} = \sum_{out} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V}$$

Đối với dòng chảy không có mô-men lực bên ngoài:

$$0 = \frac{d\vec{H}_{CV}}{dt} + \sum_{out} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \vec{r} \times \dot{m} \vec{V}$$

Câu hỏi và bài tập

Định luật Newton và Bảo toàn Động lượng

5.1LT Phát biểu các định luật thứ nhất, thứ hai và thứ ba của Newton.

5.2LT Động lượng có phải là một véc tơ? Nếu là một véc tơ thì hướng của nó thế nào?

5.3LT Phát biểu định luật bảo toàn động lượng. Có thể nói gì về động lượng của một vật thể nếu lực ròng tác dụng lên nó bằng không?

5.4LT Phát biểu định luật thứ hai của Newton cho các vật quay. Có thể nói gì về vận tốc góc và mô-men động lượng của vật thể biến dạng có khối lượng không đổi nếu mô-men xoắn tác dụng lên nó bằng không?

5.5LT Xem xét hai vật cứng có cùng tốc độ góc và khối lượng. Có thể nghĩ rằng hai vật đó phải có cùng một mô-men động lượng không? Giải thích.

Phương trình động lượng tuyến tính

5.6LT Mô tả các lực khối và lực bề mặt tác dụng lên thể tích không chế. Trọng lượng của chất lỏng là lực khối hay lực bề mặt? Còn lực do áp suất là lực gì?

5.7LT Làm thế nào để tính được lực bề mặt trong phân tích động lượng của một thể tích không chế? Làm thế nào chúng ta có thể giảm thiểu số lượng lực bề mặt trong quá trình phân tích?

5.8LT Viết phương trình động lượng cho dòng chảy một chiều ổn định cho trường hợp không có lực bên ngoài và giải thích ý nghĩa vật lý của các thành phần của phương trình.

5.9LT Trong các ứng dụng của phương trình động lượng, hãy giải thích lý do tại sao chúng ta có thể bỏ qua áp lực khí quyển và chỉ làm việc với áp suất dư.

5.10LT Hai lính cứu hỏa đang dập lửa với ống nước và vòi phun giống hệt nhau, ngoại trừ việc một người giữ ống thẳng để nước thoát khỏi vòi phun theo cùng một hướng, trong khi người kia giữ ống ngược thành hình chữ U. Ai phải dùng lực lớn hơn để giữ ống nước?

5.11LT Một tên lửa trong không gian (không có ma sát trong chuyển động) có thể phụt khí đẩy với tốc độ V so với chính nó. V có là giới hạn trên cho vận tốc của tên lửa không?

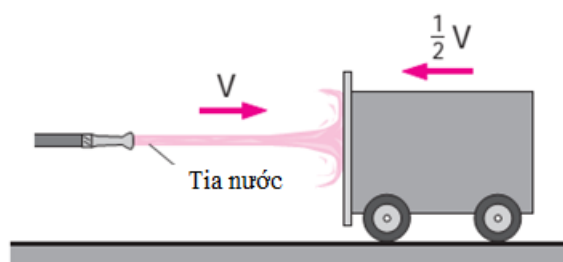
5.12LT Giải thích tại sao một chiếc trực thăng có thể bay lên thẳng đứng.

5.13LT Liệu máy bay trực thăng bay trên đỉnh núi cao cần công suất cao hơn khi nó bay ở độ cao mức nước biển hay không? Giải thích.

5.14LT Tại một địa điểm nhất định, một chiếc máy bay trực thăng cần nhiều năng lượng hơn vào mùa hè hay mùa đông để đạt được hiệu quả như nhau? Giải thích.

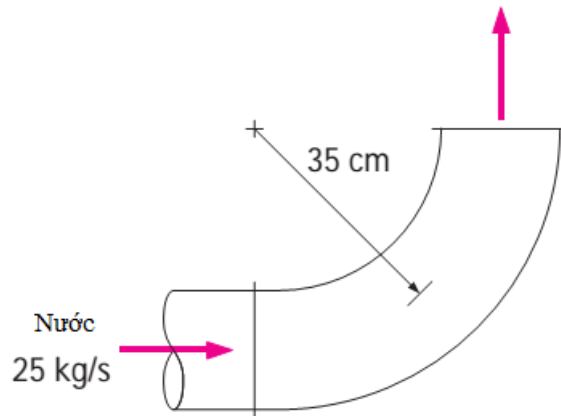
5.15 Chỉ ra rằng lực tác dụng bởi một tia nước lên vòi phun cố định khi ra khỏi vòi phun với vận tốc V là tỷ lệ với V^2 hoặc là \dot{m}^2 .

5.16 Một tia nước nằm ngang có vận tốc không đổi V tác động vuông góc lên một tấm phẳng thẳng đứng rồi tràn ra ngoài trên mặt phẳng thẳng đứng. Tấm phẳng đang di chuyển hướng tới vòi phun nước với vận tốc $0.5V$. Nếu biết cần một lực F để duy trì tấm phẳng trong trường hợp tấm phẳng đứng yên, tính lực tác dụng để tấm di chuyển hướng tới vòi phun?



Hình P5.16

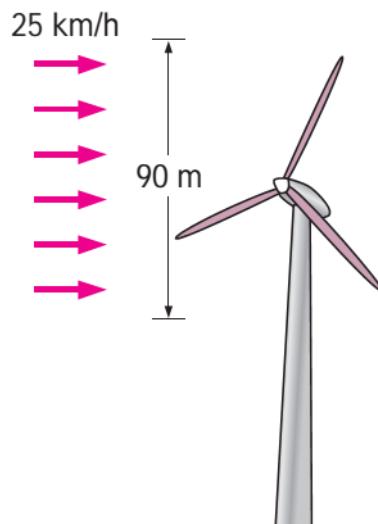
5.17 Vòng khuấy tròn 90° được sử dụng để hướng dòng nước ở có lưu lượng 25 kg/s từ ống nằm ngang lên trên. Đường kính của toàn bộ ống là 10 cm . Nước được thải vào bầu khí quyển, do đó áp suất ở cửa ra là áp suất khí quyển. Độ cao cửa ra so với ống nằm ngang là 35 cm . Trọng lượng của ống và nước trong ống được coi là không đáng kể. Xác định (a) áp suất dư ở đầu vào của ống và (b) lực neo cần thiết để giữ khuấy tại chỗ.



Hình P5.17

5.18 Lập lại bài 5.17 cho trường hợp của một khuỷu ống khác (giống hệt nhau) được gắn vào khuỷu ống hiện có để chất lỏng quay ngược lại. *Đáp số: (a) 6,88 kPa, (b) 218 N*

5.19 Các tua bin gió lớn có bán trên thị trường có sải cánh dài tới 100 m và tạo ra điện năng tối đa trên 3 MW. Hãy xem xét một tua bin gió với một sải dài 90 m trong điều kiện gió ổn định 25 km/h. Nếu hiệu suất máy phát-tua bin kết hợp của tua bin gió là 32%, xác định (a) công suất phát ra từ tua bin và (b) lực ngang gây ra bởi gió lên cột tua bin. Lấy mật độ không khí là 1.25 kg/m^3 , bỏ qua các hiệu ứng ma sát.



Hình P5.19

5.20 Các nhân viên cứu hỏa đang cầm vòi phun nằm ngang ở đầu vòi trong khi dập lửa. Nếu đường kính đầu ra của ống phun là 6 cm và lưu lượng dòng chảy của nước là $5 \text{ m}^3/\text{phút}$, xác định (a) vận tốc nước trung bình ở đầu vòi phun và (b) lực nằm ngang cần thiết để lính cứu hỏa để giữ vòi phun. *Đáp số: (a) 29.5 m/s, (b) 2457 N*



Hình P5.20

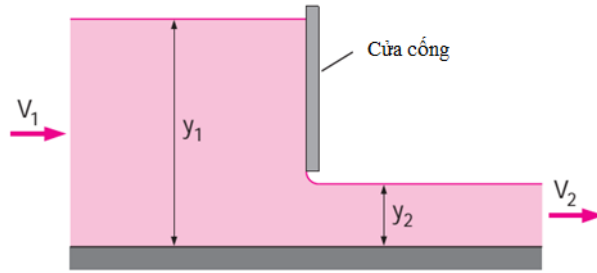
5.21 Một vòi phun nằm ngang đường kính 5 cm phun nước với vận tốc 30 m/s đập vào một tấm phẳng di chuyển cùng hướng với tốc độ 10 m/s. Nước thoát ra mọi hướng trên mặt phẳng của tấm. Tính lực của tia nước tác dụng lên tấm phẳng.

5.22 Một trực thăng có khối lượng 10.000 kg đang bay ở độ cao mực nước biển để chuẩn bị nạp tải trọng. Trong chế độ di chuyển không tải, cánh trực thăng quay ở tốc độ 400 vòng/phút. Cánh quay tạo ra một luồng không khí có đường kính 15 m di chuyển xuống dưới với vận tốc trung bình tỷ lệ thuận với vận tốc cánh quạt (vòng/phút). Tải trọng 15.000 kg được gắn lên trực thăng và trực thăng từ từ bay lên. Xác định (a) lưu lượng luồng không khí mà trực thăng tạo ra trong thời gian bay không tải và công suất hoạt động cần thiết và (b) tốc độ quay của cánh quạt để trực thăng bay với tải trọng 15.000 kg và công suất cần thiết. Lấy mật độ không khí là 1.18 kg/m^3 . Giả thiết rằng không khí tiếp cận các cánh quạt từ phía trên qua một diện tích lớn với vận tốc không đáng kể và không khí được đẩy bởi cánh quạt để di chuyển xuống với một vận tốc đều trong một xi lanh tương tự mà đáy của nó là diện tích quay của cánh quạt.

5.23 Xem lại trực thăng trong bài tập 5.22 khi nó lơ lửng trên một ngọn núi cao 3000m, nơi mật độ không khí là 0.79 kg/m^3 . Lưu ý rằng cánh quạt của trực thăng không tải phải quay với tốc độ 400 vòng/phút để lơ lửng ở độ cao mực nước biển, xác định vận tốc quay của cánh quạt và sự gia tăng công suất để trực thăng có thể di chuyển ở độ cao 3000 m. *Đáp số: 489 rpm, 22 phần trăm*

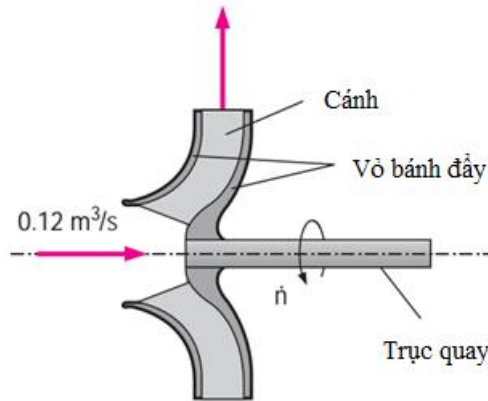
5.24 Một cửa cống, điều khiển tốc độ dòng chảy trong kênh bằng cách đơn giản là nâng hoặc hạ một tấm thẳng đứng, thường được sử dụng trong các hệ thống thủy lợi. Một lực tác dụng lên cửa cống do sự khác nhau giữa chiều cao của nước y_1 và y_2 và vận tốc dòng chảy V_1 và V_2 tại thượng du và hạ du cửa cống. Bỏ qua lực ma sát trên các bề mặt kênh, xác định mối quan hệ giữa V_1 , V_2 và lực tác dụng lên cửa cống có chiều rộng w trong dòng chảy ổn định và đều.

Đáp số: $F_R = \dot{m}(V_1 - V_2) + \frac{w}{2} \rho g (y_1^2 - y_2^2)$



Hình P5.24

5.25 Nước vào một máy bơm ly tâm ở áp suất khí quyển với lưu lượng $0.12 \text{ m}^3/\text{s}$ và vận tốc 7 m/s và ra khỏi máy bơm theo hướng vuông góc với vỏ bơm, như hình P5.25. Xác định lực tác dụng lên trục (cũng là lực tác dụng lên giá đỡ của trục) theo hướng trục.



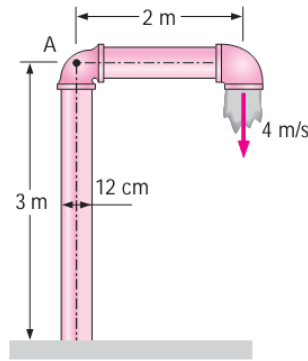
Hình P5.25

Phương trình mô-men động lượng

5.26LT Viết phương trình mô-men động lượng dưới dạng véc tơ cho dòng không ổn định đối với một thể tích khối chế có mô-men quán tính không đổi I , không có mô-men lực ngoài, một cửa ra dòng chảy đều vận tốc V và lưu lượng khối lượng \dot{m} .

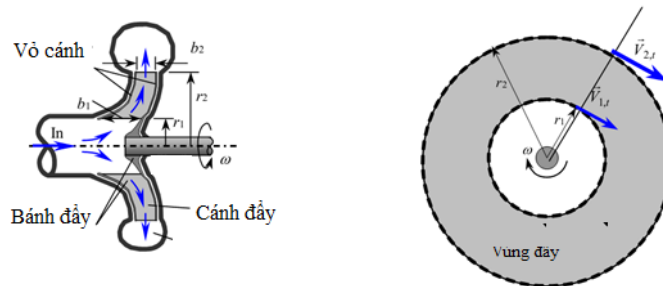
5.27LT Viết phương trình mô-men động lượng dưới dạng vô hướng đối với một trục quay cụ thể cho một thể tích khối chế cố định với dòng chảy đều và ổn định.

5.28 Nước chảy qua một đường ống có đường kính 12 cm , bao gồm một đoạn thẳng đứng dài 3 m và đoạn nằm ngang dài 2 m với một đầu khuỷu 90° quay xuống ở cửa ra, như thể hiện trong hình P5.28. Nước xả ra không khí trong điều kiện khí quyển với vận tốc 4 m/s , khối lượng của ống khi chứa nước là 15 kg/mét dài. Xác định mô-men lực tác dụng tại giao điểm của đoạn ống ngang và đoạn ống đứng (điểm A). Nếu ống xả ngược lên thì như thế nào?



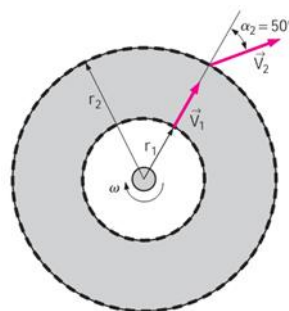
Hình P5.28

5.29. Bánh cánh của máy thổi ly tâm có bán kính 15 cm và chiều rộng là 6.1 cm ở cửa, bán kính 30 cm và chiều rộng 3.4 cm tại cửa thoát. Quạt thổi khí quyển ở không khí ở 20 °C và 95 kPa. Bỏ qua mọi tổn thất nào và giả thiết các thành phần tiếp tuyến của vận tốc không khí ở cửa vào và cửa ra tương đương với vận tốc cánh quạt tại các vị trí tương ứng, hãy xác định lưu lượng thể tích của không khí khi tốc độ quay của trục là 800 vòng/phút và mức tiêu thụ năng lượng là 120 W. Xác định các thành phần pháp tuyến của vận tốc ở cửa vào và cửa ra của bánh cánh.



Hình P5.53

5.30 Hãy xem xét một máy thổi ly tâm có bán kính 20 cm và chiều rộng của bánh cánh là 8.2 cm tại cửa vào và bán kính 45 cm và chiều rộng của bánh cánh là 5.6 cm ở cửa ra. Máy thổi khí cung cấp không khí với lưu lượng 0.70 m³/s ở tốc độ quay 700 vòng/phút. Giả sử không khí vào cánh quạt theo hướng xuyên tâm và thoát ra ở góc 50° từ hướng xuyên tâm, hãy xác định mức tiêu hao năng lượng tối thiểu của máy thổi. Lấy mật độ không khí là 1.25 kg/m³.



Hình P5.30

Chương 6. DÒNG CHẢY TRONG ĐƯỜNG ỐNG

Dòng chảy trong các đường ống là những ứng dụng thường gặp trong thực tế. Nước mà chúng ta sử dụng trong sinh hoạt hàng ngày được cung cấp qua hệ thống đường ống nước trong thành phố bao gồm các mạng lưới đường ống cấp nước rất phức tạp. Dầu và khí tự nhiên được vận chuyển đi xa hàng trăm kilomet bằng những đường ống có kích thước lớn. Máu được vận chuyển khắp cơ thể của chúng ta bằng các động mạch và tĩnh mạch. Nước làm mát động cơ được vận chuyển bằng đường ống đến các ống trong bộ tản nhiệt để làm mát động cơ.

Trong chương này, chúng ta xem xét dòng chảy trong ống dẫn trong trường hợp được chứa đầy chất lỏng và động lực chính tạo ra dòng chảy là do chênh lệch áp suất. Điều này khác với dòng chảy trong các kênh dẫn. Trong kênh dẫn, thường một phần chất lỏng có mặt thoáng tự do và dòng chảy được tạo ra chủ yếu là do lực trọng trường.

Chương này bắt đầu với việc mô tả các tính chất vật lý của dòng chảy trong lớp biên vận tốc. Tiếp theo, chúng ta sẽ thảo luận về số Reynolds và ý nghĩa vật lý của nó. Sau đó chúng ta thảo luận về các đặc trưng của dòng chảy trong đường ống và tìm hiểu mối tương quan giữa tổn thất áp suất, hệ số ma sát và các đặc trưng dòng chảy cho dòng chảy tầng và dòng chảy rối. Cuối cùng, chúng ta sẽ tìm hiểu về khái niệm tổn thất cục bộ và các phương pháp giải bài toán dòng chảy trong đường ống.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này sinh viên có thể:

- Có hiểu biết sâu sắc hơn về dòng chảy tầng và dòng chảy rối trong đường ống
- Tính toán được tổn dọc đường và tổn thất cục bộ của dòng chảy trong đường ống và giải được một số bài toán cơ bản trong đường ống đơn và mạng đường ống

6.1. Giới thiệu

Dòng chảy chất khí, chất lỏng trong đường ống hoặc kênh dẫn thường được gặp trong các ứng dụng thực tế như trong các hệ thống sưởi ấm, hệ thống làm mát và hệ thống phân phối chất lỏng. Chất lỏng trong các ứng dụng như vậy thường được “đẩy” chuyển động bởi máy bơm hoặc quạt gió tại một vị trí nào đó trong dòng chảy. Ma sát là một yếu tố cần được đặc biệt quan tâm vì nó liên quan trực tiếp đến tổn thất áp suất và năng lượng trong quá trình vận chuyển chất lỏng trong đường ống hoặc kênh dẫn. Tổn thất áp suất sẽ được sử dụng để xác định các yêu cầu về công suất bơm. Một hệ thống đường ống điển hình thường bao gồm các đường ống có đường kính khác nhau được nối với nhau bằng các phụ

kiện kết nối hoặc các khuấy để định tuyến dòng chảy chất lỏng, các van để kiểm soát tốc độ dòng chảy và máy bơm để tăng áp suất của chất lỏng.

Thuật ngữ đường ống và kênh dẫn thường được sử dụng cho các đoạn dòng chảy khác nhau. Nói chung, các đoạn dòng chảy có mặt cắt hình tròn được gọi là các đường ống và các đoạn dòng chảy có mặt cắt không tròn và hở là các kênh dẫn. Tuy nhiên, có thể sử dụng các cụm từ mang tính mô tả (ví dụ như ống tròn hoặc ống hình chữ nhật) khi cần thiết để tránh hiểu lầm.

Trong thực tế, có thể nhận thấy hầu hết các chất lỏng được vận chuyển bằng các ống tròn. Bởi đường ống với mặt cắt hình tròn có thể chịu được chênh lệch áp lực lớn giữa bên trong và bên ngoài mà ống không bị bóp méo. Ống không tròn thường được sử dụng trong các ứng dụng như hệ thống sưởi ấm và làm lạnh của các tòa nhà, nơi có sự chênh lệch áp suất tương đối nhỏ vì chi phí sản xuất và lắp đặt thấp hơn ống tròn.

Mặc dù quy luật chuyển động của chất lỏng đã được hiểu rõ thông qua các mô hình toán học, tuy nhiên các lời giải lý thuyết chỉ nhận được cho một số trường hợp đơn giản như trường hợp dòng chảy tầng ổn định trong đường ống tròn. Do đó, chúng ta thường phải dựa vào các kết quả thực nghiệm và các mối quan hệ thực nghiệm đối với hầu hết các vấn đề dòng chảy chất lỏng thay vì các lời giải giải tích tường minh. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng các kết quả thực nghiệm chỉ là kết quả thu được trong điều kiện phòng thí nghiệm và vì trong thực tế không thể có hai hệ thống giống hệt nhau, cho nên chúng ta không được phép xem kết quả nhận được từ thí nghiệm là "chính xác" cho tất cả các trường hợp.

Vận tốc chất lỏng trong đường ống thay đổi từ 0 tại bề mặt thành ống do điều kiện bám dính và đạt đến giá trị cực đại trên trục ống. Do đó, để thuận tiện hơn, chúng ta sẽ làm việc với vận tốc trung bình V_{avg} , vận tốc này là không đổi trong dòng chảy không nén được khi diện tích mặt cắt của ống là không đổi. Vận tốc trung bình trong các đường ống sưởi ấm và làm mát có thể thay đổi một chút do sự thay đổi của mật độ theo nhiệt độ. Tuy nhiên, trong thực tế, chúng ta có thể lấy các giá trị của các tính chất tại nhiệt độ trung bình và coi chúng như những hằng số. Ngoài ra, ma sát giữa các hạt chất lỏng trong một đường ống dẫn đến sự gia tăng nhẹ của nhiệt độ chất lỏng do năng lượng cơ học được chuyển thành năng lượng nhiệt. Nhưng sự gia tăng nhiệt độ này là nhỏ và thường được bỏ qua.

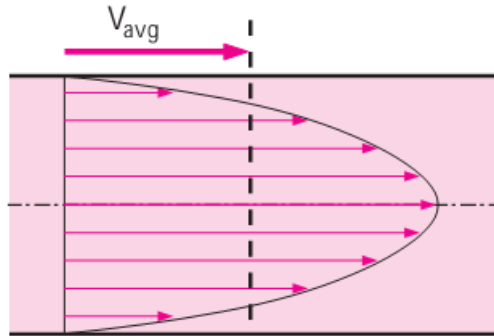
Giá trị của vận tốc trung bình V_{avg} trên mặt cắt được xác định từ định luật bảo toàn khối lượng (Hình 6.1). Chúng ta có:

$$\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \int_{A_c} \rho u dA_c \quad (6.1)$$

ở đây \dot{m} là lưu lượng khối lượng, ρ là mật độ, A_c là diện tích thiết diện của dòng chảy và u là phân bố vận tốc trên A_c .

Trong ống tròn bán kính R , vận tốc trung bình cho dòng chảy đối xứng trục được xác định như sau:

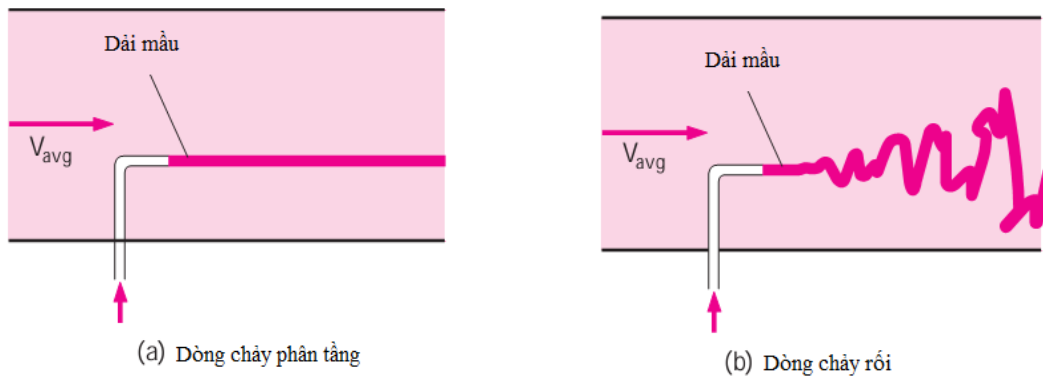
$$V_{avg} = \frac{\int_{A_c} u(r) dA_c}{A_c} = \frac{\int_0^R u(r) 2\pi r dr}{\pi R^2} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr \quad (6.2)$$



Hình 6.1 Xác định vận tốc trung bình của dòng chảy

6.2. Dòng chảy tầng và dòng chảy rối

Khi nhìn một người đang nhả khói thuốc lá, bạn có thể nhận thấy khói thuốc lá bay lên thành một dải mịn màng cho vài cm đầu tiên và sau đó bắt đầu dao động rối loạn theo mọi hướng khi tiếp tục bay lên. Tương tự như vậy, việc xem xét dòng chảy trong một đường ống cho thấy dòng chảy của chất lỏng là “êm đềm” ở vận tốc thấp nhưng trở thành hỗn loạn khi vận tốc tăng lên trên một giá trị nào đó, như Hình 6.2. Chế độ dòng chảy trong trường hợp đầu tiên được gọi là *dòng chảy tầng*, đặc trưng bởi dòng chảy êm và chuyển động có trật tự cao, còn trong trường hợp thứ hai được gọi là *dòng chảy rối*, được đặc trưng bởi sự biến động nhanh của vận tốc và các chuyển động hỗn loạn. Sự chuyển đổi chế độ dòng chảy không xảy ra đột ngột mà tồn tại một số khu vực chuyển tiếp, trong đó dòng chảy dao động giữa dòng chảy tầng và dòng chảy rối (được gọi là *dòng chảy chuyển tiếp*). Tuy nhiên, hầu hết các dòng chảy gặp trong thực tế là dòng chảy rối. Dòng chảy tầng chỉ xảy ra khi chất lỏng có độ nhớt cao chảy trong các đường ống nhỏ hoặc các kênh dẫn hẹp.



Hình 6.2 Ứng xử của dải chất lỏng màu khi được bơm vào dòng chảy tầng và dòng chảy rối

Chúng ta có thể làm thí nghiệm để nhận thấy sự tồn tại của các chế độ dòng chảy "tầng", "chuyển tiếp", và "rối" bằng cách thêm một vệt màu vào dòng chảy trong ống thủy tinh, như kỹ sư Anh Osborne Reynolds (1842-1912) đã làm cách đây hơn một thế kỷ. Chúng ta sẽ quan sát thấy rằng dải màu tạo thành một đường thẳng và mịn ở vận tốc thấp khi dòng chảy là chảy tầng, dải màu có những sự dao động trong chế độ chuyển tiếp và dao động mạnh, nhanh và hỗn loạn khi dòng chảy trở thành hoàn toàn rối.

Sự pha trộn mạnh của chất lỏng trong dòng chảy rối là do sự dao động nhanh của các hạt chất lỏng, điều này làm gia tăng sự chuyển giao động lượng giữa các lớp chất lỏng và do đó làm tăng lực ma sát trên các bề mặt, lực ma sát đạt đến mức tối đa khi dòng chảy trở nên rối hoàn toàn.

6.2.1. Số Reynolds

Sự chuyển đổi từ dòng chảy tầng đến dòng chảy rối có thể phụ thuộc vào hình học, độ gồ ghề của bề mặt, vận tốc dòng chảy, nhiệt độ bề mặt, loại chất lỏng và nhiều yếu tố khác. Bằng những thí nghiệm của mình vào những năm 1880, Osborne Reynolds đã phát hiện ra rằng chế độ dòng chảy chủ yếu phụ thuộc vào tỷ số giữa lực quán tính và lực nhớt trong chất lỏng. Tỷ số này được gọi là số Reynolds và được xác định cho dòng chảy trong ống tròn như sau:

$$Re = \frac{\text{Lực quán tính}}{\text{Lực nhớt}} = \frac{V_{avg} D}{\nu} = \frac{\rho V_{avg} D}{\mu} \quad (6.3)$$

trong đó V_{avg} là vận tốc trung bình (m/s), D là độ dài đặc trưng (trong trường hợp ống tròn là đường kính ống) và $\nu = \mu/\rho$ là hệ số nhớt động học của chất lỏng. Số Reynolds là đại lượng không thứ nguyên. Hệ số nhớt động học có đơn vị là m^2/s , có cùng đơn vị với hệ số khuếch tán vì thế được gọi là hệ số khuếch tán động lượng.

Khi số Reynolds lớn, có nghĩa là lực quán tính (tỉ lệ thuận với mật độ chất lỏng và bình phương của vận tốc chất lỏng) lớn hơn nhiều so với lực nhớt, khi đó các lực nhớt không thể ngăn cản được sự dao động nhanh và ngẫu nhiên của các hạt chất lỏng. Chuyển động của chất lỏng trở thành chuyển động rối. Tuy nhiên, khi số Reynolds nhỏ hoặc vừa phải, lực nhớt đủ lớn để ngăn chặn các dao động này và giữ cho các hạt chất lỏng chuyển động "theo đường thẳng". Chuyển động của chất lỏng khi đó là chuyển động chảy tầng.

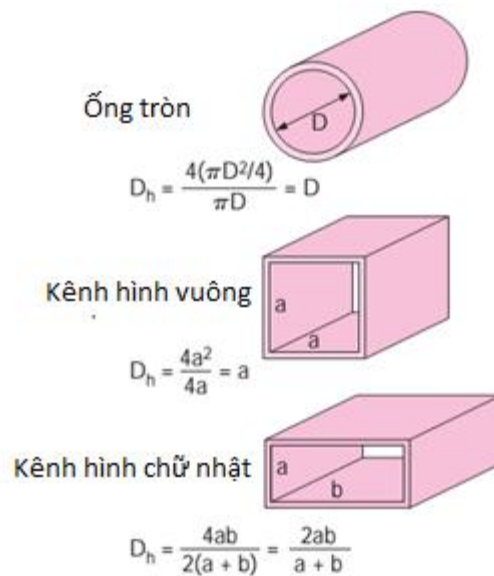
Số Reynolds tại giá trị khi mà dòng chảy trở thành chuyển động rối được gọi là số Reynolds tới hạn, Re_{cr} . Giá trị của số Reynolds tới hạn là khác nhau đối với các điều kiện dòng chảy khác nhau. Đối với dòng chảy trong ống tròn, giá trị được chấp nhận rộng rãi của số Reynolds tới hạn là $Re_{cr} = 2300$.

6.2.2. Đường kính thủy lực

Đối với ống không tròn, số Reynolds được xác định dựa trên đường kính thủy lực D_h được định nghĩa như sau (Hình 6.3):

$$D_h = \frac{4A_c}{p} \quad (6.4)$$

ở đây A_c là diện tích mặt cắt ướt và p là chu vi ướt.



Hình 6.3 Xác định đường kính thủy lực

Trong thực tế, sự chuyển đổi chế độ dòng chảy từ chảy tầng sang rối phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau. Tuy nhiên đối với dòng chảy trong ống tròn, có thể sử dụng sự phân loại dựa vào số Reynolds như sau:

$Re \leq 2300$ dòng chảy tầng

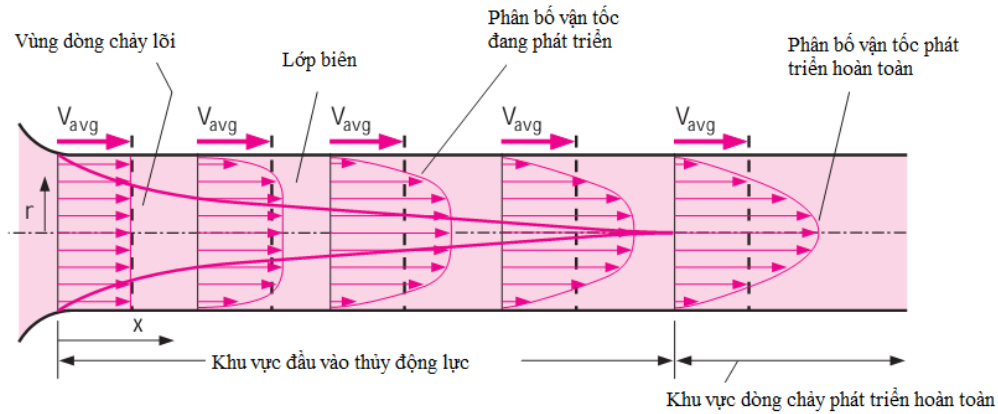
$2300 < Re \leq 4000$ dòng chảy chuyển tiếp

$Re > 4000$ dòng chảy rối

6.3. Khu vực phát triển dòng chảy

6.3.1. Khu vực phát triển dòng chảy

Xem xét chất lỏng chuyển động đi vào một ống tròn với phân bố vận tốc đều. Do điều kiện không trơn trượt, các hạt chất lỏng trong lớp tiếp xúc với bề mặt của ống dẫn có vận tốc bằng 0. Lớp chất lỏng này làm cho các hạt chất lỏng trong các lớp liền kề chậm lại do ma sát. Để bù cho sự giảm tốc độ này, vận tốc của chất lỏng ở phần giữa của ống phải tăng lên để giữ lưu lượng khối lượng của dòng chảy là không đổi. Kết quả là gradient vận tốc phát triển dọc theo đường ống. Khu vực của dòng chảy bị ảnh hưởng bởi lực cắt do tính nhớt của chất lỏng có thể nhận thấy được và được gọi là *lớp biên vận tốc* hay đơn giản là *lớp biên*. Bề mặt lớp biên phân chia dòng chảy trong đường ống thành hai khu vực: khu vực lớp biên, trong đó các hiệu ứng nhớt và sự thay đổi vận tốc là đáng kể và khu vực dòng chảy *không xoáy*, trong đó các hiệu ứng ma sát là không đáng kể và về cơ bản vận tốc là không đổi trên mặt cắt ngang vòng góc với dòng chảy.

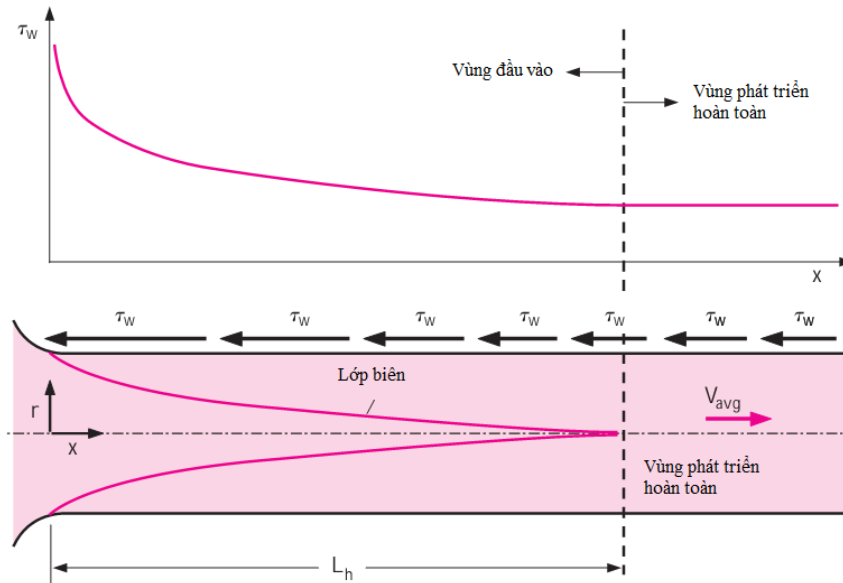


Hình 6.4 Phát triển của lớp biên và phân bố vận tốc trong đường ống

Độ dày của lớp biên tăng lên theo hướng dòng chảy cho đến khi lớp biên chiếm toàn bộ đường ống, như thể hiện trên Hình 6.4. Khu vực từ lối vào đến điểm mà tại đó các lớp biên sáp nhập ở trục ống được gọi là *khu vực đầu vào thủy động lực* và chiều dài của khu vực này được gọi là *chiều dài phát triển dòng vào* L_h . Khu vực cửa vào được gọi là *khu vực phát triển thủy động lực* bởi vì đây là khu vực hình thành phân bố vận tốc. Khu vực nằm sau khu vực đầu vào thủy động lực, nơi mà phân bố vận tốc được phát triển đầy đủ và không thay đổi được gọi là *khu vực dòng chảy phát triển hoàn toàn*. Phân bố vận tốc trong khu vực dòng chảy phát triển hoàn toàn có dạng parabol đối với dòng chảy tầng và có phần phẳng hơn đối với dòng chảy rối với sự xáo trộn mạnh mẽ hơn theo hướng ngang. Tuy nhiên, phân bố vận tốc trung bình theo thời gian không thay đổi trong dòng chảy phát triển hoàn toàn, do đó:

$$\frac{\partial u(r,x)}{\partial x} = 0 \quad \rightarrow \quad u = u(r) \quad (6.5)$$

Ứng suất cắt trên thành ống τ_w liên quan đến độ dốc của phân bố vận tốc tại thành. Vì phân bố vận tốc không thay đổi trong vùng dòng chảy phát triển hoàn toàn, cho nên ứng suất cắt trên thành ống cũng không đổi trong khu vực đó (Hình 6.5). Đối với dòng chảy của chất lỏng trong khu vực đầu vào của ống, ứng suất cắt trên thành là cao nhất ở cửa vào, nơi có độ dày của lớp biên là nhỏ nhất, sau đó giảm dần đến giá trị ứng suất của dòng chảy phát triển hoàn toàn, như thể hiện trên Hình 6.5. Do đó, tổn thất áp suất sẽ cao hơn ở khu vực cửa vào và ảnh hưởng của khu vực cửa vào làm tăng hệ số ma sát trung bình cho toàn bộ đường ống. Tuy nhiên, mức tăng này chỉ có ý nghĩa đối với đường ống ngắn nhưng không đáng kể đối với đường ống dài.



Hình 6.5: Biến thiên ứng suất cắt trên thành trong dòng chảy trong đường ống

6.3.2. Chiều dài phát triển dòng vào

Chiều dài phát triển dòng chảy đầu vào thường được lấy bằng khoảng cách từ cửa vào đến khi ứng suất cắt trên tường (hay hệ số ma sát) đạt ứng suất trên tường của dòng chảy phát triển hoàn toàn với sai số nằm trong khoảng 2%. Trong dòng chảy tầng, chiều dài này được xác định theo [Kays và Crawford (1993), Shah và Bhatti (1987)]:

$$L_{h,laminar} \cong 0.05ReD \quad (6.6)$$

Đối với $Re=20$, chiều dài phát triển dòng vào xấp xỉ bằng đường kính đường ống và tăng lên tỷ lệ với vận tốc. Trong trường hợp giới hạn của dòng chảy tầng với $Re=3200$, chiều dài phát triển dòng vào là khoảng $115D$.

Trong dòng chảy rối, chiều dài phát triển dòng vào được xác định theo [Bhatti và Shah (1987), Zhi-qing (1982)]:

$$L_{h,turbulent} \cong 1.359DRe_D^{1/4} \quad (6.7)$$

Chiều dài phát triển dòng trong dòng chảy rối phụ thuộc ít hơn vào số Reynolds. Trong thực tế, hiệu ứng cửa vào là không quan trọng sau khoảng cách cỡ 10 lần đường kính của đường ống, vì vậy công thức sau đây thường được sử dụng:

$$L_{h,turbulent} \cong 10D \quad (6.8)$$

6.4. Dòng chảy tầng trong đường ống

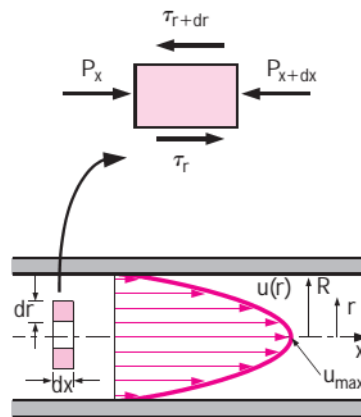
Trong mục 6.2, chúng ta đã cho rằng dòng chảy trong đường ống là có chế độ chảy tầng khi $Re < 2300$ và dòng chảy được coi phát triển hoàn toàn nếu đường ống là đủ dài (so với chiều dài phát triển dòng vào) để các hiệu ứng cửa vào là

không đáng kể. Trong mục này, chúng ta xem xét dòng chảy ổn định không nén được trong khu vực phát triển hoàn toàn của đường ống thẳng tròn. Chúng ta thu nhận được phương trình động lượng bằng cách áp dụng định luật bảo toàn động lượng cho một phần tử thể tích vi phân và nhận được lời giải cho phân bố vận tốc. Sau đó chúng ta sử dụng phân bố vận tốc để thu nhận biểu thức cho hệ số ma sát. Lời giải nhận được ở đây là một trong những lời giải giải tích hiếm có cho dòng chảy nhớt.

Trong dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn, mỗi hạt chất lỏng di chuyển theo thành phần vận tốc trục (hướng theo trục của đường ống) theo đường thẳng và phân bố vận tốc $u(r)$ không thay đổi theo hướng dòng chảy. Không có chuyển động theo hướng ngang, do đó thành phần vận tốc theo hướng vuông góc với dòng chảy là ở mọi vị trí là bằng 0. Gia tốc của chất lỏng là bằng 0 vì dòng chảy là ổn định và phát triển hoàn toàn.

Xem xét một phần tử thể tích vi phân hình vành khuyên bán kính r , chiều dày dr , và chiều dài dx đồng trục với ống, như thể hiện trong Hình 6.6. Các lực tác dụng lên phần tử thể tích này chỉ liên quan đến áp suất và hiệu ứng nhớt và do đó áp lực và lực ứng suất cắt cần phải cân bằng. Từ đó, phương trình cân bằng lực tác dụng lên phần tử có dạng:

$$(2\pi r dr P)_x - (2\pi r dr P)_{x+dx} + (2\pi r dx \tau)_r - (2\pi r dx \tau)_{r+dr} = 0 \quad (6.9)$$



Hình 6.6: Xem xét thể tích vi phân hình vành khuyên

Chia 2 vế cho $2\pi r dr dx$ và sắp xếp lại ta có:

$$r \frac{P_{x+dx} - P_x}{dx} + \frac{(r\tau)_{r+dr} - (r\tau)_r}{dr} = 0 \quad (6.10)$$

Lấy $dr, dx \rightarrow 0$:

$$r \frac{dP}{dx} + \frac{d(r\tau)}{dr} = 0 \quad (6.11)$$

Thay $\tau = -\mu(du/dr)$ với $\mu = \text{const}$, ta nhận được:

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dP}{dx} \quad (6.12)$$

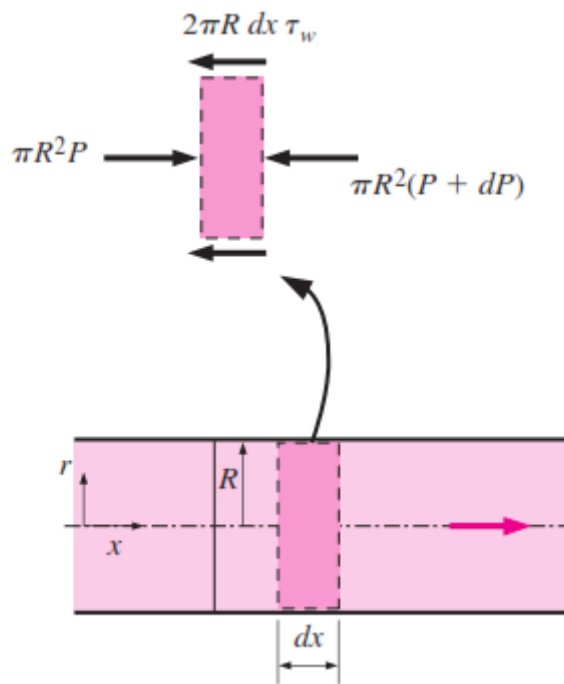
Nhận thấy rằng vế phải phương trình là hàm số của x , vế trái là hàm số của r . Vì x và r là hai biến số độc lập do đó cả 2 vế phương trình phải là hằng số. Điều đó có nghĩa là $dP/dx = \text{const}$. Mặt khác, viết phương trình cân bằng lực cho phần tử chất lỏng hình đĩa bán kính R và bề dày dx (Hình 6.7), ta nhận được:

$$\pi R^2 P - \pi R^2 (P + dP) - 2\pi R dx \tau_w = 0$$

Từ đó:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{2\tau_w}{R} \quad (6.13)$$

ở đây τ_w là ứng suất cắt trên thành ống.



Hình 6.7 Phần tử vi phân hình đĩa, bán kính R .

Giải phương trình (6.12) cho $u(r)$ ta nhận được:

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) r^2 + C_1 \ln r + C_2 \quad (6.14)$$

Các hằng số tích phân được xác định từ điều kiện: $\partial u / \partial r = 0$ tại $r=0$ (do điều kiện đối xứng) và $u(R)=0$ (do điều kiện không trơn trượt). Từ đó:

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (6.15)$$

Như vậy, phân bố vận tốc $u(r)$ có dạng parabol, với giá trị cực đại tại $r=0$ và có giá trị bằng 0 tại $r=R$. Bởi vì vận tốc trục có giá trị dương do đó dP/dx phải có giá trị âm, điều đó có nghĩa là áp suất giảm dần theo hướng dòng chảy.

Vận tốc trung bình của dòng chảy được xác định như sau:

$$V_{avg} = \frac{2}{R^2} \int_0^R u(r) r dr = \frac{-2}{R} \int_0^R \frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) r dr = -\frac{R^2}{8\mu} \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (6.16)$$

Từ đó, ta có:

$$u(r) = 2V_{avg} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (6.17)$$

Vận tốc cực đại trên trục đường ống được xác định như sau:

$$u_{max} = 2V_{avg} \quad (6.18)$$

6.4.1. Sụt áp suất và tổn thất cột chất lỏng

Trong phân tích dòng chảy trong đường ống, chúng ta quan đến sự sụt áp suất ΔP bởi vì nó liên quan trực tiếp đến yêu cầu về công suất của máy bơm hay quạt để duy trì dòng chảy. Để ý rằng $dP/dx = \text{const}$ và lấy tích phân từ điểm $x=x_1$ với $P=P_1$ đến điểm $x=x_1+L$ với $P=P_2$, ta có:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{P_2 - P_1}{L} \quad (6.19)$$

Rút dP/dx từ (6.16) và thế vào (6.19), ta nhận được:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\mu L V_{avg}}{R^2} = \frac{32\mu L V_{avg}}{D^2} \quad (6.20)$$

Phương trình (6.20) cho thấy sụt áp suất dọc theo dòng chảy tỷ lệ thuận với độ nhớt của chất lỏng. Khi độ nhớt bằng 0 thì sụt áp suất là bằng 0, do đó trong trường hợp này có thể nói rằng sự sụt áp suất là hoàn toàn do các hiệu ứng nhớt.

Trong thực tế, để thuận tiện, đối với các chế độ dòng chảy khác nhau, đường ống có thiết diện và chất liệu khác nhau, sự sụt áp suất trên đoạn ống có độ dài L được biểu diễn thông qua hệ số ma sát f như sau:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{avg}^2}{2} \quad (6.21)$$

Hệ số ma sát f còn được gọi là hệ số ma sát Darcy hay Darcy-Weisbach, theo tên của 2 nhà khoa học người Pháp Henry Darcy (1803–1858) và người Đức Julius Weisbach (1806–1871), đã có nhiều đóng góp trong nghiên cứu dòng chảy trong đường ống.

Từ phương trình (6.20) và (6.21) có thể nhận được biểu thức tường minh cho hệ số ma sát f cho dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong ống tròn:

$$f = \frac{64\mu}{\rho D V_{avg}} = \frac{64}{Re} \quad (6.22)$$

Trong phân tích dòng chảy trong đường ống, sụt áp suất thường được biểu diễn thông qua tổn thất cột chất lỏng h_L :

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{avg}^2}{2g} \quad (6.23)$$

Từ phương trình (6.20), ta có:

$$V_{avg} = \frac{(P_1 - P_2)R^2}{8\mu L} = \frac{(P_1 - P_2)D^2}{32\mu L} = \frac{\Delta P D^2}{32\mu L} \quad (6.24)$$

Từ đó lưu lượng thể tích của chất lỏng trong dòng chảy tầng nằm ngang được xác định phụ thuộc vào sụt áp suất ΔP như sau:

$$Q = V_{avg} A_c = \frac{(P_1 - P_2)}{8\mu L} \pi R^2 = \frac{(P_1 - P_2) \pi D^4}{128\mu L} = \frac{\Delta P \pi D^4}{128\mu L} \quad (6.25)$$

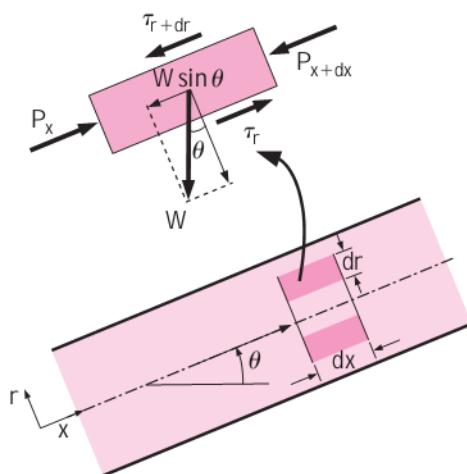
Phương trình này được gọi là định luật Poiseuille, và dòng chảy trong trường hợp này được gọi là dòng chảy Hagen-Poiseuille để vinh danh hai nhà khoa học G. Hagen (1797–1884) và J. Poiseuille (1799–1869).

6.4.2. Đường ống nằm nghiêng

Phương trình cho đường ống nằm nghiêng có thể nhận được một cách tương tự từ phương trình cân bằng lực theo hướng chuyển động. Lực duy nhất thêm vào ở đây là thành phần trọng lực của phần tử chất lỏng theo hướng chuyển động mà giá trị của nó là:

$$W_x = W \sin \theta = \rho g V_{\text{phần tử}} \sin \theta = \rho g (2\pi r dr dx) \sin \theta \quad (6.26)$$

ở đây θ là góc giữa phương nằm ngang và hướng chuyển động (Hình 6.8)



Hình 6.8 Cân bằng lực cho phần tử chất lỏng trong ống nghiêng

Phương trình cân bằng lực trở thành có dạng:

$$(2\pi r dr P)_x - (2\pi r dr P)_{x+dx} + (2\pi r dx \tau)_r - (2\pi r dx \tau)_{r+dr} - \rho g (2\pi r dr dx) \sin \theta = 0 \quad (6.27)$$

Từ đó thu nhận được phương trình vi phân:

$$\frac{\mu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{du}{dr} \right) = \frac{dP}{dx} + \rho g \sin \theta \quad (6.28)$$

và lời giải cho phân bố vận tốc là:

$$u(r) = -\frac{R^2}{4\mu} \left(\frac{dP}{dx} + \rho g \sin \theta \right) \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (6.29)$$

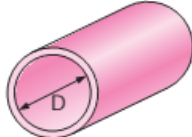
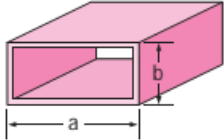
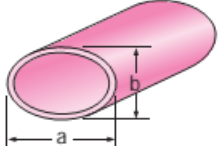
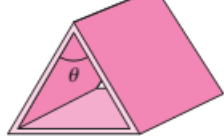
Tương tự như trường hợp ống nằm ngang, biểu thức cho vận tốc trung bình và lưu lượng cho đường ống nghiêng có dạng:

$$V_{avg} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) D^2}{32 \mu L} \quad \text{và} \quad Q = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \quad (6.30)$$

6.4.3. Dòng chảy tầng trong đường ống không tròn

Biểu thức xác định hệ số ma sát f được cho trong Bảng 6.1 đối với dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong các ống có hình học mặt cắt ngang khác nhau. Số Reynolds trong các ống này được xác định dựa trên đường kính thủy lực $D_h = 4Ac/p$, $Re = V_{avg} D_h / \nu$ trong đó Ac diện tích ướt mặt cắt ngang và p là chu vi ướt.

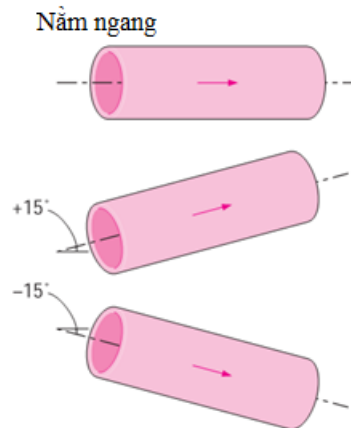
Bảng 6.1 Hệ số ma sát trong dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn cho các mặt cắt có hình học khác nhau

Hình học	a/b or θ°	Hệ số ma sát f
Hình tròn 	—	64.00/Re
Hình chữ nhật 	1 2 3 4 6 8 ∞	56.92/Re 62.20/Re 68.36/Re 72.92/Re 78.80/Re 82.32/Re 96.00/Re
Hình ellip 	1 2 4 8 16	64.00/Re 67.28/Re 72.96/Re 76.60/Re 78.16/Re
Hình tam giác 	θ 10° 30° 60° 90° 120°	50.80/Re 52.28/Re 53.32/Re 52.60/Re 50.96/Re

Trong ống nghiêng, hiệu ứng kết hợp của chênh lệch áp suất và trọng lực là động lực tạo dòng chảy. Trọng lực hỗ trợ dòng chảy xuống nhưng chống lại dòng chảy lên. Do đó, áp lực lớn hơn cần được áp dụng để duy trì dòng chảy ngược lên trong ống nghiêng. Trong trường hợp đặc biệt không có dòng chảy ($Q = 0$), chúng ta cần có $\Delta P = \rho g L \sin \theta$ để duy trì chất lỏng trong ống nghiêng ở trạng thái tĩnh.

6.4.4. Ví dụ 6.1: Lưu lượng dòng chảy trong ống nằm ngang và ống nghiêng

Dầu ở 20 °C ($\rho = 888 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 0.800 \text{ kg/m.s}$) chảy đều trong đường ống dài 40 m đường kính 5 cm (Hình 6.9). Áp suất tại đầu vào và đầu ra ống đo được lần lượt là 745 và 97 kPa. Xác định lưu lượng dầu qua đường ống giả sử đường ống là (a) nằm ngang, (b) nghiêng từ 15 ° hướng lên, (c) nghiêng 15 ° hướng xuống. Kiểm tra lại dòng chảy trong các trường hợp này là dòng chảy tầng.



Hình 6.9 Sơ đồ cho ví dụ 6.1

Vấn đề: Số đo áp suất tại đầu vào và đầu ra của đường ống được cho. Cần xác định lưu lượng trong các ống có góc nghiêng khác nhau khi dòng chảy ở chế độ chảy tầng.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, do đó dòng chảy được coi là phát triển hoàn toàn; (3) Ống không có các thành phần như uốn cong, van và đầu nối; (4) Đoạn ống không bao gồm các thiết bị làm việc như bơm hay tua bin.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động lực của dầu được cho là $\rho = 888 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 0.800 \text{ kg/m.s}$

Phân tích: Chênh lệch áp suất và diện tích mặt cắt ngang đường ống là:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 745 - 97 = 648 \text{ kPa}$$
$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0.05 \text{ m})^2}{4} = 0.001963 \text{ m}^2$$

Lưu lượng qua đường ống được xác định theo công thức:

$$Q = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L}$$

Đối với đường ống nằm ngang $\theta = 0$

$$Q = \frac{\Delta P \pi D^4}{128 \mu L} = \frac{(648 \times 10^3 \text{ Pa}) \pi (0.05 \text{ m})^4}{128 \left(0.8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right) (40 \text{ m})} = 0.00311 \text{ (m}^3/\text{s)}$$

Đối với đường ống nghiêng hướng lên $\theta = +15^\circ$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \\ &= \frac{[648000 \text{ Pa} - (888 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(40 \text{ m}) \sin 15^\circ] \pi (0.05 \text{ m})^4}{128 \left(0.8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right) (40 \text{ m})} \\ &= 0.00267 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \end{aligned}$$

Đối với đường ống nghiêng hướng xuống $\theta = -15^\circ$

$$\begin{aligned} Q &= \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \\ &= \frac{[648000 \text{ Pa} - (888 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(40 \text{ m}) \sin(-15^\circ)] \pi (0.05 \text{ m})^4}{128 \left(0.8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right) (40 \text{ m})} \\ &= 0.00354 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \end{aligned}$$

Vận tốc lớn nhất trong dòng chảy xuống tương ứng với số Reynolds là:

$$\begin{aligned} V_{avg} &= \frac{Q}{A_c} = \frac{0.00354 \text{ m}^3/\text{s}}{0.001963 \text{ m}^2} = 1.8 \text{ m/s} \\ Re &= \frac{\rho V_{avg} D}{\mu} = \frac{(888 \text{ kg/m}^3)(1.80 \text{ m/s})(0.05 \text{ m})}{0.8 \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}} = 100 \end{aligned}$$

nhỏ hơn 2300 rất nhiều. Do đó cả ba trường hợp là dòng chảy tầng.

6.4.5. Ví dụ 6.2: Sụt áp suất và tổn thất cột chất lỏng trong đường ống

Nước ở nhiệt độ 40 °F ($\rho = 62.42 \text{ lbm/ft}^3$ và $\mu = 1.038 \times 10^{-3} \text{ lbm/ft} \cdot \text{s}$) chảy qua một đường ống ngang ngang dài 0.2 inch (= 0.01 ft) dài 30 ft với vận tốc trung bình là 3.0 ft/s. Xác định (a) tổn thất cột chất lỏng, (b) sụt áp suất và (c) yêu cầu về công suất bơm để duy trì dòng chảy.

Vấn đề: Vận tốc dòng chảy trung bình trong ống đã cho. Xác định tổn thất cột chất lỏng, sụt áp suất giữa hai đầu ống và công suất máy bơm.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào không đáng kể; (3) Ống không có các thành phần như uốn cong, van và đầu nối.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động lực của nước được cho là $\rho = 62.42 \text{ lbm/ft}^3$ và $\mu = 1.038 \times 10^{-3} \text{ lbm/ft} \cdot \text{s}$

Phân tích: (a) Trước tiên cần xác định số Reynolds:

$$Re = \frac{\rho V_{avg} D}{\mu} = \frac{(62.42 \text{ lbm/ft}^3)(3 \text{ ft/s})(0.01 \text{ ft})}{1.038 \times 10^{-3} \frac{\text{lbm}}{\text{ft}} \cdot \text{s}} = 1803$$

$Re < 2300$ do đó dòng chảy là chảy tầng. Từ đó ta có:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1803} = 0.0355$$

$$h_L = f \frac{L V_{avg}^2}{D 2g} = 0.0355 \frac{30 \text{ ft} (3 \text{ ft/s})^2}{0.01 \text{ ft} 2(32.2 \text{ ft/s}^2)} = 14.9 \text{ ft}$$

(b) Sụt áp suất giữa hai đầu đường ống là:

$$\Delta P = \Delta P_L = f \frac{L \rho V_{avg}^2}{D 2} = 0.0355 \frac{30 \text{ ft} (62.42 \text{ lbm/ft}^3)(3 \text{ ft/s})^2}{0.01 \text{ ft} 2} \left(\frac{1 \text{ lbf}}{32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2} \right)$$

$$= 929 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} = 6.45 \text{ psi}$$

(c) Lưu lượng và công suất bơm cần thiết để duy trì dòng chảy là:

$$Q = V_{avg} A_c = V_{avg} (\pi D^2 / 4) = (3 \text{ ft/s}) [\pi (0.01 \text{ ft})^2 / 4] = 0.000236 \text{ ft}^3 / \text{s}$$

$$\dot{W}_{pump} = Q \Delta P = (0.000236 \text{ ft}^3 / \text{s}) (929 \text{ lbf/ft}^2) \left(\frac{1 \text{ W}}{0.737 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s}} \right) = 0.3 \text{ W}$$

Thảo luận: Máy bơm bán trên thị trường thường ghi thông số về cột nước. Trong trường hợp này máy bơm có thông số về cột nước lớn hơn 14.9 ft cần được sử dụng.

6.5. Dòng chảy rối trong đường ống

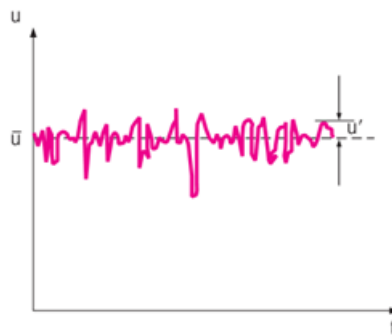
Hầu hết các dòng chảy gặp trong thực tế là dòng chảy rối, vì vậy điều quan trọng là phải hiểu chuyển động rối ảnh hưởng thế nào đến ứng suất cắt trên thành ống. Tuy nhiên, cơ chế dòng chảy rối là rất phức tạp bị chi phối bởi các biến động ngẫu nhiên, mặc dù các nhà nghiên cứu đã thực hiện rất nhiều công việc trong lĩnh vực này, lý thuyết về dòng chảy rối vẫn còn chưa được phát triển thỏa đáng. Vì vậy, phân tích dòng chảy rối trong đường ống vẫn cần phải dựa vào các quan hệ thực nghiệm hoặc bán thực nghiệm thu nhận được trong các điều kiện khác nhau.

Dòng chảy rối được đặc trưng bởi sự biến động nhanh và ngẫu nhiên của các xoáy nhỏ của chất lỏng trong dòng chảy. Những biến động này tạo ra một cơ chế bổ sung cho các quá trình chuyển giao động lượng và năng lượng. Trong dòng chảy tầng, các hạt chất lỏng "chảy" một cách có trật tự dọc theo các đường dòng, động lượng và năng lượng được truyền qua lại giữa các đường dòng thông qua cơ chế khuếch tán phân tử. Trong dòng chảy rối, các xoáy vận chuyển khối lượng, động lượng và năng lượng sang các vùng khác của dòng chảy nhanh hơn khuếch tán phân tử, do đó có sự gia tăng tốc độ chuyển giao khối lượng, động lượng và năng lượng trong dòng chảy rối. Kết quả là, trong dòng chảy rối, giá trị

các hệ số liên quan đến ma sát, truyền nhiệt và truyền chất cao hơn nhiều so với dòng chảy tầng.

Ngay cả khi lưu lượng trung bình là ổn định, chuyển động xoáy trong dòng chảy rối gây ra những biến động đáng kể cho các giá trị của vận tốc, nhiệt độ, áp suất, và mật độ. Hình 6.10 chỉ ra sự thay đổi của thành phần vận tốc tức thời u theo thời gian tại một vị trí xác định, có thể đo được bằng một đầu đo dây nóng hoặc các thiết bị nhạy cảm khác. Chúng ta quan sát thấy rằng các giá trị tức thời của vận tốc dao động xung quanh giá trị trung bình, do đó vận tốc có thể được biểu diễn như tổng của giá trị trung bình \bar{u} và thành phần dao động u' :

$$u = \bar{u} + u' \quad (6.31)$$



Hình 6.10 Dao động của vận tốc tức thời xung quanh giá trị trung bình

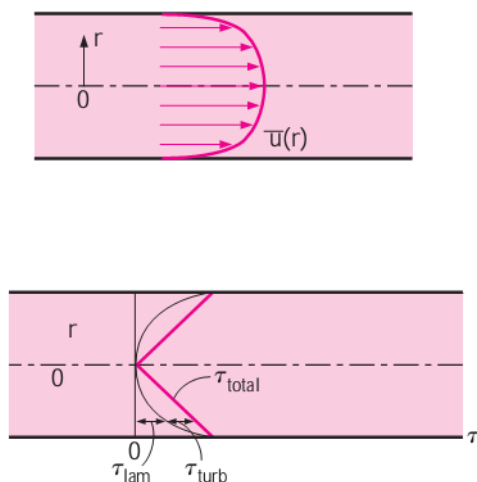
Tương tự đối với các tính chất khác của dòng chảy, ví dụ như thành phần vận tốc theo trục y là v , vậy ta có: $v = \bar{v} + v'$, $P = \bar{P} + P'$, và $T = \bar{T} + T'$. Giá trị trung bình của một tính chất tại một vị trí được xác định bằng cách lấy trung bình trong một khoảng thời gian đủ lớn để nhận được giá trị trung bình là một hằng số. Khi đó, giá trị trung bình của các thành phần dao động là 0, ví dụ $\bar{u}' = 0$. Độ lớn của u' thường chỉ bằng một vài phần trăm của \bar{u} , nhưng tần số dao động cao (khoảng một phần nghìn giây) do đó chúng rất có hiệu quả cho việc chuyển giao động lượng, năng lượng và khối lượng. Trong dòng chảy rối ổn định, các giá trị trung bình của các tính chất (được biểu diễn bằng đại lượng có dấu gạch trên) là không phụ thuộc vào thời gian. Chuyển động ngẫu nhiên của các hạt chất lỏng ảnh hưởng mạnh đến các thông số dòng chảy, vì vậy những chuyển động ngẫu nhiên này cần phải được xem xét trong các phân tích cùng với giá trị của vận tốc trung bình.

Thông thường có thể cho rằng, trong trường hợp dòng chảy rối, ứng suất cắt có thể xác định bởi công thức $\tau = -\mu d\bar{u}/dr$. Tuy nhiên, thực nghiệm chỉ ra rằng, trong thực tế ứng suất cắt của dòng chảy rối lớn hơn nhiều. Vì vậy, để thuận tiện, đối với dòng chảy rối, ứng suất được coi như bao gồm hai thành phần: thành phần chảy tầng và thành phần rối:

$$\tau_{total} = \tau_{lam} + \tau_{turb} \quad (6.32)$$

Trong đó: $\tau_{lam} = -\mu d\bar{u}/dr$.

Phân bố vận tốc điển hình và các thành phần ứng suất cắt trong dòng chảy rối trong đường ống được minh họa trên Hình 6.11.



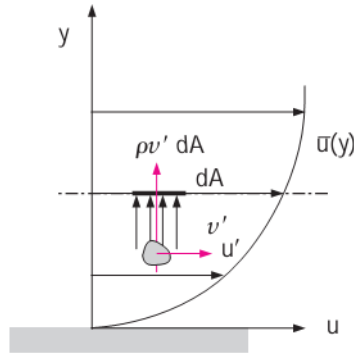
Hình 6.11: Phân bố vận tốc và các thành phần ứng suất cắt trong dòng chảy rối

6.5.1. Ứng suất cắt trong dòng chảy rối

Xem xét dòng chảy rối trong ống nằm ngang và chuyển động do dòng xoáy của các hạt chất lỏng trong lớp có vận tốc thấp hơn ảnh hưởng đến lớp lân cận có vận tốc cao hơn thông qua diện tích dA do thành phần dao động vận tốc v' như Hình 6.12. Lưu lượng khối lượng qua dA là $\rho v' dA$ và ảnh hưởng của nó lên lớp trên dA là giảm vận tốc dòng chảy trung bình do chuyển động các hạt chất lỏng lớp dưới có vận tốc dòng chảy trung bình thấp hơn. Sự chuyển giao động lượng này làm cho vận tốc nằm ngang của các hạt chất lỏng tăng lên u' , do đó động lượng của nó theo hướng nằm ngang tăng lên một khoản $(\rho v' dA)u'$ bằng với sự sụt giảm động lượng của lớp trên. Chú ý rằng lực theo một hướng nhất định là bằng với tốc độ thay đổi động lượng theo hướng đó, do đó lực nằm ngang tác dụng lên một phần tử chất lỏng trên dA do các hạt chất lỏng đi qua dA là $dF = (\rho v' dA) (-u') = -\rho u' v' dA$. Do đó, lực cắt trên một đơn vị diện tích do chuyển động xoáy của các hạt chất lỏng là $dF/dA = -\rho u' v'$ có thể được xem như ứng suất cắt rối tức thời. Vì vậy ứng suất cắt rối có thể được biểu diễn như sau:

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{u' v'} \quad (6.33)$$

ở đây $\overline{u' v'}$ là giá trị trung bình của tích các thành phần dao động của vận tốc u' và v' . Lưu ý rằng $\overline{u' v'} \neq 0$ ngay cả khi $\overline{u'}$ và $\overline{v'}$. Thực nghiệm chỉ ra rằng các giá trị $\overline{u' v'}$ thường có giá trị âm. Đại lượng $-\overline{\rho u' v'}$ hay $-\rho \overline{u' v'}$ được gọi là ứng suất Reynolds hay ứng suất rối.



Hình 6.12 Phần tử chất lỏng chuyển động lên lớp chất lỏng có vận vận tốc do thành phần dao động vận tốc v'

Nhiều công thức bán thực nghiệm đã được phát triển để ứng suất Reynolds có thể biểu diễn thông qua gradient của các vận tốc trung bình với mục đích cung cấp quan hệ toán học đóng kín cho các phương trình chuyển động. Các mô hình như vậy được gọi là mô hình rối được sử dụng để nghiên cứu dòng chảy rối.

Một trong mô hình rối đơn giản được đề xuất bởi nhà toán học người Pháp Joseph Boussinesq (1842–1929) vào năm 1877 như sau:

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{u'v'} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (6.34)$$

ở đây μ_t là hệ số nhớt xoáy hoặc hệ số nhớt rối. Khi đó tổng ứng suất được biểu diễn dưới dạng:

$$\tau_{turb} = (\mu + \mu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \rho(\nu + \nu_t) \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (6.35)$$

6.5.2. Hệ số ma sát trong dòng chảy rối

Thực nghiệm chỉ ra rằng hệ số ma sát trong dòng chảy rối phụ thuộc vào lưu lượng dòng chảy và bề mặt của thành ống. Tuy nhiên, mối quan hệ đó không nhận được từ các lời giải lý thuyết. Trong phân tích dòng chảy rối, hệ số ma sát có thể thu nhận được từ các quan hệ thực nghiệm và bán thực nghiệm.

Hầu hết các thí nghiệm được thực hiện bởi J. Nikuradse năm 1933, tiếp theo là các thí nghiệm của những tác giả khác. Hệ số ma sát được tính toán từ các kết quả đo vận tốc dòng chảy và tổn thất áp suất. Các kết quả thực nghiệm được trình bày dưới dạng bảng biểu, dạng đồ họa và các hàm hồi quy (công thức bán thực nghiệm). Năm 1939, Cyril F. Colebrook (1910-1997) đã kết hợp cơ sở dữ liệu sẵn có cho dòng chảy ở chế độ chuyển tiếp và dòng chảy rối trong các đường ống thành trơn cũng như thành nhám để nhận mối quan hệ ẩn giữa hệ số ma sát f , số Reynolds Re và độ nhám tương đối ϵ/D được gọi là phương trình Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (6.36)$$

ở đây số Reynolds Re được xác định dựa trên đường kính D của đường ống, độ nhám tương đối ε/D là tỷ số giữa độ nhám của bề mặt thành ống với đường kính D . Bảng 6.2 chỉ ra độ nhám của một số vật liệu.

Bảng 8.2 Giá trị độ nhám của một số vật liệu làm đường ống

Vật liệu	Độ nhám	
	ft	mm
Kính, nhựa	0 (vật liệu trơn)	0
Bê tông	0.003-0.03	0.9-9
Gỗ thô	0.0016	0.5
Cao su nhẵn	0.000033	0.01
Đồng (làm ống)	0.000005	0.0015
Sắt tôi	0.00085	0.26
Thép không rỉ	0.000007	0.002
Thép thường	0.00015	0.045

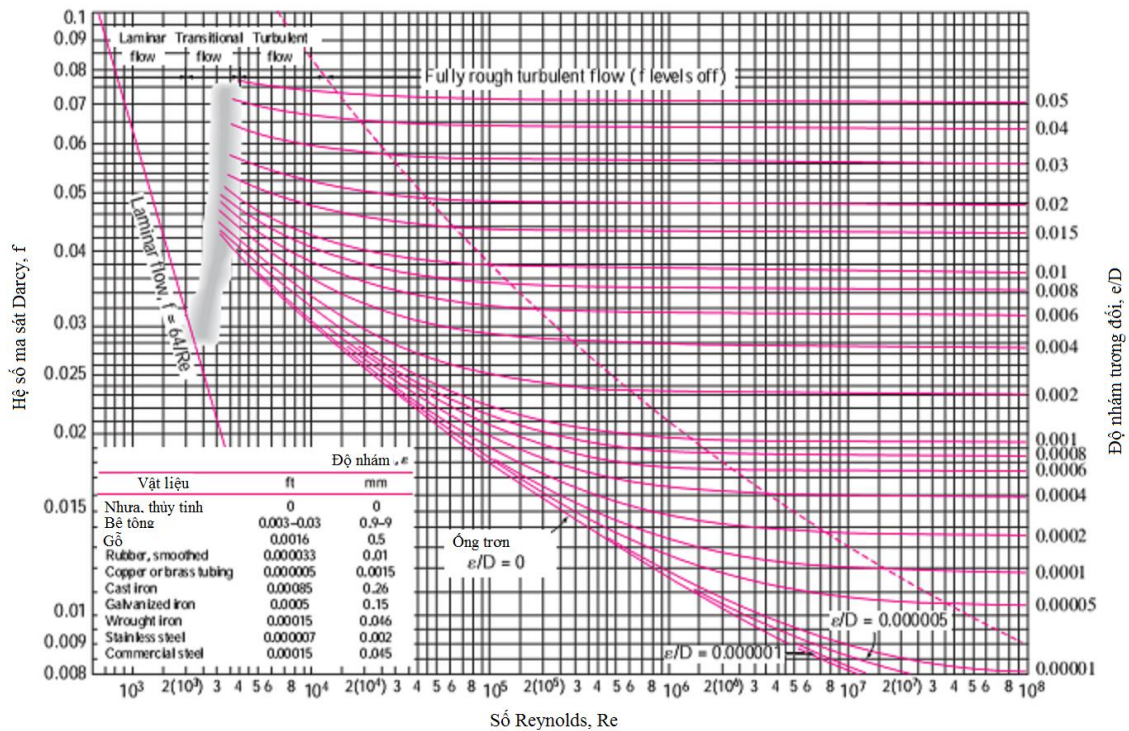
Năm 1944, Lewis Moody (1880-1953) đã giới thiệu biểu đồ dưới dạng đồ thị để tính hệ số ma sát. Biểu đồ trình bày hệ số ma sát Darcy cho dòng chảy trong đường ống như là hàm số của số Reynolds và ε/D trong một phạm vi rộng.

Phương trình Colebrook là phương trình ẩn đối với f , vì vậy để xác định f từ phương trình này cần một số bước giải lặp. Một công thức tường minh để tìm f được đưa ra bởi S.E. Haaland vào năm 1983 như sau:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left[\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} \right] \quad (8.37)$$

Công thức này cho sai số so với phương trình Colebrook trong khoảng 2%.

Biểu đồ Moody là một trong những phương pháp xác định hệ số ma sát được chấp nhận rộng rãi nhất và được sử dụng trong kỹ thuật cho đến ngày nay. Mặc dù được xây dựng dựa trên các kết quả thí nghiệm cho các đường ống tròn, biểu đồ này cũng có thể được sử dụng cho ống không tròn bằng cách thay thế đường kính ống bằng đường kính thủy lực. Sau đây là một số nhận xét về biểu đồ Moody (Hình 6.13):



Hình 6.13: Biểu đồ Moody

- Đối với dòng chảy tầng, hệ số ma sát giảm cùng với số Reynolds gia tăng, và nó không phụ thuộc vào độ nhám bề mặt.
- Hệ số ma sát là nhỏ nhất đối với ống trơn và tăng dần theo độ nhám. Phương trình Colebrook trong trường hợp ($\epsilon=0$) tiến đến phương trình Prandtl dưới dạng: $\frac{1}{\sqrt{f}} = 2.0 \log(Re\sqrt{f}) - 0.8$.
- Khu vực chuyển tiếp từ chế độ chảy tầng đến rối ($2300 < Re < 4000$) được chỉ ra bởi vùng mờ trên biểu đồ Moody (Hình 6.13). Dòng chảy trong khu vực này có thể là chảy tầng hoặc rối, phụ thuộc vào sự xáo trộn của dòng chảy, hoặc có thể luân phiên giữa chảy tầng và rối, do đó yếu tố ma sát cũng có thể thay đổi giữa các giá trị cho dòng chảy tầng và rối. Số liệu trong phạm vi này là không đáng tin cậy. Ở độ nhám tương đối nhỏ, hệ số ma sát gia tăng trong vùng chuyển tiếp và tiếp cận tới giá trị cho các đường ống trơn.
- Đối với số Reynolds rất lớn (ở bên phải của đường kẻ đứt trên biểu đồ) các đường cong hệ số ma sát tương ứng với hệ số nhám tương đối xác định là gần như nằm ngang, do đó các hệ số ma sát là không phụ thuộc vào số Reynolds (Hình 6.13). Dòng chảy trong vùng đó được gọi là dòng chảy rối nhám hoặc dòng chảy nhám hoàn toàn vì độ dày của lớp biên nhót giảm dần khi số Reynolds tăng lên và trở nên quá mỏng đến mức không đáng kể so với chiều cao nhám của bề mặt. Các hiệu ứng nhót trong trường hợp này được tạo ra chủ yếu bởi các yếu tố gồ ghề của bề mặt và sự đóng góp của lớp biên chảy tầng là không đáng kể.

Phương trình Colebrook trong vùng nhám hoàn toàn ($Re \rightarrow \infty$) đơn giản thành phương trình von Kármán: $\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left[\left(\frac{\epsilon}{D} \right) / 3.7 \right]$.

6.5.3. Ba bài toán cơ bản trong đường ống

Trong thiết kế và phân tích các hệ thống đường ống có liên quan đến việc sử dụng biểu đồ Moody (hay phương trình Colebrook), chúng ta thường gặp phải ba loại vấn đề (khi tính chất của chất lỏng và độ nhám hay vật liệu của đường ống được giả thiết là đã biết) :

1. Xác định tổn thất áp suất (hoặc tổn thất cột chất lỏng) khi cho biết chiều dài, đường kính đường ống và lưu lượng (hoặc vận tốc) dòng chảy (tìm ΔP hoặc h_L nếu biết L, D, Q hoặc V)
2. Xác định lưu lượng dòng chảy khi chiều dài, đường kính đường ống và tổn thất áp suất (hoặc tổn thất cột chất lỏng) đã biết (tìm Q nếu biết L, D và ΔP hoặc h_L)
3. Xác định đường kính ống khi chiều dài ống, lưu lượng dòng chảy và tổn thất áp suất (hoặc tổn thất cột chất lỏng) đã biết (tìm D nếu biết L, Q và ΔP hoặc h_L).

Bài toán đầu tiên là đơn giản và có thể được giải quyết trực tiếp bằng cách sử dụng biểu đồ Moody. Bài toán thứ hai và thứ ba thường gặp trong thiết kế kỹ thuật (trong việc lựa chọn đường kính ống, ví dụ như để giảm thiểu tổng chi phí xây dựng và máy bơm), nhưng việc sử dụng biểu đồ Moody với hai bài toán này đòi hỏi phải thực hiện bằng các bước lặp. Trong bài toán thứ hai, đường kính đã cho nhưng lưu lượng dòng chảy vẫn chưa được biết. Ban đầu cần giả thiết một hệ số ma sát nào đó, thường được lấy từ khu vực dòng chảy rối nhám hoàn toàn vì đây là các trường hợp thường gặp xảy ra trong thực tế. Khi có hệ số ma sát, vận tốc dòng chảy sẽ được xác định và hệ số ma sát lại có thể nhận được bằng biểu đồ Moody hoặc phương trình Colebrook hoặc các phương trình khác, quá trình này được lặp lại cho đến khi lời giải hội tụ (có nghĩa là sai số giữa hệ số ma sát giả định và hệ số ma sát tính toán là không đáng kể). Thông thường chỉ cần một vài lần lặp để hội tụ đến độ chính xác ba hoặc bốn chữ số sau dấu phẩy.

Trong bài toán thứ ba, đường kính chưa được biết và do đó không thể tính được số Reynolds và hệ số nhám tương đối. Vì vậy, chúng ta bắt đầu tính toán bằng cách giả định đường kính đường ống. Tổn thất áp suất được tính cho đường kính giả định sau đó được so sánh với tổn thất áp suất đã cho và tính toán được lặp lại với đường kính ống khác cho đến khi hội tụ. Để tránh lặp đi lặp lại để tính tổn thất cột chất lỏng, lưu lượng và tính toán đường kính, Swamee và Jain đã đề xuất các phương trình tường minh vào năm 1976 với độ chính xác trong phạm vi 2% của biểu đồ Moody:

$$h_L = 1.07 \frac{Q^2 L}{g D^5} \left\{ \ln \left[\frac{\epsilon}{3.7 D} + 4.62 \left(\frac{v D}{Q} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad \text{với } 10^{-6} < \epsilon/D < 10^{-2} \text{ và } 3000 < Re < 3 \times 10^8$$

(6.38)

$$Q = -0.965 \left(\frac{gD^5 h_L}{L} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} + \left(\frac{3.17v^2 L}{gD^3 h_L} \right)^{0.5} \right] \quad \text{với } Re > 2000 \quad (6.39)$$

$$D = 0.66 \left[\varepsilon^{1.25} \left(\frac{LQ^2}{gh_L} \right)^{4.75} + vQ^{9.4} \left(\frac{L}{gh_L} \right)^{5.2} \right]^{0.04} \quad \text{với } 10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2} \text{ và } 5000 < Re < 3 \times 10^8 \quad (6.40)$$

6.5.4. Ví dụ 6.3: Xác định tổn thất cột chất lỏng trong ống nước

Nước ở 60 °F ($\rho=62.36 \text{ lbm/ft}^3$ và $\mu=7.536 \times 10^{-4} \text{ lbm/ft.s}$) chảy đều trong đường ống nằm ngang đường 2 inch được làm bằng thép không rỉ với lưu lượng 0.2 ft³/s. Xác định tổn thất áp suất, tổn thất cột nước và công suất máy bơm cần thiết để duy trì dòng chảy trên đoạn ống dài 200 ft.

Vấn đề: Lưu lượng nước qua một đường ống cụ thể đã cho. Xác định tổn thất áp suất giảm, tổn thất cột nước và yêu cầu về công suất máy bơm.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào không đáng kể, do đó dòng chảy coi là đã phát triển hoàn toàn; (3) Ống không có các thành phần như uốn cong, van và đầu nối; (4) Đoạn ống không bao gồm các thiết bị làm việc như bơm hay tua bin.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động của nước được cho là $\rho=62.36 \text{ lbm/ft}^3$ và $\mu=7.536 \times 10^{-4} \text{ lbm/ft.s}$.

Phân tích: Chúng ta nhận ra đây là một vấn đề của bài toán thứ nhất, vì lưu lượng, chiều dài và đường kính đường ống đã biết. Trước tiên chúng ta tính vận tốc trung bình và số Reynolds để xác định chế độ dòng chảy:

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi D^2/4} = \frac{0.2 \text{ ft}^3/\text{s}}{\pi \left(\frac{2}{12} \text{ ft} \right)^2 / 4} = 9.17 \text{ ft/s}$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(62.36 \text{ lbm/ft}^3)(9.17 \text{ ft/s}) \left(\frac{2}{12} \text{ ft} \right)}{0.7536 \times 10^{-4} \frac{\text{lbm}}{\text{ft.s}}} = 126400$$

$Re > 4000$, vậy chế độ dòng chảy là chảy rối. Độ nhám tương đối được xác định bằng cách tra bảng:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.000007 \text{ ft}}{\frac{2}{12} \text{ ft}} = 0.000042$$

Hệ số ma sát có thể xác định từ biểu đồ Moody, hoặc giải phương trình Colebrook.

Nhận được $f=0.0174$.

Tổn thất áp suất giảm, tổn thất cột nước và công suất máy bơm được xác định theo các công thức:

$$\begin{aligned}\Delta P = \Delta P_L &= f \frac{L \rho V_{avg}^2}{D} \\ &= 0.0174 \frac{200 \text{ ft} (62.32 \text{ lbm/ft}^3)(9.17 \text{ ft/s})^2}{2/12 \text{ ft} \cdot 2} \left(\frac{1 \text{ lbf}}{32.2 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2} \right) \\ &= 1700 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} = 11.8 \text{ psi} \\ h_L &= f \frac{L V_{avg}^2}{D 2g} = 0.0174 \frac{200 \text{ ft} (9.17 \text{ ft/s})^2}{2/12 \text{ ft} \cdot 2(32.2 \text{ ft/s}^2)} = 27.3 \text{ ft} \\ \dot{W}_{pump} &= Q \Delta P = (0.2 \text{ ft}^3/\text{s})(1700 \text{ lbf/ft}^2) \left(\frac{1 \text{ W}}{0.737 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s}} \right) = 641 \text{ W}\end{aligned}$$

Thảo luận: Nếu tính bằng phương trình Haaland ta nhận được $f=0.0172$ rất gần với $f=0.0174$. Ngoài ra nếu giả thiết ống trơn ($\epsilon=0$) thì $f=0.0171$ cũng rất gần với $f=0.0174$. Như vậy thép không rỉ có thể coi như bề mặt trơn với sai số không đáng kể.

6.5.5. Ví dụ 6.4: Xác định đường kính của ống dẫn khí

Không khí nóng ở 1 atm và nhiệt độ 35 °C được vận chuyển bằng ống nhựa tròn dài 150 m với lưu lượng 0.35 m³/s. Nếu tổn thất cột chất lỏng trong ống không vượt quá 20 m, xác định đường kính tối thiểu của đường ống.

Vấn đề: Lưu lượng dòng chảy và tổn thất cột chất lỏng trong ống dẫn khí đã biết. Xác định đường kính của ống.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào không đáng kể, do đó dòng chảy coi như đã phát triển hoàn toàn; (3) Ống không có các thành phần như uốn cong, van và đầu nối; (4) Không khí là khí lý tưởng; (5) Ống là ống trơn nhẵn vì nó được làm bằng nhựa; (6) Dòng chảy là rối (sẽ được xác minh lại).

Tính chất: Mật độ, độ nhớt động lực và độ nhớt động học của không khí ở 35°C là $\rho=1.145 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.895 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ và $\nu=1.655 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Phân tích: Đây là vấn đề của bài toán thứ ba vì nó liên quan đến việc xác định đường kính khi biết lưu lượng và tổn thất cột chất lỏng. Chúng ta có thể giải quyết vấn đề này bằng ba cách tiếp cận khác nhau: (1) cách tiếp cận lập bằng cách giả sử đường kính ống, tính tổn thất cột chất lỏng, so sánh kết quả với tổn thất cột chất lỏng giả định và tính toán lập lại cho đến khi tổn thất cột chất lỏng tính toán phù hợp với giá trị giả định; (2) viết tất cả các phương trình có liên quan và giải hệ phương trình nhận được cách sử dụng một phần mềm máy tính (ví dụ như Matlab); và (3) dùng công thức Swamee-Jain thứ ba. Chúng ta sẽ xem xét cách tiếp cận thứ 2 và thứ 3.

Cách tiếp cận thứ 2: Vận tốc trung bình, số Reynolds, hệ số ma sát, tổn thất cột chất lỏng có thể được biểu diễn bằng các biểu thức sau:

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi D^2/4} = \frac{0.35}{\pi D^2/4} \rightarrow VD^2 = 0.4456$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \rightarrow \frac{Re}{VD} = 1.655 \times 10^{-5}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

$$h_L = f \frac{L V^2}{D 2g} \rightarrow 20 = f \frac{150}{D} \frac{V^2}{2(9.81)} \rightarrow \frac{fV^2}{D} = 2.616$$

Ta thu nhận được 4 phương trình cho 4 ẩn D, f, V, Re . Phương trình này có thể giải thông qua một chương trình máy tính đơn giản để nhận được:

$$D=0.267 \text{ m}, f=0.018, V=6.24 \text{ m/s}, Re=100800$$

Có thể nhận thấy $Re > 4000$ do đó giả thiết chuyển động rối đã được khẳng định.

Cách tiếp cận thứ 3: Đường kính có thể được xác định trực tiếp từ công thức thứ 3 của Swamee-Jain:

$$D = 0.66 \left[\varepsilon^{1.25} \left(\frac{LQ^2}{gh_L} \right)^{4.75} + \nu Q^{9.4} \left(\frac{L}{gh_L} \right)^{5.2} \right]^{0.04}$$

$$= 0.66 \left[0 + \left(1.655 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s} \right) \left(0.35 \frac{m^3}{s} \right)^{9.4} \left(\frac{150 \text{ m}}{(9.81 \text{ m/s}^2)(20 \text{ m})} \right)^{5.2} \right]^{0.04}$$

$$= 0.271 \text{ m}$$

Thảo luận: Sự sai khác kết quả giữa 2 phương pháp là không quá 2%, nếu sử dụng phương pháp lặp với D giả định là kết quả nhận được từ công thức Swamee-Jain, sau vài bước lặp kết quả thu được sẽ là $D=0.267$.

6.5.6. Ví dụ 6.5: Xác định lưu lượng dòng khí trong đường ống

Xem xét lại Ví dụ 6.4. Bây giờ chiều dài ống tăng gấp đôi, đường kính được giữ nguyên. Nếu tổng tổn thất cột áp suất là không thay đổi, xác định mức giảm lưu lượng dòng chảy qua ống.

Vấn đề: Đường kính và tổn thất cột áp suất trong ống dẫn khí đã cho. Xác định mức giảm lưu lượng dòng chảy.

Phân tích: Đây là một vấn đề của bài toán thứ hai vì nó liên quan đến việc xác định lưu lượng dòng chảy khi đã biết đường kính ống và tổn thất cột áp suất. Lời giải nhận được bằng phương pháp lặp vì lưu lượng dòng chảy (và do đó vận tốc dòng chảy) không được biết. Trước tiên chúng ta giả định hệ số ma sát f , sau đó tính V theo công thức:

$$V = \sqrt{\frac{2gh_L}{fL/D}}$$

Khi tính được V , số Reynolds sẽ được xác định. Từ đó hệ số ma sát mới sẽ nhận được bằng cách sử dụng biểu đồ Moody hay phương trình Colebrook. Qua trình sẽ được lặp lại sao cho sai số giữa hệ số ma sát giả định (đầu vào) và hệ số ma sát tính toán là đủ nhỏ.

Với hệ số ma sát giả định $f=0.04$, sau 5 lần lặp ta có:

Số lần lặp	f giả định	V (m/s)	Re	f tính toán
1	0.04	2.955	4.724×10^4	0.0212
2	0.0212	4.059	6.489×10^4	0.01973
3	0.01973	4.207	6.727×10^4	0.01957
4	0.01957	4.224	6.754×10^4	0.01956
5	0.01956	4.225	6.756×10^4	0.01956

Có thể nhận thấy rằng sau 5 lần lặp, sai số giữa hệ số ma sát giả định và hệ số ma sát mới là nhỏ hơn 10^{-5} .

Với vận tốc xác định từ lần lặp thứ 5, $V=4.225$ m/s. Từ đó, ta có:

$$Q=0.24 \text{ m}^3/\text{s}, f=0.0195, V=4.23 \text{ m/s}, \text{ và } Re=68300$$

Sự sụt giảm lưu lượng là:

$$Q_{sụt} = Q_{cũ} - Q_{mới} = 0.35 - 0.24 = 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vậy lưu lượng dòng chảy giảm xuống khoảng 31%.

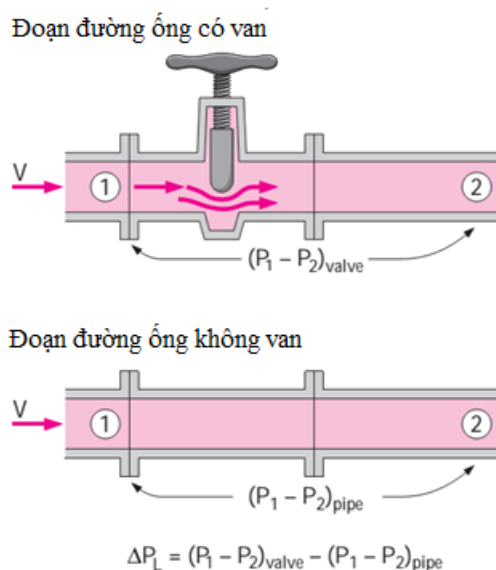
6.6. Tổn thất cục bộ

Chất lỏng trong một hệ thống đường ống thông thường, thường phải đi qua các phụ kiện như : van, khuỷu, khớp nối, đoạn ống cong, đoạn ống mở rộng, đoạn ống co hẹp.... Các thành phần này làm gián đoạn dòng chảy của chất lỏng và gây thêm tổn thất năng lượng do sự phân tách dòng chảy và sự xáo trộn mà chúng tạo ra. Trong một hệ thống với đường ống dài, tổn thất này là nhỏ so với tổng tổn thất dọc theo đường ống (tổn thất dọc đường) và được gọi là tổn thất cục bộ. Mặc dù điều này nói chung là đúng, nhưng trong một số trường hợp, tổn thất cục bộ có thể lớn hơn tổn thất dọc đường. Ví dụ, tổn thất do van mở hoàn toàn có thể là không đáng kể. Nhưng một van đóng một phần có thể gây tổn thất lớn nhất trong hệ thống, bằng sự giảm mạnh lưu lượng dòng chảy. Dòng chảy qua van và các phụ kiện khác là rất phức tạp, thường được xác định bằng thực nghiệm và được công bố bởi các nhà sản xuất của các phụ kiện. Tổn thất cục bộ thường

được biểu diễn dưới dạng hệ số tổn thất K_L , được định nghĩa như sau (Hình 6.14):

$$K_L = \frac{h_L}{V^2(2g)} \quad (6.41)$$

ở đây h_L là tổn thất cột áp suất trong hệ thống đường ống gây ra bởi chèn thêm các phụ kiện và được định nghĩa là $h_L = \Delta P_L / \rho g$. Ví dụ, hãy tưởng tượng thay thế van ở hình 6.14 bằng một phần đường ống cùng đường kính từ vị trí 1 đến vị trí 2. ΔP_L được định nghĩa là hiệu áp suất giảm từ 1 đến 2 cho trường hợp có van ($P_1 - P_2$), và sụt áp suất trong phần ống thẳng tương đương từ 1 đến 2 khi không có van, ($P_1 - P_2$) với cùng lưu lượng dòng chảy. Trong khi phần lớn tổn thất cột áp xảy ra ở gần van, phần còn lại xảy ra ở hạ lưu của van do các xoáy tạo ra trong van lan truyền xuống hạ lưu. Với khoảng cách đủ xa, những xoáy này cũng sẽ mất đi khi dòng chảy ở phần hạ lưu trở lại với điều kiện phát triển hoàn toàn. Vì vậy khi đo tổn thất cục bộ vị trí 2 thường phải đo ở xa hạ lưu (hàng chục lần đường kính ống) để các xoáy cục bộ hoàn toàn biến mất (do ma sát và sinh nhiệt).



Hình 6.14 Xác định tổn thất cục bộ qua van

Khi hệ số tổn thất K_L đã cho, tổn thất cục bộ được xác định theo công thức:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Hệ số tổn thất cục bộ, nói chung, phụ thuộc vào hình học của phụ kiện và số Reynolds, giống như hệ số ma sát. Tuy nhiên, nó thường được giả định là độc lập với số Reynolds. Đây là một sự ước lượng hợp lý vì hầu hết các dòng chảy trong thực tế có số lượng Reynolds lớn và các hệ số tổn thất (bao gồm cả hệ số ma sát) có xu hướng độc lập với số Reynolds khi số Reynolds có giá trị lớn.

Khi tính đến tổn thất cục bộ, tổng tổn thất cột chất lỏng trong hệ thống đường ống được xác định bởi:

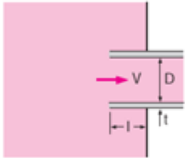
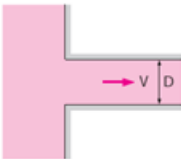
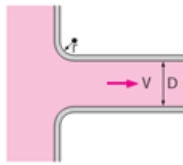
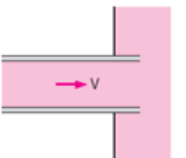
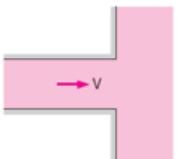
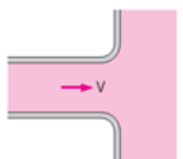
$$h_{L,tổng} = h_{L,dọc\ đường} + h_{L,cục\ bộ} = \sum_i f_i \frac{L_i V_i^2}{D_i 2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g} \quad (6.42)$$

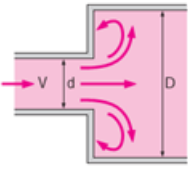
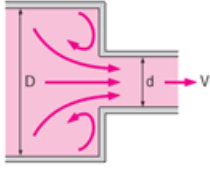
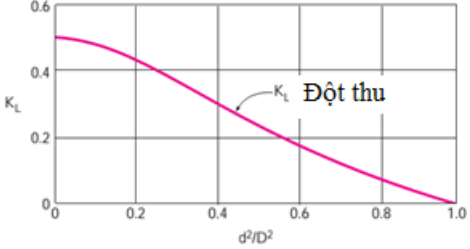
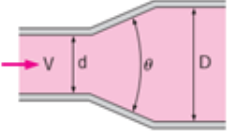
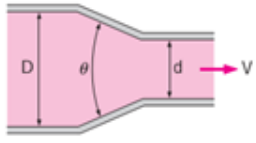
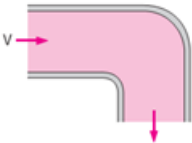
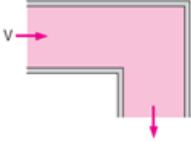
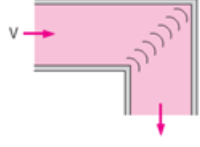
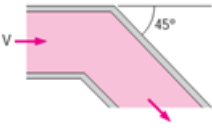
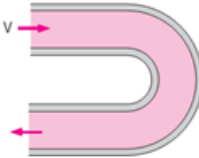
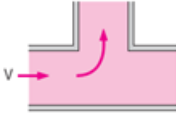
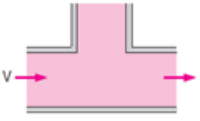
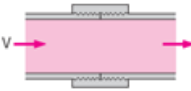
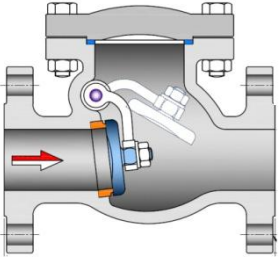
ở đây chỉ số i đại diện cho các đoạn đường ống có đường kính không đổi và j đại diện cho các phụ kiện trong hệ thống. Nếu toàn bộ hệ thống đường ống có cùng đường kính thì (6.42) đơn giản thành:

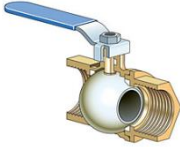
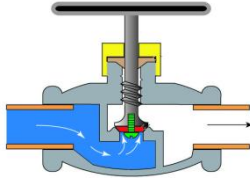
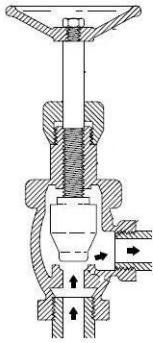

$$h_{L,tổng} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g} \quad (6.43)$$

Một số hệ số tổn thất cục bộ K_L được đưa ra trong Bảng 6.3 đối với các cửa vào, cửa ra, đường cong, sự thay đổi thiết diện dần và đột ngột và các van. Các giá trị này chỉ có ý nghĩa tương đối vì các hệ số tổn thất, nói chung, thay đổi theo đường kính ống, độ nhám bề mặt, số Reynolds và các chi tiết thiết kế khác. Trong thực tế, hệ số tổn thất của hai van tương tự nhau của hai nhà sản xuất khác nhau có thể khác nhau 2 lần hoặc nhiều hơn. Do đó, số liệu ghi trên sản phẩm của nhà sản xuất cụ thể cần được sử dụng trong tính toán thiết kế của hệ thống đường ống hơn là dựa vào các giá trị đại diện trong sổ tay kỹ thuật nào đó.

Bảng 6.3: Hệ số tổn thất cục bộ trong một số trường hợp

<p>Đầu vào ống nối dài $K_L=0.8$ ($t \ll D$ và $l \approx 0.1D$)</p> 	<p>Cửa vào vuông góc $K_L=0.5$</p> 	<p>Cửa vào lượn tròn $r/D > 0.2: K_L=0.03$ $r/D = 0.1: K_L=0.12$</p> 
<p>Cửa ra nối dài $K_L=2$ cho dòng chảy tầng, ≈ 1 cho dòng rối</p> 	<p>Cửa ra vuông góc $K_L=2$ cho dòng chảy tầng, ≈ 1 cho dòng rối</p> 	<p>Cửa ra làm tròn $K_L=2$ cho dòng chảy tầng, ≈ 1 cho dòng rối</p> 

<p>Đột mở</p> $K_L = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$ 	<p>Đột thu (xem đồ thị)</p> 		
<p>Mở rộng dần</p> $\begin{aligned} K_L &= 0.02 & \theta &= 20^\circ \\ K_L &= 0.04 & \theta &= 45^\circ \\ K_L &= 0.07 & \theta &= 60^\circ \end{aligned}$ 		<p>Thu hẹp dần</p> $\begin{aligned} \theta &= 20^\circ: \\ K_L &= 0.30 \text{ for } d/D = 0.2 \\ K_L &= 0.25 \text{ for } d/D = 0.4 \\ K_L &= 0.15 \text{ for } d/D = 0.6 \\ K_L &= 0.10 \text{ for } d/D = 0.8 \end{aligned}$ 	
<p>Cong 90° tron Nối mặt bích: $K_L=0.3$ Nối ren: $K_L=0.9$</p> 	<p>Ngoặt 90° vuông (không cánh hướng dòng) $K_L=1.1$</p> 	<p>Ngoặt 90° vuông (có cánh hướng dòng) $K_L=0.2$</p> 	
<p>Khuỷu 45o $K_L=0.4$</p> 	<p>Uốn chữ U Nối mặt bích: $K_L=0.3$ Nối ren: $K_L=0.9$</p> 	<p>Nhánh chữ T Nối mặt bích: $K_L=1.0$ Nối ren: $K_L=2.0$</p> 	
<p>Nhánh chữ T Nối mặt bích: $K_L=0.2$ Nối ren: $K_L=0.9$</p> 	<p>Nối ren $K_L=0.08$</p> 	<p>Van một chiều $K_L=2$</p> 	

<p style="text-align: center;">Van gạt Mở hoàn toàn: $K_L=0.05$</p> 	<p style="text-align: center;">Van xoay Mở hoàn toàn: $K_L=10$</p> 
<p style="text-align: center;">Van góc Mở hoàn toàn: $K_L=5$</p> 	<p style="text-align: center;">Van cánh Mở hoàn toàn: $K_L=0.2$ Đóng $\frac{1}{4}$: $K_L=0.3$ Đóng $\frac{1}{2}$: $K_L=2.1$ Đóng $\frac{3}{4}$: $K_L=17$</p> 

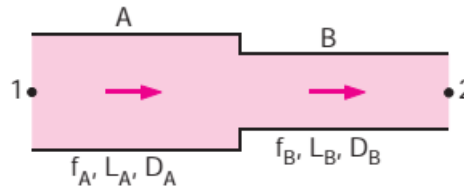
6.7. Mạng đường ống và lựa chọn bơm

Hầu hết các hệ thống đường ống gặp trong thực tế như hệ thống phân phối nước trong thành phố, trong các cơ sở sản xuất, trong nhà ở đều liên quan đến các kết nối song song và nối tiếp các đường ống. Một dự án đường ống có thể liên quan đến việc thiết kế một hệ thống mới hoặc mở rộng một hệ thống hiện có. Mục tiêu kỹ thuật của các dự án thường là thiết kế một hệ thống đường ống có thể cung cấp lưu lượng chất lỏng theo yêu cầu, hoạt động ở các áp suất xác định với độ tin cậy cao và chi phí tổng cộng tối thiểu (chi phí ban đầu cộng với chi phí vận hành và bảo trì). Khi sơ đồ của hệ thống được xác định, việc tính toán đường kính ống và áp suất trong toàn bộ hệ thống với điều kiện hạn chế về ngân sách, thường đòi hỏi phải giải quyết bài toán tối ưu. Mô hình máy tính thường được sử dụng để giải quyết các bài toán như vậy. Sơ đồ hệ thống đường ống mắc nối tiếp và song song được thể hiện trên Hình 6.15 và 6.16. Khi các đường ống mắc nối tiếp với nhau, lưu lượng dòng chảy qua bộ hệ thống là không đổi, không phụ thuộc vào đường kính của từng đường ống trong hệ thống. Đây là một hệ quả tự nhiên của nguyên lý bảo toàn khối lượng cho dòng chảy ổn định không nén được. Tổng tổn thất cột chất lỏng trong trường hợp này bằng tổng tổn thất trong các ống riêng lẻ

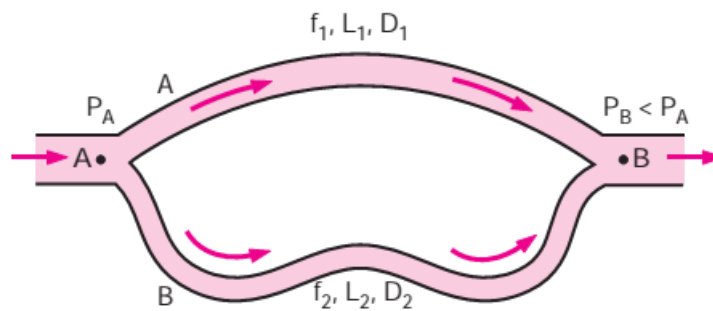
trong hệ thống, bao gồm cả tổn thất cục bộ. Ta có, đối với đường ống mắc nối tiếp:

$$Q_A = Q_B$$

$$h_{L,1-2} = h_{L,A} + h_{L,B}$$



Hình 6.15 Hệ thống đường ống mắc nối tiếp



Hình 6.16 hệ thống đường ống mắc song song

Đối với đường ống mắc song song:

$$h_{L,1} = h_{L,2}$$

$$Q_A = Q_1 + Q_2 = Q_B$$

Khi một đường ống dẫn tách ra hai đường ống song song (hoặc nhiều hơn hai) và sau đó nối lại cùng một nút ở hạ lưu, lưu lượng dòng chảy sẽ là tổng các lưu lượng trong từng đường ống. Sụt áp suất (hoặc tổn thất cột chất lỏng) của mỗi đường ống kết nối song song phải bằng nhau bởi vì $\Delta P = P_A - P_B$ và áp suất tại P_A và P_B là như nhau đối với tất cả các đường ống riêng lẻ. Đối với hệ thống gồm hai ống song song giữa các nút nối A và B, khi bỏ qua tổn thất cục bộ, ta có:

$$h_{L,1} = h_{L,2} \quad \rightarrow \quad f_1 \frac{L_1 V_1^2}{D_1 2g} = f_2 \frac{L_2 V_2^2}{D_2 2g}$$

Từ đó:

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{f_2 L_2 D_1}{f_1 L_1 D_2} \right)^{1/2} \quad \text{và} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{A_{c,1} V_1}{A_{c,2} V_2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \left(\frac{f_2 L_2 D_1}{f_1 L_1 D_2} \right)^{1/2}$$

Việc phân tích mạng lưới đường ống, dù phức tạp như thế nào, đều dựa trên hai nguyên tắc đơn giản:

1. Phương trình bảo toàn khối lượng trong toàn hệ thống phải được thỏa mãn. Điều này được thể hiện thông qua các điều kiện: (1) tổng lưu lượng vào bằng với tổng lưu lượng ra khỏi nút giao nhau cho tất cả các nút trong hệ thống; (2) lưu lượng dòng chảy phải không đổi trong các đường ống nối tiếp, không phụ thuộc vào sự thay đổi của đường kính.

2. Sụt áp suất giảm (hay tổn thất cột chất lỏng) giữa hai nút giao phải bằng nhau cho tất cả các đường ống nối giữa hai nút. Trong thực tế, điều kiện này tương đương với điều kiện yêu cầu tổng số đại số của tổn thất cột chất lỏng trong một vòng của mạng (cho tất cả các vòng) là bằng 0. (Tổn thất cột chất lỏng được coi là dương đối với dòng chảy theo chiều kim đồng hồ và âm cho dòng chảy theo hướng ngược chiều kim đồng hồ).

Như vậy, một phương trình đại số sẽ nhận được cho mỗi nút và mỗi vòng trong mạng đường ống. Do đó việc phân tích mạng đường ống đòi hỏi giải đồng thời một hệ phương trình phi tuyến. Tuy nhiên, nội dung này nằm ngoài phạm vi của giáo trình này.

6.7.1. Hệ thống đường ống với bơm và tua bin

Trong trường hợp khi hệ đường ống có kết nối với bơm và tua bin, phương trình năng lượng trên đơn vị khối lượng giữa hai điểm 1 và 2 của hệ thống có dạng:

$$\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2} + gz_1 + w_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + w_{turbine,e} + gh_L \quad (6.44)$$

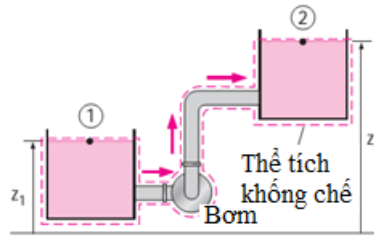
hay có thể được biểu diễn theo cột năng lượng như sau:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbine,e} + h_L \quad (6.45)$$

Trong đó $h_{pump,u} = w_{pump,u}/g$ là cột năng lượng hữu ích được cung cấp cho chất lỏng bởi bơm, $h_{turbine,e} = w_{turbine,e}/g$ là cột năng lượng mà tua bin nhận được từ chất lỏng, α là hệ số hiệu chỉnh động năng có giá trị xấp xỉ 1 đối với hầu hết các dòng chảy trong thực tế, và h_L là tổng tổn thất cột năng lượng của đường ống (bao gồm cả tổn thất cục bộ) giữa điểm 1 và 2. $h_{pump,u}=0$ nếu hệ thống đường ống không có bơm và $h_{turbine,e}=0$ nếu hệ thống không có tua bin.

Trong thực tế, nhiều hệ thống đường ống liên quan đến một máy bơm để bơm chất lỏng từ một bể chứa này sang bể chứa khác. Lấy điểm 1 và điểm 2 tại các bề mặt tự do của các hồ chứa, phương trình năng lượng trong trường hợp này đơn giản thành (Hình 6.17):

$$h_{pump,u} = (z_2 - z_1) + h_L \quad (6.46)$$



Hình 6.17 Bơm nước giữa hai bể chứa

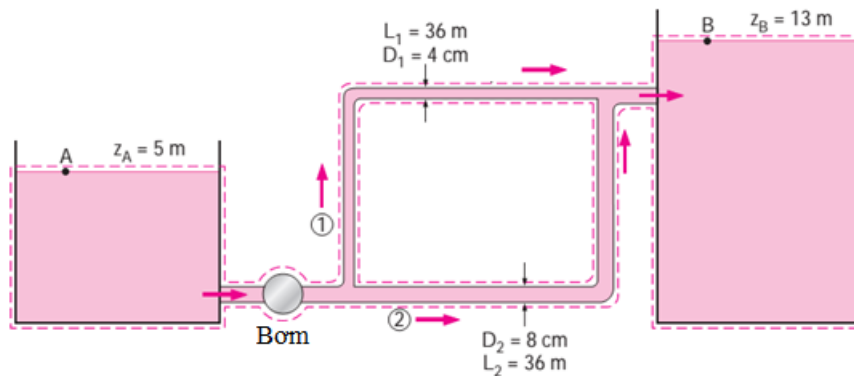
Vì vận tốc ở bề mặt tự do là không đáng kể và áp lực là áp suất khí quyển. Do đó, cột năng lượng hữu ích của bơm bằng chênh lệch độ cao giữa hai bể chứa cộng với tổn thất đường ống. Nếu tổn thất đường ống là không đáng kể so với $z_2 - z_1$, cột năng lượng hữu ích của bơm bằng chênh lệch độ cao giữa hai bể chứa. Trong trường hợp $z_1 > z_2$ (mặt tự do của hồ chứa 1 ở độ cao cao hơn mặt tự do của hồ chứa 2) và không có bơm, dòng chảy giữa hai bể được hình thành do lực hấp dẫn với lưu lượng sao cho tổn thất đường ống bằng với chênh lệch độ cao. Tương tự đối với trường hợp tua bin, khi đó chỉ cần thay thế $h_{pump,u}$ trong (6.46) bởi $-h_{turbine,e}$.

Khi đã biết được cột năng lượng hữu ích của bơm thì công suất cơ học của máy bơm và điện năng tiêu thụ bởi động cơ của máy bơm với lưu lượng cho trước được xác định từ các công thức:

$$\dot{W}_{pump, shaft} = \frac{\rho Q g h_{pump,u}}{\eta_{pump}} \quad \text{và} \quad \dot{W}_{elect} = \frac{\rho Q g h_{pump,u}}{\eta_{pump-motor}} \quad (6.47)$$

6.7.2. Ví dụ 6.6 : Bơm nước qua hai ống song song

Nước ở 20 °C sẽ được bơm từ bể chứa ($z_A = 5$ m) đến một bể chứa khác ở độ cao ($z_B = 13$ m) thông qua hai ống dài 36 m nối song song, như thể hiện trong hình 6.18. Các ống được làm bằng thép, đường kính của hai ống là 4 và 8 cm. Nước sẽ được bơm bằng máy bơm có hiệu suất 70%, tiêu thụ 8 kW điện năng trong quá trình vận hành. Các tổn thất cục bộ và tổn thất trong các đường ống nối đến hai bể là không đáng kể. Xác định tổng lưu lượng và lưu lượng qua các ống mắc song song.



Hình 6.18 Sơ đồ cho ví dụ 6.7

Vấn đề : Biết công suất bơm vào hệ thống đường ống với hai đường ống mắc song song. Xác định lưu lượng dòng chảy.

Giả thiết :(1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Bỏ qua các hiệu ứng cửa vào, do đó dòng chảy được coi là phát triển hoàn toàn; (3) Chênh lệch mực nước của hai hồ chứa là không đổi; (4) Các tổn thất cục bộ và tổn thất ở các ống khác với ống song song được cho là không đáng kể; (5) Dòng chảy qua cả hai đường ống là rối (cần phải được xác minh lại).

Tính chất : Mật độ và độ nhớt động của nước ở 20 °C là $\rho=998 \text{ kg/m}^3$ và $\mu=1.002.10^{-3} \text{ kg/m.s}$. Độ nhám của ống thép thương mại là $e=0.000045 \text{ m}$.

Phân tích : Vấn đề này không thể giải quyết trực tiếp vì không biết vận tốc (hoặc lưu lượng) trong ống. Do đó, chúng ta có thể sử dụng phương pháp giải lặp cho bài toán này. Tuy nhiên, ngày nay phần mềm giải phương trình giải thường có sẵn và phổ biến rộng rãi, vì vậy chúng ta sẽ chỉ cần thiết lập các phương trình và sử dụng phần mềm để giải bài toán. Cột cao hữu ích của bơm đến chất lỏng được xác định từ phương trình:

$$\dot{W}_{elect} = \frac{\rho Q g h_{pump,u}}{\eta_{pump-motor}} \rightarrow 8000 = \frac{998 \times Q \times 9.81 \times h_{pump,u}}{0.7} \rightarrow Q h_{pump,u} = 0.572 \quad (1)$$

Chọn điểm A và B trên bề mặt tự do của hai bể chứa. Lưu ý rằng chất lỏng mở ra cho khí quyển (do đó $P_A=P_B=P_{atm}$) và vận tốc chất lỏng ở cả hai điểm là bằng 0 ($V_A=V_B=0$), phương trình năng lượng giữa hai điểm này đơn giản thành:

$$h_{pump,u} = (z_B - z_A) + h_L$$

Từ đó:

$$h_{pump,u} = 8 + h_L \quad (2)$$

Và vì đường ống mắc song song, do đó:

$$h_L = h_{L,1} = h_{L,2} \quad (3)(4)$$

Ký hiệu chỉ số 1 cho ống có đường kính 4 cm và 2 cho ống có đường kính 8 cm. Khi đó vận tốc trung bình, số Reynolds, hệ số ma sát và tổn thất cột áp của mỗi ống thỏa mãn các phương trình:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_{c,1}} = \frac{Q_1}{\pi D_1^2/4} \rightarrow V_1 = 795.78 Q_1 \quad (5)$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A_{c,2}} = \frac{Q_2}{\pi D_2^2/4} \rightarrow V_2 = 198.94 Q_2 \quad (6)$$

$$Re_1 = \frac{\rho V_1 D_1}{\mu} \rightarrow Re_1 = \frac{998 \times 0.04}{1.002 \times 10^{-3}} V_1 = 39840.32 V_1 \quad (7)$$

$$Re_2 = \frac{\rho V_2 D_2}{\mu} \rightarrow Re_2 = \frac{998 \times 0.08}{1.002 \times 10^{-3}} V_2 = 79680.64 V_2 \quad (8)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re_1 \sqrt{f_1}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2.0 \log \left(\frac{0.000045}{3.7 \times 0.04} + \frac{2.51}{Re_1 \sqrt{f_1}} \right) \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re_2 \sqrt{f_2}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2.0 \log \left(\frac{0.000045}{3.7 \times 0.08} + \frac{2.51}{Re_2 \sqrt{f_2}} \right) \quad (10)$$

$$h_{L,1} = f_1 \frac{L_1 V_1^2}{D_1 2g} \rightarrow h_{L,1} = f_1 \frac{L_1 V_1^2}{D_1 2g} = 45.87 f_1 V_1^2 \quad (11)$$

$$h_{L,2} = f_2 \frac{L_2 V_2^2}{D_2 2g} \rightarrow h_{L,2} = f_2 \frac{L_2 V_2^2}{D_2 2g} = 22.94 f_2 V_2^2 \quad (12)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (13)$$

Giải đồng thời 13 phương trình, ta nhận được:

$$Q=0.03 \text{ m}^3/\text{s}, \quad Q_1=0.00415 \text{ m}^3/\text{s}, \quad Q_2=0.0259 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V_1=3.3 \text{ m/s}, \quad V_2=5.15 \text{ m/s}, \quad h_L=h_{L,1}=h_{L,2}=11.1 \text{ m}, \quad h_{pump,u}=19.1 \text{ m}$$

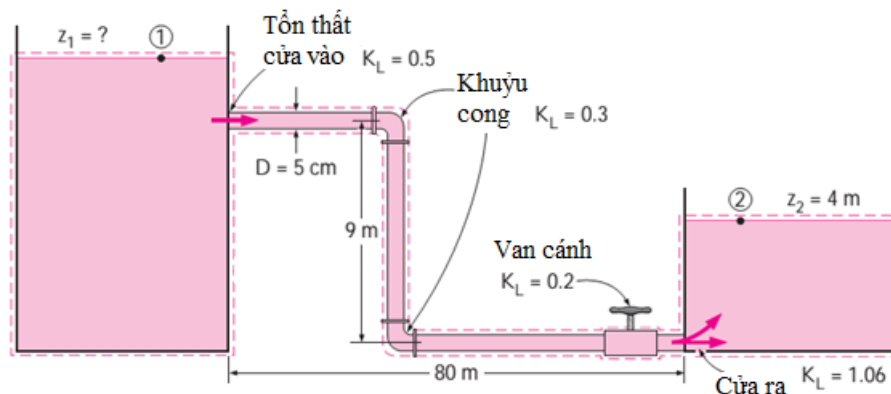
$$Re_1=131600, \quad Re_2=410000, \quad f_1=0.0221, \quad f_2=0.0182$$

Các số Reynolds >4000 vậy giả thiết (5) đã được kiểm chứng.

Thảo luận: Hai đường song song là như nhau, ngoại trừ đường kính của đường ống đầu tiên bằng một nửa đường kính của đường ống thứ hai. Nhưng chỉ có 14% nước chảy qua ống đầu tiên. Điều này cho thấy sự phụ thuộc mạnh mẽ của lưu lượng dòng chảy (và tổn thất cột áp) vào đường kính. Ngoài ra, có thể thấy rằng nếu các bề mặt tự do của hai bể chứa ở cùng độ cao ($z_A=z_B$) thì lưu lượng dòng chảy sẽ tăng 20% từ 0.03 đến 0.0361 m³/s. Ngoài ra, nếu tổn thất dọc đường là không đáng kể, thì lưu lượng dòng chảy sẽ trở thành 0.0715 m³/s (tăng 138%).

6.7.3. Ví dụ 6.7: Dòng chảy do trọng lực trong đường ống

Nước ở 10 °C chảy từ một bể chứa lớn đến một bể nhỏ hơn thông qua hệ thống đường ống bằng gang đúc đường kính 5 cm, như hình 6.48. Xác định độ cao z_1 , cho lưu lượng dòng chảy là 6 L/s.



Hình 6.19 Sơ đồ của ví dụ 6.8

Vấn đề: Lưu lượng dòng chảy qua hệ thống đường ống kết nối hai bể chứa được biết. Xác định độ cao mặt nước của bể trên.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Độ cao mặt nước của các bể chứa là không đổi; (3) Không có máy bơm hoặc tua bin trong hệ thống.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động của nước tại 10 °C là $\rho=999.7 \text{ kg/m}^3$ và $\mu=1.307 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$. Độ nhám của ống gang là $\epsilon=0.00026 \text{ m}$.

Phân tích: Chọn các điểm 1 và 2 trên bề mặt tự do của hai bể chứa. Lưu ý rằng chất lỏng ở cả hai điểm mở ra cho khí quyển (và do đó $P_1=P_2=P_{atm}$) và vận tốc chất lỏng ở cả hai điểm là bằng 0 ($V_1=V_2=0$), phương trình năng lượng giữa hai điểm đơn giản thành:

$$z_1 = z_2 + h_L$$

Ta có:

$$h_L = h_{L,tổng} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$

vì đường ống có đường kính không đổi.

Vận tốc và số Reynolds được xác định như sau:

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{0.006}{\pi(0.05)^2/4} = 3.06 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{999.7 \times 3.06 \times 0.05}{1.307 \times 10^{-3}} = 117000$$

Hệ số ma sát xác định từ phương trình:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{0.0052}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Từ đó nhận được $f=0.0315$. Tổng tổn thất cục bộ là:

$$\sum K_L = K_{L,cửa\ vào} + 2K_{L,khuỷu} + K_{L,van} + K_{L,cửa\ ra} = 0.5 + 2 \times 0.3 + 0.2 + 1.06 = 2.36$$

Từ đó tính được tổng tổn thất cột áp:

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g} = \left(0.0315 \times \frac{89}{0.05} + 2.36 \right) \frac{3.06^2}{2 \times 9.81} = 27.9$$

Vậy:

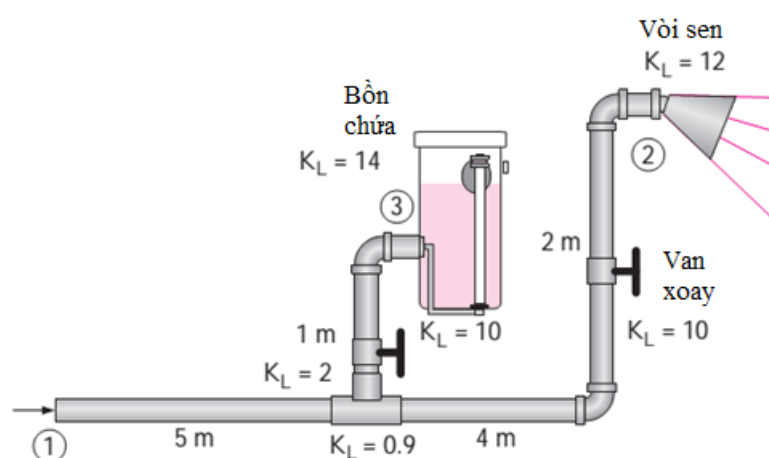
$$z_1 = z_2 + h_L = 4 + 27.9 = 31.9 \text{ m}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng $fL/D=56.1$ trong trường hợp này, có giá trị gấp khoảng 24 lần tổng số tổn thất cục bộ. Do đó, bỏ qua tổn thất cục bộ trong trường hợp này sẽ dẫn đến sai số khoảng 4%. Có thể chỉ ra rằng tổng tổn thất cột áp sẽ là 35.9 m (thay vì 27.9 m) nếu van bị đóng 3/4, và sẽ giảm xuống còn 24.8 m nếu đường ống giữa hai bể chứa là thẳng (bỏ qua tổn thất khuỷu). Tổn thất cột áp có thể được giảm thêm (từ 24.8 đến 24.6 m) bằng cách làm trơn cửa vào. Tổn thất cột áp

có thể giảm đáng kể (từ 27.9 xuống 16.0 m) bằng cách thay ống gang bằng ống nhựa ví dụ như bằng ống nhựa.

6.7.4. Ví dụ 6.8: Ảnh hưởng của việc xả nước lên lưu lượng dòng chảy từ vòi hoa sen

Hệ thống ống nước phòng tắm của nhà bao gồm đường ống bằng đồng có đường kính 1.5 cm với đầu nối ren, như Hình 6.20. (a) Nếu áp suất dư ở đầu vào của hệ thống là 200 kPa trong khi tắm và bồn chứa trong nhà vệ sinh đầy (không có dòng chảy trong nhánh đó), hãy xác định lưu lượng nước chảy qua đầu vòi sen. (b) Xác định ảnh hưởng của việc xối rửa nhà vệ sinh đến lưu lượng dòng chảy qua đầu vòi hoa sen. Lấy các hệ số tổn thất của đầu vòi sen và cửa vào bồn chứa là lần lượt là 12 và 14.



Hình 6.20 Sơ đồ của ví dụ 6.9

Vấn đề: Cho sơ đồ hệ thống nước của phòng tắm. Xác định lưu lượng dòng chảy qua vòi hoa sen và ảnh hưởng của việc xả bồn chứa nhà vệ sinh lên lưu lượng dòng chảy.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Dòng chảy rối và phát triển hoàn toàn; (3) Bể chứa mở ra khí quyển; (4) Bỏ qua ảnh hưởng của động năng dòng chảy.

Tính chất: Các tính chất của nước ở 20 ° C là $\rho=998 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.002 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$, và $\nu=1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Độ nhám của ống đồng là $\varepsilon=1.5 \times 10^{-6} \text{ m}$.

Phân tích: Đây là bài toán thứ hai vì nó liên quan đến việc xác định lưu lượng dòng chảy khi đã biết đường kính và chênh lệch áp suất. Phương pháp giải sẽ bao gồm một vòng lặp vì lưu lượng dòng chảy (và do đó là vận tốc) chưa được biết đến.

(a) Hệ thống đường ống của vòi sen là ống dẫn 11 m có đường kính không đổi, với các tổn thất cục bộ: khớp nối ($K_L=0.9$), hai khuỷu vuông góc ($K_L=0.9$), một van xoay mở ($K_L=10$) và vòi sen (đầu ra) ($K_L=12$). Vì vậy, tổng tổn thất cục bộ là:

$$\sum K_L = 0.9 + 2 \times 0.9 + 10 + 12 = 24.7$$

Lưu ý rằng đầu vòi hoa sen được mở ra khí quyển, cột cao vận tốc là không đáng kể, vì vậy phương trình năng lượng giữa điểm 1 và 2 đơn giản thành:

$$\frac{P_{1,dv}}{\rho g} = (z_2 - z_1) + h_L$$

Vì vậy tổn thất cột áp giữa 2 điểm sẽ là:

$$h_L = \frac{200000 \text{ N/m}^2}{(998 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} - 2 \text{ m} = 18.4 \text{ m}$$

Và

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g} \rightarrow 18.4 = \left(f \times \frac{11}{0.015} + 24.7 \right) \frac{V^2}{2 \times 9.81}$$

Vận tốc trung bình trong ống, số Reynolds và hệ số ma sát thỏa mãn:

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi(0.015)^2/4} \rightarrow V = 5658.85Q$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} \rightarrow Re = \frac{0.015}{1.004 \times 10^{-6}} V = 14940V$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{1.5 \times 10^{-6}}{3.7 \times 0.015} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Giải hệ 4 phương trình với 4 ẩn, ta nhận được:

$$Q=0.00053 \text{ m}^3/\text{s}, f=0.0218, V=2.98 \text{ m/s} \text{ và } Re=44550$$

(b) Khi xả bồn vệ sinh, phao di chuyển và van được. Nước bắt đầu chảy vào bồn, tạo thành 2 nhánh song song từ kết nối chữ T. Tổn thất cột áp và hệ số tổn thất cục bộ trong nhánh đến vòi sen đã được xác định trong (a) là $h_{L,2} = 18.4 \text{ m}$ và $\Sigma K_{L,2} = 24.7$. Tương tự đối với nhánh bồn vệ sinh, ta có:

$$h_{L,3} = \frac{200000 \text{ N/m}^2}{(998 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} - 1 \text{ m} = 19.4 \text{ m}$$

$$\sum K_{L,3} = 2 + 10 + 0.9 + 14 = 26.9$$

Các phương trình liên quan sẽ là:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3$$

$$h_{L,2} = f_1 \frac{5 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} \frac{V_1^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} + \left(f_2 \frac{6 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} + 24.7 \right) \frac{V_2^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 18.4$$

$$h_{L,2} = f_1 \frac{5 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} \frac{V_1^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} + \left(f_3 \frac{1 \text{ m}}{0.015 \text{ m}} + 26.9 \right) \frac{V_3^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 19.4$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{\pi(0.015 \text{ m})^2/4}, \quad V_2 = \frac{Q_2}{\pi(0.015 \text{ m})^2/4}, \quad V_3 = \frac{Q_3}{\pi(0.015 \text{ m})^2/4}$$

$$Re_1 = \frac{V_1(0.015 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}},$$

$$Re_2 = \frac{V_2(0.015 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}, Re_3 = \frac{V_3(0.015 \text{ m})}{1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}},$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2.0 \log \left(\frac{1.5 \times 10^{-6}}{3.7(0.015 \text{ m})} + \frac{2.51}{Re_1 \sqrt{f_1}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_2}} = -2.0 \log \left(\frac{1.5 \times 10^{-6}}{3.7(0.015 \text{ m})} + \frac{2.51}{Re_2 \sqrt{f_2}} \right)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_3}} = -2.0 \log \left(\frac{1.5 \times 10^{-6}}{3.7(0.015 \text{ m})} + \frac{2.51}{Re_3 \sqrt{f_3}} \right)$$

Giải 12 phương trình nhận được với 12 ẩn, ta có:

$$Q_1=0.0009 \text{ m}^3/\text{s}, Q_2=0.00042 \text{ m}^3/\text{s} \text{ và } Q_3=0.00048 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vậy, việc xả bồn vệ sinh làm giảm tỷ lệ nước lạnh qua vòi sen lên 21% từ 0.53 xuống 0.42 L/s, có thể làm cho nước vòi hoa sen bất ngờ bị nóng.

Thảo luận: Nếu tính đến động năng dòng chảy, lưu lượng dòng chảy qua vòi sen sẽ là 0.43 thay vì 0.42 L/s. Do đó, giả thiết bỏ qua động năng là hợp lý trong trường hợp này. Lưu ý rằng sự rò rỉ trong hệ thống đường ống cũng gây ra hiệu quả tương tự, và do đó sự giảm lưu lượng không thể giải thích được ở đầu ra có thể báo hiệu sự rò rỉ trong hệ thống.

TỔNG KẾT

Chúng ta đã xem xét trường hợp dòng chảy bên trong đường ống được làm đầy bởi chất lỏng. Dòng chảy *tầng* được đặc trưng bởi các dòng chảy *mịn* và chuyển động có trật tự cao, còn dòng chảy *rối* được đặc trưng bởi dao động nhanh của vận tốc và chuyển động hỗn loạn của các phần tử chất lỏng. Chế độ dòng chảy tầng hay rối được xác định thông qua *số Reynolds* được định nghĩa như sau:

$$Re = \frac{\text{Lực quán tính}}{\text{Lực nhớt}} = \frac{V_{avg} D}{\nu} = \frac{\rho V_{avg} D}{\mu}$$

Trong phần lớn điều kiện thực tế, dòng chảy trong đường ống là chảy tầng với $Re < 2300$, là rối với $Re > 4000$ và ở *chế độ chuyển tiếp* khi Re nằm giữa 2300 và 4000.

Khu vực của dòng chảy chịu ảnh hưởng tính nhớt được gọi là *lớp biên vận tốc*. Khu vực dòng chảy từ cửa vào đường ống đến điểm mà tại đó ranh giới lớp biên vận tốc sáp nhập tại trục ống được gọi là *khu vực phát triển thủy động lực*, và chiều dài của khu vực này được gọi là *chiều dài phát triển thủy động lực* L_h . Chiều dài phát triển thủy động lực L_h được xác định như sau:

$$L_{h, \text{phân tầng}} \cong 0.05 Re D \quad \text{và} \quad L_{h, \text{rối}} \cong 10D$$

Hệ số ma sát đối với dòng chảy ổn định phát triển hoàn toàn là hằng số.

Giá trị cực đại và trung bình trong dòng chảy tầng trong ống tròn được xác định bởi:

$$u_{max} = 2V_{avg} \quad \text{và} \quad V_{avg} = \frac{\Delta P D^2}{32\mu L}$$

Lưu lượng và tổn thất áp suất trong dòng chảy tầng trong ống tròn được xác định bởi:

$$Q = V_{avg} A_c = \frac{\Delta P \pi D^4}{128\mu L} \quad \text{và} \quad \Delta P = \frac{32\mu L V_{avg}}{D^2}$$

Giảm sụt/tổn thất áp suất và tổn thất cột áp cho tất cả các loại dòng chảy bên trong (chảy tầng, rối, trong ống tròn hoặc không tròn, bề mặt nhẵn hoặc nhám) được xác định bởi:

$$\Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{và} \quad h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

trong đó $\rho V^2/2$ là *áp suất động lực* và đại lượng không thứ nguyên f là hệ số ma sát. Đối với dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong một đường ống tròn, hệ số ma sát được xác định bởi $f=64/Re$. Đối với ống không tròn, đường kính được thay thế bằng *đường kính thủy lực* được định nghĩa bởi $D_h= 4A_c/p$, trong đó A_c là diện tích mặt cắt ướt và p là chu vi ướt của dòng chảy.

Trong dòng chảy rối phát triển hoàn toàn, hệ số ma sát phụ thuộc vào số Reynolds và độ nhám tương đối ϵ/D . Hệ số ma sát trong dòng chảy rối được xác định bởi phương trình Colebrook, như sau:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Đây là công thức thực nghiệm cho các giá trị gần đúng với biểu đồ Moody. Công việc thiết kế và phân tích hệ thống đường ống liên quan đến các bài toán xác định tổn thất cột áp, lưu lượng dòng chảy hoặc đường kính đường ống. Để giải quyết các bài toán này thường phải sử dụng phương pháp lặp. Tuy nhiên công thức gần đúng Swamee-Jain có thể hỗ trợ để giải quyết bài toán dễ dàng hơn.

Các tổn thất áp suất xảy ra trong các bộ phận đường ống như phụ kiện, van, đoạn uốn cong, khuỷu, cửa vào, cửa ra, ống mở rộng, và ống thu hẹp được gọi là những *tổn thất cục bộ*. Các tổn thất cục bộ được biểu diễn dưới dạng hệ số tổn thất cục bộ K_L . Tổn thất cột áp được xác từ hệ số tổn thất cục bộ bởi:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Khi đã có tất cả các hệ số tổn thất, tổng tổn thất cột áp trong một hệ thống đường ống được xác định là tổng của tất cả các tổn thất thành phần:

$$h_{L,tổng} = h_{L,dọc\ đường} + h_{L,cục\ bộ} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{V_i^2}{2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{V_j^2}{2g}$$

Nếu đường ống có đường kính không đổi, công thức trên được đơn giản thành:

$$h_{L,tổng} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$

Phân tích hệ thống đường ống dựa trên hai nguyên tắc đơn giản: (1) Phương trình bảo toàn khối lượng trong toàn hệ thống phải được thỏa mãn và (2) tổn thất áp suất giữa hai điểm phải giống nhau đối với tất cả các đường ống nối hai điểm đó.

Khi các ống mắc nối tiếp nhau, lưu lượng dòng chảy qua toàn bộ hệ thống là không đổi không phụ thuộc vào đường kính của từng đoạn ống. Đối với các đường ống mắc song song (hai hoặc nhiều hơn), lưu lượng dòng chảy là tổng các lưu lượng trong từng đường ống, còn tổn thất đầu ở hai đầu mỗi nhánh là bằng nhau. Khi hệ thống đường ống có mắc bơm và/hoặc tua bin, phương trình dòng chảy ổn định giữa hai điểm (1 và 2) được biểu diễn dưới dạng:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{tuabin,e} + h_L$$

Khi biết được cột áp hữu ích của bơm $h_{pump,u}$, công suất của bơm đến chất lỏng và công suất của động cơ điện cần thiết để cung cấp lưu lượng dòng chảy Q xác định được xác định từ:

$$\dot{W}_{pump,shaft} = \frac{\rho Q g h_{pump,u}}{\eta_{pump}} \quad \text{và} \quad \dot{W}_{elect} = \frac{\rho Q g h_{pump,u}}{\eta_{pump-motor}}$$

ở đây động cơ $\eta_{pump-motor}$ là hiệu suất kết hợp giữa máy bơm và động cơ.

Câu hỏi và bài tập

Dòng chảy tầng và dòng chảy rối

6.1LT Tại sao chất lỏng thường được vận chuyển bằng ống tròn?

6.2LT Ý nghĩa vật lý của số Reynolds là gì? Viết công thức cho số Reynolds cho (a) dòng chảy trong một đường ống tròn có đường kính trong D và (b) dòng chảy trong một ống chữ nhật có mặt cắt ngang axb ?

6.3LT Xem xét một vật chuyển động trong không khí và trong nước với vận tốc như nhau. Chuyển động nào có số Reynolds cao hơn?

6.4LT Chứng minh rằng số Reynolds cho dòng chảy trong đường ống tròn có đường kính D có thể được biểu diễn như sau $Re = 4\dot{m}/(\pi D\mu)$.

6.5LT Giá trị được chấp nhận rộng rãi cho số Reynolds là bao nhiêu khi mà số Reynolds lớn hơn giá trị ấy thì dòng chảy trong đường ống là được coi chuyển động rối?

6.6LT Đường kính thủy lực là gì? Được định nghĩa như thế nào? Xác định đường kính thủy lực cho đường ống tròn đường kính D .

6.7LT Định nghĩa khái niệm chiều dài phát triển dòng chảy trong một đường ống? Chiều dài phát triển dòng chảy trong dòng rối hay dòng chảy tầng dài hơn?

6.8LT Xem xét dòng chảy tầng trong đường ống tròn. Ứng suất cắt trên thành ống sẽ lớn hơn ở gần cửa vào của đường ống hay gần cửa ra? Tại sao? Câu trả lời sẽ là gì nếu dòng chảy là rối?

6.9LT Độ nhám của bề mặt thành ống ảnh hưởng đến tổn thất cột áp như thế nào trong dòng chảy rối? Nếu dòng chảy là chảy tầng thì sao?

Dòng chảy phát triển hoàn toàn trong đường ống

6.10LT Ứng suất cắt trên thành ống thay đổi như thế nào dọc theo dòng chảy trong khu vực dòng chảy phát triển hoàn toàn trong (a) dòng chảy tầng và (b) dòng chảy rối?

6.11LT Tính chất nào của chất lỏng có ảnh hưởng đến sự phát triển của lớp biên vận tốc? Đối với những loại chất lỏng nào sẽ không có lớp biên vận tốc trong đường ống?

6.12LT Trong vùng phát triển hoàn toàn của dòng chảy trong đường ống tròn, phân bố vận tốc có thay đổi theo hướng dòng chảy không?

6.13LT Viết mối liên quan giữa hệ số ma sát và tổn thất áp suất cho dòng chảy trong đường ống. Viết mối quan hệ giữa tổn thất áp suất, công suất bơm và lưu lượng khối lượng.

6.14LT Người ta cho rằng ứng suất cắt trên trục của đường ống tròn trong dòng chảy phát triển hoàn toàn là bằng 0. Có đúng không? Giải thích tại sao?

6.15LT Người ta cho rằng trong dòng chảy rối phát triển hoàn toàn trong đường ống, ứng suất cắt là lớn nhất trên bề mặt thành ống. Có đúng không? Giải thích tại sao?

6.16LT Xem xét dòng chảy phát triển hoàn toàn trong một đường ống tròn với hiệu ứng cửa vào không đáng kể. Nếu chiều dài của ống là tăng gấp đôi, tổn thất cột áp sẽ (a) tăng gấp đôi, (b) tăng nhiều hơn gấp đôi, (c) tăng ít hơn gấp đôi, (d) giảm một nửa, hoặc (e) vẫn không đổi?

6.17LT Xem xét dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong đường ống tròn. Nếu đường kính của đường ống giảm xuống một nửa trong khi lưu lượng dòng chảy và chiều dài đường ống được giữ không đổi thì tổn thất cột áp (a) tăng gấp đôi, (b) tăng gấp ba, (c) gấp bốn lần, (d) tăng thêm 8 lần, hoặc (e) tăng thêm 16 lần?

6.18LT Cơ chế vật lý làm cho hệ số ma sát lớn hơn trong dòng chảy rối so với dòng chảy tầng là gì?

6.19LT Độ nhớt rối là gì? Nguyên nhân gây ra nhớt rối?

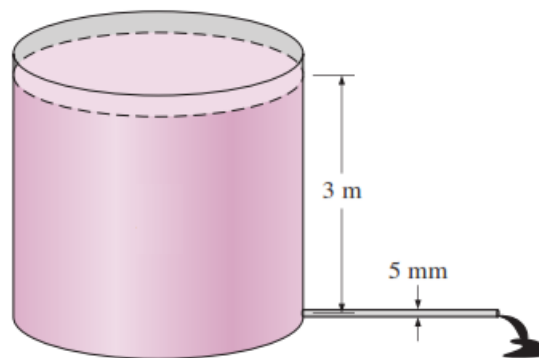
6.20LT Xem xét dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong đường ống tròn. Nếu độ nhớt của chất lỏng giảm đi một nửa bằng cách nung nóng trong khi lưu lượng dòng chảy được giữ cố định, tổn thất cột áp sẽ thay đổi như thế nào?

6.21LT Viết ra mối quan hệ giữa tổn thất cột áp và sụt áp suất? Đối với một chất lỏng cho trước, hãy giải thích làm thế nào để chuyển đổi tổn thất cột áp thành sụt áp suất?

6.22LT Xem xét dòng chảy không khí ở chế độ chảy tầng trong một ống tròn có bề mặt nhẵn hoàn hảo. Có thể cho rằng hệ số ma sát cho dòng chảy này sẽ bằng 0? Giải thích tại sao?

6.23LT Giải thích tại sao hệ số ma sát không phụ thuộc số Reynolds khi số Reynolds rất lớn.

6.24 Dầu với mật độ 850 kg/m^3 và độ nhớt động học là $0.00062 \text{ m}^2/\text{s}$ được xả qua đường ống nằm ngang đường kính 5 mm , dài 40 m từ một bể chứa mở ra khí quyển. Chiều cao của mực nước so với tâm của đường ống là 3 m . Bỏ qua tổn thất cục bộ, xác định lưu lượng dầu qua đường ống.



Hình P6.24

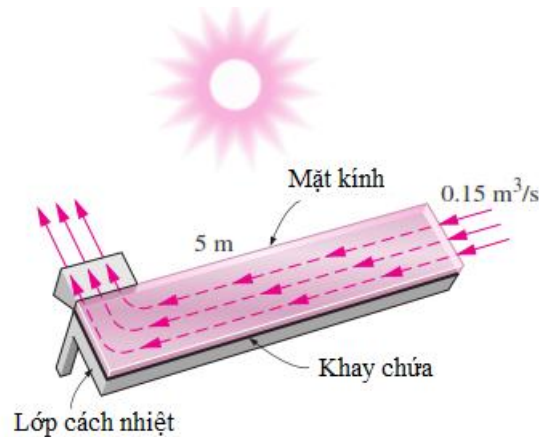
6.25 Nước ở nhiệt độ $10 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho=999.7 \text{ kg/m}^3$ và $\mu=1.307 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$) chảy ổn định trong ống đường kính 0.20 cm , dài 15 m với vận tốc trung bình 1.2 m/s . Xác định (a) tổn thất áp suất, (b) tổn thất cột áp, và (c) yêu cầu về công suất bơm duy trì tổn thất áp suất. *Đáp số: (a) 188 kPa, (b) 19.2 m, (c) 0.71 W*

6.26 Nước ở $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\rho=999.1 \text{ kg/m}^3$ và $\mu=1.138 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$) chảy ổn định trong ống dài 30 m , đường kính 4 cm làm bằng thép không gỉ với lưu lượng 8 L/s . Xác định (a) tổn thất áp suất, (b) tổn thất cột áp, và (c) yêu cầu về công suất bơm duy trì tổn thất áp suất.

6.27 Trong dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong ống tròn, vận tốc tại $r=R/2$ (giữa thành và trục ống) đo được là 6 m/s . Xác định vận tốc ở giữa ống ($r=0$). *Đáp số: 8 m/s*

6.28 Vận tốc dòng chảy trong dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong một ống tròn có bán kính $R=2 \text{ cm}$, tính bằng m/s , được cho bởi $u(r)=4(1-r^2/R^2)$. Xác định vận tốc trung bình, cực đại trong đường ống và lưu lượng dòng chảy.

6.29 Xem xét bộ thu năng lượng mặt trời có chiều rộng 1 m và dài 5 m và có khoảng cách không đổi khoảng 3 cm giữa vỏ thủy tinh và tấm thu. Không khí đi vào ở nhiệt độ trung bình 45 °C với lưu lượng 0.15 m³/s qua cạnh 1 m của bộ thu dọc theo máng dài 5 m. Không tính đến hiệu ứng độ nhám và cửa vào, xác định tổn thất áp suất trong bộ thu. *Đáp số: 32 Pa*



Hình P6.29

6.30 Xem xét dòng chảy của dầu với $\rho = 894 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 2.33 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ trong đường ống có đường kính 40 cm dài 300 m và vận tốc trung bình 0.5 m/s. Bỏ qua hiệu ứng cửa vào, xác định công suất bơm cần thiết để duy trì dòng dầu trong ống.

6.31 Xem xét dòng chảy tầng của chất lỏng qua một kênh dẫn có thiết diện vuông với bề mặt trơn nhẵn. Nếu vận tốc trung bình của chất lỏng tăng gấp đôi. Xác định thay đổi tổn thất cột áp chất lỏng. Giả sử chế độ dòng chảy vẫn không thay đổi.

6.32 Dầu với $\rho = 876 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 0.24 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ chảy trong đường ống có đường kính 1.5 cm và xả ra không khí ở áp suất 88 kPa. Áp suất tuyệt đối tại vị trí cách cửa ra 15 m đo được là 135 kPa. Xác định lưu lượng dòng dầu qua đường ống nếu đường ống là (a) nằm ngang, (b) nghiêng hướng lên 8 °, và (c) nghiêng hướng xuống 8 ° so với mặt nằm ngang.

6.33 Glycerin ở 40 °C với $\rho = 1252 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 0.27 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ chảy trong đường ống đường kính 2 cm, dài 25 m và xả vào khí quyển ở áp suất 100 kPa. Lưu lượng qua đường ống là 0.035 L/s. (a) Xác định áp suất tuyệt đối ở vị trí 25 m trước cửa ra. (b) Ống cần phải nghiêng ở góc độ nào để áp suất trong toàn bộ đường ống bằng áp suất khí quyển và lưu lượng dòng chảy vẫn được duy trì?

6.34 Trong hệ thống sưởi không khí, không khí nóng ở 40 °C và 105 kPa tuyệt đối được cung cấp qua ống hình chữ nhật 0.3 m x 0.2 m làm bằng thép thường với vận tốc độ 0.5 m/s. Xác định tổn thất áp suất cột áp qua đoạn ống dài 40 m. *Đáp số: 128 Pa, 93.8 m*

6.35 Glycerin ở 40 °C với $\rho=1252 \text{ kg/m}^3$ và $\mu=0.27 \text{ kg/m.s}$ chảy trong đường ống tròn nhẵn nằm ngang đường kính 5 cm với vận tốc trung bình 3.5 m/s. Xác định tổn thất áp suất trên 10 m đường ống.

Tổn thất cục bộ

6.36LT Tổn thất cục bộ trong dòng chảy trong đường ống là gì? Hệ số tổn thất cục bộ K_L được xác định như thế nào?

6.37LT Ảnh hưởng của việc làm trơn nhẵn cửa vào của đường ống đến hệ số tổn thất cục bộ là (a) không đáng kể, (b) có đáng kể, hoặc (c) rất đáng kể.

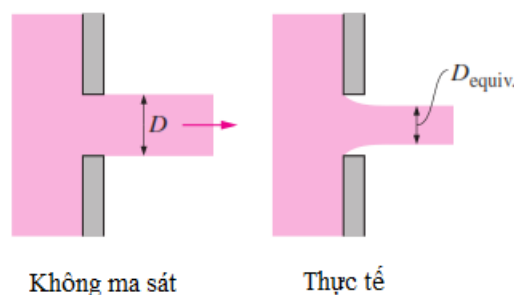
6.38LT Ảnh hưởng của việc làm trơn nhẵn cửa ra của đường ống đến hệ số tổn thất cục bộ là (a) không đáng kể, (b) có đáng kể, hoặc (c) rất đáng kể.

6.39LT Hệ số tổn thất cục bộ nhỏ hơn hay lớn hơn đối với đoạn ống mở rộng dần dần hay thu hẹp dần? Tại sao?

6.40LT Một hệ thống đường ống cần đến một đoạn cua ngoặt, do đó sẽ có tổn thất cục bộ lớn. Một cách để giảm tổn thất cục bộ là sử dụng các đoạn ống cua tròn. Còn cách gì khác không?

6.41 Nước được rút khỏi bể chứa cao 3 m bằng cách khoan một lỗ có đường kính 1.5 cm ở đáy. Bỏ qua hệ số hiệu chỉnh động năng, xác định tốc độ dòng chảy của nước qua lỗ nếu (a) cửa vào của lỗ được làm trơn và (b) cửa vào không được làm trơn.

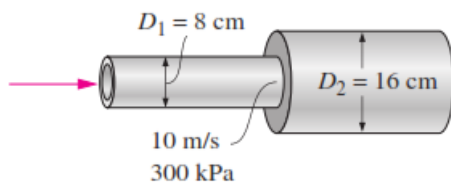
6.42 Xem xét dòng chảy từ bình chứa nước thông qua một lỗ tròn có đường kính D tại thành bên cạnh có khoảng cách thẳng đứng là H tính từ mặt thoáng. Lưu lượng dòng chảy qua lỗ thực tế với $K_L=0.5$ sẽ thấp hơn đáng kể so với lưu lượng dòng chảy được tính toán giả định với dòng chảy "không ma sát" và do đó không có tổn thất cục bộ. Bỏ qua hệ số hiệu chỉnh động năng, tìm mối quan hệ giữa đường kính thực tế D với "đường kính tương đương", D_{equiv} , sử dụng trong dòng chảy không ma sát.



Hình P6.42

6.43 Một đường ống nằm ngang có một mở rộng đột ngột từ $D=8\text{cm}$ đến $D=16\text{cm}$. Vận tốc nước trong ống là 10 m/s và dòng chảy là rối. Áp suất bên ống nhỏ hơn là $P_1=300 \text{ kPa}$. Lấy hệ số hiệu chỉnh năng lượng là 1.06 ở cả cửa vào và cửa ra, xác định áp suất P_2 bên ống to hơn và ước lượng sai số có thể xảy ra nếu

phương trình của Bernoulli được sử dụng (không tính đến tổn thất cục bộ). *Đáp số: 321 kPa, 28 kPa*



Hình P6.43

Hệ thống đường ống và lựa chọn bơm

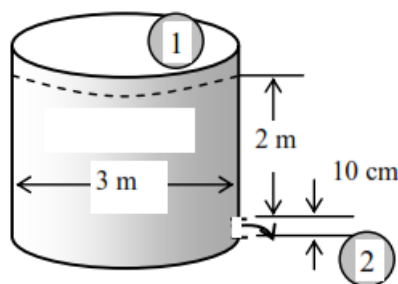
6.44LT Hệ thống đường ống bao gồm hai ống có đường kính khác nhau (nhưng chiều dài, vật liệu và độ nhám như nhau) mắc nối tiếp. Hãy so sánh (a) lưu lượng dòng chảy và (b) tổn thất áp suất trong hai đường ống này.

6.45LT Hệ thống đường ống bao gồm hai ống có đường kính khác nhau (nhưng chiều dài, vật liệu và độ nhám như nhau) mắc song song. Hãy so sánh (a) lưu lượng dòng chảy và (b) tổn thất áp suất trong hai đường ống này.

6.46LT Một hệ thống đường ống bao gồm hai ống có đường kính giống nhau nhưng có độ dài khác nhau được mắc song song. Có thể so sánh tổn thất áp suất trong hai đường ống này không?

6.47LT Nước được bơm từ một hồ chứa thấp hơn lên một hồ chứa cao hơn. Nếu tổn thất cột áp là không đáng kể thì cột áp hiệu quả của máy bơm phải bằng chênh lệch độ cao mực nước của hai hồ chứa. Điều này đúng không?

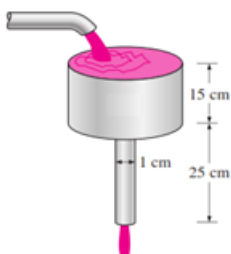
6.48 Một bể chứa có đường kính 3 m ban đầu được đổ đầy nước cao hơn 2 m so với lỗ xả làm tròn mở ở đáy có đường kính có đường kính 10 cm. Mặt nước bể và lỗ xả được mở ra khí quyển. Bỏ qua hiệu ứng của hệ số hiệu chỉnh động năng, tính (a) vận tốc ban đầu qua lỗ và (b) thời gian cần thiết để bể cạn. Hệ số tổn thất cục bộ của lỗ có làm tăng đáng kể thời gian làm cạn bể không?



Hình P6.48

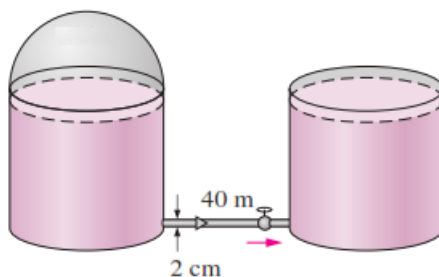
6.49 Một bể chứa có đường kính 3 m ban đầu được đổ đầy nước cao hơn 2 m so với lỗ thoát chưa làm tròn có đường kính 10 cm. Mặt nước bể được mở ra khí quyển, và nước chảy qua lỗ ra ngoài khí quyển bằng bằng đường ống dài 100 m. Hệ số ma sát của đường ống được cho là 0.015, bỏ qua hiệu ứng của hệ số hiệu chỉnh động năng. Xác định vận tốc ban đầu qua lỗ thoát.

6.50 Dầu ở $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ chảy qua phễu thủy tinh thẳng đứng bao gồm một bể chứa hình trụ cao 15 cm và đường ống có đường kính 1 cm, cao 25 cm. Phễu luôn luôn được duy trì đầy bằng cách bổ sung dầu từ một bể. Bỏ qua tổn thất cửa vào, xác định lưu lượng dòng chảy của dầu qua phễu và tính "hiệu quả của phễu", được định nghĩa là tỷ số giữa tốc độ dòng chảy thực tế qua kênh đến tốc độ dòng chảy tối đa cho trường hợp "không ma sát". *Đáp số: $4.09 \times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$, 1.86%*.



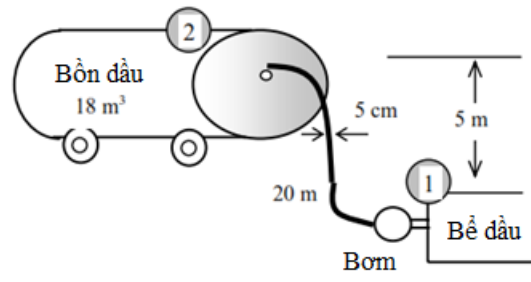
Hình P6.50

6.51 Hai bể chứa A và B được nối với nhau qua một đường ống bằng sắt tôle có đường kính 2 cm và dài 40 m và có cửa vào chưa được làm trơn. Trên đoạn ống có một van một chiều và một van cánh mở hoàn toàn. Mục nước trong cả hai hồ chứa là như nhau, nhưng bể chứa A được nén bằng không khí nén trong khi bể B mở ra khí quyển ở áp suất 88 kPa. Nếu lưu lượng dòng chảy ban đầu qua đường ống là 1.2 L/s, xác định áp suất không khí tuyệt đối trong bể A. Lấy nhiệt độ nước là $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. *Đáp số: 733 kPa.*



Hình P6.51

6.52 Xe bồn chở dầu được bơm dầu với $\rho=920\text{ kg/m}^3$ và $\mu=0.045\text{ kg/m}\cdot\text{s}$ từ bể chứa dưới lòng đất sử dụng ống nhựa dài 20 m, đường kính 5 cm và có cửa vào đã được làm trơn và hai đoạn cong tròn 90 ° . Chênh lệch độ cao giữa mức dầu trong bể chứa và đầu vào bồn chứa mà ống xả ra là 5 m. Dung tích thùng chứa là 18 m^3 và thời gian đổ đầy là 30 phút. Lấy hệ số hiệu chỉnh động năng ở ống xả là 1.05 và hiệu suất bơm tổng thể là 82%, xác định công suất đầu vào cần thiết của bơm.



Hình P6.52

Chương 7. LỰC TÁC DỤNG LÊN VẬT TRONG DÒNG CHẢY BAO

Trong Chương 6, chúng ta đã xem xét dòng chảy của chất lỏng bên trong đường ống, tập trung chủ yếu vào tổn thất áp suất và mối quan hệ của nó với lưu lượng dòng chảy. Trong chương này, chúng ta sẽ xem xét dòng chảy của chất lỏng bao quanh vật thể, được gọi là dòng chảy bao, với trọng tâm là lực cản và lực nâng.

Đối với dòng chảy bên trong, toàn bộ dòng chảy bị chi phối bởi các hiệu ứng nhớt, trong khi đối với dòng chảy bao, các hiệu ứng nhớt được giới hạn trong một phần của trường dòng chảy như trong các lớp biên và các vết sau vật cản.

Khi chất lỏng chuyển động bao xung quanh một vật, nó sẽ tạo ra áp lực vuông góc và lực cắt song song với bề mặt của vật. Tuy nhiên, chúng ta thường quan tâm đến tổng hợp lực tác dụng lên vật mà ít quan tâm đến chi tiết phân bố của các lực trên toàn bộ bề mặt của vật. Thành phần tổng hợp lực tác dụng theo hướng dòng chảy được gọi là *lực cản* và thành phần vuông góc với hướng dòng chảy được gọi là *lực nâng*.

Chúng ta bắt đầu chương này với các khái niệm về lực cản và lực nâng, ảnh hưởng của áp suất, ma sát và sự tách dòng đến các lực này. Sau đó, chúng ta tiếp tục xem xét hệ số cản của các vật thể có hình học hai và ba chiều khác nhau thường gặp trong thực tế và xác định lực cản bằng các hệ số lực cản nhận được từ thí nghiệm. Tiếp theo, chúng ta nghiên cứu sự phát triển của lớp biên vận tốc trong dòng chảy song song bao tấm phẳng và phát triển các mối quan hệ cho hệ số ma sát bề mặt và hệ số lực cản cho dòng chảy bao tấm phẳng, hình trụ và hình cầu. Cuối cùng, chúng ta thảo luận về lực nâng của các cánh và các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính nâng của các vật thể.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này sinh viên có thể:

- Có hiểu biết về bản chất một số hiện tượng vật lý khác nhau như lực cản, lực cản do ma sát, lực cản do áp suất và lực nâng
- Tính toán được lực cản trong dòng chảy cho một số vật thể có hình học phổ biến
- Hiểu được các ảnh hưởng của chế độ dòng chảy lên hệ số lực cản liên quan đến dòng chảy bao hình trụ và hình cầu
- Hiểu các nguyên lý cơ bản của dòng chảy bao cánh và có thể tính toán lực cản và lực nâng tác dụng lên một số dạng cánh

7.1. Giới thiệu

Dòng chảy chất lỏng bao quanh vật thể thường gặp trong thực tế và liên quan đến nhiều hiện tượng vật lý như lực cản tác dụng lên ô tô, đường dây điện, cây cối, đường ống dưới nước; lực nâng cánh máy bay; các lực tác dụng lên các hạt bụi bay trong không khí; vận chuyển các hồng cầu trong mạch máu; chuyển động của các giọt chất lỏng của bình xịt; dao động và tiếng ồn do vật thể chuyển động trong chất lỏng; và công suất của một tua bin gió (Hình 7.1). Sự hiểu biết tốt về dòng chảy bao là rất quan trọng trong việc thiết kế nhiều hệ thống kỹ thuật như máy bay, ô tô, nhà xưởng, tàu thủy, tàu ngầm, các loại tuabin.... Ví dụ, ngày nay những mẫu xe hiện đại được thiết kế đặc biệt chú trọng đến tính khí động học. Điều này đã dẫn đến việc giảm đáng kể lượng tiêu thụ nhiên liệu, tiếng ồn và cải thiện đáng kể việc vận hành.



Hình 7.1 Dòng chảy bao quanh vật thể thường gặp trong thực tế

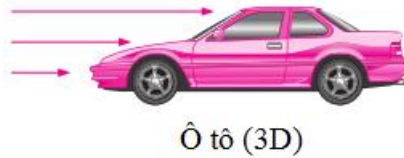
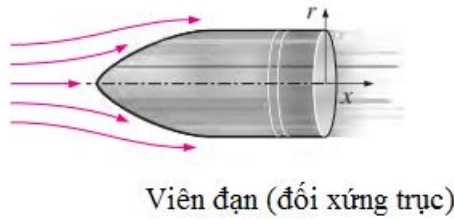
Có những trường hợp chất lỏng chuyển động bao quanh vật thể cố định (như gió thổi bao quanh tòa nhà) và có những trường hợp vật thể chuyển động trong chất lỏng đứng yên (như một chiếc xe chuyển động trong không khí). Hai quá trình này dường như khác nhau nhưng là tương đương với nhau; vấn đề chính ở đây là chuyển động tương đối giữa chất lỏng và vật thể. Những chuyển động này có thể phân tích một cách thuận tiện bằng cách cố định hệ tọa độ trên vật thể. Chính vì vậy các trường hợp kể trên đều được gọi là *dòng chảy bao vật thể* hay *dòng chảy bao*. Ví dụ, các đặc tính khí động học của các kiểu cánh máy bay khác nhau được nghiên cứu thuận tiện trong phòng thí nghiệm bằng cách đặt cánh trong đường

hàm gió và thổi không khí từ hệ thống quạt gió. Ngoài ra, dòng chảy có thể được phân loại là ổn định hoặc không ổn định, tùy thuộc vào hệ tọa độ được lựa chọn. Ví dụ, dòng không khí xung quanh máy bay luôn luôn không ổn định so với mặt đất nhưng nó vẫn ổn định đối với hệ tọa độ di chuyển với máy bay đang bay.

Các trường dòng chảy và hình học của hầu hết các bài toán chảy bao thường là quá phức tạp để có thể nhận được lời giải giải tích, do đó người ta phải dựa vào các kết quả thực nghiệm. Tuy nhiên, ngày nay với sự sẵn có của các máy tính tốc độ cao đã làm cho việc tiến hành các thí nghiệm số được thực hiện một cách nhanh chóng để giải các phương trình phức tạp bằng phương pháp số nhờ vậy các nghiên cứu thực nghiệm tốn kém chỉ phải tiến hành ở giai đoạn cuối của thiết kế. Các nghiên cứu thực nghiệm này được thực hiện trong đường hầm gió. H. F. Phillips (1845-1912) là người đầu tiên đã xây dựng đường hầm gió vào năm 1894 để đo lực cản và lực nâng. Trong chương này, chúng ta chủ yếu sử dụng các mối quan hệ thực nghiệm trong phân tích và tính toán.

Vận tốc của chất lỏng ở khoảng cách xa vật thể được gọi là vận tốc dòng tự do và được ký hiệu là V_∞ . Vận tốc chất lỏng dao động từ 0 trên bề mặt (điều kiện không trơn trượt) đến giá trị vận tốc dòng tự do, và chỉ số vô hạn " ∞ " thường được dùng để nhớ rằng đây là giá trị vận tốc ở khoảng cách khá xa mà sự hiện diện của vật thể không ảnh hưởng tới. Vận tốc dòng tự do có thể thay đổi theo vị trí và thời gian (ví dụ trường hợp gió thổi bao quanh tòa nhà). Nhưng để thuận tiện trong thiết kế và phân tích, vận tốc dòng tự do thường được giả định là đồng nhất và ổn định, và đây cũng là giả thiết quan trọng cho những nghiên cứu được trình bày trong chương này.

Hình dạng của vật thể có ảnh hưởng mạnh đến dòng chảy bao quanh vật thể và trường vận tốc. Dòng chảy bao quanh vật thể được coi là hai chiều khi vật thể rất dài, có mặt cắt ngang không đổi và dòng chảy vuông góc đối với vật thể. Trường hợp gió thổi bao quanh một đường ống hình trụ dài vuông góc với trục của nó là một ví dụ về dòng chảy hai chiều. Có thể thấy rằng rằng thành phần vận tốc hướng dọc trục là bằng 0 trong trường hợp này, do đó phân bố vận tốc là hai chiều. Dòng trong trường hợp đối xứng trục cũng là hai chiều. Ví dụ trường hợp viên đạn bắn trong không khí có thể là dòng chảy đối xứng trục. Vận tốc trong trường hợp này thay đổi theo trục x và khoảng cách xuyên tâm r . Tuy nhiên, trong thực tế nhiều dòng chảy bao vật thể không thể được mô hình hóa như là hai chiều hoặc đối xứng trục, chẳng hạn như dòng chảy bao quanh ô tô, là ba chiều (Hình 7.2).



Hình 7.2 Dòng chảy 2D, đối xứng trục và 3D

Dòng chảy bao cũng có thể được phân loại thành dòng chảy không nén được (như dòng chảy bao ô tô, tàu ngầm và tòa nhà) và dòng chảy nén được (như dòng bao máy bay siêu thanh, tên lửa,...). Hiệu quả nén là không đáng kể ở vận tốc thấp (dòng chảy với $Ma < 0.3$) và các dòng chảy như vậy có thể được coi là không nén được.

7.2. Lực cản và lực nâng

7.2.1. Khái niệm lực cản và lực nâng

Có thể nhận thấy dễ dàng rằng vật thể bị cản trở khi di chuyển trong một chất lỏng hay chất khí, đặc biệt là trong chất lỏng. Chúng ta có thể cảm thấy rằng “đi dạo” trong nước rất khó khăn hơn là trong không khí vì sức cản của nước lớn hơn nhiều so với sức cản của không khí. Ngoài ra, chúng ta có thể đã nhìn thấy những cây lớn, thậm chí các cột điện ven đường bị gió thổi nghiêng, rõ ràng là có “sự đẩy mạnh” của gió lên các vật đứng trong luồng gió.

Chất lỏng có thể gây ra các lực và những mô-men lực tác dụng lên vật thể theo nhiều hướng khác nhau. Thành phần lực theo hướng dòng chảy được gọi là lực cản. Lực cản có thể được đo trực tiếp bằng cách gắn vật thể vào một lò xo và đo sự dịch chuyển theo hướng dòng chảy. Ngoài ra còn các thiết bị đo lường phức tạp hơn, được gọi là cân bằng cản, sử dụng các đầu đo điện tử.

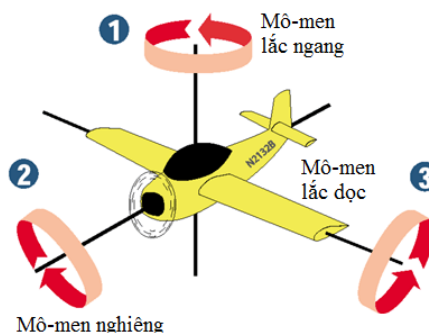
Lực cản thường là một hiệu ứng không mong muốn, như ma sát, và chúng ta làm hết sức mình để giảm thiểu nó. Việc giảm lực cản liên quan chặt chẽ với việc

giảm mức tiêu hao nhiên liệu trong xe ô tô, tàu ngầm, và máy bay; cải thiện độ an toàn và độ bền của các công trình chịu gió cao; và giảm tiếng ồn và rung động. Tuy nhiên, trong một số trường hợp sức cản tạo ra hiệu quả rất có lợi và chúng tôi cố gắng tối đa hóa nó. Ma sát, ví dụ, là một "tiết kiệm cuộc sống" trong phanh ô tô. Tương tự như vậy, nó là sự giúp đỡ cho mọi người nhảy dù, và tất cả chúng ta đều thích sóng của đại dương và những chuyển động thư giãn của lá cây.

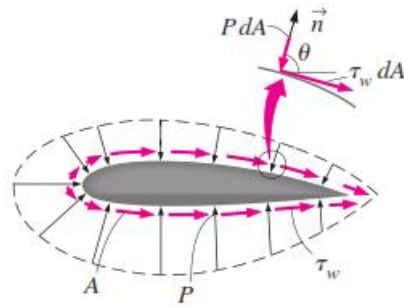
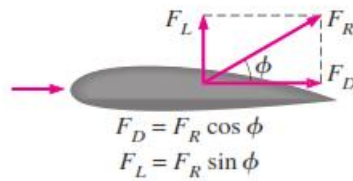
Một chất lỏng ở trạng thái tĩnh chỉ gây áp lực vuông góc trên bề mặt của một vật thể ngập trong nó. Tuy nhiên, một chất lỏng chuyển động cũng có tác động lên lực cắt trên bề mặt vì điều kiện không trơn trượt do hiệu ứng nhớt. Cả hai lực này, nói chung, đều có các thành phần theo hướng dòng chảy, và do đó lực cản là do các hiệu ứng kết hợp của áp suất và lực cắt trên thành vật thể theo hướng dòng chảy. Các thành phần của áp lực và lực cắt tương theo hướng vuông góc với dòng chảy có xu hướng di chuyển vật thể theo hướng đó, tổng của chúng được gọi là lực nâng.

Đối với dòng chảy hai chiều, tổng hợp của lực do áp suất và lực cắt có thể được chia thành hai thành phần: một trong hướng dòng chảy, đó là lực cản, và một theo hướng vuông góc với dòng chảy, đó là lực nâng, như được hiển thị trong Hình 7.4. Đối với dòng chảy ba chiều, còn có một thành phần lực bên cạnh theo hướng vuông góc nằm ngang (với trang giấy) có xu hướng di chuyển vật thể theo hướng đó.

Các lực tác dụng bởi chất lỏng có thể tạo ra những mô-men làm cho vật thể quay. Mô-men theo hướng dòng chảy được gọi là *mô-men nghiêng* (rolling moment – nghiêng), mô-men theo hướng nâng được gọi là *mô-men lắc ngang* (yawing moment – lắc ngang) và mô-men theo hướng lực cạnh được gọi là *mô-men lắc dọc* (pitching moment-lắc dọc) (Hình 7.3). Đối với vật thể có dạng hình học đối xứng đối với mặt phẳng thẳng đứng theo phương chuyển động như xe ô tô, máy bay, và tàu thủy, thì các lực cạnh, mô-men nghiêng và mô-men lắc ngang là bằng 0. Các lực tác dụng lên vật thể chỉ còn lực cản, lực nâng và mô-men lắc đứng. Đối với các vật thể đối xứng trục chuyển động thẳng, chẳng hạn như viên đạn, lực duy nhất tác dụng bởi chất lỏng trên vật thể là lực cản.



Hình 7.3 Các loại mô-men tác dụng lên vật thể chuyển động trong chất lỏng



Hình 7.4 Lực do ma sát và áp suất tác dụng lên vật thể và các thành phần lực cản và lực nâng

Lực áp suất và lực cắt tác dụng lên phần tử vi phân dA trên bề mặt là PdA và $\tau_w dA$, tương ứng. Lực cản và lực nâng tác dụng lên phần tử dA trong dòng chảy hai chiều là (Hình 7.4):

$$dF_D = -P dA \cos \theta + \tau_w dA \sin \theta \quad (7.1)$$

$$dF_L = -P dA \sin \theta - \tau_w dA \cos \theta \quad (7.2)$$

Ở đây θ là góc giữa pháp tuyến ngoài và hướng của dòng chảy. Tổng hợp lực tác dụng lên vật thể được xác định bằng cách lấy tích phân trên toàn bộ bề mặt của vật thể:

Lực cản

$$F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P \cos \theta + \tau_w \sin \theta) dA \quad (7.3)$$

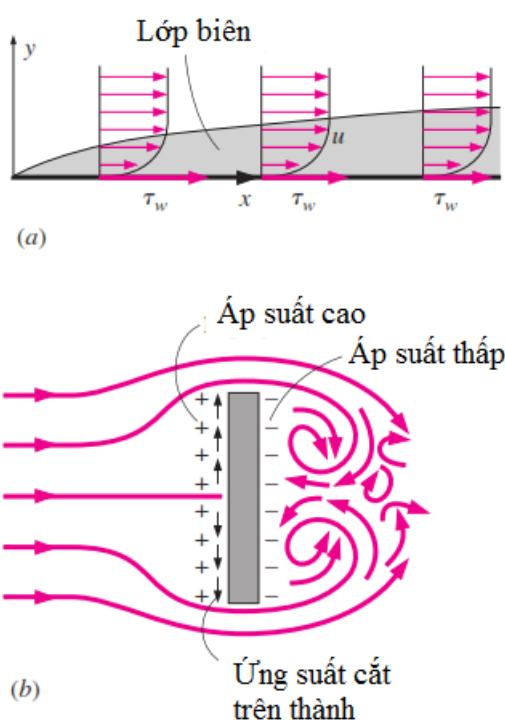
Lực nâng

$$F_L = \int_A dF_L = - \int_A (P \sin \theta + \tau_w \cos \theta) dA \quad (7.4)$$

Đây là những phương trình được sử dụng để tính toán lực cản và lực nâng trên vật thể khi biết được phân bố áp suất và vận tốc ở tất cả các điểm xung quanh bề mặt của vật thể. Tuy nhiên, trong nghiên cứu thực nghiệm, phương trình (7.3) và (7.4) là không thực tế vì sự phân bố chi tiết của áp lực và ứng suất cắt rất khó

nhận được bằng các dụng cụ đo. Rất may mắn là trong thực tế những thông tin này thường không cần thiết vì chúng ta chỉ quan tâm đến tổng hợp lực mà các lực này có thể được đo trực tiếp và dễ dàng trong ống khí động.

Các phương trình (7.1) và (7.2) cho thấy cả ma sát (ứng suất cắt trên bề mặt) và áp suất đều góp phần vào lực cản và lực nâng. Trong trường hợp đặc biệt khi một tấm phẳng phẳng đặt song song với hướng dòng chảy, thì lực cản chỉ phụ thuộc vào ứng suất cắt mà không phụ thuộc vào áp suất vì $\theta=90^\circ$. Tuy nhiên, khi tấm phẳng được đặt vuông góc với hướng dòng chảy, thì lực cản chỉ phụ thuộc vào áp suất mà không phụ thuộc vào ứng suất cắt vì ứng suất cắt trong trường hợp này tác dụng vuông góc với hướng dòng chảy và $\theta=0^\circ$ (Hình 7.6). Nếu tấm phẳng nghiêng một góc so với hướng dòng chảy, thì lực cản sẽ phụ thuộc vào cả áp suất và ứng suất cắt.



Hình 7.6 Hai trường hợp đặc biệt của tấm phẳng đặt trong dòng chảy (a) song song với dòng chảy; (b) vuông góc với dòng chảy.

Đôi cánh của máy bay được tạo hình và đặt ở tư thế (góc nghiêng) đặc biệt để có lực nâng tối đa và lực cản tối thiểu. Điều này được thực hiện bằng cách duy trì một góc nghiêng (góc tấn) trong quá trình bay. Cả lực nâng và lực cản là các hàm số phụ thuộc nhiều vào góc tấn (chúng ta sẽ thảo luận sau trong chương này). Sự chênh lệch áp suất giữa bề mặt trên và mặt dưới của cánh tạo ra một lực đẩy lên có xu hướng nâng cánh và do đó máy bay bay được trên trung không. Đối với vật thể mỏng như cánh, lực cắt tác dụng gần như song song với hướng dòng chảy, do đó sự đóng góp lực cắt vào lực nâng là nhỏ. Lực cản cho vật thể mỏng chủ yếu là do ứng suất cắt (ma sát trên bề mặt).

Lực nâng và lực cản phụ thuộc vào mật độ ρ của chất lỏng, vận tốc dòng chảy V , kích thước, hình dạng và hướng đặt của vật thể (so với hướng dòng chảy). Để thuận tiện trong việc tính toán các lực này, chúng ta sẽ sử dụng các tham số không thứ nguyên đại diện cho đặc trưng cho một vật thể. Các tham số này được gọi là hệ số lực cản C_D và hệ số lực nâng C_L , chúng được định nghĩa như sau:

Hệ số cản

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (7.5)$$

Hệ số nâng

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (7.6)$$

ở đây A thường là diện tích mặt trước (diện tích được chiếu lên trên mặt phẳng vuông góc với hướng dòng chảy) của vật thể. Ví dụ, diện tích mặt trước của một ống hình trụ có đường kính D và chiều dài L , là $A=LD$. Trong tính toán lực nâng của một số vật thể mỏng, chẳng hạn như cánh, A được coi là *diện tích nâng cánh* (planform area), đó là diện tích được nhìn thấy bởi một người nhìn vào vật thể từ phía trên theo một hướng vuông góc với vật thể. Các hệ số lực cản và lực nâng là các hàm chủ yếu phụ thuộc của hình dạng của vật thể, nhưng trong một số trường hợp chúng cũng phụ thuộc vào số Reynolds và độ nhám bề mặt. Số hạng $\rho V^2/2$ trong phương trình (7.5) và (7.6) là áp suất động lực của dòng chảy.

Các hệ số lực cản và lực nâng cục bộ (địa phương) thay đổi dọc theo bề mặt do sự thay đổi trong lớp biên vận tốc theo hướng dòng chảy. Tuy nhiên, chúng ta thường quan tâm đến lực cản và lực nâng cho toàn bộ bề mặt, các lực này có thể được xác định thông qua hệ số lực cản và lực nâng trung bình. Mối quan hệ giữa hệ số lực cản và lực nâng cục bộ (phụ thuộc x) cho bề mặt có chiều dài L và các hệ số trung bình cho toàn bộ bề mặt có thể được xác định bằng phương trình tích phân sau:

$$C_D = \frac{1}{L} \int_0^L C_{D,x} dx \quad (7.7)$$

$$C_L = \frac{1}{L} \int_0^L C_{L,x} dx \quad (7.8)$$

Khi một vật thể trong khí quyển hoặc chìm xuống trong hồ nước, vận tốc của nó sẽ gia tăng dưới ảnh hưởng của trọng lượng. Tuy nhiên sự chuyển động của vật thể bị cản trở bởi lực cản của chất lỏng, tác dụng theo hướng ngược với chuyển động. Khi vận tốc của vật thể gia tăng, thì lực kéo cũng gia tăng. Điều này có thể tiếp tục cho đến khi tất cả các lực cân bằng lẫn nhau và tổng hợp lực tác dụng lên

vật thể là bằng 0. Sau đó, vận tốc của vật thể sẽ không đổi nếu các tính chất của chất lỏng không thay đổi. Vận tốc này là vận tốc rơi tối đa của vật thể và được gọi là *vận tốc cuối*. Các lực tác dụng lên vật thể rơi thường là lực cản, lực đẩy nổi và trọng lượng của vật thể.

7.2.2. Lực cản do ma sát và áp suất

Như đã đề cập trong mục 7.2, lực cản là tổng hợp lực thực hiện bởi chất lỏng lên vật thể theo hướng dòng chảy do tác động kết hợp của lực cắt và áp lực trên bề mặt vật thể. Thông thường có tách hai hiệu ứng và nghiên cứu chúng một cách riêng biệt.

Một phần của lực cản trực tiếp do ứng suất cắt trên bề mặt gây ra bởi ảnh hưởng của ma sát được gọi là *lực cản ma sát bề mặt* (hoặc đơn giản là lực cản ma sát $F_{D,friction}$) và một phần trực tiếp do áp suất P được gọi là *lực cản áp suất* ($F_{D,pressure}$, còn được gọi là *lực cản hình dạng* vì sự phụ thuộc mạnh mẽ vào hình dạng của vật thể). Hệ số cản ma sát và áp suất được định nghĩa như sau:

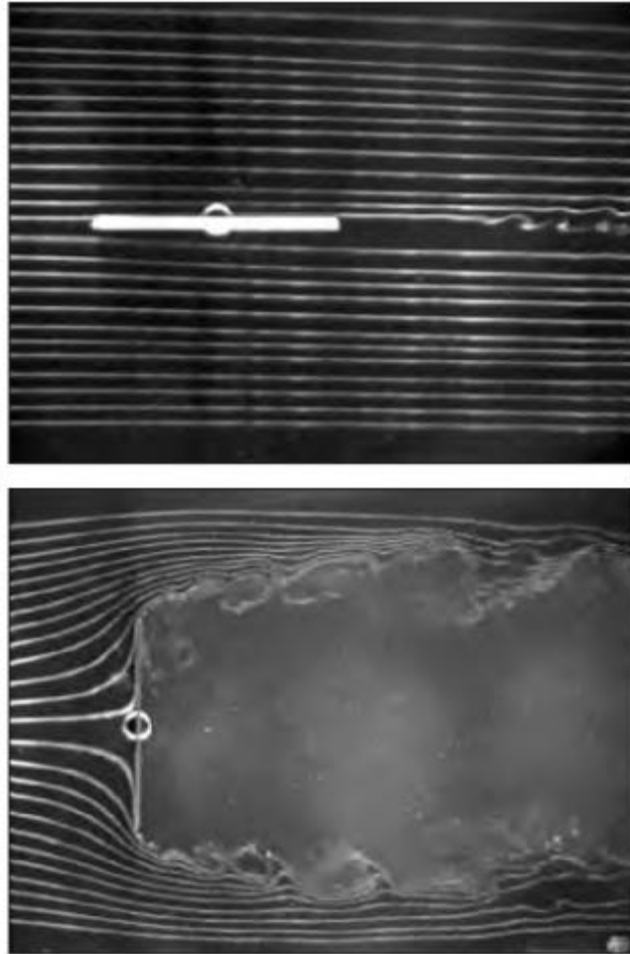
$$C_{D, friction} = \frac{F_{D, friction}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{và} \quad C_{D, pressure} = \frac{F_{D, pressure}}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (7.9)$$

Khi các hệ số ma sát lực cản hoặc các lực cản thành phần có sẵn, tổng hệ số lực cản hoặc tổng lực cản có thể được xác định bằng cách lấy tổng của chúng chúng:

$$C_D = C_{D, friction} + C_{D, pressure} \quad \text{và} \quad F_D = F_{D, friction} + F_{D, pressure} \quad (7.10)$$

Lực cản ma sát là một hàm số phụ thuộc mạnh mẽ vào độ nhớt và tăng lên khi độ nhớt tăng lên. Số Reynolds tỉ lệ nghịch với độ nhớt của chất lỏng. Do đó, sự đóng góp của lực cản ma sát đến tổng lực cản đối với các vật thể có thân dày ít hơn khi số Reynolds lớn hơn và có thể không đáng kể khi số Reynolds rất lớn. Lực cản trong những trường hợp như vậy là chủ yếu là do lực cản áp suất. Trái lại, khi số Reynolds nhỏ, lực cản chủ yếu là lực cản ma sát. Lực ma sát tỉ lệ với diện tích bề mặt. Vì vậy, các vật thể với một bề mặt có diện tích lớn hơn sẽ có lực cản ma sát lớn hơn.

Lực cản áp suất tỉ lệ thuận với *diện tích mặt trước* và sự khác biệt giữa áp suất tác động lên mặt trước và mặt sau của vật thể. Do đó, lực cản áp suất thường chiếm ưu thế đối với các vật có thân dày và nhỏ đối với các vật có thân mỏng và hình dáng khí động học như các loại cánh và bằng 0 đối với tấm phẳng đặt song song với dòng chảy (Hình 7.7). Lực cản áp suất trở nên lớn nhất khi vận tốc của chất lỏng quá cao để chất lỏng không thể đi theo độ cong của bề mặt vật thể mà tách ra khỏi bề mặt tại một số điểm để tạo ra một vùng áp suất rất thấp ở mặt sau. Lực cản áp suất trong trường hợp này được tạo ra do sự chênh lệch áp suất lớn giữa mặt trước và mặt sau của vật thể.



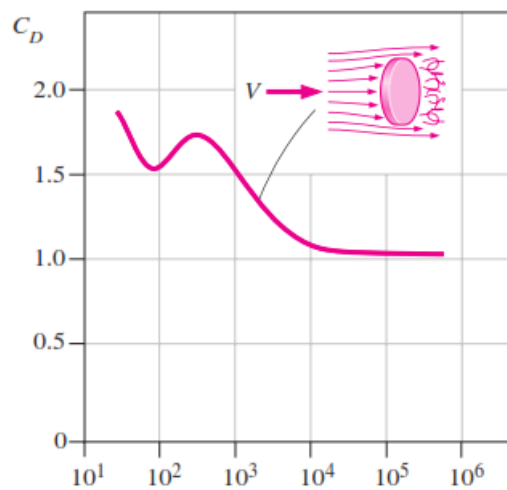
Hình 7.7 Lực cản ma sát chiếm ưu thế khi tấm phẳng đặt song song và không đáng kể khi tấm phẳng đặt vuông góc với dòng chảy

7.3. Hệ số lực cản cho các hình dạng thông thường

Khái niệm lực cản có những ứng dụng quan trọng trong cuộc sống hàng ngày, lực cản của các vật thể tự nhiên và nhân tạo khác nhau được đặc trưng bởi hệ số lực cản của chúng được đo trong điều kiện đặc trưng. Mặc dù lực cản được gây ra bởi hai hiệu ứng khác nhau (ma sát và áp lực), thường rất khó để xác định chúng một cách riêng biệt. Ngoài ra, trong hầu hết các trường hợp, chúng ta sẽ quan tâm đến tổng hợp lực cản chứ không phải là các thành phần lực cản, do đó thường là tổng hệ số cản được nghiên cứu. Việc xác định hệ số cản là đề tài của nhiều nghiên cứu (chủ yếu là thí nghiệm), và có một số lượng lớn các dữ liệu về hệ số cản trong các tài liệu các dạng hình học gặp trong thực tế.

Hệ số lực cản, nói chung, phụ thuộc vào số Reynolds, đặc biệt đối với số Reynolds nhỏ hơn 10^4 . Ở các số Reynolds cao hơn, hệ số lực cản cho hầu hết các hình học là hằng số (Hình 7.9). Điều này là do dòng chảy có số Reynolds cao trở nên *rối hoàn toàn* (fully turbulent). Tuy nhiên, đối với các trường hợp thân tròn như hình trụ tròn và hình cầu thì không phải như vậy, chúng ta sẽ thảo luận về

vấn đề này sau trong chương này. Các hệ số lực cản được đưa ra (trong các bảng tra cứu) thường chỉ áp dụng cho các dòng chảy ở số Reynolds cao.



Hình 7.9: Hệ số lực cản là hằng số khi $Re > 10^4$ cho phần lớn các vật thể có hình dạng khác nhau

Hệ số lực cản có các đặc điểm khác nhau ở các vùng khác nhau của số Reynolds: thấp (dòng chảy chậm – creeping flow), trung bình (dòng chảy tầng) và cao (dòng chảy rối). Dòng chảy với các hiệu ứng quán tính là không đáng kể khi số Reynolds thấp ($Re \ll 1$), được gọi là dòng chảy chậm và chất lỏng chảy bao quanh vật thể một cách êm ả. Hệ số lực cản trong trường hợp này là tỷ lệ nghịch với số Reynolds, và đối với dòng chảy bao quanh quả cầu được xác định như sau:

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (Re \leq 1) \quad (7.11)$$

Như vậy lực cản tác dụng lên vật thể hình cầu trong dòng chảy chậm sẽ là:

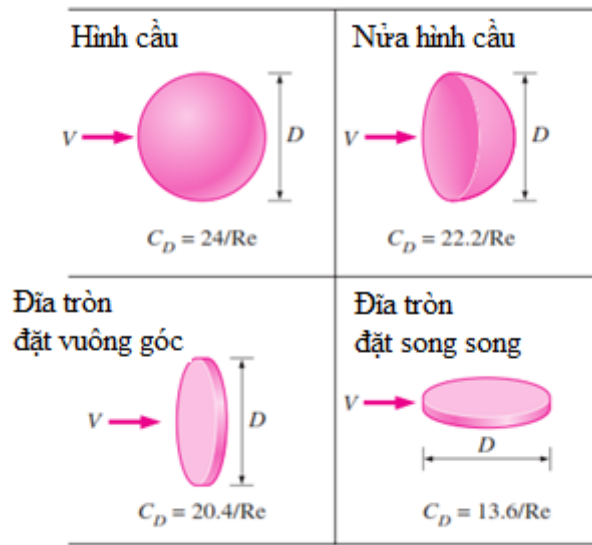
$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = \frac{24}{Re} A \frac{\rho V^2}{2} = \frac{24}{\rho V D / \mu} \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho V^2}{2} = 3\pi\mu V D \quad (7.12)$$

Công thức này còn được gọi là định luật Stokes, lấy tên nhà toán học và nhà vật lý học người Anh G. G. Stokes (1819-1903). Phương trình này chỉ ra rằng ở số Reynolds rất thấp, lực cản tác dụng lên các vật hình cầu tỷ lệ thuận với đường kính, vận tốc và độ nhớt của chất lỏng. Mối quan hệ này thường được áp dụng cho các hạt bụi trong không khí và các hạt rắn lơ lửng trong nước.

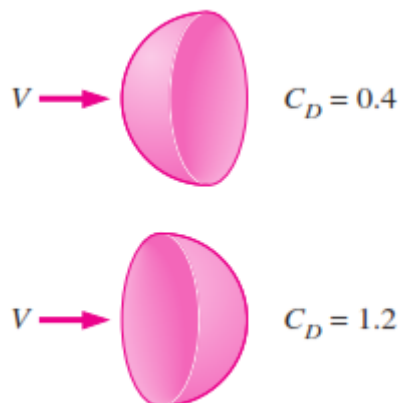
Hệ số lực cản cho số Reynolds thấp của một số hình học khác được cho trong Hình 7.10. Có thể nhận thấy rằng ở số Reynolds thấp, hình dạng của vật thể không có ảnh hưởng lớn đến hệ số cản. Các hệ số lực cản của các vật thể khác nhau trong dòng chảy hai và ba chiều được cho trong các Bảng 7.3 và 7.4 đối với các số Reynolds lớn. Chúng ta có thể có một vài nhận xét về hệ số lực cản ở số Reynolds cao như sau. Trước hết, góc đặt của vật thể so với hướng dòng chảy có ảnh hưởng lớn đến hệ số lực cản. Ví dụ, hệ số lực cản dòng chảy bao bán cầu là

0.4 khi mặt cầu đối diện với dòng chảy, nhưng nó tăng gấp ba lần lên 1.2 khi mặt phẳng đối diện với dòng chảy (Hình 7.11).

Đối với vật thể có thân dày với các góc sắc nét, chẳng hạn như dòng chảy qua khối hình chữ nhật hoặc một tấm phẳng đặt vuông góc với chảy, sự phân tách dòng thường xảy ra ở các cạnh và không có sự thay đổi đáng kể về đặc trưng của dòng chảy. Do đó, hệ số lực cản của các vật thể như vậy gần như độc lập với số Reynolds. Lưu ý rằng hệ số lực cản của một thanh hình chữ nhật dài có thể được giảm gần một nửa từ 2.2 đến 1.2 bằng cách làm tròn các góc.


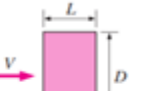

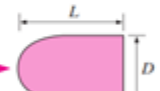


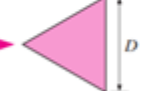
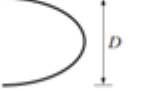


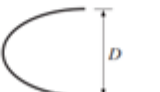
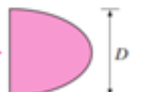


Hình 7.10 Hệ số lực cản C_D ở vận tốc nhỏ ($Re \leq 1$ với $Re = VD/\nu$ và $A = \pi D^2/4$)








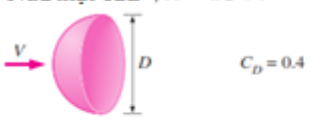
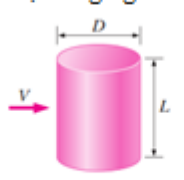
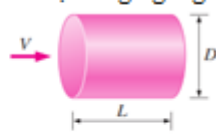
Hình 7.11 Hệ số lực cản phụ thuộc vào góc đặt của vật cản

Bảng 7.3 Hệ số lực cản C_D của một số vật thể 2 chiều cho $Re > 10^4$ dựa trên diện tích tích mặt trước $A=bD$, b là chiều sâu vuông góc với mặt giấy

Thanh vuông		Thanh chữ nhật																		
	Góc nhọn $C_D = 2.2$		Góc nhọn	<table border="1"><thead><tr><th>LD</th><th>C_D</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.0</td><td>1.9</td></tr><tr><td>0.1</td><td>1.9</td></tr><tr><td>0.5</td><td>2.5</td></tr><tr><td>1.0</td><td>2.2</td></tr><tr><td>2.0</td><td>1.7</td></tr><tr><td>3.0</td><td>1.3</td></tr></tbody></table>	LD	C_D	0.0	1.9	0.1	1.9	0.5	2.5	1.0	2.2	2.0	1.7	3.0	1.3		
LD	C_D																			
0.0	1.9																			
0.1	1.9																			
0.5	2.5																			
1.0	2.2																			
2.0	1.7																			
3.0	1.3																			
	Góc lượn ($r/D = 0.2$): $C_D = 1.2$		Mặt tròn Mặt	<table border="1"><thead><tr><th>LD</th><th>C_D</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.5</td><td>1.2</td></tr><tr><td>1.0</td><td>0.9</td></tr><tr><td>2.0</td><td>0.7</td></tr><tr><td>4.0</td><td>0.7</td></tr></tbody></table>	LD	C_D	0.5	1.2	1.0	0.9	2.0	0.7	4.0	0.7						
LD	C_D																			
0.5	1.2																			
1.0	0.9																			
2.0	0.7																			
4.0	0.7																			
Thanh tròn		Thanh elip																		
	Phân tầng: $C_D = 1.2$ Rối: $C_D = 0.3$			<table border="1"><thead><tr><th rowspan="2">LD</th><th colspan="2">C_D</th></tr><tr><th>Phân tầng</th><th>Rối</th></tr></thead><tbody><tr><td>2</td><td>0.60</td><td>0.20</td></tr><tr><td>4</td><td>0.35</td><td>0.15</td></tr><tr><td>8</td><td>0.25</td><td>0.10</td></tr></tbody></table>	LD	C_D		Phân tầng	Rối	2	0.60	0.20	4	0.35	0.15	8	0.25	0.10		
LD	C_D																			
	Phân tầng	Rối																		
2	0.60	0.20																		
4	0.35	0.15																		
8	0.25	0.10																		
Thanh tam giác		Vô nửa tròn		Thanh nửa tròn																
	$C_D = 1.5$		$C_D = 2.3$		$C_D = 1.2$															
	$C_D = 2.0$		$C_D = 1.2$		$C_D = 1.7$															

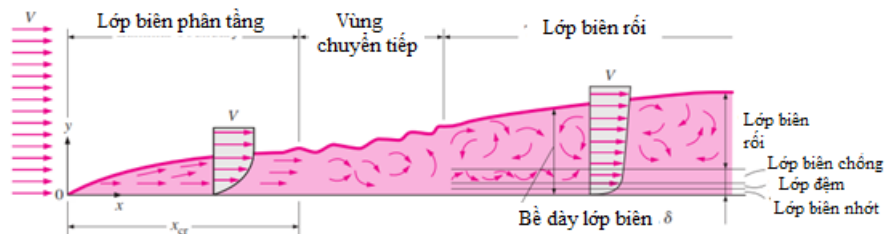
Bảng 7.3 Hệ số lực cản C_D của một số vật thể 3 chiều cho $Re > 10^4$

	$A = D^2$ Hình lập phương $C_D = 1.05$		Đĩa tròn mỏng $A = \pi D^2/4$ $C_D = 1.1$		Hình nón $C_D = 0.5$																				
	$A = \pi D^2/4$ Hình cầu Phân tầng $C_D = 0.5$ Rối $C_D = 0.2$		Ellipsoid, $A = \pi D^2/4$	<table border="1"><thead><tr><th rowspan="2">LD</th><th colspan="2">C_D</th></tr><tr><th>Phân tầng</th><th>Rối</th></tr></thead><tbody><tr><td>0.75</td><td>0.5</td><td>0.2</td></tr><tr><td>1</td><td>0.5</td><td>0.2</td></tr><tr><td>2</td><td>0.3</td><td>0.1</td></tr><tr><td>4</td><td>0.3</td><td>0.1</td></tr><tr><td>8</td><td>0.2</td><td>0.1</td></tr></tbody></table>	LD	C_D		Phân tầng	Rối	0.75	0.5	0.2	1	0.5	0.2	2	0.3	0.1	4	0.3	0.1	8	0.2	0.1	
LD	C_D																								
	Phân tầng	Rối																							
0.75	0.5	0.2																							
1	0.5	0.2																							
2	0.3	0.1																							
4	0.3	0.1																							
8	0.2	0.1																							

Nửa mặt cầu, $A = \pi D^2/4$	Trụ đứng ngắn, $A = LD$	Trụ đứng ngang, $A = \pi D^2/4$																										
																												
$C_D = 0.4$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0.6</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.8</td></tr> <tr><td>10</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>40</td><td>1.0</td></tr> <tr><td>∞</td><td>1.2</td></tr> </tbody> </table>	L/D	C_D	1	0.6	2	0.7	5	0.8	10	0.9	40	1.0	∞	1.2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>L/D</th> <th>C_D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5</td><td>1.1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>8</td><td>1.0</td></tr> </tbody> </table>	L/D	C_D	0.5	1.1	1	0.9	2	0.9	4	0.9	8	1.0
L/D	C_D																											
1	0.6																											
2	0.7																											
5	0.8																											
10	0.9																											
40	1.0																											
∞	1.2																											
L/D	C_D																											
0.5	1.1																											
1	0.9																											
2	0.9																											
4	0.9																											
8	1.0																											
$C_D = 1.2$	Các giá trị cho dòng phân tầng																											

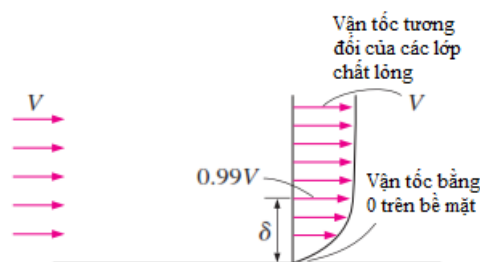
7.4. Dòng chảy song song bao tấm phẳng

Xem xét dòng chảy của chất lỏng trên một tấm phẳng, như thể hiện trong Hình 7.12. Trục tọa độ x có gốc tọa độ từ mép đầu của tấm và theo hướng dòng chảy, tọa độ y hướng lên trên vuông góc với bề mặt tấm phẳng. Trước khi tiếp cận tấm phẳng, chất lỏng chuyển động đều với vận tốc V .



Hình 7.12 Phát triển của lớp biên trên tấm phẳng và các chế độ dòng chảy khác nhau

Để dễ hình dung, chúng ta có thể xem xét chất lỏng xung quanh tấm phẳng bao gồm các lớp liên nhau xếp chồng lên nhau. Vận tốc của các hạt trong lớp chất lỏng đầu tiên sát bề mặt tấm phẳng là bằng 0 vì điều kiện không trơn trượt. Lớp chất lỏng này làm chậm lại các hạt của lớp chất lỏng lân cận do ma sát giữa các hạt chất lỏng của hai lớp chất lỏng tiếp giáp nhau nhưng có vận tốc khác nhau. Lớp chất lỏng này lại làm chậm các phân tử của lớp tiếp theo, vân vân. Vì vậy, sự hiện diện của tấm phẳng sẽ ảnh hưởng đến một khoảng cách δ nào đó từ bề mặt tấm và khi vượt qua khoảng cách này thì vận tốc dòng chảy là không thay đổi. Kết quả là, thành phần x của vận tốc chất lỏng, u , thay đổi từ 0 tại $y=0$ đến tiến gần V tại $y=\delta$ (Hình 7.13).



Hình 7.13 Phân bố vận tốc tại lớp biên

Khu vực dòng chảy trên tấm được bao bọc bởi khoảng cách δ , trong đó ảnh hưởng của lực cắt do độ nhớt của chất lỏng được cảm nhận được gọi là *lớp biên vận tốc*. Độ dày lớp biên δ thường được định nghĩa là khoảng cách tính từ bề mặt tấm phẳng mà ở đó $u=0.99V$.

Đường dòng giả định $u=0.99V$ chia trường dòng chảy thành hai vùng: vùng lớp biên, trong đó có các hiệu ứng nhớt và sự thay đổi vận tốc là đáng kể và vùng dòng chảy không xoáy, nơi mà các hiệu ứng ma sát là không đáng kể và vận tốc được giữ nguyên. Đối với dòng chảy song song trên một tấm phẳng, lực cản áp suất là bằng 0, và do đó hệ số lực cản bằng với hệ số cản ma sát, vì vậy có thể gọi đơn giản là *hệ số ma sát*. Ta có,

$$\text{Đối với tấm phẳng:} \quad C_D = C_{D,friction} = C_f \quad (7.13)$$

Lực cản trong trường hợp này sẽ được xác định từ công thức:

$$F_D = F_f = \frac{1}{2} C_f A \rho V^2 \quad (7.14)$$

trong đó A là diện tích bề mặt tiếp xúc với dòng chất lỏng. Khi cả hai mặt của tấm phẳng tiếp xúc với dòng chảy, A là tổng diện tích bề mặt trên và bề mặt dưới. Lưu ý rằng các giá trị địa phương của hệ số ma sát $C_{f,x}$, nói chung, thay đổi theo vị trí dọc theo bề mặt.

Các dạng phân bố vận tốc trung bình điển hình trong dòng chảy tầng và dòng chảy rối được minh họa trên Hình 7.12. Lưu ý rằng các dạng phân bố vận tốc trong dòng chảy rối là “phẳng” hơn so với trong dòng chảy tầng, tuy nhiên có sự biến đổi mạnh khu vực sát bề mặt tấm. Lớp biên rối có thể được xem xét bao gồm bốn khu vực, được đặc trưng bởi khoảng cách đến bề mặt. Lớp mỏng trên bề mặt nơi mà lực nhớt chiếm ưu thế được gọi là *lớp biên nhớt*. Phân bố vận tốc trong lớp này là xấp xỉ tuyến tính và dòng chảy là chảy tầng. Bên trên lớp biên nhớt là *lớp đệm*, trong đó các hiệu ứng rối đã có ảnh hưởng, song vẫn còn bị chi phối bởi các hiệu ứng nhớt. Ở phía trên lớp đệm là *lớp chùng lẫn*, trong đó các hiệu ứng rối đã có ảnh hưởng lớn hơn, nhưng chưa hoàn toàn chiếm ưu thế. Phía trên lớp chùng lẫn là *lớp rối*, trong đó các hiệu ứng rối chiếm ưu thế hoàn toàn (so với hiệu ứng nhớt).

Sự chuyển đổi chế độ dòng chảy từ dòng chảy tầng sang rối phụ thuộc vào hình học bề mặt, độ nhám bề mặt, vận tốc dòng chảy, nhiệt độ bề mặt, loại chất lỏng,... và được đặc trưng bởi số Reynolds. Số Reynolds ở khoảng cách x từ mép đầu của tấm phẳng được xác định bằng:

$$Re_x = \frac{\rho V x}{\mu} = \frac{V x}{\nu} \quad (7.15)$$

trong đó V là vận tốc ở thượng lưu và x là chiều dài đặc trưng hình học (đối với một tấm phẳng là chiều dài của tấm theo hướng dòng chảy). Lưu ý rằng không giống như dòng chảy trong đường ống, số Reynolds thay đổi dọc theo dòng

chảy, cho tới $Re=VL/\nu$ ở cuối tấm. Đối với bất kỳ điểm nào trên tấm phẳng, chiều dài đặc trưng là khoảng cách x của điểm từ mép đầu tấm theo hướng dòng chảy.

Đối với dòng chảy trên một tấm phẳng trơn nhẵn, việc chuyển chế độ chảy tầng sang rối bắt đầu khi $Re=1 \times 10^5$, nhưng chưa trở nên rối hoàn toàn khi số Reynolds chưa đạt đến giá trị cao hơn, thường là khoảng 3×10^6 . Trong các phân tích kỹ thuật, một giá trị số Reynolds tới hạn (trước khi trở nên rối hoàn toàn) được chấp nhận rộng rãi là:

$$Re_{x,cr} = \frac{\rho V x_{cr}}{\mu} = 5 \times 10^5$$

7.4.1. Hệ số ma sát

Hệ số ma sát cho dòng chảy tầng trên tấm phẳng có thể nhận được từ lời giải lý thuyết (xem Cengel Simbala Chương 10 []). Tuy nhiên, đối với dòng chảy rối, hệ số này chỉ được xác định bằng thực nghiệm và có thể được biểu diễn bằng các biểu thức thực nghiệm.

Hệ số ma sát cục bộ thay đổi dọc theo bề mặt tấm phẳng do sự thay đổi của lớp biên tốc độ theo hướng dòng chảy. Tuy nhiên, chúng ta thường quan tâm đến lực cản trên toàn bộ bề mặt thông qua hệ số ma sát trung bình. Trong một số trường hợp, khi chúng ta cũng quan tâm đến lực cản tại một vị trí nhất định thì chúng ta cần phải xác định giá trị của hệ số ma sát cục bộ. Vì vậy, chúng ta sẽ thu nhận biểu thức cho cả hai hệ số ma sát: hệ số ma sát cục bộ (là hàm số phụ thuộc vào tham số x) và hệ số ma sát trung bình trên tấm phẳng cho các điều kiện dòng chảy tầng và dòng chảy rối. Khi các giá trị cục bộ đã được xác định, hệ số ma sát trung bình cho toàn bộ tấm được xác định bằng cách lấy tích phân:

$$C_f = \frac{1}{L} \int_0^L C_{f,x} dx \quad (7.16)$$

Theo kết quả phân tích dòng chảy bao trên tấm phẳng (Cengel Simbala Chương 10 []), bề dày lớp biên và hệ số ma sát cục bộ được xác định như sau:

Đối với dòng chảy tầng:

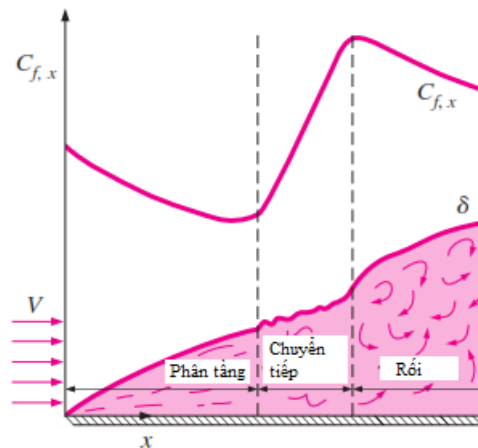
$$\delta = \frac{4.91x}{Re_x^{1/2}} \quad \text{và} \quad C_{f,x} = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}}, \quad \text{với} \quad Re_x < 5 \times 10^5 \quad (7.17)$$

Đối với dòng chảy rối:

$$\delta = \frac{0.38x}{Re_x^{1/5}} \quad \text{và} \quad C_{f,x} = \frac{0.059}{Re_x^{1/5}}, \quad \text{với} \quad 5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7 \quad (7.18)$$

ở đây x là khoảng cách dọc theo dòng chảy tính từ đầu mũi của tấm phẳng, $Re_x = Vx/\nu$. Có thể nhận thấy rằng, theo các công thức trên $C_{f,x}$ lớn vô cùng tại đầu mũi tấm phẳng, do đó các phương trình trên sẽ không đúng cho vùng gần đầu mũi tấm phẳng. Sự biến đổi của bề dày lớp biên và hệ số cản cục bộ dọc theo tấm phẳng được minh họa trên Hình 7.14. Hệ số ma sát cục bộ lớn hơn trong dòng

chảy rối so với dòng chảy tầng, đạt giá trị lớn nhất khi dòng chảy trở thành rối hoàn toàn sau đó giảm dần với $x^{-1/5}$ theo hướng dòng chảy.



Hình 7.14 Sự biến đổi của bề dày lớp biên và hệ số cản cục bộ dọc theo tấm phẳng

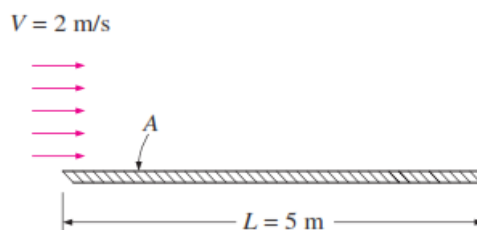
Hệ số ma sát trung bình cho tấm phẳng được xác định từ (7.16), có giá trị như sau:

$$\text{Dòng chảy tầng: } C_f = \frac{1.33}{Re_L^{1/2}}, \quad \text{với } Re_x < 5 \times 10^5 \quad (7.19)$$

$$\text{Dòng chảy rối: } C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}}, \quad \text{với } 5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7 \quad (7.20)$$

7.4.2. Ví dụ 7.1: Dòng dầu nóng chảy trên tấm phẳng

Dầu động cơ ở nhiệt độ 40 °C chảy trên một tấm phẳng 5 m dài với vận tốc dòng tự do 2 m/s (Hình 7.15). Xác định lực kéo tác dụng lên tấm trên một đơn vị chiều rộng.



Hình 7.15 Sơ đồ ví dụ 7.1

Vấn đề: Dầu động cơ chảy trên một tấm phẳng. Xác định lực cản trên một đơn vị chiều rộng của tấm.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Số Reynolds tới hạn là $Re_{cr} = 5 \times 10^5$.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của dầu động cơ ở 40 °C là $\rho = 876 \text{ kg/m}^3$ và $\nu = 2.485 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Phân tích: Với $L = 5 \text{ m}$, số Reynolds tại cuối tấm là:

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{(2)(5)}{2.465 \times 10^{-4}} = 4.024 \times 10^4$$

Số Reynolds nhỏ hơn số Reynolds tới hạn, do đó dòng chảy là chảy tầng. Hệ số ma sát trung bình được xác định từ:

$$C_f = 1.328Re_L^{-0.5} = 1.328 \times (4.024 \times 10^4)^{-0.5} = 0.00662$$

Đối với tấm phẳng, hệ số cản áp suất là bằng 0, do đó $C_D=C_f$. Vậy lực cản lên 1 m bề rộng tấm phẳng sẽ là:

$$F_D = C_f A \frac{\rho V^2}{2} = 0.00662(5 \times 1) \frac{(876)(2)^2}{2} = 58.0 \text{ N}$$

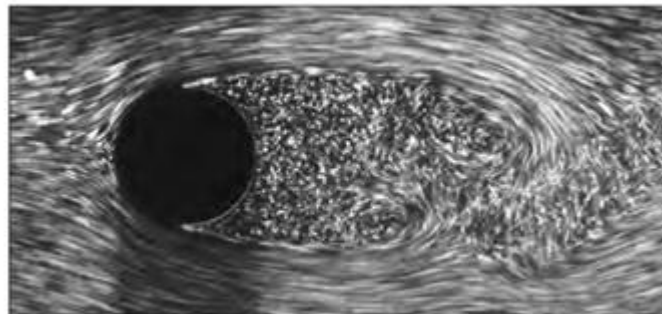
7.5. Dòng chảy bao hình trụ và hình cầu

Dòng chảy bao hình trụ và hình cầu thường gặp trong thực tế. Ví dụ, dòng chảy làm mát các ống trong bộ trao đổi nhiệt liên quan đến dòng chảy bao hình trụ. Trong nhiều môn thể thao như bóng đá, quần vợt và golf, đường đi của các quả bóng liên quan đến dòng chảy bao hình cầu.

Độ dài đặc trưng cho hình trụ hoặc hình tròn được lấy là đường kính ngoài D . Do đó, số Reynolds được định nghĩa là $Re=VD/\nu$, trong đó V là vận tốc đều của chất lỏng trước khi tiến gần đến hình trụ hoặc hình cầu. Số Reynolds tới hạn đối với dòng chảy qua hình trụ hoặc hình cầu tròn là khoảng $Re_{cr} \approx 2 \times 10^5$. Điều đó có nghĩa là, lớp biên còn là chảy tầng với $Re < 2 \times 10^5$ và trở thành rối với $Re > 2 \times 10^5$.

Dòng chảy bao quanh hình trụ có trường dòng chảy rất phức tạp, như thể hiện trong Hình 7.16. Chất lỏng tiếp cận hình trụ rồi phân nhánh chảy bao quanh hình trụ, tạo thành một lớp biên xung quanh. Các hạt chất lỏng trên mặt phẳng trung tâm đập vào hình trụ ở điểm dừng, làm vận tốc chất lỏng tại điểm đó bằng 0 và do đó làm tăng áp suất tại điểm đó. Áp suất giảm theo hướng dòng chảy trong khi vận tốc chất lỏng tăng lên.

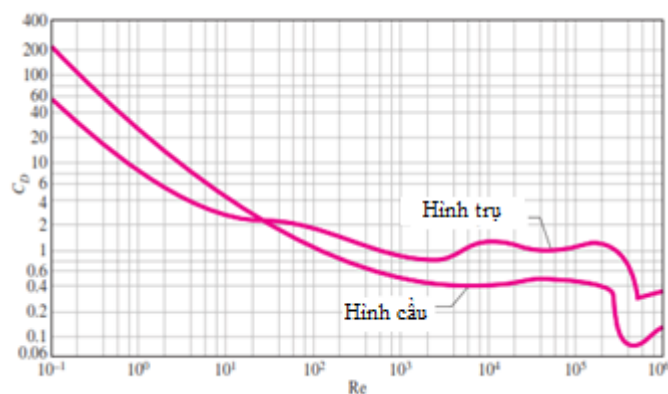
$$\delta = \frac{4.91x}{Re_x^{1/2}} \quad \text{và} \quad C_{f,x} = \frac{0.664}{Re_x^{1/2}}, \quad \text{với} \quad Re_x < 5 \times 10^5 \quad (7.17)$$



Hình 7.16 Hình ảnh phân tích lớp biên chảy tầng và vết rối: dòng chảy bao hình trụ trong với $Re=2000$. Nguồn: ONERA.

Trong dòng chảy với vận tốc rất thấp ($Re \ll 1$), chất lỏng hoàn toàn bao quanh hình trụ, các hạt chất lỏng trên mặt phẳng trung tâm lại trở về mặt phẳng này sau khi chảy bao quanh hình trụ. Ở vận tốc cao hơn, các hạt chất lỏng trên mặt phẳng trung tâm vẫn còn bao quanh hình trụ ở mặt trước, nhưng vận tốc quá nhanh để chúng giữ liên kết với bề mặt khi tới gần phía sau của hình trụ. Kết quả là, lớp biên sẽ tách ra khỏi bề mặt, tạo thành một khu vực phân cách phía sau hình trụ. Dòng chảy trong khu vực này gọi là *vết dòng chảy* đặc trưng bởi hình thành xoáy tuần hoàn và áp suất thấp hơn nhiều so với áp suất điểm dừng.

Trong dòng chảy bao hình trụ hoặc hình cầu, lực cản do áp suất và do ma sát đều quan trọng. Áp suất cao trong vùng lân cận của điểm dừng và áp suất thấp ở phía sau tạo thành lực tác dụng lên vật thể theo hướng dòng chảy. Lực cản do ma sát là trội hơn khi số Reynolds thấp ($Re < 10$) và lực cản do áp suất sẽ trội hơn khi số Reynolds cao ($Re > 5000$). Cả hai hiệu ứng đều quan trọng khi số Reynolds có giá trị vừa phải ($10 < Re < 5000$).



Hình 7.17 Hệ số cản trung bình cho dòng chảy bao hình trụ tròn và hình cầu trơn nhẵn.

Nguồn: H.Schlichting, *Boundary Layer Theory*.

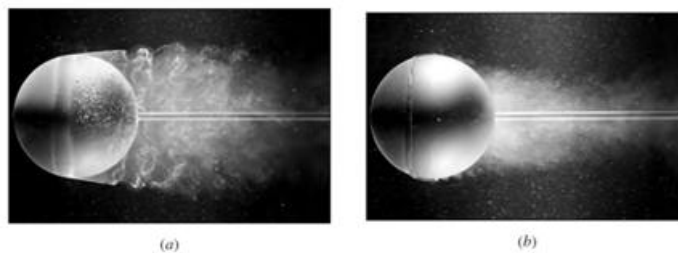
Hệ số lực cản C_D cho dòng chảy bao hình trụ và hình cầu trơn nhẵn được trình bày trên Hình 7.17. Các đường cong chỉ ra các đặc trưng phụ thuộc vào số Reynolds như sau:

- Đối với $Re \ll 1$ (dòng chảy chậm – creeping flow), hệ số lực cản giảm khi số Reynolds tăng. Đối với hình cầu, lời giải giải tích cho C_D là: $C_D = 24/Re$. Không có hiện tượng tách dòng trong chế độ này.
- Ở khoảng $Re = 10$, sự tách dòng ra bắt đầu xuất hiện ở phía sau của vật thể với sự đổ vỡ xoáy bắt đầu từ khoảng $Re \approx 90$. Vùng vết sau vật cản tăng lên cùng với số Reynolds tăng lên đến khoảng $Re = 10^3$. Tại điểm này, lực cản là chủ yếu là do áp suất (khoảng 95%), hệ số cản vẫn tiếp tục giảm với số Reynolds tăng lên trong khoảng $10 < Re < 10^3$. (Hệ số lực cản giảm không nhất thiết cho thấy lực cản giảm, vì lực cản theo tỷ lệ với bình phương vận

tốc, và sự gia tăng vận tốc ở các số Reynolds cao hơn thường là lớn hơn nhiều so với sự giảm giá trị của hệ số lực cản.)

- Trong phạm vi giá trị vừa phải $10^3 < Re < 10^5$, hệ số lực cản tương đối ổn định. Hành vi này là đặc trưng của các vật cản thân dày. Dòng chảy trong lớp biên là chảy tầng, nhưng dòng chảy trong vùng vết sau hình trụ hoặc hình cầu được mở rộng và hoàn toàn rối.
- Hệ số lực cản bất ngờ giảm mạnh trong khoảng $10^5 < Re < 10^6$ (thường ở khoảng 2×10^5). Sự giảm mạnh của C_D là do dòng chảy trong lớp biên trở nên rối, đẩy điểm tách dòng xa hơn về phía sau của vật thể, giảm kích thước của vùng vết dòng chảy và do đó là độ lớn của lực cản do áp suất. Điều này trái ngược với vật thể có hình dạng khí động học, có hệ số lực cản (chủ yếu là do ma sát) tăng lên khi lớp biên trở nên rối.

Sự phân tách dòng xảy ra ở khoảng $\theta \approx 80^\circ$ (tính từ điểm dừng phía trước hình trụ) khi lớp biên ở chế độ chảy tầng và ở khoảng $\theta \approx 140^\circ$ khi lớp biên ở chế độ chảy rối (Hình 7.18). Sự chậm trễ của sự phân tách dòng trong dòng chảy rối là do sự biến động nhanh của chất lỏng theo hướng ngang, điều này cho phép lớp biên rối di chuyển xa hơn trên bề mặt trước khi sự phân tách xảy ra, kết quả là có một cảm giác vùng vết dòng chảy hẹp hơn và lực cản nhỏ hơn. Hãy nhớ rằng dòng chảy rối có phân bố vận tốc “phẳng” hơn so với trường hợp chảy tầng, do đó có gradient lớn hơn ở gần tường. Trong khoảng số Reynolds mà dòng chảy thay đổi từ chảy tầng sang rối, lực cản giảm khi vận tốc (và do đó số Reynolds) tăng lên. Điều này dẫn đến sự giảm sút đột ngột về lực cản đối với vật thể đang bay dẫn đến sự mất ổn định bay.

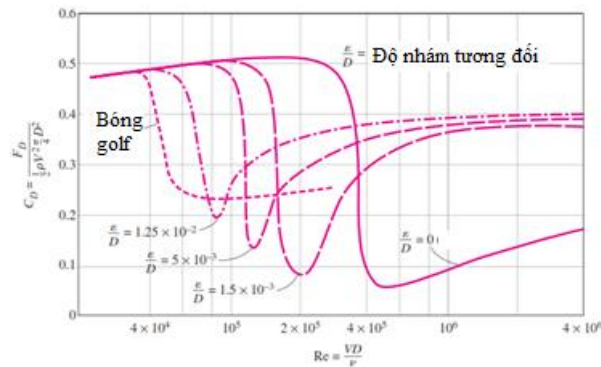


Hình 7.18 Hình ảnh dòng chảy của dòng chảy bao hình cầu tròn nhẵn (a) với $Re=15000$; (b) với $Re=30000$. Sự thay đổi vị trí của điểm tách dòng được thấy rõ. Nguồn: ONERA

7.5.1. Ảnh hưởng của độ nhám bề mặt

Chúng ta đã có các nghiên cứu về độ nhám bề mặt ở các phần trước, nói chung độ nhám bề mặt làm tăng hệ số cản trong dòng chảy rối. Đó là trường hợp đối với các vật thể có hình dáng khí động học. Tuy nhiên, đối với các vật thể thân dày như hình tròn hoặc hình cầu, sự gia tăng độ nhám bề mặt có thể làm giảm hệ số cản, như trình bày trên Hình 11.36 cho trường hợp hình cầu. Điều này xảy ra là do sự hình thành lớp biên rối ở số Reynolds thấp hơn, do đó làm thu hẹp vùng vết dòng chảy và giảm đáng kể lực cản do áp suất. Điều này dẫn đến lực cản nhỏ hơn cho trường hợp dòng chảy bao quanh hình trụ hoặc hình cầu có bề mặt

nhám hơn so với trường hợp bề mặt trơn nhẵn có cùng kích thước và cùng vận tốc trong một phạm vi nhất định của số Reynolds.



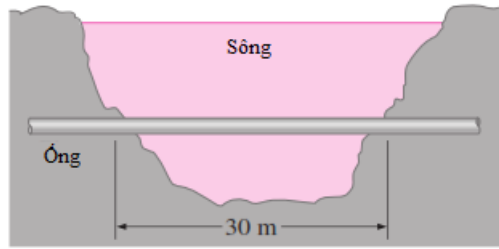
Hình 7.19 Ảnh hưởng của độ nhám bề mặt lên hệ số lực cản đối với hình cầu. Nguồn: Blevins (1984)

Các thảo luận ở trên cho thấy rằng độ nhám bề mặt có thể được sử dụng để giảm lực cản, nhưng nếu chúng ta nếu không cẩn thận có thể nhận được tác dụng ngược lại. Cụ thể, nếu chúng ta không xem xét đến phạm vi của số Reynolds. Ví dụ trong thực tế, quả bóng golf được làm cố ý có bề mặt gồ ghề để có lớp biên rời ở số Reynolds thấp nhằm tận dụng sự giảm mạnh của hệ số cản khi lớp biên rời bắt đầu hình thành (khoảng tốc độ của quả bóng golf là từ 15 đến 150 m/s với số Reynolds nhỏ hơn 4×10^5). Số Reynolds quan trọng đối với quả bóng golf là khoảng 4×10^4 . Trên giá trị này hệ số cản của quả bóng golf giảm khoảng một nửa, như thể hiện trong hình 7.19. Đối với một cú đánh nhất định, điều này có nghĩa là khoảng cách bóng bay sẽ dài hơn. Người có kinh nghiệm chơi golf cũng thường đánh bóng xoáy để giúp có lực nâng lớn hơn làm bóng bay cao hơn và xa hơn. Một lập luận tương tự cũng có thể áp dụng cho quả bóng tennis. Tuy nhiên, đối với bóng bàn, vì khoảng cách rất ngắn và quả bóng không bao giờ đạt đến tốc độ trong phạm vi rời. Do đó, bề mặt của quả bóng bàn được làm trơn nhẵn (để dễ dàng đạt tốc độ lớn hơn).

Khi đã xác định được hệ số lực cản, lực cản tác dụng lên vật thể trong dòng chảy được xác định từ công thức (7.5) trong đó A là diện tích mặt trước ($A=LD$ cho hình trụ có chiều dài L và $A=\pi D^2/4$ cho hình cầu). Cần lưu ý rằng dòng rối và các vật thể khác bên trong dòng chảy (ví dụ như dòng chảy qua dây ống) có thể ảnh hưởng đáng kể đến hệ số lực cản.

7.5.2. Ví dụ 7.2: Xác định lực cản tác dụng lên đường ống bắc ngang sông

Ống dẫn có đường kính ngoài 2.2 cm bắc ngang sông với chiều rộng 30 m và ngập hoàn toàn trong nước (Hình 11.38). Vận tốc dòng chảy trung bình của nước là 4 m/s và nhiệt độ nước là 15 °C. Xác định lực cản tác dụng lên đoạn đường ống trong sông.



Hình 7.20 Sơ đồ cho Ví dụ 7.2

Vấn đề: Một đường ống ngập trong nước bắc ngang sông. Xác định lực cản tác dụng lên đường ống.

Giả thiết: (1) Bề mặt bên ngoài của đường ống là trơn nhẵn, hệ số lực cản xác định từ Hình 7.17; (2) Dòng chảy của trong sông là ổn định; (3) Hướng dòng chảy nước là vuông góc đối với đường ống; (4) Bỏ qua chuyển động rối trong sông.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động lực của nước ở 15 °C là $\rho = 999.1 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 1.138 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$.

Phân tích: Với $D = 0.022 \text{ m}$, số Reynolds là:

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{(999.1)(4)(0.022)}{1.138 \times 10^{-3}} = 7.73 \times 10^4$$

Hệ số lực cản tương ứng tra từ Hình 7.17 là $C_D = 1$. Diện tích mặt trước của hình trụ là $A = LD$. Vậy lực cản tác dụng lên đoạn đường ống là:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = 1.0(30 \times 0.022) \frac{(999.1)(4)^2}{2} = 5275 \text{ N}$$

Thảo luận: Nhận thấy rằng lực này tương đương với trọng lượng của một khối lượng trên 500 kg. Do đó, lực cản của dòng sông chảy tác dụng lên đường ống tương đương với treo một khối lượng trên 500 kg trên đoạn đường ống dài 30 m với hai đầu được cố định. Cần phải có các biện pháp phòng ngừa cần thiết nếu đường ống không chịu được một lực như vậy. Nếu dòng sông chảy với tốc độ nhanh hơn hoặc nếu các biến động bất thường trong dòng sông thì lực cản sẽ lớn hơn. Ngoài ra, cần tính đến hiệu ứng lực tác dụng không ổn định lên đường ống.

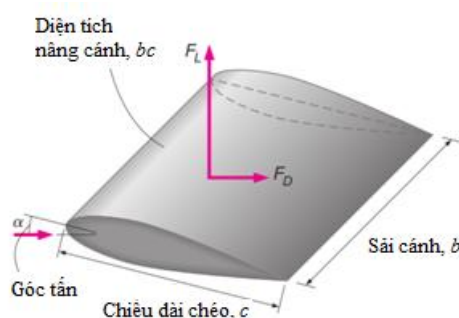
7.6. Lực nâng

7.6.1. Lực nâng cánh

Lực nâng đã được định nghĩa ở phần trước là thành phần của tổng hợp lực (do ma sát và áp suất) vuông góc với hướng dòng chảy, và hệ số lực nâng được xác định như sau:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad (7.6)$$

trong đó A , trong trường hợp này, thường là *diện tích nâng cánh* (planform area), là diện tích mà người ta có thể nhìn thấy từ phía trên theo hướng vuông góc đối với vật thể, và V là vận tốc dòng chảy (hoặc tương đương, vận tốc của vật thể chuyển động trong chất lỏng tĩnh). Đối với cánh có chiều rộng (span) b và *chiều dài chéo* (chord length) là c (chiều dài giữa mũi đầu đầu và mũi cuối), diện tích nâng cánh là $A=bc$ (Hình 7.2). Khoảng cách giữa hai đầu cuối của cánh được gọi là *sải cánh* (span). Đối với máy bay, sải cánh được tính là tổng khoảng cách giữa đầu của hai cánh, bao gồm độ rộng của thân máy bay giữa hai cánh. Lực nâng trung bình trên một đơn vị diện tích F/A được gọi là *tải trọng cánh* (wing loading), đơn giản là tỷ lệ giữa trọng lượng máy bay và diện tích nâng cánh của cánh (vì lực nâng bằng với trọng lượng khi máy bay bay ở độ cao không đổi).

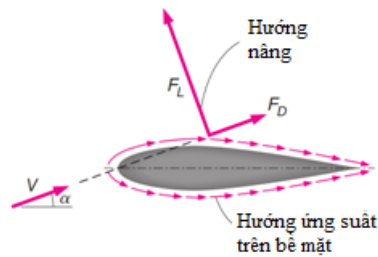


Hình 7.21 Định nghĩa một số đặc trưng của cánh

Máy bay bay được là nhờ vào lực nâng, do đó nâng cao hiểu biết về lực nâng cũng như cải thiện đặc tính lực nâng của các vật thể đã là trọng tâm của nhiều nghiên cứu. Trong phần này, chúng ta xem xét các thiết bị ví dụ như các dạng cánh được thiết kế đặc biệt để tạo ra lực nâng nhưng vẫn giữ được lực cản ở mức tối thiểu. Tuy nhiên, cần lưu ý rằng một số thiết bị như *cánh ngược* trên xe ô tô đua được thiết kế cho mục đích ngược lại để giảm lực nâng hoặc thậm chí tạo ra lực nâng âm để cải thiện độ bám và khả năng kiểm soát (một số chiếc xe đua đời cũ đã thực sự "cất cánh" ở tốc độ cao do lực nâng dương, điều này đã cảnh báo các kỹ sư phải tìm cách giảm lực nâng trong thiết kế của họ).

Đối với các thiết bị cần tạo ra lực nâng như các loại cánh, sự đóng góp hiệu ứng nhót đến lực nâng thường là không đáng kể vì vật có hình dạng khí động học, và ứng suất cắt trên bề mặt là song song với bề mặt và do đó gần như vuông góc với hướng nâng (Hình 7.22). Vì vậy, lực nâng trong thực tế có thể được thực hiện hoàn toàn do sự phân bố áp lực trên bề mặt của vật thể, do đó hình dạng của vật thể có ảnh hưởng quan trọng lên lực nâng. Vì vậy, vấn đề quan trọng nhất trong việc thiết kế các cánh là giảm thiểu áp lực trung bình ở bề mặt phía trên, đồng thời tối đa hóa nó ở mặt dưới. Phương trình Bernoulli có thể được sử dụng như một hướng dẫn để xác định vùng áp suất cao và áp suất thấp: vùng áp suất thấp có vận tốc dòng chảy cao, và vùng áp suất cao có vận tốc dòng chảy thấp. Ngoài ra, lực nâng thực tế không phụ thuộc vào độ nhám bề mặt vì độ nhám ảnh hưởng đến ứng suất cắt trên bề mặt, chứ không ảnh hưởng đến phân bố áp suất.

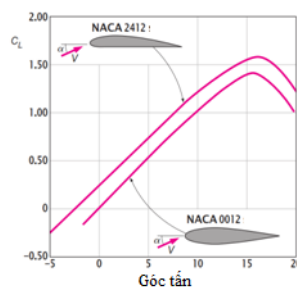
Sự đóng góp của ứng suất cắt vào lực nâng thường chỉ quan trọng đối với các vật thể rất nhỏ (nhẹ) và có thể bay ở tốc độ thấp (và do đó số Reynolds rất thấp).



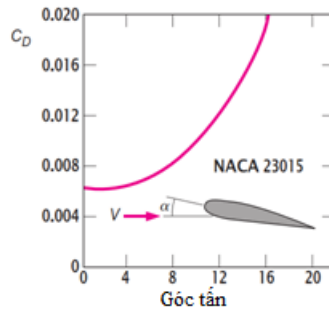
Hình 7.22 Đối với các dạng cánh, đóng góp của hiệu ứng nhớt lên lực nâng là không đáng kể vì ứng suất cắt trên bề mặt gần như vuông góc với hướng nâng.

Sự phát triển dạng cánh hiệu quả (lực cản nhỏ) là chủ đề nghiên cứu thực nghiệm quan trọng vào những năm 1930. Kết quả nghiên cứu về các dạng cánh đã được chuẩn hóa bởi Ủy ban Cố vấn Quốc gia về Hàng không Mỹ (NASA), và danh sách các dữ liệu về hệ số lực nâng đã được trình bày. Sự thay đổi của hệ số lực nâng C_L theo góc tấn công đối với hai loại cánh (NACA 0012 và NACA 2412) được trình bày trong Hình 7.23. Từ hình này, chúng ta thấy:

- Hệ số lực nâng tăng gần như tuyến tính với góc tấn α , đạt đến mức tối đa khoảng 16° , sau đó bắt đầu giảm mạnh. Việc giảm lực nâng này với tăng thêm góc tấn công được gọi là *hiện tượng mất tốc*, là do sự phân tách dòng và sự hình thành của một vùng vệt dòng chảy rộng trên bề mặt trên của cánh. Hiện tượng mất tốc là rất không mong muốn bởi vì nó cũng làm tăng lực cản.
- Ở góc tấn bằng 0 ($\alpha=0^\circ$), hệ số lực nâng là 0 đối với các cánh đối xứng nhưng không khác với những cánh không đối xứng có độ cong lớn hơn ở bề mặt trên. Do đó, những chiếc máy bay có cánh đối xứng phải bay với cánh ở những góc tấn cao hơn để tạo ra một lực nâng tương tự.
- Hệ số nâng có thể tăng lên gấp vài lần bằng cách điều chỉnh góc tấn (từ 0.25 ở $\alpha=0^\circ$ lên đến 1.25 với $\alpha=10^\circ$ đối với cánh không đối xứng).
- Hệ số cản cũng tăng theo góc tấn, thường theo cấp số nhân (Hình 7.23). Vì vậy, góc tấn lớn nên được sử dụng ít trong thời gian bay để tiết kiệm nhiên liệu.



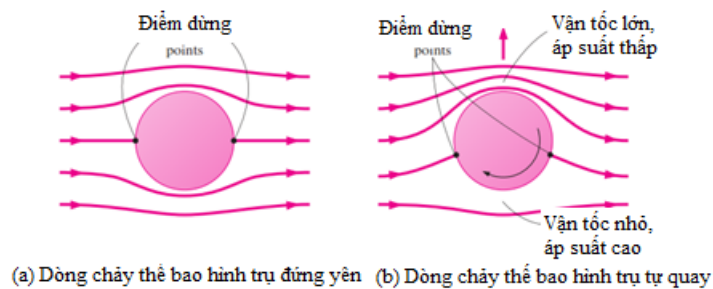
Hình 7.23 Thay đổi hệ số lực nâng theo góc tấn đối với hai loại cánh NACA 2412 và NACA 0012. Nguồn: Abbott (1932)



Hình 7.24 Thay đổi hệ số lực cản theo góc tấn. Nguồn: Abbott & Doenhoff (1959)

7.6.2. Lực nâng tạo ra bởi vật thể tự quay

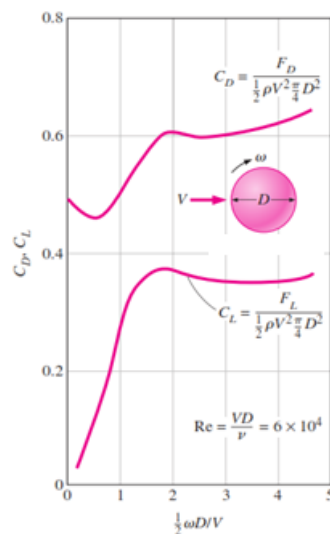
Trong các môn thể thao như bóng bàn, tennis, bóng đá, golf, ... các vận động viên thường thực hiện các cú bóng xoáy để tạo ra những đường bóng khó hoặc đường đi xa hơn. Các quả bóng xoáy tự xoay quanh mình đã làm thay đổi lực nâng để tạo ra những đường bóng bất ngờ. Hiện tượng lực nâng được tạo ra bởi vật thể tự quay được gọi là hiệu ứng Magnus mang tên nhà khoa học người Đức Heinrich Magnus (1802-1870), người đầu tiên nghiên cứu lực nâng lên của các vật thể quay. Hình 7.25 minh họa trường hợp đơn giản cho dòng không xoáy (dòng chảy thế). Khi hình trụ không quay, lực nâng bằng 0 vì tính đối xứng qua mặt phẳng nằm ngang. Nhưng khi hình trụ xoay quanh trục của nó, các hạt chất lỏng gần bề mặt sẽ bị kéo theo chuyển động của hình trụ vì điều kiện bám dính (không trơn trượt). Vị trí điểm dừng bị chuyển dịch xuống thấp hơn và dòng chảy không còn đối xứng so với mặt phẳng ngang đi qua trục hình trụ. Vận tốc chất lỏng ở phần trên sẽ lớn hơn vận tốc chất lỏng ở phần dưới, do hiệu ứng Bernoulli áp suất trung bình trên nửa trên sẽ thấp hơn áp suất trung bình nửa dưới và vì vậy tạo thành một lực đẩy lên trên tác dụng lên hình trụ. Lập luận tương tự cũng có thể được áp dụng đối với lực nâng được tạo ra bởi một quả cầu tự quay.



Hình 7.25 Sự hình thành lực nâng đối với hình trụ tự quay trong dòng chảy thế

Sự phụ thuộc của hệ số lực nâng C_L và hệ số lực cản C_D vào tốc độ quay của một quả cầu tròn nhẵn được trình bày trong Hình 7.26. Có thể nhận thấy rằng hệ số lực nâng phụ thuộc mạnh vào tốc độ quay, đặc biệt là ở vận tốc thấp. Hiệu ứng của tốc độ quay đối với hệ số lực cản là nhỏ. Độ nhám cũng ảnh hưởng đến hệ số lực cản và lực nâng. Trong một phạm vi nhất định của số Reynolds, độ nhám tạo

ra hiệu quả mong muốn trong việc tăng hệ số lực nâng và giảm hệ số cản. Vì vậy, quả bóng golf với độ nhám phù hợp sẽ bay cao hơn và xa hơn bóng trơn nhẵn với một cú đánh như nhau.



Hình 7.26 Sự phụ thuộc của hệ số lực cản và lực nâng vào tốc độ tự quay của hình cầu có bề mặt trơn nhẵn

7.6.3. Ví dụ 7.3: Ảnh hưởng của tốc độ xoáy đối với bóng tennis

Một quả bóng tennis có khối lượng 0.125 lbm và đường kính 2.52 inch được đánh đi với tốc độ 45 dặm/h với xoáy ngược (backspin) tốc độ 4800 rpm. Xác định xem quả bóng sẽ rơi xuống hay bay lên theo hiệu ứng kết hợp giữa trọng lực và lực nâng do tự quay ngay sau khi bị đánh đi trong không khí ở điều kiện 1 atm và 80 °F.

Vấn đề: Một quả bóng tennis được đánh xoáy ngược với các vận tốc cho trước. Xác định xem quả bóng sẽ rơi xuống hay bay lên sau khi bị đánh.

Giả thiết: (1) Bề mặt của quả bóng đủ trơn để có thể áp dụng Hình 7.26; (2) Bóng được đánh theo phương ngang để nó bắt đầu chuyển động theo chiều ngang.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của không khí ở 1 atm và 80 °F là $\rho=0.07350$ lbm/ft³ và $\nu=1.697 \times 10^{-4}$ ft²/s.

Phân tích: Bóng được đánh theo phương ngang, và do đó nó sẽ rơi dưới ảnh hưởng của trọng lực khi không tự quay. Quả bóng xoáy tạo ra một lực nâng, và quả bóng sẽ bay lên nếu lực nâng lớn hơn trọng lượng của quả cầu. Lực nâng có thể được xác định từ công thức:

$$F_L = C_L A \frac{\rho V^2}{2}$$

ở đây A là diện tích mặt trước của quả bóng, $A=\pi D^2/4$. Vận tốc di chuyển và vận tốc góc của quả bóng là:

$$V=(45)(5280)/3600=66 \text{ ft/s}$$

$$\omega = (4800)(2\pi)/(60) = 502 \text{ rad/s}$$

Khi đó

$$\frac{\omega D}{2V} = \frac{(502)\left(\frac{2.52}{12}\right)}{2(66)} = 0.8 \text{ rad}$$

Từ Hình 7.26, $C_L = 0.21$, vì vậy lực nâng tác dụng lên bóng là:

$$F_L = (0.21) \frac{\pi \left(\frac{2.52}{12}\right)^2}{4} \frac{(0.0735)(66)^2}{2} \left(\frac{1}{32.2}\right) = 0.036 \text{ lbf}$$

Thảo luận: Ví dụ này cho thấy quả bóng được đánh xoáy có thể đi xa hơn. Lưu ý rằng nếu bóng được đánh với xoáy thuận (topspin) thì có lực nâng âm và bóng sẽ rơi xuống nhanh hơn.

TỔNG KẾT

Trong chương này, chúng ta đã nghiên cứu lực do dòng chảy chất lỏng tác dụng lên vật thể ở bên trong chất lỏng. Chất lỏng có thể gây ra các lực và mô-men lực tác dụng lên vật thể theo nhiều hướng khác nhau. Lực tác dụng theo hướng dòng chảy được gọi là lực cản, trong khi lực tác dụng theo hướng vuông góc với dòng chảy được gọi là lực nâng. Một phần của lực cản gây ra do ứng suất trên bề mặt gọi là lực cản ma sát bề mặt, phần gây ra do áp suất được gọi là lực cản áp suất hoặc *lực cản hình dạng* vì lực này phụ thuộc mạnh vào hình dạng của vật thể.

Hệ số lực cản C_D và hệ số lực nâng C_L là những đại lượng không thứ nguyên đặc trưng cho đặc tính cản và tính nâng của vật thể và được định nghĩa như sau :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{và} \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

ở đây A thường là diện tích mặt trước (diện tích được chiếu lên trên mặt phẳng vuông góc với hướng dòng chảy) của vật thể. Đối với cánh, A là diện tích nâng cánh, là diện tích được chiếu lên trên mặt phẳng song song với hướng dòng chảy. Hệ số lực cản, nói chung, phụ thuộc vào số Reynolds, đặc biệt đối với số Reynolds nhỏ hơn 10^4 . Ở số Reynolds cao hơn, hệ số lực cản cho hầu hết các dạng hình học khác nhau là không đổi.

Một vật thể được gọi là có *dạng khí động học* nếu có hình dáng phù hợp với đường dòng dự kiến trong dòng chảy với mục đích để giảm lực cản. Ngược lại, một vật thể (như một tòa nhà) có khuynh hướng ngăn chặn dòng chảy và được coi là không có dạng khí động học. Ở vận tốc đủ lớn, dòng chất lỏng tách rời khỏi bề mặt của vật thể. Hiện tượng này được gọi là hiện tượng tách dòng. Khi dòng chất lỏng tách ra khỏi vật thể, một vùng tách biệt giữa vật thể và dòng chảy chất lỏng được tạo thành. Sự tách dòng cũng có thể xảy ra trên một vật thể thân mỏng như cánh máy bay ở một góc tấn đủ lớn.

Vùng dòng chảy trên bề mặt, trong đó các ảnh hưởng của lực cắt do độ nhớt của chất lỏng được cảm nhận được gọi là *lớp biên tốc độ* hoặc đơn giản là *lớp biên*. Độ dày của lớp biên, δ , được định nghĩa là khoảng cách vuông góc từ bề mặt đến điểm mà vận tốc đạt $0.99V$.

Đường giả định với vận tốc bằng $0.99V$ phân chia miền dòng chảy bao quanh tấm phẳng thành hai vùng: vùng lớp biên, trong đó các hiệu ứng nhớt và sự thay đổi vận tốc là đáng kể và khu vực dòng chảy không xoáy, trong đó các hiệu ứng ma sát không đáng kể và vận tốc là hằng số. Đối với dòng chảy bao quanh tấm phẳng, số Reynolds được xác định theo công thức:

$$Re_L = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{VL}{\nu}$$

trong đó V là vận tốc dòng chảy phía thượng du và L là chiều dài của tấm. Hệ số ma sát trung bình trên toàn bộ tấm phẳng là :

$$\text{Dòng chảy tầng: } C_f = \frac{1.33}{Re_L^{1/2}}, \quad \text{với } Re_x < 5 \times 10^5$$

$$\text{Dòng chảy rối: } C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}}, \quad \text{với } 5 \times 10^5 \leq Re_x \leq 10^7$$

Độ nhám bề mặt, nói chung, làm tăng hệ số lực cản trong dòng chảy rối. Tuy nhiên, đối với các vật thể thân dày như hình trụ hoặc hình cầu, sự gia tăng độ nhám bề mặt có thể làm giảm hệ số cản. Điều này có được là do sự xuất hiện lớp biên rối ở số Reynolds thấp và do đó làm thu hẹp vết dòng chảy và làm giảm đáng kể lực cản do áp suất.

Đối với các loại cánh, sự đóng góp hiệu ứng nhớt vào lực nâng là không đáng kể vì các vật thể có hình dạng khí động học và ứng suất cắt trên bề mặt là song song với bề mặt và do đó gần như vuông góc với hướng nâng. Vì vậy, trong thực tế lực nâng được gây ra chủ yếu là do sự phân bố áp suất trên bề mặt của vật thể. Lực nâng của cánh còn phụ thuộc nhiều vào góc tấn.

Ngoài ra, có thể quan sát thấy rằng lực nâng được tạo ra khi một hình trụ hoặc hình cầu tự quay. Hiện tượng tạo ra lực nâng khi vật thể tự quay được gọi là hiệu ứng Magnus.

Câu hỏi và bài tập

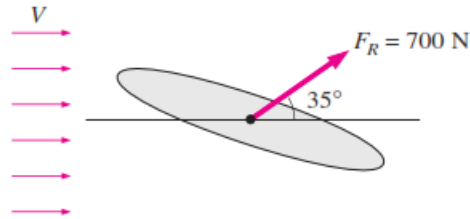
Lực cản, lực nâng và hệ số lực cản

7.1LT Giải thích khi nào dòng chảy bao là hai chiều, ba chiều và đối xứng trục. Dòng chảy bao xe ô tô thuộc loại dòng chảy nào?

7.2LT Sự khác biệt giữa vật thể có hình dạng khí động học và vật thể không có hình dạng khí động học là gì? Quả bóng tennis có dạng khí động học hay không?

7.3LT Kể tên các ứng dụng trong thực tế cần lực cản lớn.

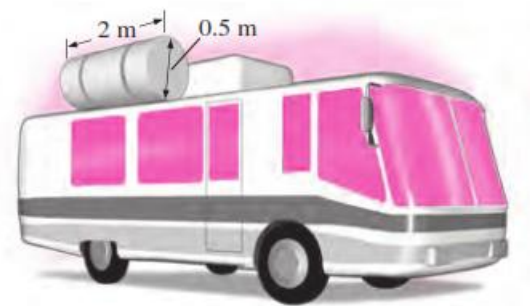
- 7.4LT Lực cản là gì? Nguyên nhân gây ra lực cản? Tại sao chúng ta thường cố gắng giảm thiểu nó?
- 7.5LT Lực nâng là gì? Nguyên nhân gây ra lực nâng? Ứng suất cắt bề mặt có góp phần vào lực nâng không?
- 7.6LT Trong dòng chảy bao một vật thể, lực cản, vận tốc dòng chảy, và mật độ chất lỏng được đo. Hệ số lực cản sẽ được xác định bằng cách nào?. Bạn sẽ sử dụng diện tích nào trong tính toán?
- 7.7LT Trong dòng chảy bao một vật thể thân mỏng như cánh, lực nâng, vận tốc thượng lưu và mật độ chất lỏng được đo. Hệ số lực nâng sẽ được xác định bằng cách nào? Bạn sẽ sử dụng diện tích nào trong tính toán?
- 7.8LT Diện tích mặt trước của một vật thể trong dòng chảy bao được xác định như thế nào?. Diện tích mặt trước được sử dụng để tính lực cản hay lực nâng?
- 7.9LT Vận tốc cuối là gì? Nó được xác định như thế nào?
- 7.10LT Sự khác nhau giữa lực cản ma sát và lực cản áp suất là gì? Lực nào là quan trọng đối với vật thể thân mỏng như cánh?
- 7.11LT Mô tả hiệu ứng của độ nhám bề mặt đối với hệ số cản ma sát trong dòng chảy tầng và dòng chảy rối.
- 7.12LT Trong trường hợp chung, hệ số lực cản biến đổi như thế nào với số Reynolds ở (a) mức thấp và vừa và (b) mức cao ($Re > 10^4$)?
- 7.13LT Hình dạng khí động học ảnh hưởng đến lực nào (a) lực cản ma sát, (b) lực cản do áp suất? Liệu tổng lực cản tác dụng lên vật thể nhất thiết phải giảm khi vật thể có dạng khí động học? Giải thích.
- 7.14LT Hiện tượng tách dòng là gì? Nguyên nhân gì gây ra nó? Ảnh hưởng của hiện tượng tách dòng chảy lên hệ số lực cản như thế nào?
- 7.15 Hệ số lực cản của xe trong điều kiện thiết kế là 1 atm, 25 °C và 90 km/h sẽ được xác định bằng thực nghiệm trong một đường hầm gió. Chiều cao và chiều rộng của xe tương ứng là 1.40 m và 1.65 m. Nếu lực nằm ngang tác dụng lên xe được đo là 300 N, hãy xác định hệ số lực cản của xe. *Đáp số: 0.42*
- 7.16 Một chiếc xe di chuyển với vận tốc không đổi là 80 km/h. Xác định vận tốc thượng lưu được sử dụng trong tính toán lực cản nếu (a) không khí ở trạng thái tĩnh, (b) gió thổi ngược hướng chuyển động của xe với tốc độ 30 km/h, và (c) gió thổi theo cùng hướng chuyển động của xe với tốc độ 50 km/h.
- 7.17 Tổng hợp lực do áp suất và ứng suất cắt bề mặt tác dụng lên vật thể được đo là 700 N, có hướng tạo thành góc 35 ° với hướng dòng chảy. Xác định lực cản và lực nâng tác dụng lên vật thể.



Hình P7.17

7.18 Trong một thí nghiệm số Reynolds cao, tổng lực cản tác dụng lên một vật hình cầu có đường kính $D=12$ cm trong luồng không khí ở điều 1 atm và 5°C đo được là 5.2 N. Lực cản do áp suất tác dụng lên vật thể được tính bằng cách lấy tích phân phân bố áp suất (được đo bằng việc sử dụng các cảm biến áp suất trên bề mặt) là 4.9 N. Xác định hệ số cản ma sát của quả cầu. *Đáp số: 0.0115*

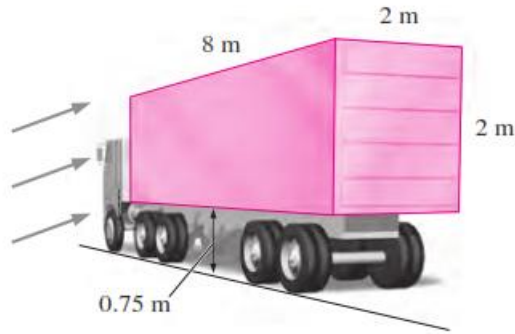
7.19 Để đáp ứng nhu cầu nước của một chiếc xe du lịch, người ta lắp đặt một chiếc bồn chứa hình trụ có đường kính 0.5 m dài 2 m, phía trên xe. Xác định công suất bổ sung của xe khi xe chạy với tốc độ 95 km/h biết bồn được lắp đặt (a) song song với thân xe và (b) ngang thân xe. Giả sử các điều kiện khí quyển là 87 kPa và 20°C . *Đáp số: (a) 1,67 kW, (b) 7.55 kW*



Hình P7.19

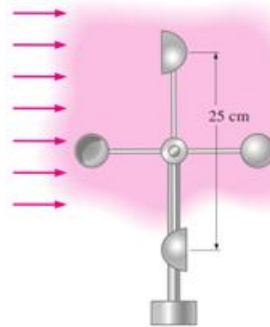
7.20 Một quả cầu nhựa đường kính 4 mm có mật độ 1150 kg/m^3 được ném xuống nước ở nhiệt độ 20°C . Xác định vận tốc cuối của quả cầu rơi chìm trong nước.

7.21 Trong những cơn bão lớn, những chiếc xe cao như xe du lịch và xe tải có thể bị gió thổi lật đổ, đặc biệt là khi chúng trống rỗng và ở những khu vực hẻo lánh. Xem xét một tải 5000 kg có chiều dài 8 m, cao 2 m và rộng 2 m. Khoảng cách giữa đáy của xe tải và đường là 0.75 m. Xe tải tiếp xúc với gió từ mặt bên cạnh. Xác định vận tốc gió sẽ lật đổ xe tải. Lấy mật độ không khí là 1.1 kg/m^3 và giả thiết các lực tác dụng được phân bố đều.



Hình P7.21

7.22 Một tuabin gió với hai hoặc bốn ly bán cầu rỗng nối với trục quay thường được sử dụng để đo tốc độ gió. Xem xét một tuabin gió với hai ly có đường kính 8 cm với khoảng cách trung tâm là 25 cm, như hình P7.22. Khi trục bị mắc kẹt do một số trục trặc nào đó làm các ly dừng quay. Đối với tốc độ gió là 15 m/s và mật độ không khí là 1.25 kg/m^3 , hãy xác định mô men xoắn cực đại mà tuabin này tác dụng trên trục quay.



Hình P7.22

7.23 Tàu ngầm có thể được coi như một elipsoid có đường kính 5 m và chiều dài 25 m. Xác định công suất yêu cầu đối với tàu ngầm này di chuyển theo chiều nằm ngang với vận tốc 40 km/h trong nước biển có mật độ 1025 kg/m^3 và trong không khí với mật độ 1.30 kg/m^3 . Giả thiết dòng chảy bao tàu ngầm là rối.



Hình P7.23

Dòng chảy bao tấm phẳng

7.24LT Tính chất nào của chất lỏng chịu trách nhiệm cho sự phát triển của lớp biên vận tốc? Ảnh hưởng của vận tốc lên độ dày của lớp biên như thế nào?

7.25LT Hệ số ma sát có ý nghĩa gì trong dòng chảy bao tấm phẳng? Nó liên quan đến lực cản tác dụng trên tấm phẳng như thế nào?

7.26LT Xem xét dòng chảy tầng trên một tấm phẳng. Hệ số ma sát cục bộ thay đổi như thế nào như là hàm số của vị trí?

7.27LT Hệ số ma sát trung bình được xác định như thế nào trong dòng chảy bao tấm phẳng?

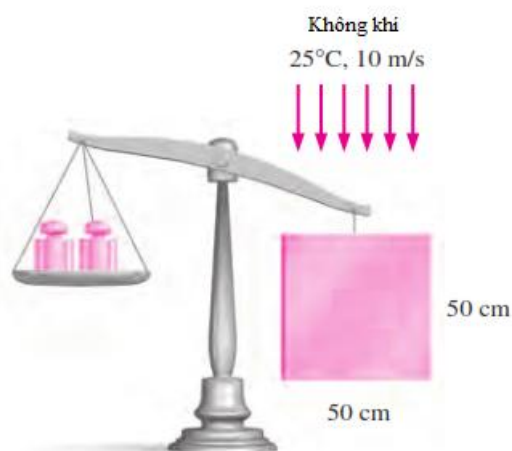
7.28 Áp suất khí quyển địa phương vùng núi độ cao 1610 m là 83.4 kPa. Không khí ở áp suất này và ở 25 °C đang có gió thổi với vận tốc 6 m/s trên tấm phẳng phẳng 2.5 m và 8 m. Xác định lực cản tác dụng lên bề mặt trên của tấm nếu không khí chảy song song với mặt (a) cạnh dài 8 m và (b) cạnh dài 2.5 m.

7.29 Trong một ngày mùa đông, gió với tốc độ 55 km/h, ở điều kiện 5 °C và 1 atm đang thổi song song với bức tường cao 4 m và dài 10 m của một tòa nhà. Giả sử bề mặt tường là trơn nhẵn, xác định lực cản ma sát tác dụng lên tường. Lực cản sẽ là bao nhiêu nếu tốc độ gió tăng gấp đôi? *Đáp số: 16 N, 58 N.*



Hình P7.29

7.30 Khối lượng của một tấm phẳng mỏng kích thước 50 cmx50 cm được cân bằng bởi một cân thăng bằng cho khối lượng 2 kg, như thể hiện trên Hình P7.30. Một quạt gió được bật lên trong không khí ở áp suất 1 atm nhiệt độ và 25 °C thổi gió xuống dưới bao xung quanh cả hai mặt của tấm với vận tốc 10 m/s. Xác định khối lượng cần được thêm vào để cân được cân bằng.



Hình P7.30

Dòng chảy bao ống hình trụ và quả cầu

7.31LT Trong dòng chảy bao hình trụ, tại sao hệ số lực cản đột ngột giảm khi dòng chảy trở nên rối? Có phải chuyển động rối được mong đợi để tăng hệ số lực cản thay vì làm giảm nó?

7.32LT Trong dòng chảy bao các vật thể thân dày như hình trụ, lực cản do áp suất và lực cản do ma sát quan trọng như thế nào?

7.33LT Tại sao hiện tượng tách dòng chảy trong dòng chảy bao hình trụ bị trì hoãn trong dòng chảy rối?

7.34 Một đường ống dẫn hơi đường kính 8 cm dài đi qua một khu vực hở ra ngoài không khí. Xác định lực cản tác dụng lên đường ống trên một đơn vị chiều dài của khí không khí ở điều kiện 1 atm, và 5 °C và gió thổi qua ống với vận tốc 50 km/h.

7.35 Đường dây truyền điện đường kính 6mm được tiếp xúc với không khí. Xác định lực cản tác dụng lên đoạn dây dài 120 m trong thời tiết gió khi không khí ở điều kiện 1 atm và 15 °C và gió thổi qua đường dây với vận tốc 40 km/h.

7.36 Hạt mưa đá có đường kính 0.8 cm có thể rơi tự do trong không khí ở điều kiện 1 atm và 5 °C. Xác định vận tốc cuối của hạt mưa đá. Lấy mật độ của hạt mưa đá là 910 kg/m³.

7.37 Một hạt bụi đường kính 0.1 mm có mật độ 2.1 g/cm³ lơ lửng trong không khí ở điều kiện 1 atm và 25 °C tại một điểm cố định. Ước lượng vận tốc luồng gió của chuyển động lên của không khí tại vị trí đó. Giả sử định luật Stokes (cho dòng chảy có số Reynolds rất nhỏ) được áp dụng. Đây có phải là một giả thiết hợp lệ?
Đáp số: 0.62 m/s

Lực nâng

7.38LT Tại sao sự đóng góp của các hiệu ứng nhớt cho lực nâng thường không đáng kể cho các loại cánh?

7.39LT Không khí chảy bao một cánh đối xứng với góc tấn bằng 0. Hỏi (a) lực nâng và (b) lực cản tác dụng lên cánh có bằng 0 hoặc không?

7.40LT Không khí chảy bao một cánh không đối xứng với góc tấn bằng 0. Hỏi (a) lực nâng và (b) lực cản tác dụng lên cánh có bằng 0 hoặc không?

7.41LT Không khí chảy bao một cánh đối xứng với góc tấn bằng 5°. Hỏi (a) lực nâng và (b) lực cản tác dụng lên cánh có bằng 0 hoặc không?

7.42LT Hiện tượng mất tốc là gì? Nguyên nhân làm cho một cánh mất tốc?

7.43 Xem xét một chiếc máy bay, cất cánh ở tốc độ 190 km/h khi nó được nạp đầy. Nếu trọng lượng của máy bay là tăng 20% do quá tải, xác định tốc độ mà máy bay quá tải sẽ cất cánh. *Đáp số: 208 km/h*

7.44 Xem xét một máy bay có tốc độ cất cánh là 220 km/h và mất 15 giây để cất cánh ở cao độ mực nước biển. Đối với sân bay ở độ cao 1600 m, xác định (a) tốc độ cất cánh, (b) thời gian cất cánh và (c) chiều dài đường băng bổ sung cần thiết cho máy bay này. Giả sử gia tốc không đổi cho cả hai trường hợp.

7.45 Một chiếc máy bay phản lực jumbo có khối lượng khoảng 400.000 kg khi nạp đầy với 400 hành khách và cất cánh với tốc độ 250 km/h. Xác định tốc độ cất cánh khi máy bay có 100 ghế trống. Giả thiết mỗi hành khách có hành lý là 140 kg và vị trí cánh được duy trì như nhau. *Đáp số: 246 km/h*

Chương 8. CHUYỂN ĐỘNG ỔN ĐỊNH CỦA CHẤT LỎNG NÉN ĐƯỢC

Trong các nội dung của các phần trước, chúng ta đã giới hạn xem xét những dòng chảy mà sự thay đổi của mật độ hay hiệu ứng nén được của chất lỏng là không đáng kể. Trong chương này, chúng ta bỏ qua hạn chế đó và xem xét các dòng chảy có sự thay đổi mật độ đáng kể. Dòng chảy này được gọi là dòng chảy nén được và thường gặp trong các thiết bị liên quan đến dòng khí ở tốc độ cao. Dòng chảy nén được cần được xem xét đồng thời đến động lực chất lỏng và nhiệt động lực (có nghĩa là ảnh hưởng của nhiệt độ là không được bỏ qua). Trong chương này, chúng ta sẽ phát triển các mối quan hệ tổng quát liên quan đến dòng chảy nén được cho chất khí lý tưởng.

Chương này được bắt đầu với khái niệm về trạng thái *ngừng/hãm*, tốc độ âm thanh và số Mach cho dòng chảy nén được. Mối quan hệ giữa các tính chất *tĩnh* và tính chất trong trạng thái hãm được thu nhận cho dòng chảy đẳng entropy của khí lý tưởng thông qua hệ số khí và số Mach. Ảnh hưởng của sự thay đổi diện tích mặt cắt ống dẫn trong các dòng chảy đẳng entropy dưới âm và trên âm một chiều sẽ được thảo luận. Những ảnh hưởng này được minh họa bằng cách xem xét dòng chảy một chiều qua vòi phun thu hẹp và thu hẹp-mở rộng. Khái niệm sóng xung kích và sự biến thiên của tính chất dòng chảy qua các sóng xung kích vuông góc và xiên cũng sẽ được xem xét.

MỤC TIÊU

Khi đọc xong chương này sinh viên có thể:

- Có được hiểu biết cơ bản về dòng chảy của chất lỏng nén được
- Hiểu được tại sao một ống phun cần có đoạn ống mở rộng để vận tốc dòng không khí có thể vượt trên vận tốc âm thanh
- Tính toán được các thông số dòng chảy ổn định của chất lỏng nén được

8.1. Một số vấn đề nhiệt động lực học

Bước đầu tiên để hiểu về dòng chảy nén được, chúng ta cần xem lại một số nguyên lý nhiệt động lực học. Các tính chất nhiệt động lực của một chất khí bao gồm hằng số khí R , nhiệt dung riêng c_p ở điều kiện áp suất không đổi, nhiệt dung riêng c_v ở điều kiện thể tích không đổi và hệ số khí (tỷ số nhiệt dung riêng) $k=c_p/c_v$. Mật độ ρ (hoặc thể tích riêng v) của chất khí phụ thuộc vào áp suất tuyệt đối P và nhiệt độ tuyệt đối T của chất khí. Đối với các chất khí ở áp suất thấp và nhiệt độ bình thường hoặc khá cao, mối quan hệ giữa các tính chất tuân theo "định luật khí lý tưởng" hay còn gọi là phương trình trạng thái khí lý tưởng:

$$Pv=RT \text{ hoặc } P=\rho RT \quad (2.4)$$

Chất khí thỏa mãn Pt. (2.4) (Chương 2) được gọi là khí lý tưởng. Trong giáo trình này chúng ta chỉ xem xét các chất khí lý tưởng (không nên nhầm lẫn với khái niệm chất lỏng lý tưởng khi hiệu ứng nhớt có thể bỏ qua).

Các phương trình quá trình của chất khí lý tưởng bao gồm:

$$\text{Quá trình đẳng nhiệt:} \quad Pv = \text{constant} \quad (8.1)$$

$$\text{Quá trình đoạn nhiệt:} \quad Pv^k = \text{constant} \quad (8.2)$$

Quá trình đẳng nhiệt là quá trình mà nhiệt độ chất khí là không thay đổi. Quá trình đoạn nhiệt là quá trình cách nhiệt (không có nhiệt lượng thêm vào hoặc mất đi). Quá trình đoạn nhiệt bỏ qua hiệu ứng ma sát gọi là quá trình đẳng entropy.

Enthalpy h trên một đơn vị khối lượng chất khí được định nghĩa (trong Chương 2) như sau:

$$h = u + Pv = u + P/\rho \quad (2.7)$$

ở đây u là nội năng của chất khí. Đối với khí lý tưởng ta có $h = u + RT$.

Nhiệt dung riêng ở áp suất không đổi, c_p , được định nghĩa là sự gia tăng enthalpy khi nhiệt độ chất khí tăng lên một độ trong điều kiện áp suất không đổi. Dưới dạng Pt. vi phân ta có:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_{P=\text{constant}} \quad (8.3)$$

Nhiệt dung riêng ở thể tích không đổi, c_v , được định nghĩa là sự gia tăng nội năng khi nhiệt độ chất khí tăng lên một độ trong điều kiện thể tích không đổi. Dưới dạng Pt. vi phân ta có:

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_{v=\text{constant}} \quad (8.4)$$

Đối với khí lý tưởng, các phương trình trên có dạng $dh = c_p dT$ và $du = c_v dT$. Mặt khác $dh = du + R dT$. Từ đó ta có:

$$c_p - c_v = R \quad (8.5)$$

Kết hợp với phương trình $k = c_p/c_v$, ta nhận được:

$$c_p = \frac{k}{k-1} R, \quad c_v = \frac{R}{k-1} \quad (8.6)$$

8.1.1. Ví dụ 8.1: Sự thay đổi nội năng và enthalpy của một khối lượng chất khí

Tính sự thay đổi nội năng và enthalpy của 15 kg không khí khi nhiệt độ của nó thay đổi từ 20 đến 30°C. Áp suất tuyệt đối ban đầu của chất khí là 95 kPa.

Vấn đề: Tính sự thay đổi nội năng và enthalpy của một khối lượng chất khí.

Tính chất: Hằng số khí của không khí là $R = 287 \text{ N.m/(kg.K)}$, hệ số khí $k = 1.4$.

Giả thiết: Hằng số khí R và hệ số khí k không phụ thuộc vào áp suất và nhiệt độ.

Phân tích: Từ (8.4) ta có:

$$c_p=1.4/(1.4-1)\times 287=1004; \quad c_v=287/(1.4-1)=717$$

Từ đó:

$$\Delta u=c_v(T_2-T_1)=717(30-20)=7170 \text{ (J/kg)}$$

Thay đổi nội năng là $\Delta U = \Delta u \cdot (15 \text{ kg})=107550 \text{ (J)}$

$$\Delta h=c_p(T_2-T_1)=1004(30-20)=10040 \text{ (J/kg)}$$

Thay đổi enthalpy là $\Delta H= \Delta h \cdot (15 \text{ kg})=150600 \text{ (J)}$

8.2. Các phương trình cơ bản cho dòng chảy chất lỏng nén được

Các phương trình cơ cho dòng chảy chất lỏng đã được giới thiệu trong Chương 4. Trong chương này, chúng ta sẽ viết lại các phương trình cho dòng chảy chất lỏng nén được.

8.2.1. Phương trình liên tục

Phương trình liên tục cho dòng chảy dừng một chiều cho chất lỏng nén được có dạng:

$$\dot{m} = \rho AV = \rho Q = \text{constant} \quad (8.7)$$

ở đây \dot{m} là lưu lượng khối lượng của dòng chảy.

8.2.3. Phương trình chuyển động

Trong dòng chảy dừng của chất lỏng nén được, bỏ qua ảnh hưởng của ma sát, phương trình chuyển động được viết dưới dạng tích phân theo đường dòng như phương trình (4.40) (Chương 4):

$$\int \frac{dP}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{const} \quad (\text{dọc theo đường dòng}) \quad (4.40)$$

Đối với quá trình đoạn nhiệt ta có $Pv^k=\text{constant}$, vì vậy:

$$\int \frac{dP}{\gamma} = \frac{k}{k-1} \frac{P}{\gamma}$$

Từ đó, (4.4) trở thành:

$$z + \frac{k}{k-1} \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{constant} \quad (8.8)$$

Đối với quá trình đẳng nhiệt ta có $Pv=\text{constant}$, vì vậy:

$$\int \frac{dP}{\gamma} = \frac{P_0}{\gamma} \ln P$$

ở đây P_0 và γ_0 là áp suất và trọng lượng riêng của chất lỏng tại cao độ z_0 nào đó.

Từ (4.40) ta nhận được:

$$z + \frac{P_0}{\gamma_0} \ln P + \frac{V^2}{2g} = \text{const} \quad (8.9)$$

8.2.3. Phương trình năng lượng

Đối với chất khí, hay chất lỏng không nén được, phương trình năng lượng cho dòng chảy ổn định có dạng (Chương 4):

$$w_{shaft,net\ in} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 + (u_2 - u_1 - q_{net\ in}) \quad (4.67)$$

Đối với chất khí, ảnh hưởng của trọng trường có thể bỏ qua, khi đó ta có:

$$w_{shaft,net\ in} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} + (u_2 - u_1 - q_{net\ in}) \quad (8.10)$$

Trong trường hợp không có trao đổi nhiệt và công với bên ngoài (8.10) thành có dạng:

$$u_1 + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = u_2 + \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} \quad (8.11)$$

hay

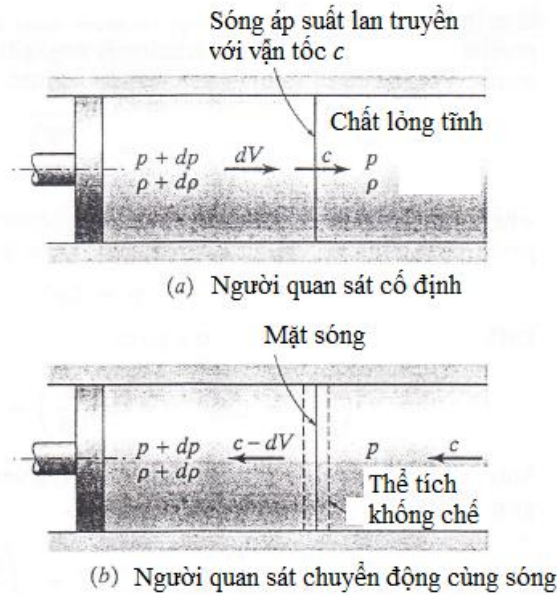
$$h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \quad (8.12)$$

Đối với chất khí lý tưởng với $dh = c_p dT$, phương trình (8.12) có thể viết dưới dạng:

$$T_1 + \frac{V_1^2}{c_p} = T_2 + \frac{V_2^2}{c_p} \quad (8.13)$$

8.3. Vận tốc âm và số Mach

Xem xét chất lỏng nén được có áp suất P và mật độ ρ ở trạng thái tĩnh trong ống cứng có thiết diện mặt cắt ngang A như trong Hình (8.1a). Giả sử một piston trong ống đột ngột chuyển động về bên phải với vận tốc nhỏ dV . Điều này sẽ tạo ra một sóng áp suất nhỏ lan truyền trong chất lỏng với vận tốc c và áp suất và mật độ trong ống sẽ thay đổi thành $P+dP$ và $\rho+d\rho$.



Hình 8.1 Sự lan truyền sóng áp suất

Chất lỏng phía sau sóng (bên trái) sẽ chuyển động với vận tốc dV . Trong Hình 8.1b, quá trình này được trình bày trong hệ tọa độ chuyển động gắn với sóng. Phương trình liên tục áp dụng cho thể tích khống chế được chỉ ra trên hình vẽ có dạng:

$$\rho A c = (\rho + d\rho) A (c - dV)$$

Bởi vì độ lớn dV được giả thiết là nhỏ, do đó số hạng $d\rho dV$ là số hạng nhỏ bậc 2 và có thể bỏ qua. Phương trình liên tục trở thành có dạng:

$$\rho dV = c d\rho \quad (8.13)$$

Phương trình mô-men động lượng áp dụng cho thể tích khống chế có dạng:

$$PA - (P + dP)A = \rho A c [(c - dV) - c]$$

và được đơn giản thành:

$$dP = \rho c dV \quad (8.14)$$

Kết hợp (8.13) và (8.14) ta nhận được:

$$c^2 = \frac{dP}{d\rho} \quad (8.15)$$

Sóng lan truyền trong chất lỏng với vận tốc đủ lớn để bỏ qua các quá trình truyền nhiệt; ngoài ra, hiệu ứng ma sát trong chất khí có thể bỏ qua do đó quá trình truyền sóng âm có thể coi là quá trình đẳng entropy. Vậy vận tốc âm có thể được biểu diễn dưới dạng:

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s}$$

ở đây chỉ số s chỉ điều kiện đẳng entropy.

Đối với chất khí lý tưởng ta có:

$$c^2 = k \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_T = k \left[\frac{\partial(\rho RT)}{\partial \rho} \right]_T = kRT$$

hay

$$c = \sqrt{kRT} \quad (8.16)$$

Có thể nhận thấy rằng hằng số khí R là hằng số và hệ số khí k cho chất khí cụ thể có thể là hàm số chỉ của nhiệt độ, vì vậy vận tốc âm chỉ là hàm số của nhiệt độ đối với một chất khí lý tưởng. Hình 8.2 minh họa sự thay đổi của vận tốc khí theo nhiệt độ cho các chất khí khác nhau.

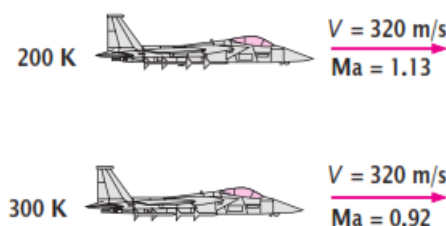


Hình 8.2 Sự thay đổi vận tốc âm theo nhiệt độ

Tham số thứ hai quan trọng trong phân tích dòng chảy chất lỏng nén được là số Mach, Ma , được gọi tên theo nhà vật lý người Áo Ernst Mach (1838-1916). Số Ma là tỷ số giữa vận tốc của chất khí (hoặc của một vật trong chất khí ở trạng thái tĩnh) và vận tốc âm thanh của chất khí trong cùng trạng thái:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (8.17)$$

Lưu ý rằng số Mach phụ thuộc vào vận tốc âm do đó phụ thuộc vào trạng thái của chất khí. Vì vậy, số Mach của một máy bay chuyển động cùng vận tốc có thể có số Mach khác nhau ở khu vực có điều kiện khác nhau (Hình 8.3).

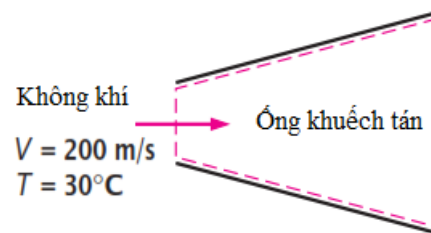


Hình 8.3 Số Mach trong các điều kiện khác nhau

Chế độ dòng chảy chất khí thường được nghiên cứu theo các điều kiện số Mach khác nhau. Dòng chảy chất khí được gọi là ở chế độ *âm thanh* (sonic) khi $Ma=1$, chế độ *dưới âm* (subsonic) khi $Ma<1$, chế độ *trên âm* (supersonic) khi $Ma>1$, chế độ *siêu âm* (hypersonic) khi $Ma>>1$ và chế độ *cận âm* (transonic) khi $Ma\approx 1$.

8.3.1. Ví dụ 8.2: Số Mach của không khí đi vào ống khuếch tán

Không khí đi vào ống khuếch tán như chỉ ra trên Hình 8.4 với vận tốc 200 m/s. Hãy xác định (a) vận tốc âm thanh và (b) số Mach của không khí tại đầu vào của ống khuếch tán nếu nhiệt độ không khí là 30°C.



Hình 8.4 Sơ đồ cho ví dụ 8.2

Vấn đề: Không khí đi vào ống khuếch tán với vận tốc đã biết, xác định vận tốc âm thanh và số Mach của không khí tại cửa vào.

Giả thiết: Không khí trong điều kiện cửa vào là chất khí lý tưởng.

Tính chất: Hằng số khí của không khí là $R=287 \text{ J/kg.K}$, tỷ số nhiệt dung riêng (hệ số khí) $k=1.4$.

Phân tích: (a) Vận tốc âm thanh được xác định từ công thức (8.16):

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{1.4 \times 287 \times 303} = 346 \text{ m/s}$$

(b) Khi đó số Mach sẽ là:

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{200}{349} = 0.573$$

Thảo luận: Dòng chảy không khí tại đầu vào ống khuếch tán là dòng dưới âm bởi vì số $Ma<1$.

8.4. Dòng hãm và dòng tới hạn

Trong phân tích dòng chảy chất khí các thông số dòng chảy trong *dòng hãm* và *dòng tới hạn* có ý nghĩa quan trọng. Dòng hãm được định nghĩa là khu vực dòng chảy (hay một điểm) mà ở đó vận tốc của chất khí là bằng 0. Các thông số của dòng hãm được ký hiệu với chỉ số dưới là số 0, ví dụ P_0, T_0, ρ_0 . Dòng tới hạn được định nghĩa là khu vực dòng chảy mà ở đó vận tốc của chất khí là bằng với vận tốc âm ($Ma=1$). Các thông số của dòng tới hạn được ký hiệu với chỉ số trên bằng ký hiệu *, ví dụ P^*, T^*, ρ^* .

Hình 8.4 chỉ ra một điểm dừng trong dòng chảy nén được. Tại điểm dừng O, vận tốc $V_0=0$ và sự tăng áp suất điểm này (từ phương trình Bernoulli) sẽ làm tăng nhiệt độ và mật độ của chất khí.

Phương trình (8.14) được sử dụng để xác định nhiệt độ điểm dừng T_0 :

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} \quad \text{hoặc} \quad \frac{T_0}{T} = 1 + \frac{V^2}{2c_p T}$$

Từ các biểu thức cho số Ma , c_p , phương trình trên có thể đưa về dưới dạng:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \quad (8.18)$$

Phương trình đúng với các quá trình đoạn nhiệt và đẳng entropy. Đối với quá trình đoạn nhiệt, nhiệt độ điểm dừng tại mọi điểm trong dòng hãm là như nhau.

Đối với dòng chảy khí lý tưởng đẳng entropy, mối liên hệ giữa áp suất và mật độ với nhiệt độ được xác định như sau:

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{k/(k-1)}, \quad \frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{k/(k-1)} \quad (8.18a)$$

ở đây P_0 và ρ_0 là áp suất và mật độ điểm dừng.

Kết hợp các phương trình trên, áp suất và mật độ có thể biểu diễn thông qua số Mach:

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{k/(k-1)} \quad (8.19)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right)^{1/(k-1)} \quad (8.20)$$

Đối với dòng tới hạn khi $Ma=1$, ta có mối quan hệ giữa các thông số tới hạn và các thông số điểm dừng thông qua các tỷ số như sau :

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad (8.21)$$

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} \quad (8.22)$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)} \quad (8.23)$$

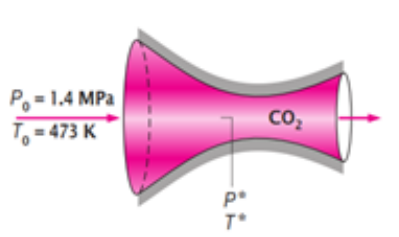
Những tỷ số này được tính cho các giá trị k khác nhau được trình bày trong Bảng 8.1.

Bảng 8.1 Tỷ số áp suất tới hạn, nhiệt độ tới hạn và mật độ tới hạn của một số chất khí trong dòng chảy đẳng entropy

	Hơi nước nóng $k=1.3$	Khí cháy nổ $k=1.33$	Không khí $k=1.4$	Khí đơn nguyên tử $k=1.667$
P^*/P_0	0.5457	0.5404	0.5283	0.4871
T^*/T	0.8696	0.8584	0.8333	0.7499
ρ^*/ρ	0.6276	0.6295	0.6340	0.6495

8.4.1. Ví dụ 8.3: Nhiệt độ và áp suất tới hạn trong dòng chảy khí

Tính áp suất và nhiệt độ của khí dioxide cacbon trong điều kiện mô tả trên Hình 8.5.



Hình 8.5 Sơ đồ cho ví dụ 8.3

Vấn đề: Tính áp suất và nhiệt độ tới hạn của dòng chảy với điều kiện cho trước nhiệt độ và áp suất dòng hãm.

Giả thiết: (1) Dòng chảy dừng, đoạn nhiệt và một chiều; (2) Khí cacbon là khí lý tưởng có các nhiệt dung riêng là hằng số.

Tính chất: Hệ số khí của khí cacbon là $k=1.289$.

Phân tích: Các tỷ số của nhiệt độ và áp suất dòng tới hạn và dòng hãm là:

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} = \frac{2}{1.289+1} = 0.87337$$
$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)} = \left(\frac{2}{1.289+1}\right)^{1.289/(1.289-1)} = 0.5477$$

Từ đó:

$$T^*=0.87337 \times 473=413 \text{ K}$$

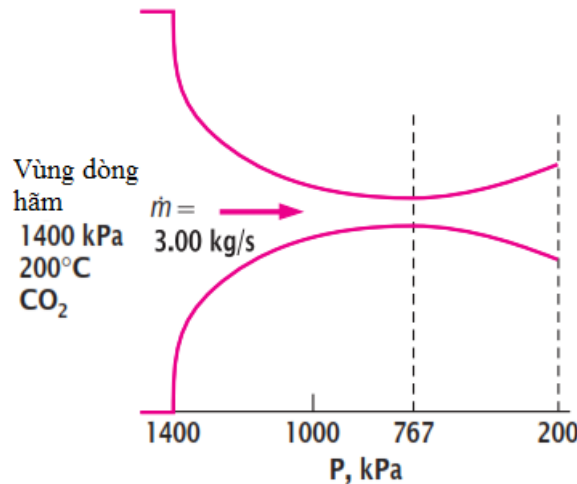
$$P^*=0.5477 \times 1400=764 \text{ kPa}$$

8.5. Dòng chảy đẳng entropy một chiều

Trong dòng chảy chất khí qua các thiết bị như vòi phun, ống khuếch tán, tua bin khí, các đại lượng dòng chảy thay đổi chủ yếu theo hướng dòng chảy và dòng chảy có thể được xấp xỉ như dòng một chiều đẳng entropy với độ chính xác cao. Vì vậy dòng chảy khí một chiều đẳng entropy cần được nghiên cứu kỹ lưỡng. Trước khi nghiên cứu các vấn đề tổng quát, chúng ta sẽ xem xét một vài vấn đề quan trọng thông qua một ví dụ.

8.5.1. Ví dụ 8.4 : Dòng chảy khí qua ống phun thu hẹp - mở rộng

Khí cacbonic chảy ổn định qua ống phun thu hẹp - mở rộng như trên Hình 8.6 với lưu lượng khối lượng 3 kg/s. Khí cacbonic đi vào ống phun với áp suất 1400 kPa và 200°C với vận tốc nhỏ và ra khỏi ống ở áp suất 200 kPa. Ống được thiết kế để dòng chảy được coi là đẳng entropy. Xác định mật độ, vận tốc, thiết diện và số Mach dọc theo chiều dài của ống và vị thiết diện có sụt áp suất là 200 kPa.



Hình 8.6 Sơ đồ cho ví dụ 8.3

Vấn đề: Khí cacbonic đi vào ống dẫn có thiết diện thay đổi trong điều kiện đã cho. Xác định các đại lượng dòng chảy dọc theo ống.

Giả thiết: (1) Khí cacbonic là chất khí lý tưởng có các nhiệt dung riêng là hằng số trong điều kiện đã cho; (2) Dòng chảy trong ống là ổn định, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Nhiệt dung riêng đẳng áp và hệ số khí: $c_p=0.846$ kJ/kg.K và $k=1.289$ là hằng số trong điều kiện đã cho. Hằng số khí của khí cacbonic là $R=0.1889$ kJ/kg.K.

Phân tích: Có thể nhận thấy rằng nhiệt độ cửa vào là xấp xỉ với nhiệt độ điểm dừng vì vận tốc ở cửa vào là rất nhỏ. Bởi vì dòng chảy là đẳng entropy nên áp suất và nhiệt độ điểm dừng trong toàn bộ vùng dòng chảy là không đổi. Vì vậy:

$$T_0 \cong T_1 = 200^\circ\text{C} = 473 \text{ K}$$

$$P_0 \cong P_1 = 1400 \text{ kPa}$$

Để minh họa quá trình tính toán các thông số dòng chảy dọc theo đường ống, chúng ta tính toán các thông số tại mặt cắt có áp suất 1200 kPa, tương ứng với mặt cắt đầu tiên có độ sụt áp suất là 200 kPa.

Từ phương trình (8.18a),

$$T = T_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(k-1)/k} = (473) \left(\frac{1200}{1400} \right)^{1.289 - \frac{1}{1.289}} = 457 \text{ K}$$

Từ phương trình (8.....),

$$V = \sqrt{2c_p(T_0 - T)} = \sqrt{2(846)(473 - 457)} = 164.5 \text{ m/s}$$

Từ phương trình trạng thái khí lý tưởng,

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{1200}{(0.1889)(457)} = 13.9 \text{ kg/m}^3$$

Từ định nghĩa của lưu lượng khối lượng,

$$A = \frac{\dot{m}}{\rho V} = \frac{3}{(13.9)(164.5)} = 13.1 \text{ cm}^2$$

Từ các phương trình (8.) và (8.), ta có:

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{(1.289)(188.9)(457)} = 333.6 \text{ m/s}$$

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{164.5}{333.6} = 0.493$$

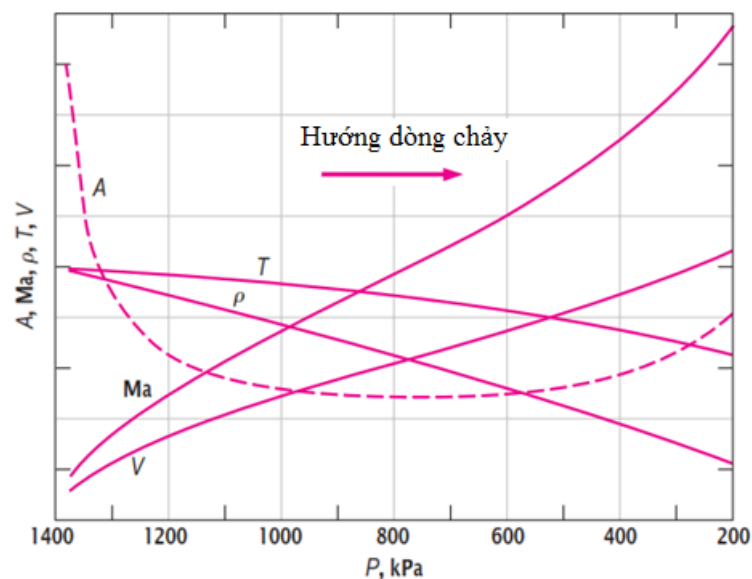
Kết quả tính toán cho các mặt cắt với áp suất khác được tổng kết trong Bảng 8.2 và đồ thị Hình 8.7.

Thảo luận: Có thể nhận thấy rằng dọc theo đường ống theo chiều dòng chảy, áp suất, nhiệt độ, vận tốc âm thanh giảm, trong khi đó vận tốc và số Mach tăng. Mật độ ban đầu giảm chậm sau đó giảm nhanh hơn khi vận tốc dòng chảy tăng.

Bảng 8.2 Sự thay đổi các đặc trưng của khí dọc theo dòng chảy trong Ví dụ 8.4 với $\dot{m}=3 \text{ kg/s}=\text{constant}$.

P , kPa	T , K	V , m/s	ρ , kg/m ³	c , m/s	A , cm ²	Ma
1400	473	0	15.7	339.4	∞	0
1200	457	164.5	13.9	333.6	13.1	0.493
1000	439	240.7	12.1	326.9	10.3	0.736
800	417	306.6	10.1	318.8	9.64	0.962
767*	413	317.2	9.82	317.2	9.63	1.000
600	391	371.4	8.12	308.7	10.0	1.203
400	357	441.9	5.93	295.0	11.5	1.498
200	306	530.9	3.46	272.9	16.3	1.946

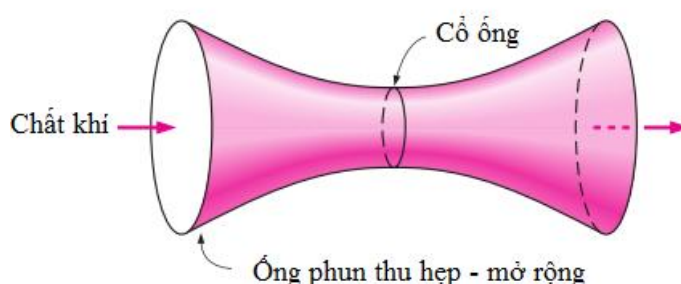
* 767 kPa là vận tốc tới hạn khi $Ma=1$



Hình 8.7 Diễn biến các tham số dòng chảy và thiết diện đường ống dọc theo dòng chảy khí áp suất giảm từ 1400 kPa xuống 200 kPa.

Từ ví dụ 8.4 có thể nhận thấy rằng thiết diện dòng chảy giảm cùng với sự giảm áp suất cho tới áp suất tới hạn với $Ma=1$, sau đó thiết diện bắt đầu tăng cùng với áp suất giảm. Số $Ma=1$ tại thiết diện nhỏ nhất, được gọi là "cổ" của đường ống (Hình 8.8). Lưu ý rằng vận tốc chất khí tăng sau khi đi qua cổ ống mặc dù thiết diện dòng chảy tăng lên ở vùng này. Vận tốc dòng chảy tăng lên sau cổ ống là do sự giảm nhanh của mật độ chất khí.

Thiết diện dòng chảy trong ví dụ này ban đầu giảm sau đó tăng. Ống dẫn có thiết diện như vậy được gọi là ống phun thu hẹp-mở rộng. Ống phun loại này được sử dụng để tăng tốc dòng khí lên vận tốc trên âm. Ống phun loại này xuất hiện lần đầu trong tua bin hơi nước năm 1983 thiết kế bởi kỹ sư người Thụy sĩ Carl G. B. de Laval (1845-1913) và được gọi là ống phun Laval.



Hình 8.8. Mặt cắt ngang có diện tích nhỏ nhất gọi là "cổ ống".

8.6. Ảnh hưởng của thay đổi thiết diện trong dòng chảy chất lỏng nén được

Trong dòng chảy ổn định của chất lỏng không nén được, vận tốc thay đổi tỷ lệ nghịch với diện tích mặt cắt dòng chảy. Tuy nhiên, trong dòng chảy chất lỏng nén được, điều này không phải luôn đúng bởi vì sự thay đổi mật độ cũng ảnh hưởng đến vận tốc. Hơn nữa, ứng xử của chất lỏng nén được khi thiết diện dòng chảy thay đổi còn phụ thuộc vào chế độ dòng chảy là dưới âm ($Ma < 1$) hay trên âm ($Ma > 1$). Tiếp theo, chúng ta sẽ xem xét hiện tượng này đối với dòng chất khí lý tưởng.

Từ phương trình liên tục (8.7), lấy vi phân cả hai vế và chia cả 2 vế cho ρAV , ta nhận được:

$$\frac{dA}{A} + \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dV}{V} = 0 \quad (8.24)$$

Từ phương trình chuyển động, lấy vi phân cả 2 vế và bỏ qua ảnh hưởng của trọng trường ta có:

$$\frac{dP}{\rho} + V dV = 0 \quad (8.25)$$

Từ đó

$$\frac{dp}{d\rho} \frac{d\rho}{\rho} + V dV = c^2 \frac{d\rho}{\rho} + V dV = 0 \quad (8.26)$$

Kết hợp (8.24), (8.25) bằng cách khử số hạng $d\rho/\rho$, ta nhận được:

$$\frac{dA}{A} = \frac{dP}{\rho V^2} (1 - Ma^2) \quad (8.27)$$

Đây là phương trình quan trọng đối với dòng chảy đẳng entropy trong đường ống bởi vì phương trình này mô tả sự thay đổi áp suất theo thiết diện dòng chảy. Lưu ý rằng các đại lượng A , ρ và V^2 có giá trị dương. Đối với dòng chảy dưới âm ($Ma < 1$), số hạng $1 - Ma^2$ có giá trị dương, vì vậy dA và dP phải có cùng dấu. Có nghĩa là, áp suất của chất khí phải tăng khi thiết diện đường ống tăng và phải giảm khi thiết diện đường ống giảm. Vì vậy, đối với dòng dưới âm, áp suất giảm trong ống thu hẹp và tăng trong ống mở rộng.

Trong dòng chảy trên âm, số hạng $1 - Ma^2$ là âm, vì vậy dA và dP phải trái dấu. Có nghĩa là áp suất chất khí tăng khi thiết diện ống giảm và giảm khi thiết diện tăng. Vì vậy, đối với dòng trên âm, áp suất giảm trong ống mở rộng và tăng trong ống thu hẹp.

Một phương trình quan trọng khác cho dòng chảy đẳng entropy có thể nhận được bằng cách thế $\rho V = -dP/dV$ từ phương trình (8.25) vào phương trình (8.27):

$$\frac{dA}{A} = -\frac{dV}{V} (1 - Ma^2) \quad (8.28)$$

Phương trình này quy định hình dáng của đường ống trong dòng chảy đẳng entropy dưới âm hoặc trên âm. Để ý rằng A và V là các đại lượng dương, từ đó ta có:

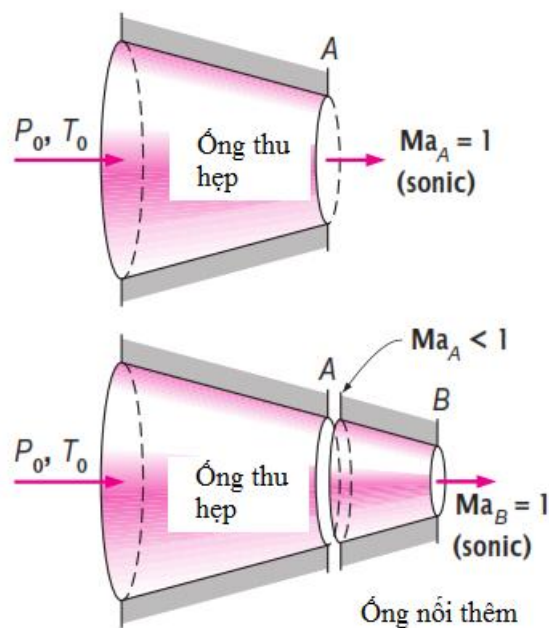
$$\text{Đối với dòng dưới âm } (Ma < 1), \frac{dA}{dV} < 0$$

$$\text{Đối với dòng trên âm } (Ma > 1), \frac{dA}{dV} > 0$$

$$\text{Đối với dòng sonic } (Ma = 1), \frac{dA}{dV} = 0$$

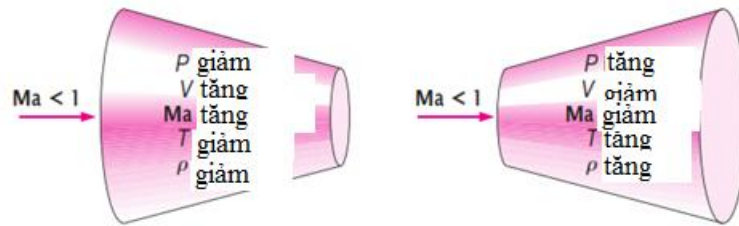
Vì vậy để tăng tốc dòng chảy, chúng ta phải có ống thu hẹp với chế độ dưới âm và ống mở rộng với chế độ trên âm. Trường hợp vận tốc dưới âm có nhiều ứng dụng trong thực tế, vì vậy các đầu phun đều có hình dạng ống thu hẹp. Tuy nhiên, trong ống thu hẹp, vận tốc lớn nhất chỉ đạt được bằng vận tốc âm và chỉ đạt được ở miệng ra của ống. Nếu chúng ta nối dài ống phun thu hẹp bằng một ống thu hẹp nữa để hy vọng nhận được vận tốc trên âm, như trên Hình 8.8, thì

chúng ta sẽ thất vọng. Bởi vì vận tốc âm lại sẽ xuất hiện ở miệng ra của phần nối thêm thay vì miệng ra của ống trước đó và lưu lượng khối lượng của dòng chảy giảm xuống vì diện tích miệng ra giảm xuống.

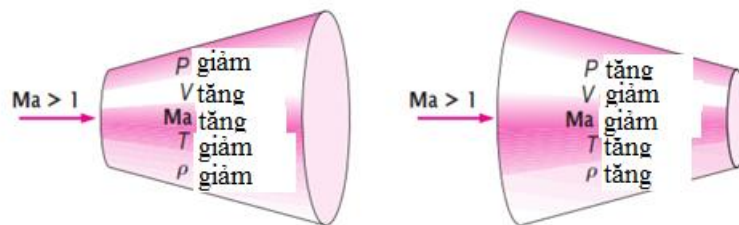


Hình 8.8 Không thể nhận được vận tốc trên âm khi kéo dài thêm ống thu hẹp

Trên cơ sở phương trình (8.28), chúng ta cần phải nối đoạn ống mở rộng với đoạn ống thu hẹp để tăng vận tốc chất khí lên vận tốc trên âm. Kết quả là sẽ có ống phun thu hẹp-mở rộng. Ban đầu chất khí đi qua đoạn dưới âm (ống thu hẹp), trong đoạn này, số Mach tăng dần khi thiết diện dòng chảy giảm dần, sau đó đạt giá trị 1 tại cổ ống. Chất khí tiếp tục tăng tốc khi đi qua đoạn siêu âm (ống mở rộng). Để ý rằng $\dot{m} = \rho AV = \text{constant}$ đối với dòng chảy dừng, chúng ta thấy sự giảm mạnh của mật độ là nguyên nhân gây ra sự tăng tốc trong đoạn ống mở rộng. Một ví dụ của trường hợp này là dòng chảy của khí đốt đi qua ống phun của tua-bin khí. Quá trình ngược lại thì lại xuất hiện trong cửa vào động cơ của máy bay siêu âm. Trong trường hợp này, chất khí giảm tốc khi đi qua ống có thiết diện giảm theo hướng dòng chảy (Hình 8.9b).



(a) Dòng dưới âm

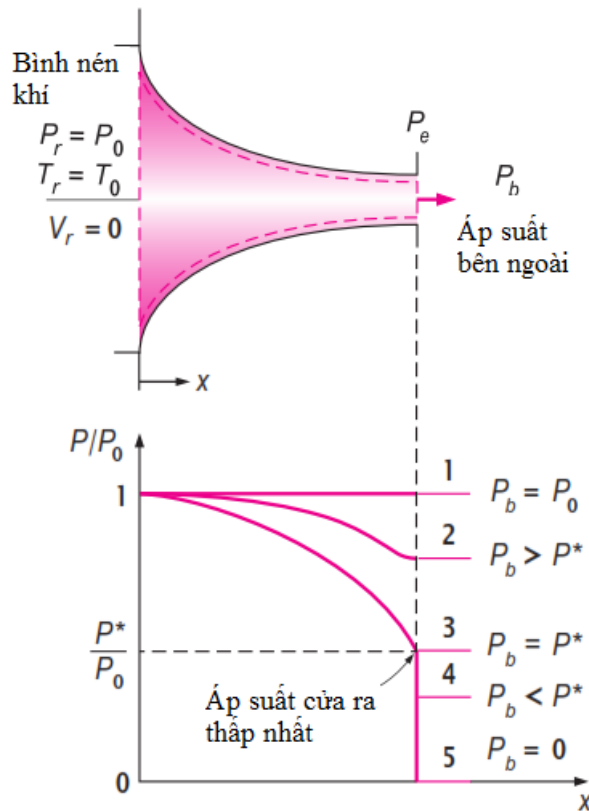


(b) Dòng trên âm

Hình 8.9 Sự thay đổi các thông số dòng khí trong ống thu hẹp và ống mở rộng ở chế độ dưới âm và trên âm.

8.6.1. Dòng chảy trong ống phun thu hẹp

Xem xét dòng chảy dưới âm qua ống phun thu hẹp như chỉ ra trên Hình 8.10. Đầu vào ống phun nối với bình chứa ở áp suất P_r và nhiệt độ T_r . Bình chứa đủ to để vận tốc đầu vào ống phun là không đáng kể. Bởi vì vận tốc chất khí trong bình bằng 0 và dòng chảy qua ống phun có thể coi là quá trình đẳng entropy, cho nên áp suất và nhiệt độ điểm dòng hãm trong dòng chảy là bằng với áp suất và nhiệt độ trong bình chứa. Bây giờ chúng ta bắt đầu giảm áp suất bên ngoài miệng ống phun và quan sát phân bố áp suất dọc theo ống phun như chỉ ra trên Hình 8.10. Nếu áp suất bên ngoài $P_b = P_1 = P_r$ thì không có dòng chảy trong đường ống và phân bố áp suất đều dọc theo đường ống. Khi áp suất bên ngoài giảm xuống P_2 , áp suất cửa ra của ống phun P cũng giảm xuống bằng P_2 . Điều đó làm cho áp suất trong ống phun giảm dọc theo hướng dòng chảy.



Hình 8.10. Ảnh hưởng của áp suất bên ngoài miệng ống phun lên phân bố áp suất dọc theo ống phun thu hẹp

Khi áp suất bên ngoài giảm xuống P_3 ($=P^*$ là áp suất cần thiết để tăng tốc dòng chảy đạt vận tốc âm thanh tại cửa ra của đường ống), lưu lượng khối lượng đạt cực đại và dòng chảy gọi là dòng chảy "nghẹn" (choked). Khi áp suất bên ngoài tiếp tục giảm xuống P_4 hoặc thấp hơn, không có bất kỳ sự thay đổi nào về phân bố áp suất hay các tham số dòng chảy khác dọc theo đường ống.

Trong điều kiện dòng chảy dừng, lưu lượng khối lượng qua ống phun là hằng số và được biểu diễn bởi biểu thức:

$$\dot{m} = \rho AV = \left(\frac{P}{RT}\right) A (\text{Ma} \sqrt{kRT}) = P A \text{Ma} \sqrt{\frac{k}{RT}}$$

Từ các phương trình cho T (8.18) và P (8.19), ta nhận được:

$$\dot{m} = \frac{A \text{Ma} P_0 \sqrt{k/(RT_0)}}{[1 + (k-1)\text{Ma}^2/2]^{(k+1)/[2(k-1)]}} \quad (8.30)$$

Vậy lưu lượng khối lượng của chất khí qua vòi phun phụ thuộc vào các thông số dòng hãm, thiết diện dòng chảy và số Mach. Phương trình (8.30) là đúng với bất kỳ mặt cắt nào, vì vậy \dot{m} có thể được xác định tại bất kỳ vị trí nào dọc theo chiều dài ống phun.

Đối với thiết diện A và các tham số dòng hãm cho trước T_0 và P_0 , lưu lượng khối lượng cực đại có thể xác định bằng cách lấy đạo hàm phương trình (8.30) đối với biến Ma và tìm Ma khi đạo hàm bằng 0. Kết quả cho $Ma=1$. Bởi vì vị trí duy nhất dọc theo đường ống nơi Ma có thể bằng 1 là “cổ ống” nơi có thiết diện nhỏ nhất. Vậy lưu lượng khối lượng lớn nhất trong ống phun xảy ra khi $Ma=1$ tại cổ ống. Ký hiệu A^* là diện tích cổ ống, chúng ta nhận được biểu thức cho lưu lượng cực đại bằng cách thế $Ma=1$ trong phương trình (8.30):

$$\dot{m} = A^* P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/[2(k-1)]} \quad (8.31)$$

Vì vậy, đối với chất khí lý tưởng, lưu lượng khối lượng cực đại đi qua ống phun với thiết diện cổ ống cho trước được xác định bởi áp suất và nhiệt độ dòng hãm ở đầu vào. Lưu lượng có thể được kiểm soát bằng sự thay đổi áp suất hoặc nhiệt độ vì vậy ống phun thu hẹp có thể sử dụng để đo lưu lượng. Nguyên lý này rất quan trọng trong các quá trình hóa học, các thiết bị y tế, trong các thiết bị đo và các thiết bị khác khi mà dòng chảy chất khí cần được biết và cần được kiểm soát.

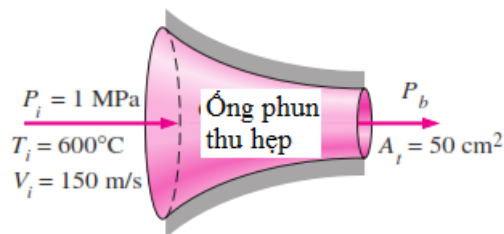
Mối quan hệ cho sự biến thiên thiết diện A dọc theo ống phun liên quan đến thiết diện cổ ống A^* có thể nhận được từ Pt. (8.30) và (8.31) cho dòng chảy có cùng lưu lượng khối lượng và cùng các tính chất dòng hãm của một chất khí. Ta có:

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{Ma} \left[\left(\frac{2}{k+1}\right) \left(1 + \frac{k-1}{2} Ma^2\right) \right]^{(k+1)/[2(k-1)]} \quad (8.32)$$

8.6.2. Ví dụ 8.5: Ảnh hưởng của áp suất bên ngoài ống phun lên lưu lượng khối lượng

Không khí ở nhiệt độ 1 Mpa và 600°C đi vào một ống phun thu hẹp (Hình 8.11) với vận tốc 150 m/s. Xác định lưu lượng khối lượng qua ống phun cho ống phun có cổ ống là 50 cm² khi áp suất bên ngoài là (a) 0.7 Mpa và (b) 0.4 Mpa.

Vấn đề: Không khí đi vào ống phun. Xác định lưu lượng khối lượng với áp suất bên ngoài khác nhau.



Hình 8.11 Sơ đồ cho ví dụ 8.4

Giả thiết: (1) Không khí là khí lý tưởng với các nhiệt dung riêng là hằng số; (2) Dòng chảy qua ống phun là dòng dừng, 1 chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Nhiệt dung riêng đẳng áp và hệ số khí của không khí là: $c_p=1.005$ kJ/kg.K và $k=1.4$

Phân tích: Chúng ta dùng ký hiệu chỉ số i và t cho các tính chất tại cửa vào và cổ ống, tương ứng. Áp suất và nhiệt độ dòng hãm được xác định từ các Pt.:

$$T_{0i} = T_i + \frac{V_i^2}{2c_p} = 873 + \frac{150^2}{2(1005)} = 884 \text{ K}$$

$$P_{0i} = P_i \left(\frac{T_{0i}}{T_i} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (1) \quad \left(\frac{884}{873} \right)^{1.4/(1.4-1)} = 1.045 \text{ Mpa}$$

Áp suất và nhiệt độ dòng hãm có giá trị không đổi trong toàn bộ miền dòng chảy bởi vì dòng chảy được giả thiết là đẳng entropy. Vậy:

$$T_0 = T_{0i} = 884 \text{ K và } P_0 = P_{0i} = 1.045 \text{ Mpa}$$

Tỷ số áp suất tới hạn được xác định từ phương trình: $P^*/P_0 = 0.5283$

(a) Tỷ số áp suất bên ngoài cho trường hợp này là:

$$P_b/P_0 = 0.7/1.045 = 0.670$$

lớn hơn tỷ số áp suất tới hạn là 0.5283. Vậy áp suất miệng ống phun (hay áp suất cổ ống P_i) bằng với áp suất bên ngoài. Do đó $P_i = P_b = 0.7 \text{ MPa}$ và $P_i/P_0 = 0.670$. Vì vậy dòng chảy chưa đạt tới hạn. Từ các Pt. ta xác định được $Ma_i = 0.778$ và $T_i/T_0 = 0.892$

Lưu lượng khối lượng qua ống phun được xác định từ phương trình (8.30). Ngoài ra, còn có thể được xác định theo từng bước như sau:

$$T_t = 0.892 T_0 = 0.892(884) = 788.5 \text{ K}$$

$$\rho_t = \frac{P_t}{RT_t} = \frac{700}{(0.287)(788.5)} = 3.093 \text{ kg/m}^3$$

$$V_t = Ma_t c_t = Ma_t \sqrt{kRT_t} = (0.778) \sqrt{(1.4)(287)(788.5)} = 437.9 \text{ m/s}$$

Vậy,

$$\dot{m} = \rho_t A_t V_t = (3.093)(50 \times 10^{-4})(437.9) = 6.77 \text{ kg/s}$$

Tỷ số áp suất bên ngoài cho trường hợp này là:

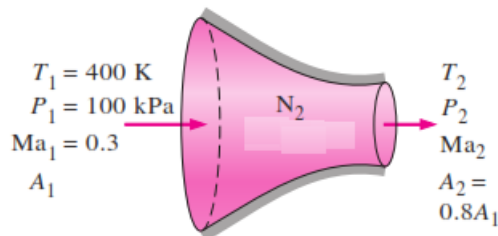
$$P_b/P_0 = 0.4/1.045 = 0.383$$

Nhỏ hơn tỷ số áp suất tới hạn 0.5283. Vậy dòng đạt tới hạn tại cửa ra (cổ ống) với $Ma=1$. Lưu lượng khối lượng được xác định theo Pt. (8.31):

$$\begin{aligned} \dot{m} &= A^* P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/[2(k-1)]} \\ &= (50 \times 10^{-4})(1045 \times 10^3) \sqrt{\frac{1.4}{(287)(884)}} \left(\frac{2}{2.4} \right)^{\frac{2.4}{0.8}} = 7.10 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

8.6.3. Ví dụ 8.6: Dòng chảy chất khí qua ống phun thu hẹp

Khí ni tơ đi vào ống phun có thiết diện thay đổi với nhiệt độ $T_1=400$ K, $P_1=100$ kPa và $Ma_1=0.3$. Giả thiết dòng chảy là dừng, đẳng entropy và đạt tới hạn, xác định T_2 , P_2 và Ma_2 tại vị trí mà thiết diện đã thu hẹp 20%.



Hình 8.12 Sơ đồ cho Ví dụ 8.6

Vấn đề: Khí ni tơ chảy trong ống thu hẹp. Xác định các thông số dòng chảy tại một mặt cắt.

Giả thiết: (1) Ni tơ là chất khí lý tưởng với $k=1.4$; (2) dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Phân tích: Sơ đồ dòng chảy được trình bày trên Hình 8.12. Đối với dòng chảy trong ống có thiết diện thay đổi, tỷ số thiết diện A/A^* thỏa mãn phương trình (8.32). Với $Ma=0.3$, và từ các công thức (8.18), (8.19) ta có:

$$\frac{A_1}{A^*} = 2.0351 \quad \frac{T_1}{T_0} = 0.9823 \quad \frac{P_1}{P_0} = 0.9395$$

Với $A_2=0.8A_1$, ta có:

$$\frac{A_2}{A^*} = \frac{A_2 A_1}{A_1 A^*} = (0.8)(2.0351) = 1.6281$$

Tương tự, đối với mặt cắt 1, ta nhận được các tỷ số (từ Pt (8.32)) nhận được Ma_2 :

$$\frac{T_2}{T_0} = 0.9703 \quad \frac{P_2}{P_0} = 0.9000 \quad Ma_2 = 0.391$$

Bởi vì các thông số dòng hãm là không đổi với dòng đẳng entropy, do đó:

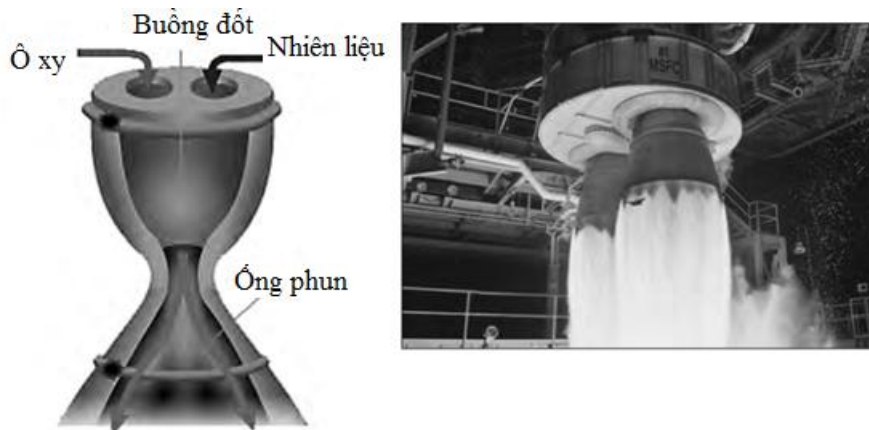
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_2/T_0}{T_1/T_0} \rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{T_2/T_0}{T_1/T_0} \right) = (400) \left(\frac{0.9703}{0.9823} \right) = 395 \text{ K}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2/P_0}{P_1/P_0} \rightarrow P_2 = P_1 \left(\frac{P_2/P_0}{P_1/P_0} \right) = (100) \left(\frac{0.9000}{0.9395} \right) = 95.8 \text{ kPa}$$

8.6.4. Dòng chảy trong ống phun thu hẹp-mở rộng

Khi nghĩ về các ống phun, chúng ta thường nghĩ chúng có đầu phun với thiết diện thu hẹp theo hướng của dòng chảy. Tuy nhiên, vận tốc cao nhất trong ống phun thu hẹp chỉ đạt tới vận tốc âm thanh ($Ma=1$) và chỉ xuất hiện ở miệng ống. Để có được vận tốc trên âm ($Ma>1$) cần nối thêm một ống phun mở rộng vào miệng của ống phun thu hẹp. Kết quả là chúng ta sẽ có hệ thống ống phun kết

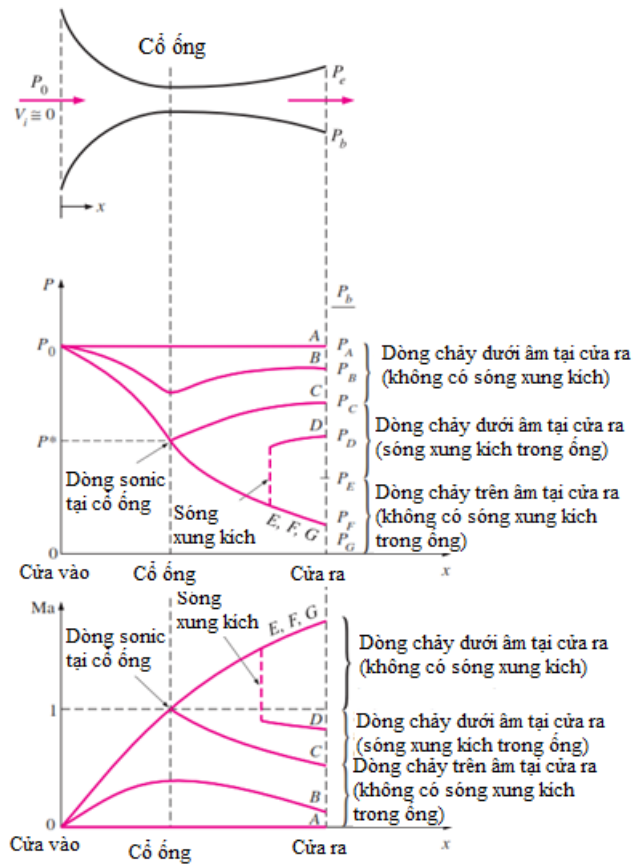
hợp thu hẹp-mở rộng, hệ thống này là thiết bị thường được thấy trong các máy bay siêu âm và tên lửa (Hình 8.13)



Hình 8.13 Ống phun thu hẹp-mở rộng thường được dùng trong động cơ tên lửa

Khi cho chất khí đi qua ống phun thu hẹp-mở rộng, không phải khi nào cũng đảm bảo nhận được vận tốc trên âm. Thực tế, dòng chảy chất khí có thể giảm tốc độ trong phần ống mở rộng thay vì tăng tốc nếu chênh lệch áp suất không đạt được mức độ nhất định. Trạng thái dòng chảy trong ống phun được xác định bởi tỷ số áp suất P_b/P_0 . Vì vậy, đối với áp suất đầu vào đã cho, dòng chảy trong ống thu hẹp-mở rộng sẽ phụ thuộc vào áp suất bên ngoài P_b , điều đó sẽ được giải thích dưới đây.

Xem xét ống thu hẹp mở rộng như trên Hình 8.14. Chất khí đi vào ống với vận tốc nhỏ và áp suất dòng hãm P_0 . Khi $P_b=P_0$ (trường hợp A), không có dòng chảy xảy ra vì dòng chảy chỉ xảy ra khi có chênh lệch áp suất. Bây giờ chúng ta sẽ xem xét điều gì sẽ xảy ra nếu áp suất bên ngoài hạ thấp xuống.



Hình 8.14 Hiệu ứng của áp suất bên ngoài lên dòng chảy trong ống thu hẹp mở rộng

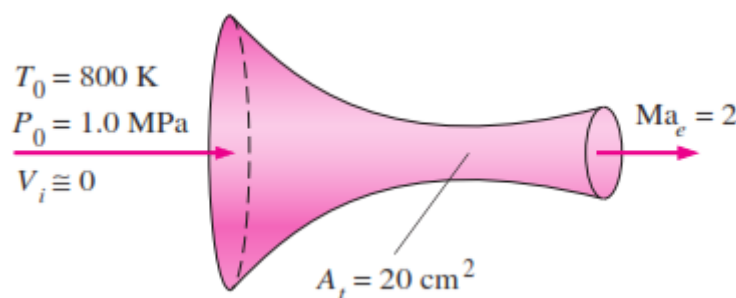
1. Khi $P_0 > P_b > P_C$, dòng chảy ở trạng thái dưới âm trong toàn bộ ống phun, lưu lượng khối lượng nhỏ hơn lưu lượng dòng nghẽn. Vận tốc chất khí tăng trong đoạn ống thu hẹp đạt cực đại tại cổ ống với $Ma < 1$. Tuy nhiên, vận tốc chất khí giảm dần khi đi qua đoạn ống mở rộng. Áp suất cũng giảm dần trong đoạn ống thu hẹp và đạt tới giá trị cực tiểu tại cổ ống, sau đó tăng dần trong đoạn ống mở rộng.
2. Khi $P_b = P_C$, áp suất tại cổ ống đạt áp suất tới hạn P^* và vận tốc chất khí đạt vận tốc âm thanh tại cổ ống. Tuy nhiên trong đoạn ống mở rộng, dòng chảy vẫn dưới âm và có tính chất tương tự trường hợp 1. Lưu lượng khối lượng tăng khi P_b giảm và đạt cực đại khi $P_b = P_C$. Cần lưu ý rằng P^* là áp suất thấp nhất có thể có tại cổ ống và vận tốc âm thanh là vận tốc lớn nhất mà chất khí có thể đạt được trong ống thu hẹp. Vì vậy nếu hạ thấp áp suất P_b thêm nữa thì dòng chảy trong phần ống thu hẹp sẽ không bị ảnh hưởng gì và lưu lượng khối lượng qua ống vẫn là không đổi. Tuy nhiên điều này sẽ ảnh hưởng đến đặc điểm dòng chảy trong đoạn ống mở rộng.
3. Khi $P_C > P_b > P_E$, chất khí đạt vận tốc âm thanh tại cổ ống và tiếp tục tăng tốc trong đoạn ống mở rộng khi áp suất tiếp tục giảm. Tuy nhiên sự tăng tốc sẽ dừng lại đột ngột khi **sóng xung kích** (vuông góc) xuất hiện ở giữa cổ ống và cửa ra, tạo ra sự giảm vận tốc đột ngột xuống dưới âm và sự tăng áp suất đột ngột. Sau sóng xung kích chất khí tiếp tục giảm vận tốc cho

đến tận cửa ra. Dòng chảy đi qua sóng xung kích là quá trình không thuận nghịch vì vậy không được xấp xỉ bằng dòng đẳng entropy. Vị trí của mặt sóng xung kích dịch chuyển xa dần cổ ống khi P_b giảm dần và tiến dần đến miệng ống khi P_b dần đến P_E . Khi $P_b=P_E$, mặt sóng xung kích trùng với mặt phẳng miệng ống. Khi đó dòng chảy trong toàn bộ phần ống mở rộng là dòng chảy trên âm và dòng chảy ở đây có thể được xấp xỉ là dòng đẳng entropy. Tuy nhiên, vận tốc chất khí sẽ xuống dưới âm khi chất khí thoát ra khỏi miệng ống. Thảo luận về sóng xung kích vuông góc sẽ được trình bày tại mục 8.7.

4. Khi $P_E > P_b > 0$, dòng chảy trong phần ống mở rộng là trên âm và áp suất bên ngoài có thể hạ xuống P_F mà không có sóng xung kích xuất hiện bên trong ống. Khi $P_b = P_F$, không có sóng xung kích xuất hiện bên trong và bên ngoài ống.

8.6.5. Ví dụ 8.7: Dòng chảy chất khí qua ống phun thu hẹp-mở rộng

Dòng không khí đi vào ống thu hẹp-mở rộng, như chỉ ra trên Hình 8.15, ở áp suất 1.0 Mpa và nhiệt độ 800 K với vận tốc nhỏ không đáng kể. Dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy với $k=1.4$. Với số Mach ở cửa ra là $Ma=2$ và thiết diện cổ ống là 20 cm^2 , xác định (a) các điều kiện tại cổ ống, (b) các điều kiện tại cửa ra bao gồm cả diện tích cửa ra, và (c) lưu lượng khối lượng đi qua ống.



Hình 8.15 Sơ đồ cho ví dụ 8.6.

Vấn đề: Dòng chảy khí đi qua ống phun thu hẹp-mở rộng. Xác định các điều kiện tại cổ ống, miệng ra và lưu lượng khối lượng của dòng chảy.

Giả thiết: (1) Không khí là chất khí lý tưởng có các nhiệt dung riêng là hằng số; (2) Dòng chảy trong ống phun là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Tỷ số nhiệt dung riêng của không khí là $k=1.4$. Hằng số khí của không khí là $R=0.287 \text{ kJ/kg.K}$.

Phân tích: Số Mach tại cửa ra là $Ma=2$. Vì vậy dòng chảy là bằng âm (sonic) tại cổ ống và trên âm trong đoạn ống mở rộng. Vì vận tốc cửa vào là không đáng kể do đó áp suất và nhiệt độ dòng hãm bằng với áp suất và nhiệt độ cửa vào: $P_0=1.0 \text{ Mpa}$ và $T_0=800 \text{ K}$. Với giả thiết chất khí lý tưởng, mật độ dòng hãm là:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} = \frac{1000}{(0.287)(800)} = 4.355 \text{ kg/m}^3$$

(a) Tại cổ ống $Ma=1$, với $k=1.4$ ta có:

$$P^*=0.5283P_0=(0.5283)(1.0)=0.5283 \text{ Mpa}$$

$$T^*=0.8333T_0=(0.8333)(800)=666.6 \text{ K}$$

$$\rho^*=0.6339\rho_0=(0.6339)(4.355)=2.761 \text{ kg/m}^3$$

Ta cũng có:

$$V^* = c^* = \sqrt{kRT^*} = \sqrt{(1.4)(287)(666.6)} = 517 \text{ m/s}$$

(b) Vì dòng chảy là đẳng entropy và tại cửa ra có $Ma=2$, từ đó:

$$\frac{P_e}{P_0} = 0.1278 \quad \frac{T_e}{T_0} = 0.5556 \quad \frac{\rho_e}{\rho_0} = 0.2300 \quad Ma_e^* = 1.6330 \quad \frac{A_e}{A^*} = 1.6875$$

Vậy:

$$P_e=(0.1278)(1.0)=0.1278 \text{ Mpa}$$

$$T_e=(0.5556)(800)=444.5 \text{ K}$$

$$\rho_e=(0.2300)(4.355)=1.002 \text{ kg/m}^3$$

$$A_e=(1.6875)(20)=33.75 \text{ cm}^2$$

Và

$$V_e = Ma_e c_e = Ma_e \sqrt{kRT_e} = 2\sqrt{(1.4)(287)(444.5)} = 845.2 \text{ m/s}$$

(c) Vì dòng chảy là dừng cho nên lưu lượng khối lượng là hằng số, ta có:

$$\dot{m} = \rho^* A^* V^* = (2.761)(20 \times 10^{-4})(517.5) = 2.86 \text{ kg/s}$$

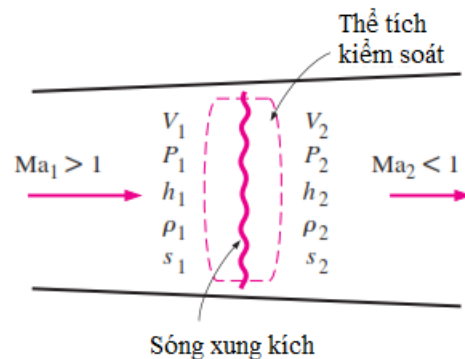
8.7. Sóng xung kích

Chúng ta đã biết sóng âm thanh gây ra bởi sự nhiễu loạn nhỏ của áp suất và được truyền đi trong môi trường với vận tốc âm thanh. Chúng ta cũng đã thấy, đối với giá trị áp suất bên ngoài nhất định, sự thay đổi đột ngột các tính chất của chất khí có thể xuất hiện trong đoạn ống mở rộng để tạo thành sóng xung kích. Chúng ta sẽ xem xét các thông số của sóng xung kích và ảnh hưởng của nó tới dòng chảy.

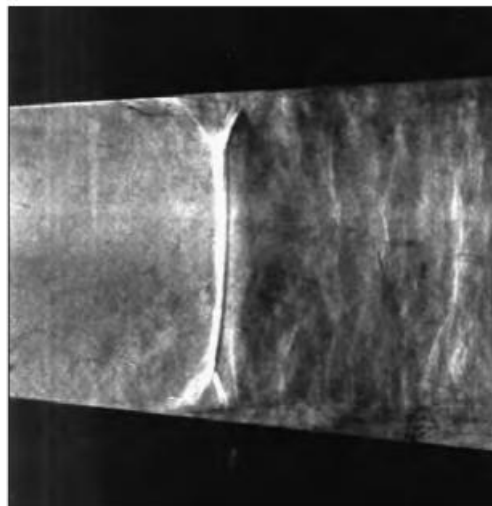
Chúng ta xem xét sóng xung kích xuất hiện trên mặt phẳng vuông góc với hướng dòng chảy, được gọi là *sóng xung kích vuông góc*. Quá trình dòng chảy đi qua sóng là không thuận nghịch và không được xấp xỉ là dòng đẳng entropy.

Theo các nhà nghiên cứu Pierre Laplace (1749-1927), G.F. Bernhard Riemann (1826-1866), William Rankine (1820-1872), Pierre Henry Hugoniot (1851-1887), Lord Rayleigh (1842-1919) và G.I. Taylor (1886-1975), chúng ta có thể nhận được mối quan hệ giữa các đặc trưng của dòng chảy trước và sau sóng bằng cách sử

dụng các phương trình bảo toàn khối lượng, động lượng, năng lượng và một số quan hệ tính chất khác cho thể tích khối chế chứa mặt sóng, như là chỉ ra trên Hình 8.16. Sóng xung kích vuông góc có bề dày rất mỏng, vì vậy diện tích đầu vào và đầu ra của thể tích khối chế có thể coi là xấp xỉ như nhau (Hình 8.17).



Hình 8.16 Thể tích kiểm soát cho dòng chảy đi qua sóng xung kích vuông góc



Hình 8.17 Hình ảnh sóng xung kích vuông góc trong ống phun mở rộng (Ảnh G.S. Settles, Penn State University)

Chúng ta giả thiết dòng chảy dừng đều, không có trao đổi nhiệt và công và không có thay đổi về thế năng. Ký hiệu các đại lượng phía thượng du (trước) sóng bởi chỉ số 1 và hạ du (sau) bởi chỉ số 2, chúng ta có:

$$\text{Bảo toàn khối lượng:} \quad \rho_1 A V_1 = \rho_2 A V_2 \quad (8.33)$$

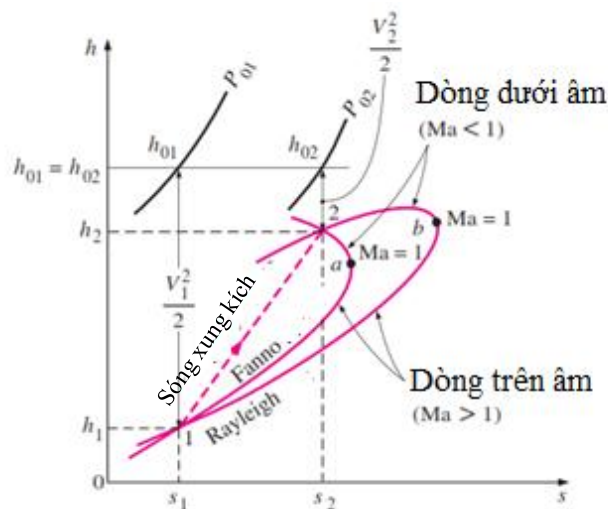
$$\text{Bảo toàn năng lượng:} \quad h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2} \quad (8.34)$$

$$\text{Bảo toàn động lượng:} \quad A(P_1 - P_2) = \dot{m}(V_2 - V_1) \quad (8.35)$$

$$\text{Entropy tăng:} \quad s_2 - s_1 \geq 0 \quad (8.36)$$

Có thể kết hợp phương trình bảo toàn khối lượng và năng lượng thành một phương trình để vẽ đồ thị mối quan hệ $h-s$. Đường cong này được gọi là đường Fanno, và đó là “quỹ đạo” của các trạng thái có cùng enthalpy dòng hãm và thông lượng khối lượng (lưu lượng khối lượng trên một đơn vị diện tích). Tương

tự như vậy, kết hợp phương trình bảo toàn khối lượng và động lượng và vẽ sơ đồ mối quan hệ $h-s$ cho đường cong có tên là đường cong Reyleigh. Hình 8.18 biểu diễn cả hai đường cong này trên sơ đồ $h-s$. Trong Ví dụ 8.8 sẽ chứng minh, điểm có entropy cực đại trên các đường này (điểm a và b) tương ứng với $Ma=1$. Trạng thái chất khí ở các phần trên của mỗi đường cong là dưới âm và ở phần dưới là trên âm.



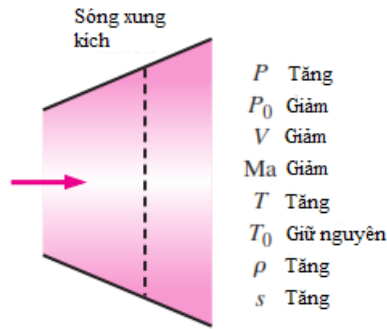
Hình 8.18 Đường cong $h-s$ cho dòng chảy đi qua sóng xung kích

Các đường cong Fanno và Rayleigh cắt nhau tại 2 điểm (điểm 1 và điểm 2), ở đây là 2 trạng thái mà cả 3 phương trình bảo toàn đều thỏa mãn. Trạng thái 1 tương ứng với trạng thái trước sóng xung kích và trạng thái 2 là trạng thái sau sóng xung kích. Lưu ý rằng dòng chảy là trên âm ở trước sóng và dưới âm ở sau sóng. Vì vậy dòng chảy phải thay đổi từ trên âm thành dưới âm nếu xuất hiện sóng xung kích. Số Mach trước sóng càng lớn thì sóng càng mạnh. Trong trường hợp tới hạn $Ma=1$, sóng xung kích đơn giản là sóng âm thanh. Từ Hình 8.18 thấy rằng entropy tăng $s_2 > s_1$. Đó là điều mong đợi vì dòng chảy đi qua sóng xung kích là đoạn nhiệt nhưng không thuận nghịch.

Phương trình bảo toàn năng lượng (8.34) đòi hỏi enthalpy là hằng số qua mặt sóng: $h_{01}=h_{02}$. Đối với khí lý tưởng $h=h(T)$, do đó:

$$T_{01}=T_{02} \tag{8.37}$$

Như vậy, nhiệt độ dòng hãm đối với khí lý tưởng là hằng số qua mặt sóng. Tuy nhiên, áp suất dòng hãm giảm sau mặt sóng vì tính không thuận nghịch, trong khi đó nhiệt độ chất khí tăng mạnh bởi vì sự chuyển đổi động năng thành enthalpy do vận tốc chất khí giảm mạnh (xem Hình 8.19).



Hình 8.19 Sự thay đổi tính chất qua sóng xung kích

Bây giờ chúng ta xây dựng mối quan hệ giữa các đặc trưng dòng chảy trước và sau sóng đối với chất khí lý tưởng có các nhiệt dung là hằng số. Tỷ số nhiệt độ nhận được bằng cách áp dụng Pt. (8....):

$$\frac{T_{01}}{T_1} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma_1^2 \quad \text{và} \quad \frac{T_{02}}{T_2} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma_2^2$$

Với $T_{01}=T_{02}$, ta nhận được:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1+Ma_1^2(k-1)/2}{1+Ma_2^2(k-1)/2} \quad (8.38)$$

Từ phương trình trạng thái:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1}, \quad \rho_2 = \frac{P_2}{RT_2}$$

Ta có:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \frac{P_2 Ma_2 c_2}{P_1 Ma_1 c_1} = \frac{P_2 Ma_2 \sqrt{T_2}}{P_1 Ma_1 \sqrt{T_1}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2 \left(\frac{Ma_2}{Ma_1}\right)^2 \quad (8.39)$$

Kết hợp 2 Pt. (8.38) và (8.39):

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Ma_1 \sqrt{1 + Ma_1^2(k-1)/2}}{Ma_2 \sqrt{1 + Ma_2^2(k-1)/2}} \quad (8.40)$$

Phương trình (8.40) là sự kết hợp 2 phương trình bảo toàn khối lượng và năng lượng; vì vậy đó là phương trình đường cong Fanno cho chất khí lý tưởng với các nhiệt dung là hằng số. Tương tự như vậy phương trình đường cong Rayleigh có thể nhận được bằng cách kết hợp Pt. bảo toàn khối lượng và Pt. động lượng. Từ Pt. (8.36):

$$P_1 - P_2 = \frac{\dot{m}}{A} (V_2 - V_1) = \rho_2 V_2^2 - \rho_1 V_1^2$$

Mặt khác

$$\rho V^2 = \left(\frac{P}{RT}\right)(Ma c)^2 = \left(\frac{P}{RT}\right)(Ma \sqrt{kRT})^2 = Pk Ma^2$$

Vi vậy

$$P_1(1 + kMa_1^2) = P_2(1 + kMa_2^2)$$

hay là

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1 + kMa_1^2}{1 + kMa_2^2} \quad (8.41)$$

Kết hợp 2 Pt. (8.40), (8.41) ta nhận được

$$Ma_2^2 = \frac{Ma_1^2 + 2/(k-1)}{2Ma_1^2 k/(k-1) - 1} \quad (8.42)$$

Pt. (8.42) biểu diễn các điểm cắt của đường cong Fanno và Rayleigh và quan hệ giữa số Mach ở trước và sau sóng xung kích.

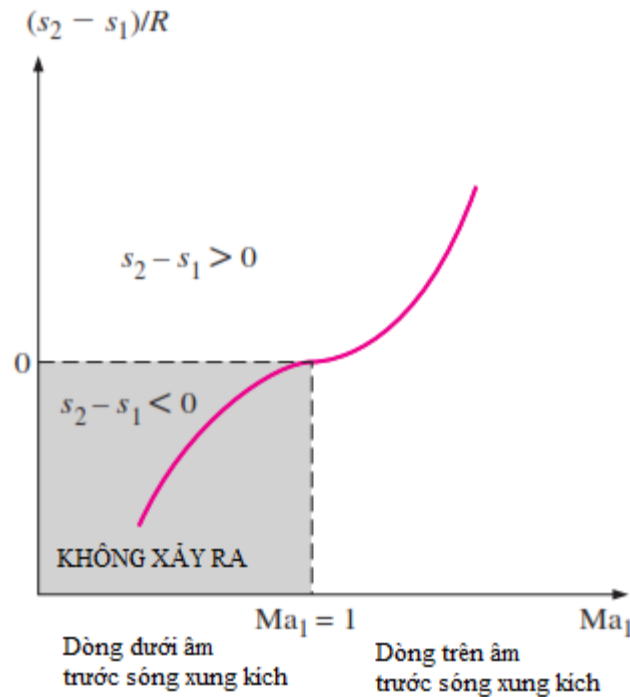
Sự xuất hiện sóng xung kích không chỉ giới hạn trong các ống phun trên âm. Hiện tượng này có thể quan sát thấy ở đầu vào động cơ của máy bay siêu âm, nơi mà không khí đi qua mặt sóng xung kích sau đó vận tốc giảm dần xuống dưới âm trước khi đi vào phần ống mở rộng của động cơ.

Sự thay đổi entropy qua mặt sóng xung kích có thể nhận được bằng cách áp dụng phương trình entropy cho chất khí lý tưởng qua mặt sóng:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (8.43)$$

Phương trình này có thể biểu diễn qua các thông số k , R và Ma_1 thông qua các mối quan hệ đã nhận được trong các mục ở trên.

Đồ thị biểu diễn sự thay đổi entropy không thứ nguyên qua sóng xung kích $(s_2 - s_1)/R$ theo Ma_1 được trình bày trên Hình 8.20. Bởi vì dòng chảy qua sóng xung kích là đoạn nhiệt và không thuận nghịch, vì vậy theo định luật thứ 2 của nhiệt động lực entropy sẽ tăng lên sau mặt sóng. Do đó sóng xung kích không tồn tại với $Ma_1 < 1$ khi mà sự thay đổi entropy là âm. Như vậy đối với dòng đoạn nhiệt, sóng xung kích chỉ tồn tại đối với dòng trên âm với $Ma_1 > 1$.



Hình 8.20 Thay đổi entropy qua mặt sóng xung kích

8.7.1. Ví dụ 8.8: Điểm entropy cực đại trên đường cong Fanno

Hãy chỉ ra rằng điểm entropy cực đại trên đường cong Fanno (điểm *a* của hình 8.18) đối với dòng chảy dừng đoạn nhiệt trong ống có vận tốc là vận tốc âm, $Ma=1$.

Vấn đề: Cần chứng minh rằng điểm entropy cực đại trên đường Fanno đối với dòng dừng đoạn nhiệt có vận tốc bằng vận tốc âm, có nghĩa là $Ma=1$.

Giả thiết: Dòng chảy là dừng, đoạn nhiệt và một chiều.

Phân tích: Khi không có sự trao đổi nhiệt và công, và không có sự thay đổi về thế năng, phương trình năng lượng cho dòng dừng có dạng:

$$h = \frac{V^2}{2} = \text{constant}$$

Lấy vi phân 2 vế:

$$dh + VdV = 0$$

Đối với sóng mỏng, sự thay đổi thiết diện ống dẫn trước và sau sóng là không đáng kể, phương trình bảo toàn khối lượng có thể viết như sau:

$$\rho V = \text{constant}$$

Từ đó:

$$\rho dV + Vd\rho = 0$$

Kết hợp các Pt. ta có:

$$dh - V^2 \frac{d\rho}{\rho} = 0$$

Đây là Pt. của đường Fanno ở dạng vi phân. Tại điểm a (điểm có entropy cực đại) $ds=0$. Khi đó từ mối quan hệ $Tds=dh-vdP$ ta có $dh=vdP=dP/\rho$. Thay vào biểu thức trên, ta nhận được:

$$dh - V^2 \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad \text{tại } s = \text{constant}$$

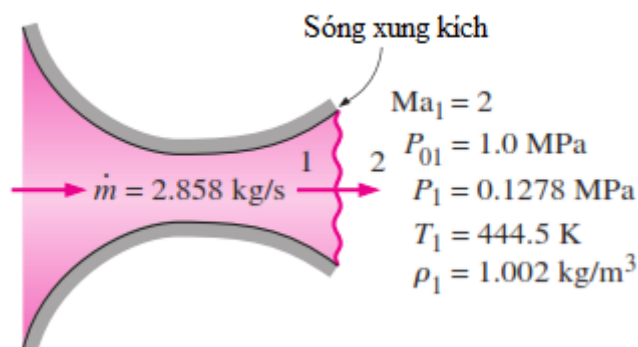
Từ đó

$$V = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_s^{1/2} = a$$

Đây chính là biểu thức của vận tốc âm. Đó là điều cần chứng minh.

8.7.2. Ví dụ 8.9: Sóng xung kích trong ống phun thu hẹp-mở rộng

Nếu dòng chảy không khí qua ống thu hẹp - mở rộng ở Ví dụ 8.7 xảy ra sóng xung kích tại cửa ra (Hình 8.21), xác định các tham số sau sóng: (a) áp suất dòng hãm, áp suất, nhiệt độ và mật độ tại chỗ; (b) thay đổi entropy qua sóng; (c) vận tốc tại cửa ra; và (d) lưu lượng khối lượng qua ống phun. Giả thiết dòng dừng, một chiều và đẳng entropy với $k=1.4$ từ cửa vào của ống đến vị trí của sóng xung kích.



Hình 8.21. Sơ đồ cho ví dụ 8.9

Vấn đề: Dòng chảy không khí qua ống phun thu hẹp-mở rộng xảy ra sóng xung kích tại cửa ra. Xác định các tham số dòng chảy sau sóng xung kích lên.

Giả thiết: (1) Không khí là khí lý tưởng có các nhiệt dung riêng là hằng số; (2) Dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy trước sóng xung kích; (3) Sóng xung kích xuất hiện ở cửa ra.

Tính chất: $c_p=1.005$ kJ/kg.K và $k=1.4$. Hằng số khí của không khí là $R=0.287$ kJ/kg.K.

Phân tích: (a) Các tính chất của chất khí ngay trước mặt sóng xung kích (ký hiệu bằng chỉ số 1) là các giá trị được xác định từ ví dụ 8.7:

$$P_{01}=1.0 \text{ Mpa}, \quad P_1=0.1278 \text{ Mpa}, \quad T_1=444.5 \text{ K}, \quad \rho_1=1.002 \text{ kg/m}^3$$

Các tính chất của chất khí sau mặt sóng (ký hiệu bởi chỉ số 2) được xác định từ điều kiện $Ma_1=2$:

$$Ma_2 = 0.5774, \quad \frac{P_{02}}{P_{01}} = 0.7209, \quad \frac{P_2}{P_1} = 4.5, \quad \frac{T_2}{T_1} = 1.6875, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = 2.6667$$

Từ đó ta có:

$$P_{02}=(0.7209)(1.0)=0.721 \text{ Mpa}$$

$$P_2=(4.5)(0.1278)=0.575 \text{ Mpa}$$

$$T_2=(1.6875)(444.5)=750 \text{ K}$$

$$\rho_2=(2.6667)(1.002)=2.67 \text{ kg/m}^3$$

(b) Sự thay đổi entropy qua mặt sóng được xác định như sau

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1} = (1.005) \ln(1.6875) - (0.287)(4.5) = 0.0942 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Vậy entropy tăng lên sau sóng xung kích, quá trình xảy ra ở đây là không thuận nghịch (có sự thay đổi entropy).

(c) Vận tốc chất khí sau sóng xung kích được xác định bởi $V_2=Ma_2 \times c_2$, ở đây c_2 là vận tốc âm sau sóng và được xác định như sau:

$$V_2 = Ma_2 c_2 = Ma_2 \sqrt{kRT_2} = (0.5774) \sqrt{(1.4)(287)(750.1)} = 317 \text{ m/s}$$

(d) Lưu lượng khối lượng đi qua ống phun thu hẹp-mở rộng với dòng tới hạn ($Ma=1$ tại cổ ống) không bị ảnh hưởng bởi sóng xung kích. Vì vậy lưu lượng khối lượng trong trường hợp này là bằng với lưu lượng khối lượng đã xác định trong ví dụ 8.7:

$$\dot{m} = 2.86 \text{ kg/s}$$

Ví dụ 8.9 cho thấy áp suất dòng hãm và vận tốc giảm trong khi áp suất, nhiệt độ, mật độ và entropy tại chỗ tăng sau sóng xung kích. Sự gia tăng nhiệt độ của chất khí sau sóng xung kích là vấn đề rất đáng quan tâm đối với các kỹ sư tàu không gian, vì vậy vấn đề truyền nhiệt tại các đầu cánh và mũi khí cụ bay trong điều kiện siêu âm là rất quan trọng. Nhiệt độ quá cao chính là nguyên nhân gây thảm họa cho tàu không gian Columbia năm 2003 khi nó quay trở lại bầu khí quyển.

TỔNG KẾT

Trong chương này hiệu ứng nén được lên dòng chảy chất khí đã được nghiên cứu. Khi nghiên cứu dòng chảy nén được, để thuận tiện cần xem xét đại lượng *enthalpy* dòng hãm hay *tổng enthalpy* được định nghĩa là tổng của enthalpy và động năng của chất khí :

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2}$$

Các tính chất của chất khí ở trạng thái dòng hãm được gọi là các tính chất dòng hãm và được ký hiệu với chỉ số 0. Nhiệt độ dòng hãm của chất khí lý tưởng với các nhiệt dung là hằng số được xác định như sau :

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p}$$

Nhiệt độ dòng hãm là nhiệt độ của chất khí lý tưởng đạt được khi được đưa về trạng thái tĩnh bởi qua trình đoạn nhiệt. Các tính chất dòng hãm và các tính chất tại chỗ của chất khí lý tưởng liên hệ với nhau thông qua các phương trình :

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{k/(k-1)} \quad \frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{1/(k-1)}$$

Vận tốc lan truyền nhiễu áp suất nhỏ trong môi trường được gọi là vận tốc âm. Đối với chất khí lý tưởng, vận tốc âm được xác định như sau :

$$c = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{kRT}$$

Số Mach là tỷ số giữa vận tốc của chất khí và vận tốc âm trong cùng trạng thái :

$$\text{Ma} = \frac{V}{c}$$

Dòng chảy được gọi là dòng sonic khi $\text{Ma}=1$, dưới âm khi $\text{Ma}<1$, trên âm khi $\text{Ma}>1$, siêu âm khi $\text{Ma}\gg 1$ và cận âm khi $\text{Ma}\approx 1$.

Tỷ số giữa tính chất dòng hãm và tính chất tại chỗ đối với chất khí lý tưởng với các nhiệt dung hằng số có thể được biểu diễn thông qua số Mach như sau :

$$\begin{aligned} \frac{T_0}{T} &= 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right)\text{Ma}^2 \\ \frac{P_0}{P} &= \left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right)\text{Ma}^2\right]^{k/(k-1)} \\ \frac{\rho_0}{\rho} &= \left[1 + \left(\frac{k-1}{2}\right)\text{Ma}^2\right]^{1/(k-1)} \end{aligned}$$

Khi $Ma=1$, các tỷ số này được gọi là các tính số tới hạn và được ký hiệu với chỉ số trên với dấu (*):

$$\frac{T^*}{T_0} = \frac{2}{k+1} \quad \frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$$

$$\frac{\rho^*}{\rho_0} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/(k-1)}$$

Các ống phun có thiết diện nhỏ dần được gọi là ống phun thu hẹp (hội tụ). Ống phun có thiết diện nhỏ dần sau đó tăng dần được gọi là ống thu hẹp-mở rộng (hội tụ - phân kỳ). Vị trí có thiết diện nhỏ nhất trong ống phun được gọi là *cổ ống*. Vận tốc lớn nhất trong ống thu hẹp mà chất khí có thể đạt được là vận tốc âm. Chất khí chỉ có thể gia tăng vận tốc lên trên âm trong ống thu hẹp-mở rộng. Tất cả dòng chảy trên âm trong ống thu hẹp-mở rộng đều có vận tốc đạt vận tốc âm ở cổ ống.

Áp suất bên ngoài ống phun được gọi là *áp suất ngoài*. Khi áp suất ngoài nhỏ hơn P^* , áp suất tại cửa ống phun thu hẹp bằng với P^* , số Mach tại cửa ống bằng 1, lưu lượng khối lượng đạt cực đại.

Trong một khoảng áp suất ngoài nào đó, chất khí đạt vận tốc âm tại cổ ống trong ống thu hẹp-mở rộng có thể được tăng tốc lên vận tốc trên âm trong phần ống mở rộng và trong phần ống này xuất hiện sóng xung kích vuông góc với sự gia tăng đột ngột về áp suất và nhiệt độ và giảm đột ngột vận tốc xuống dưới âm. Mối liên hệ giữa các thông số dòng chảy trước và sau sóng xung kích được biểu diễn bằng các phương trình như sau:

$$T_{01} = T_{02} \quad Ma_2 = \sqrt{\frac{(k-1)Ma_1^2 + 2}{2kMa_1^2 - k + 1}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2 + Ma_1^2(k-1)}{2 + Ma_2^2(k-1)}$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1 + kMa_1^2}{1 + kMa_2^2} = \frac{2kMa_1^2 - k + 1}{k + 1}$$

Câu hỏi và bài tập

Các thông số dòng hãm

8.1LT Một máy bay bay với vận tốc cao trong không khí tĩnh. Nhiệt độ không khí ở mũi nhọn đầu máy bay khác với vận tốc không khí ở vị trí khác như thế nào?

8.2LT Enthalpy dòng hãm được định nghĩa như thế nào? Nó khác gì với enthalpy thường (tại chỗ).

8.3 Xác định nhiệt độ và áp suất dòng hãm của dòng chảy không khí tại điểm có áp suất 44 kPa, nhiệt độ 245.9 K và vận tốc 470 m/s. *Đáp số: 356 K, 160 kPa.*

8.4 Không khí có nhiệt độ 300 K chuyển động trong kênh với vận tốc (a) 1, (b) 10, (c) 100 và (d) 1000 m/s. Xác định nhiệt độ tại đầu đo Pitot cố định đặt trong kênh cho mỗi trường hợp.

8.5 Tính nhiệt độ và áp suất dòng hãm cho các chất sau đây đang chuyển động trong kênh: (a) hê li ở 0.25 MPa, 50°C và 240 m/s; (b) ni to ở 0.15 MPa, 50°C và 300 m/s; (c) hơi nước ở 0.1 MPa, 350°C và 480 m/s.

8.6 Hỗn hợp cháy nổ đi vào một tua bin khí với áp suất dòng hãm là 1.0 MPa và nhiệt độ dòng hãm là 750°C, và nó được dẫn nở đến áp suất bên ngoài là 100 kPa. Lấy $k=1.33$ và $R=0.287$ kJ/kg.K cho hỗn hợp cháy nổ và giả thiết quá trình dẫn nở là đẳng entropy, xác định công năng của tua bin trên một đơn vị khối lượng dòng chảy.

8.7 Dòng chảy không khí đi qua thiết bị với áp suất dòng hãm là 0.6 MPa, nhiệt độ dòng hãm là 400°C, và vận tốc 750 m/s. Xác định áp suất tĩnh và nhiệt độ không khí trong trạng thái đã cho. *Đáp số: 518.6 K, 0.23 MPa.*

Vận tốc âm và số Mach

8.8LT Âm thanh là gì? Nó được tạo ra như thế nào? Nó được lan truyền như thế nào? Nó có thể lan truyền trong chân không không?

8.9LT Giả thiết quá trình lan truyền sóng âm là đẳng entropy có phù hợp không? Hãy giải thích.

8.10LT Vận tốc âm của một môi trường cho trước là một giá trị cố định, hay nó có thể thay đổi khi một số đặc trưng của môi trường thay đổi? Hãy giải thích.

8.11LT Trong không khí ấm hơn hay lạnh hơn thì vận tốc âm nhanh hơn?

8.12LT Ở cùng một nhiệt độ, môi trường nào có vận tốc âm lớn nhất: không khí, khí hê li hay khí ác gông?

8.13LT Trong môi trường nào vận tốc âm lớn hơn: không khí ở nhiệt độ 20°C và 1 atm hay không khí ở nhiệt độ 20°C và 5 atm.

8.14LT Số Mach của dòng chảy với vận tốc không đổi có thay đổi không? Hãy giải thích.

8.15 Xác định vận tốc âm thanh của không khí ở (a) 300 K và (b) 1000 K. Xác định số Mach của máy bay bay ở vận tốc 240 m/s cho cả hai trường hợp.

8.16 Khí cacbonic (CO_2) đi vào một ống phun đoạn nhiệt ở nhiệt độ 1200 K và vận tốc 50 m/s và ra khỏi ống với nhiệt độ 400 K. Giả thiết các hệ số nhiệt dung riêng là không đổi, xác định số Mach (a) tại cửa vào và (b) tại cửa ra của ống. Đánh giá độ chính xác của giả thiết về các hệ số nhiệt dung riêng. *Đáp số: (a) 0.0925, (b) 3.73.*

8.17 Khí ni tơ đi vào một thiết bị trao đổi nhiệt với áp suất 150 kPa, 10°C và 100 m/s, và nhận được nhiệt lượng 120 kJ/kg khi đi qua thiết bị. Khí ni tơ ra khỏi thiết bị với áp suất 100 kPa và vận tốc 200 m/s. Xác định số Mach của khí ni tơ tại cửa vào và cửa ra của thiết bị.

8.18 Máy bay Airbus A-340 có trọng lượng cất cánh tối đa là 260000 kg, có chiều dài 64 m, sải cánh rộng 60 m, vận tốc cực đại 945 km/s, số chỗ cho hành khách là 271, độ cao bay cap nhất là 14000 m, cự ly bay tối đa là 12000 km. Nhiệt độ không khí ở độ cao đang bay là -60°C. Xác định số Mach của máy bay trong các điều kiện tới hạn kể trên.

8.19 Không khí dẫn nở đẳng entropy từ 1.5 MPa và 60°C đến 0.4 MPa. Tính tỷ số giữa vận tốc âm thanh ở trạng thái ban đầu và trạng thái cuối.

Dòng chảy một chiều đẳng entropy

8.20LT Xem xét ống phun thu hẹp với dòng chảy tới hạn tại cửa ra. Nếu bây giờ cửa ống thu hẹp lại mà điều kiện đầu vào vẫn giữ nguyên. Điều gì sẽ xảy ra (a) vận tốc khí tại cửa ra và (b) lưu lượng khối lượng qua ống phun.

8.21LT Chất khí đang ở vận tốc trên âm đi vào một ống thu hẹp đoạn nhiệt. Thảo luận xem các ảnh hưởng như thế nào (a) vận tốc, (b) nhiệt độ, (c) áp suất và (d) mật độ của chất khí.

8.22LT Chất khí đang ở vận tốc trên âm đi vào một ống mở rộng đoạn nhiệt. Thảo luận xem các ảnh hưởng như thế nào (a) vận tốc, (b) nhiệt độ, (c) áp suất và (d) mật độ của chất khí.

8.23LT Chất khí đang ở vận tốc dưới âm đi vào một ống thu hẹp đoạn nhiệt. Thảo luận xem các ảnh hưởng như thế nào (a) vận tốc, (b) nhiệt độ, (c) áp suất và (d) mật độ của chất khí.

8.24LT Chất khí đang ở vận tốc dưới âm đi vào một ống mở rộng đoạn nhiệt. Thảo luận xem các ảnh hưởng như thế nào (a) vận tốc, (b) nhiệt độ, (c) áp suất và (d) mật độ của chất khí.

8.25LT Một chất khí có nhiệt độ và áp suất cho trước trong bình nén tăng tốc đến $Ma=2$ trong ống phun thu hẹp-mở rộng và đến $Ma=3$ trong ống khác. Có thể nói gì về áp suất tại các cổ ống (có thiết diện nhỏ nhất) của hai ống này.

8.26LT. Có thể tăng tốc chất khí lên vận tốc trên âm trong ống thu hẹp không?

8.27 Không khí đi vào ống phun thu hẹp-mở rộng ở áp suất 1.2 MPa với vận tốc không đáng kể. Hỏi áp suất thấp nhất có thể nhận được ở cổ ống là bao nhiêu?
Đáp số: 634 kPa

8.28 Khí Hê li đi vào ống phun thu hẹp-mở rộng ở áp suất 0.7 MPa, 800 K và tốc độ 100 m/s. Hỏi nhiệt độ và áp suất thấp nhất có thể nhận được ở cổ ống là bao nhiêu?

8.29 Tính nhiệt độ, áp suất và mật độ tới hạn của (a) không khí ở 200 kPa, 100 °C và 250 m/s, và (b) Hê li ở 200 kPa, 40 °C và 300 m/s.

8.30 Dioxid các bon ở trạng thái tĩnh với áp suất 800 kPa và nhiệt độ 400 K được tăng tốc đẳng áp đẳng entropy lên chuyển động với số Mach là 0.6. Xác định nhiệt độ và áp suất của khí dioxid các bon sau khi tăng tốc. *Đáp số: 380 K, 636 kPa*

8.31 Không khí ở 200 kPa, 100 °C và số Mach $Ma=0.8$ chuyển động trong kênh. Tính vận tốc và áp suất, nhiệt độ và mật độ dòng hãm của không khí.

8.32 Máy bay được thiết kế để bay ở số Mach $Ma=1.4$ ở độ cao 8000 m, nơi có nhiệt độ là 236.15 K. Xác định nhiệt độ điểm dừng trên cạnh đầu của cánh.

Dòng chảy đẳng entropy qua ống phun

8.33LT Xem xét dòng dưới âm trong ống phun thu hẹp với điều kiện đầu vào cho trước. Hiệu ứng gì xảy ra khi hạ áp suất bên ngoài xuống áp suất tới hạn (a) đối với vận tốc cửa ra, (b) đối với áp suất cửa ra, và (c) đối với lưu lượng khối lượng của ống phun.

8.34LT Xem xét dòng dưới âm trong ống phun thu hẹp với điều kiện đầu vào cho trước và điều kiện áp suất tới hạn tại cửa ra. Hiệu ứng gì xảy ra khi hạ áp suất bên ngoài xuống dưới áp suất tới hạn, đối với: (a) vận tốc cửa ra, (b) áp suất cửa ra, (c) lưu lượng khối lượng của ống.

8.35LT Xem xét một ống phun thu hẹp và một ống phun thu hẹp-mở rộng có cùng diện tích mặt cắt cổ ống (thiết diện hẹp nhất). Với cùng điều kiện đầu vào (và áp suất bên ngoài), có thể so sánh lưu lượng khối lượng của hai ống phun không?

8.36LT Số Ma^* khác với số Ma khác như thế nào?

8.37LT Điều gì xảy ra nếu chúng ta cố gắng giảm tốc độ của một chất khí chuyển động trên âm trong ống phun mở rộng?

8.38LT Điều gì xảy ra nếu chúng ta cố gắng tăng tốc độ của một chất khí chuyển động trên âm trong ống phun mở rộng?

8.39LT Xem xét dòng chảy đẳng entropy trong ống thu hẹp mở rộng với vận tốc dưới âm ở cổ ống. Hiệu ứng của phần mở rộng là như thế nào đối với: (a) vận tốc, (b) áp suất và (c) lưu lượng khối lượng của chất khí?

8.40LT Có thể tăng tốc chất khí lên vận tốc trên âm với vận tốc khác vận tốc âm ở cổ ống? Giải thích.

8.41 Giải thích tại sao lưu lượng cực đại trên một đơn vị diện tích của chất khí lý tưởng cho trước chỉ phụ thuộc vào $P_0/\sqrt{T_0}$. Đối với chất khí lý tưởng với $k=1.4$, $R=0.287$ kJ/kg.K, hãy tìm hằng số a sao cho $\frac{\dot{m}}{A^*} = aP_0/\sqrt{T_0}$.

8.42 Đối với chất khí lý tưởng, hãy thu nhận công thức cho tỷ số vận tốc âm của dòng tới hạn và vận tốc âm của dòng hãm a^*/a_0 .

8.43 Không khí đi vào ống phun ở 0.2 MPa, 350 K và vận tốc 150 m/s. Giả thiết dòng đẳng entropy, xác định áp suất và nhiệt độ của không khí ở vị trí mà vận tốc không khí bằng vận tốc âm thanh. Xác định tỷ số diện tích mặt cắt tại vị trí đó và diện tích cửa vào. *Đáp số: 301.0 K, 0.118 MPa, 0.629*

8.44 Làm lại bài 8.43 nếu vận tốc không khí tại cửa vào là không đáng kể.

8.45 Không khí đi vào ống phun thu hẹp-mở rộng ở 0.8 MPa với vận tốc không đáng kể. Giả thiết dòng chảy là đẳng entropy, xác định áp suất bên ngoài khi áp suất tại cửa ra có số Mach $Ma=1.8$. *Đáp số: 0.139 MPa*

8.46 Khí ni tơ đi vào ống phun thu hẹp-mở rộng ở 700 kPa và 400 K với vận tốc không đáng kể. Xác định vận tốc, áp suất, nhiệt độ và mật độ tới hạn trong ống.

8.47 Chất khí lý tưởng với $k=1.4$ trong ống phun có $Ma=2.4$ tại vị trí có diện tích là 25 cm². Giả thiết dòng chảy đẳng entropy, xác định diện tích mặt cắt có số Mach là $Ma=1.2$.

8.64 Làm lại bài 8.47 với $k=1.33$

8.48 Không khí ở 900 kPa và 400 K đi vào ống phun thu hẹp với vận tốc không đáng kể. Cổ ống có diện tích 10 cm². Giả thiết dòng chảy đẳng entropy, tính và vẽ đồ thị áp suất, vận tốc cửa ra và lưu lượng khối lượng với áp suất bên ngoài P_b từ 0.1 MPa đến 0.9 MPa.

8.49 Giải quyết bài 8.48 với điều kiện đầu vào là 1 MPa và 1000 K.

Chương 9. MỘT SỐ BÀI TOÁN DÒNG CHẢY KHÔNG DỪNG

Trong các Chương ở trên, chúng ta đã tập trung nghiên cứu các dòng chảy ổn định vì đó là sự quan tâm của phần lớn các vấn đề thiết kế kỹ thuật. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, đặc trưng không dừng của dòng chảy là không thể bỏ qua. Một vài ví dụ về dòng chảy không dừng sẽ được thảo luận trong chương này. Chúng ta đã biết rằng dòng chảy rối là dòng chảy không dừng theo đúng nghĩa “không dừng”, tuy nhiên giá trị trung bình theo thời gian của các đặc trưng dòng chảy có thể là hằng số trong khoảng thời gian nhất định, dòng chảy với tính chất này được gọi là dòng chảy dừng trung bình. Ở đây chúng ta sẽ nghiên cứu các trường hợp mà các giá trị trung bình theo thời gian cũng thay đổi liên tục.

Chúng ta sẽ nghiên cứu hai loại dòng chảy không dừng. Trường hợp thứ nhất là khi mực nước hay áp suất trong bồn chứa tăng hoặc giảm liên tục vì vậy mà lưu lượng xả ra từ bồn cũng thay đổi liên tục, tuy nhiên sự thay đổi trong trường hợp này được giả thiết là chậm để các hiệu ứng quán tính có thể bỏ qua. Trường hợp thứ hai là trường hợp vận tốc chất lỏng thay đổi nhanh do đóng hoặc mở van. Trong trường hợp thứ nhất, sự thay đổi là tương đối chậm, các lực tác dụng lên dòng chảy là hoàn toàn giống với trường hợp dòng chảy dừng. Trường hợp thứ hai, sự thay đổi là rất nhanh, đòi hỏi phải xem xét đến các lực đàn hồi và các hiệu ứng quán tính.

MỤC TIÊU

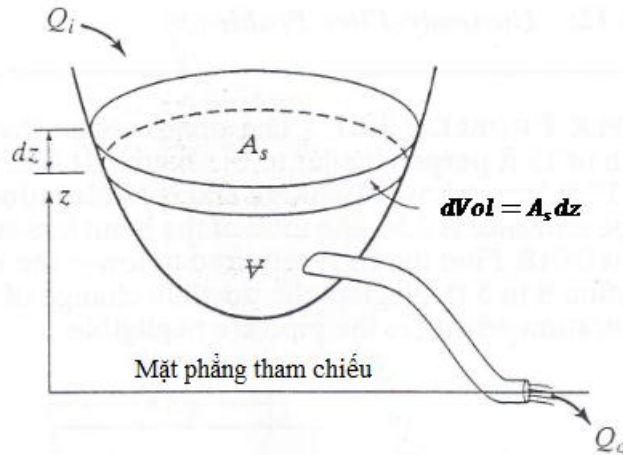
Khi đọc xong chương này sinh viên có thể:

- Có được hiểu biết về sự khác nhau giữa dòng chảy dừng và không dừng
- Có thể tính toán được các đặc trưng dòng chảy của một số dòng chảy không dừng trong kỹ thuật

9.1. Lưu lượng xả với cột nước thay đổi

Khi dòng chảy xảy ra với cột nước thay đổi, lưu lượng xả sẽ thay đổi liên tục. Chúng ta xem xét trường hợp như mô tả trên Hình 9.1 với Vol là thể tích chất lỏng chứa trong bồn tại một thời điểm cho trước. Ký hiệu lưu lượng vào bồn là Q_i và lưu lượng xả là Q_o . Khi đó sự thay đổi thể tích chất lỏng trong khoảng thời gian nhỏ dt được xác định bởi:

$$dVol = Q_i dt - Q_o dt$$



Hình 9.1 Lưu lượng xả với cột nước thay đổi

Nếu A_s là diện tích mặt thoáng của thể tích Vol và dz là thay đổi cột nước, khi đó sự thay đổi thể tích sẽ là $dVol=A_s dz$. Thay vào phương trình trên ta có:

$$A_s dz = Q_i dt - Q_o dt \quad (9.1)$$

Các đại lượng Q_i và Q_o đều có thể thay đổi theo thời gian. Lưu lượng ra Q_o thường là hàm số của biến z . Ví dụ nếu chất lỏng chảy qua một vòi nhỏ có diện tích A với độ chênh cột nước là z thì $Q_o = C_d A \sqrt{2gz}$, ở đây C_d là hệ số lưu lượng và z là biến số. Nếu chất lỏng chuyển động qua một đập tràn có độ dài L thì $Q_o=CLh^{3/2}$, ở đây C là hệ số và h là chiều cao cột nước (xem Chương 4, mục 4.5). Trong cả hai trường hợp z và h đều là chiều cao mặt thoáng chất lỏng so với mặt nằm ngang tham chiếu nào đó. Lưu lượng vào Q_i thường thay đổi theo thời gian, tuy nhiên, ở đây chúng ta sẽ chỉ xem xét ở đây trường hợp $Q_i=0$ hoặc $Q_i=constant$.

Biến đổi Pt. (9.1) và lấy tích phân để thu nhận t là thời gian mực nước thay đổi từ mức z_1 đến z_2 . Ta có:

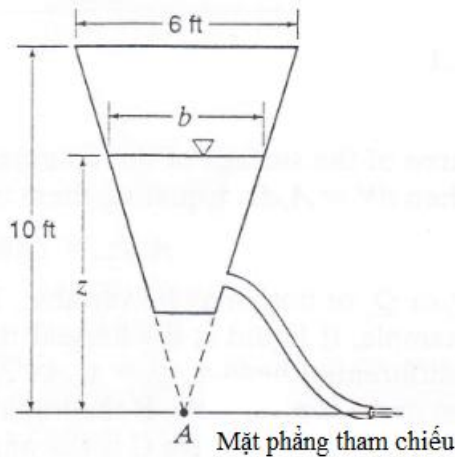
$$t = \int_{z_1}^{z_2} \frac{A_s dz}{Q_i - Q_o} \quad (9.2)$$

Vế phải của Pt. (9.2) có thể lấy tích phân nếu Q_i là hằng số và nếu A_s và Q_o có thể biểu diễn là hàm số của z . Trong trường hợp hồ chứa tự nhiên, chúng ta không thể biểu diễn diện tích mặt thoáng của hồ là một hàm đơn giản của z , nhưng mối quan hệ có thể nhận được từ bản đồ địa hình lòng hồ. Pt.(9.2) có thể giải bằng phương pháp đồ họa bằng cách vẽ quan hệ $A_s/(Q_i-Q_o)$ theo z . Diện tích dưới đường cong quan hệ sẽ là giá trị của t .

Chúng ta lưu ý rằng giá trị Q_o được xác định từ bài toán cho dòng dừng. Điều đó không chính xác hoàn toàn vì với dòng không dừng phương trình năng lượng còn có thêm thành phần gia tốc (xem Pt. (9.6)). Thành phần này sẽ làm cho bài toán khó giải hơn. Trong các trường hợp mà z không thay đổi nhanh, sai số từ thành phần gia tốc có thể bỏ qua. Vì vậy sử dụng Q_o của dòng dừng là một phương pháp xấp xỉ.

9.1.1. Ví dụ 9.1 Thời gian xả nước trong một bồn chứa

Một bồn chứa hình nôm như trong Hình 9.1 có chiều rộng là 15 ft (vuông góc với mặt giấy). Nước được xả ra trong đường ống có đường kính 3 inch, dài 10 ft và đầu cuối của đường ống ở độ cao của mặt phẳng tham chiếu với $z=0$. Hệ số tổn thất đầu vào ống là 0.5, tổn thất do độ cong ống là 0.2 và hệ số ma sát là $f=0.018$. Tìm thời gian để mặt thoáng nước hạ thấp từ cao độ 8 ft xuống 5 ft. Giả thiết rằng hiệu ứng gia tốc trong đường ống là không đáng kể.



Hình 9.2 Sơ đồ cho ví dụ 9.1

Vấn đề: Mục nước ban đầu, hình dáng và kích thước một bồn chứa nước được cho trước. Xác định thời gian xả nước để mực nước hạ thấp xuống một độ cao nhất định.

Giả thiết: (1) Hệ số ma sát trong đường ống xả nước là không đổi; (2) hiệu ứng gia tốc trong đường ống là không đáng kể.

Phân tích: Viết Pt. năng lượng tổng quát từ mặt thoáng tới miệng ống xả, ta có::

$$0 + z + 0 - \left[0.5 + 0.2 + 0.018 \left(\frac{10}{0.25} \right) \right] \frac{V^2}{2g} = 0 + 0 + \frac{V^2}{2g}$$

$$z - 1.420 \frac{V^2}{2g} = \frac{V^2}{2g}; \quad V = 5.16z^{1/2}$$

$$Q_o = AV = \frac{\pi}{4} (0.25)^2 5.16z^{1/2} = 0.253z^{1/2}$$

Theo tính chất đồng dạng tam giác như trên hình vẽ, ta nhận được:

$$\frac{b}{z} = \frac{6}{10}; \quad \text{so } b = 0.6z$$

Vì vậy diện tích mặt thoáng được biểu diễn theo hàm số của z như sau:

$$A_s = 15b = 15(0.6)z = 9z$$

Từ đó:

$$t = \int_8^5 \frac{9z dz}{0 - 0.253z^{1/2}} = -\frac{9}{0.253} \int_8^5 z^{1/2} dz$$

$$= -35.5 \left[\frac{2}{3} z^{3/2} \right]_8^5 = 271 \text{ s}$$

Thảo luận: Nếu độ cao của miệng ống xả thay đổi thì thời gian xả cũng thay đổi, phụ thuộc vào giới hạn của tích phân (9.2).

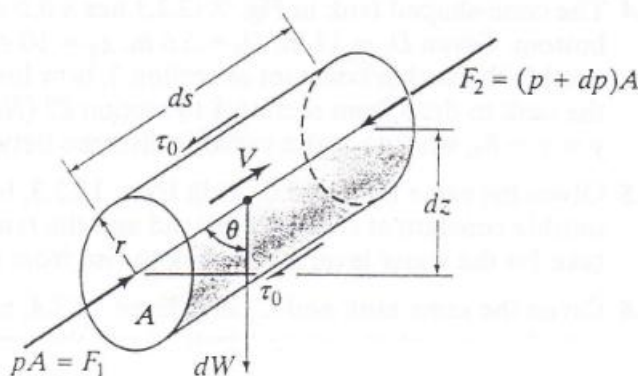
9.2. Dòng chảy không dừng của chất lỏng không nén được trong đường ống

Khi dòng chảy trong đường ống là không dừng, chúng ta sẽ chỉ ra rằng phương trình năng lượng sẽ có thêm thành phần gia tốc, còn gọi là *cột cao gia tốc* (accelerative head) $h_a = (L/g)(dV/dt)$, đại diện cho hiệu ứng gia tốc của chất lỏng. Chúng ta hãy xem xét một phần tử của chất lỏng theo chiều dài trong đường ống, như trên Hình 9.2. Trong trường hợp này, khi áp dụng định luật thứ 2 của Newton $\sum F = ma$, chúng ta sẽ biểu diễn gia tốc theo biểu thức $a = DV/Dt = V(dV/ds) + dV/dt$. Áp dụng cho một phần tử hình trụ trên Hình 9.2 ta nhận được:

$$F_1 - F_2 - dW \cos \theta - \tau_0 A_s = ma$$

Hay là

$$pA - (p + dp)A - \rho g A ds \left(\frac{dz}{ds} \right) - \tau_0 (2\pi r) ds = \rho A ds \left(V \frac{dV}{ds} + \frac{dV}{dt} \right)$$



Hình 9.2 Phần tử trong đường ống

Chia cả 2 vế cho $\gamma = \rho g$ và $A = \pi r^2$, ta có:

$$-\frac{dp}{\gamma} - dz - \frac{2\tau_0 ds}{\gamma r} = \frac{V dV}{g} + \frac{ds}{g} \frac{dV}{dt} \quad (9.3)$$

Với $d(V^2)/dt = 2V dV/dt$, từ đó:

$$-\frac{dp}{\gamma} - dz - d\frac{V^2}{2g} - \frac{2\tau_0 ds}{\gamma r} - \frac{ds}{g} \frac{dV}{dt} = 0 \quad (9.4)$$

Phương trình vi phân này có thể áp dụng cho cả chất lỏng nén được và không nén được. Trong trường hợp chất lỏng nén được $\gamma = \text{constant}$, lấy tích phân dọc theo đường ống từ điểm 1 đến điểm 2 ta có:

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} + z_1 - z_2 + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} - \frac{2\tau_0 L}{\gamma r} - \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = 0$$

Sử dụng khái niệm bán kính thủy lực $R_h = D/4 = r/2$, ta nhận được:

$$\left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}\right)_1 - \frac{\tau_0 L}{\gamma R_h} - \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = \left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}\right)_2 \quad (9.5)$$

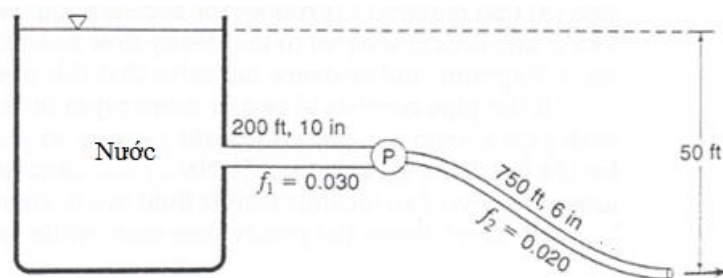
Từ đó ta có:

$$\left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}\right)_1 - h_f - \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = \left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g}\right)_2 \quad (9.6)$$

Trong đó h_f là tổn thất do ma sát thành ống từ điểm 1 đến điểm 2.

9.2.1. Ví dụ 9.2: Thay đổi lưu lượng dòng chảy trong đường ống do thay đổi tốc độ bơm

Khi một bơm ly tâm trong hệ thống đường ống như Hình 9.3 quay với vận tốc 1650 rpm, lưu lượng dòng chảy là ổn định và có giá trị 1600 gpm. Giả thiết rằng bơm đột ngột tăng tốc lên 2000 rpm. Xác định lưu lượng dòng chảy theo hàm của thời gian. Giả thiết rằng cột năng lượng tăng lên do vận tốc bơm tỷ lệ với bình phương vận tốc quay.



Hình 9.3 Sơ đồ của Ví dụ 9.2

Vấn đề: Xác định lưu lượng thay đổi theo thời gian khi vòng quay của bơm thay đổi đột ngột.

Giả thiết: cột năng lượng tăng lên do vận tốc bơm tỷ lệ với bình phương vận tốc quay.

Phân tích: Viết phương trình năng lượng tổng quát cho hệ thống từ mặt thoáng đến miệng ống xả, ta có:

$$0 + 50 + 0 - 0.5 \frac{V_1^2}{2g} - f_1 \frac{L_1}{D_1} \frac{V_1^2}{2g} + h_p - f_2 \frac{L_2}{D_2} \frac{V_2^2}{2g} - \frac{L_1}{g} \frac{dV_1}{dt} - \frac{L_2}{g} \frac{dV_2}{dt} = 0 + 0 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Từ phương trình bảo toàn khối lượng ta có:

$$V_1 = \frac{A_2 V_2}{A_1} = \left(\frac{6}{10}\right)^2 V_2 = 0.36 V_2$$

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{A_2}{A_1} \frac{dV_2}{dt} = 0.36 \frac{dV_2}{dt}$$

Vì vậy:

$$50 - 0.5 \frac{(0.36 V_2)^2}{2g} - 0.030 \left(\frac{200}{10/12}\right) \frac{(0.36 V_2)^2}{2g} + h_p - 0.020 \left(\frac{750}{6/12}\right) \frac{V_2^2}{2g} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{200}{g} (0.36) \frac{dV_2}{dt} + \frac{750}{g} \frac{dV_2}{dt}$$

Rút gọn lại, ta nhận được

$$50 + h_p = 32.0 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{822}{g} \frac{dV_2}{dt} \quad (1)$$

Với dòng ban đầu ổn định ($dV/dt=0$) ta có

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{1600/449}{(\pi/4)(0.5)^2} = 18.16 \text{ fps}$$

$$h_p = 32 \frac{V_2^2}{2g} - 50 = 113.8 \text{ ft}$$

Giả thiết tổn thất tỷ lệ với bình phương tỷ lệ thay đổi vòng quay của bơm ta có

$$h_p = 113.8 \left(\frac{2000}{1650}\right)^2 = 167.2 \text{ ft}$$

Thay vào (1) ta nhận được:

$$50 + 167 = 32 \frac{V_2^2}{2g} + \frac{822}{g} \frac{dV_2}{dt}$$

Sử dụng quan hệ $V_2=Q/A_2=5.09Q$, ta có:

$$217 = 12.89Q^2 + 130.0 \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

Lấy tích phân Pt.(2) với $t=0$, $Q=3.57$ cfs (=1600 gpm)

$$\int_0^t dt = 130 \int_{3.57}^Q \frac{dQ}{217 - 12.89Q^2}$$

$$t = 1.229 \ln \frac{4.10 + Q}{4.10 - Q} - 3.27$$

$$e^{0.814t+2.66} = \frac{4.10 + Q}{4.10 - Q}$$

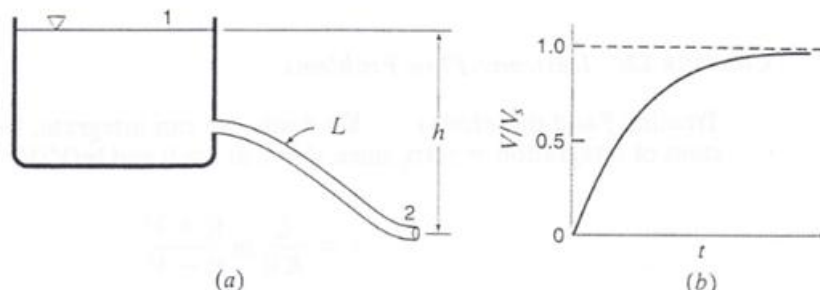
Từ đó ta nhận được:

$$Q = 4.10 \frac{e^{0.814t+2.66} - 1}{e^{0.814t+2.66} + 1}$$

Thảo luận: (1) Với t rất lớn, Q tiến tới 4.10 cfs (=1840 gpm) và $h_p=169$ ft; (2) Chúng ta không thể tăng tốc độ của bơm đột ngột. Vì vậy, trong thực tế để giải quyết bài toán một cách chính xác, chúng ta cần biết đặc tính hoạt động của bơm và động cơ và mô men quán tính của hệ thống quay.

9.3. Sự tiệm cận đến dòng chảy dừng

Vấn đề xác định thời gian để dòng chảy trở thành dòng chảy dừng trong đường ống khi một van trong hệ thống mở đột ngột có thể thực hiện dựa trên phương trình (9.6). Ngay sau khi van được mở (Hình 9.4), cột năng lượng h sẵn có sẽ tăng tốc dòng chảy. Khi dòng chảy bắt đầu, vận tốc tăng dần và cột năng lượng dòng chảy sẽ giảm dần do ma sát dọc đường ống và các tổn thất cục bộ. Giả thiết rằng tổng tổn thất là h_L và có thể biểu diễn dưới dạng $k_L V^2/2g$, ở đây k_L là hằng số, thực tế thì k_L có thể thay đổi theo vận tốc.



Hình 9.4 Tiệm cận đến dòng chảy dừng (V_s là vận tốc dòng chảy dừng)

Khi đó ta có:

$$k_L = f \frac{L}{D} + \sum k$$

Trong đó $\sum k$ là tổng các hệ số tổn thất cục bộ. Viết Pt. (9.6) giữa 2 mặt cắt 1 và 2 trong Hình 9.4(a), với $P_1=P_2=V_1=0$ và $z_1-z_2=h$, ta nhận được:

$$h - \frac{V_2^2}{2g} = h_L + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

$$h = \left(\frac{fL}{D} + \sum k \right) \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

$$h = K \frac{V^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}, \quad \text{với} \quad K = \frac{fL}{D} + 1 + \sum k$$

Ký hiệu V_s là vận tốc trong trường hợp dòng chảy dừng ($dV/dt=0$), ta có:

$$V_s = \sqrt{\frac{2gh}{K}} \quad (9.7)$$

Rút h và thế vào Pt. năng lượng, ta nhận được

$$dt = \frac{2L}{K} \frac{dV}{V_s^2 - V^2}$$

Với f và K là hằng số, lấy tích phân phương trình trên với điều kiện $V=0$ khi $t=0$, ta có:

$$t = \frac{L}{KV_s} \ln \frac{V_s + V}{V_s - V} \quad (9.8)$$

Phương trình này chỉ ra rằng V tiệm cận V_s và tiến tới V_s khi thời gian tiến tới vô cùng (Hình 9.4b). Tuy nhiên cần phải nhớ rằng đó là trường hợp lý tưởng. Trong thực tế sẽ xuất hiện sóng đàn hồi và hiện tượng tiêu hao năng lượng vì vận tốc V_s sẽ đạt được trong thời gian hữu hạn. Cũng cần ghi nhớ rằng, Pt. (9.7) và (9.8) có thể áp dụng cho trường hợp xả tự do và xả ngầm.

9.3.1. Ví dụ 9.3: Biến thiên lưu lượng giữa hai bồn chứa thông nhau

Hai bồn chứa nước lớn nối với nhau bằng đường ống có đường kính 100 mm với $f=0.02$ dài 15 m. Chênh lệch mực nước giữa hai bồn là 2.0 m. Một van trong đường ống ban đầu đóng được mở đột ngột. (a) Xác định thời gian để lưu lượng dòng chảy đạt $1/4$, $1/2$ và $3/4$ lưu lượng dòng ổn định. Giả thiết mực nước hai bồn là hằng số. (b) Lập lại bài toán với đường ống dài 150 m và 1500 m với các thông số khác giữ nguyên. Tổn thất cửa vào là tương đương cửa vuông-sắc cạnh ($k_L=0.5$).

Vấn đề: Đường ống nối giữa hai bồn chứa có chênh lệch mực nước cho trước. Xác định biến thiên lưu lượng giữa hai bình khi van được mở đột ngột.

Giả thiết: (1) Dòng chảy không nén được; (2) hệ số ma sát và hệ số tổn thất cục bộ cho trước.

Phân tích:

(a) Với $L=15$ m, cửa vào vuông góc-sắc cạnh, xả chìm $L/D=15/0.1=150$, tổn thất cục bộ là quan trọng, do đó $\Sigma k=0.5+1=1.5$. Vậy

$$K = k_L = \frac{fL}{D} + \sum k = 0.02 \frac{15}{0.10} + 1.5 = 4.5$$

Đối với dòng dừng, từ Pt. (9.7) ta có:

$$V_s = \sqrt{\frac{2gH}{K}} = \sqrt{\frac{2(9.81)2}{4.5}} = 2.95 \text{ m/s}$$

Đối với dòng không dừng sử dụng (9.8) ta có:

$$t = \frac{L}{KV_s} \ln \frac{V_s + V}{V_s - V} = \frac{15}{4.5(2.95)} \ln \frac{2.95 + V}{2.95 - V} = 1.129 \ln \frac{2.95 + V}{2.95 - V}$$

Thay các giá trị Q tương ứng ta nhận được:

Q	$V, \text{ m/s}$	$\frac{2.95 + V}{2.95 - V}$	\ln	For $L = 15$ m $t, \text{ s}$
$0.25Q_s$	0.74	1.667	0.511	0.577
$0.50Q_s$	1.48	3.00	1.099	1.240
$0.75Q_s$	2.21	7.00	1.946	2.197

(b) Đối với trường hợp $L=150$ m và 1500 m, tổn thất cục bộ có thể bỏ qua, khi đó

Q	$L = 150$ m	$L = 1500$ m
$0.25Q_s$	2.18 s	7.04 s
$0.50Q_s$	4.69 s	15.15 s
$0.75Q_s$	8.30 s	26.84 s

9.4. Vận tốc sóng áp suất trong đường ống

Hiện tượng dòng chảy không dừng với các tính chất thay đổi nhanh thường liên quan đến sự lan truyền sóng áp suất. Vận tốc truyền sóng trong môi trường đàn hồi được xác định như sau [xem [3] Mục 13.3]:

$$c = \sqrt{\frac{E_v}{\rho}} = \sqrt{\frac{g}{\gamma} E_v}$$

(9.9)

ở đây E_v là mô đun đàn hồi thể tích của môi trường đàn hồi. Đối với nước, giá trị thông thường là $E_v = 2.7 \times 10^6$ kN/m² (300000 psi), vì vận tốc truyền sóng trong nước là khoảng 1440 m/s (4720 fps), phụ thuộc vào nhiệt độ.

Đối với nước trong đường ống, vận tốc truyền sóng áp suất bị giảm đi do sự giãn nở của đường ống. Trong đó E_v được thay thế bởi mô đun đàn hồi chung (hay hỗn hợp) E_j , được xác định bởi:

$$E_j = \frac{E_v}{1 + \frac{D}{t} \frac{E_v}{E}} = \frac{1}{\frac{1}{E_v} + \frac{D}{tE}}$$

ở đây D là đường kính của ống, t là độ dày thành ống và E là mô đun đàn hồi của vật liệu thành ống. Lưu ý rằng D/t và E_v/E là các đại lượng không thứ nguyên, do đó các hệ đơn vị bất kỳ phù hợp có thể được sử dụng để tính các tỷ số này.

Vận tốc truyền sóng áp suất trong chất lỏng đàn hồi trong đường ống đàn hồi được xác định bởi:

$$c_j = \sqrt{\frac{E_j}{\rho}} = \sqrt{\frac{g}{\gamma} E_j} = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{D}{t} \frac{E_v}{E}}} = \sqrt{\frac{1}{\rho \left(\frac{1}{E_v} + \frac{D}{tE} \right)}} \quad (9.10)$$

Các giá trị mô đun đàn hồi của thép, gang và bê tông là khoảng 30 000 000, 15 000 000, và 3 000 000, tương ứng. Đối với các đường ống bình thường vận tốc c_j thường nằm trong khoảng 600 đến 1200 m/s (2000 đến 4000 fps), tuy nhiên luôn nhỏ hơn $c = 1440$ m/s (4720 fps), sự thay đổi nhiệt độ có thể làm giá trị này thay đổi trong khoảng 7.5%.

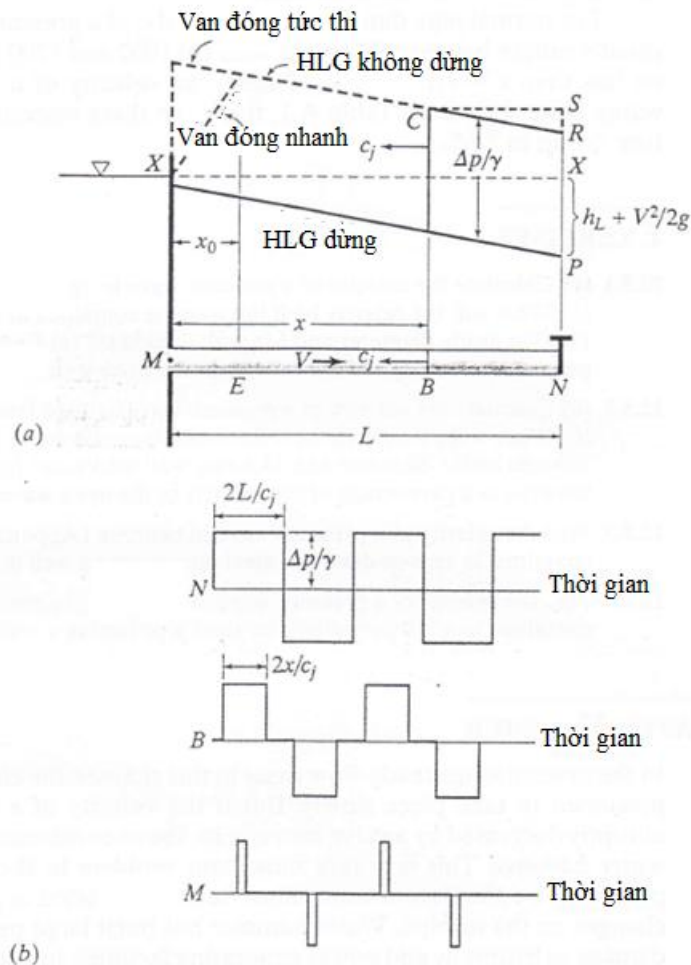
9.5. Búa nước

Trong những mục trước về các trường hợp dòng chảy không dừng, sự thay đổi vận tốc được giả thiết là xảy ra chậm. Tuy nhiên, trong thực tế vận tốc chất lỏng trong đường ống có thể hạ thấp đột ngột bởi thao tác đóng van, hiện tượng thay đổi lưu lượng đột ngột trong đường ống được gọi là hiện tượng **búa nước**. Đây là vấn đề rất quan trọng thường xảy ra trong các nhà máy thủy điện, khi mà dòng chảy phải thay đổi nhanh để thay đổi công suất phát điện của tua bin. Búa nước có thể gây ra hỏng hóc lớn cho các thiết bị thủy lực và máy phát điện. Búa nước xuất hiện trong hệ thống dòng chảy có áp khi mở hoặc đóng van hoàn toàn hoặc từng phần.

9.5.1. Đóng van đột ngột

Về mặt vật lý van không thể đóng đột ngột (tức thì), tuy nhiên xem xét trường hợp này là bước đầu quan trọng để xem xét các trường hợp thực tế. Để thuận

tiện, chúng ta xem xét dòng chảy dừng trong đường ống nằm ngang (Hình 9.5) với van đang mở một phần.



Hình 9.5 Hiện tượng búa nước trong đường ống với ảnh hưởng ma sát và tiêu hao năng lượng được bỏ qua; (a) Van N ở cuối đường ống đóng đột ngột và sóng áp suất chuyển động ngược hướng dòng chảy; (b) Áp suất búa nước trong trường hợp lý tưởng tại các điểm N, B và M trong trường hợp van đóng tức thì.

Tiếp theo, chúng ta giả thiết là van N đóng hoàn toàn và tức thì. “Lát” chất lỏng trước van sẽ bị nén bởi cột chất lỏng chuyển động ngược lại. Cùng lúc đó thành ống bao xung quanh “lát” chất lỏng cũng bị kéo giãn ra do sự gia tăng áp suất; bằng cách đó động năng của khối chất lỏng chuyển động sẽ chuyển đổi thành hai dạng thế năng (năng lượng đàn hồi). Lát chất lỏng phía trước ở thượng du sẽ ở trạng thái dừng. Chất lỏng trong đường ống không còn ứng xử như vật rắn không nén được mà do áp suất gia tăng, hiện tượng này bị tác động bởi độ đàn hồi của cả đường ống và chất lỏng. Sự dừng chuyển động của chất lỏng sẽ tạo ra sự gia tăng áp suất ở thượng du và chuyển động như sóng áp suất dọc theo đường ống với vận tốc truyền âm c_j .

Sau một thời gian ngắn cột chất lỏng BN sẽ ở trạng thái tĩnh, trong khi đó chất lỏng trong đoạn MB sẽ vẫn chuyển động với vận tốc và áp suất ban đầu. Khi mà

sóng áp xuất đi tới cửa vào M, toàn bộ khối chất lỏng trong đoạn dài L sẽ ở trạng thái tĩnh nhưng với áp suất tăng thêm. Trong thời gian sóng áp suất chuyển động từ N tới M, dọc theo đường ống sẽ có đường mức thủy lực song song với đường mức thủy lực (HGL dừng) ban đầu (đường XP) nhưng có chiều cao lớn hơn $\Delta p/\gamma$, trong đó Δp đại diện cho áp suất gia tăng của hiện tượng búa nước.

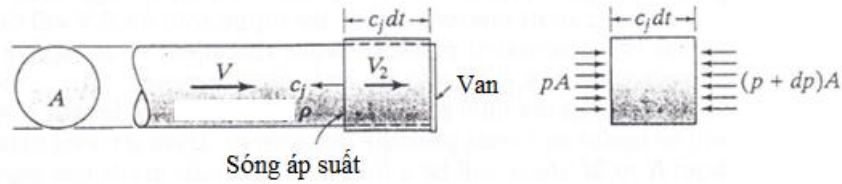
Tại điểm M áp suất chất lỏng không thể lớn hơn độ sâu MX, vì vậy khi sóng áp suất đi đến điểm M, áp suất tại M sẽ đột ngột hạ thấp xuống giá trị khi không có dòng chảy. Tuy nhiên toàn bộ đoạn đường ống còn lại chịu sự gia tăng áp suất; chất lỏng trong đó bị nén lại và thành ống bị dãn ra. Một ít chất lỏng sẽ chảy lại bồn chứa và tạo ra sóng áp suất thấp chuyển động dọc theo ống từ M đến N. Giả thiết rằng không có sự mất mát dần năng lượng (damping), tại thời điểm sóng giảm áp đi tới điểm N, toàn bộ chất lỏng trong đường ống lại trở về áp suất ban đầu như đường XP, nhưng chất lỏng vẫn chảy trở lại bồn chứa. Vận tốc ngược này sẽ tạo ra sự hút chân không tại điểm N và tạo sự giảm sút áp suất dưới áp suất bình thường, trong trường hợp lý tưởng là bằng đúng với sự tăng áp suất trước đó. Tiếp theo sóng áp suất này lại chuyển động từ N đến M. Như vậy trong trường hợp lý tưởng, sóng áp suất sẽ chuyển động tới và lui trong đoạn đường ống với giá trị thay đổi giữa giá trị gia tăng và giá trị sụt áp. Trong thực tế, sự mất mát năng lượng do ma sát trong chất lỏng và đàn hồi của đường ống, giá trị áp suất sẽ giảm dần tiến đến giá trị của dòng không dừng, biểu diễn bởi đường XX trên Hình (9.5).

Thời gian cho một chu kỳ kín của sóng áp suất đi từ N đến M và quay lại N là:

$$T_r = 2\frac{L}{c_j} \quad (9.11)$$

Trong đó L là độ dài của đường ống. Vậy khi đóng van đột ngột, áp suất gia tăng tại van sẽ là hằng số trong khoảng thời gian T_r , trước khi được đưa trở về giá trị bình thường; và tương tự như vậy, thời gian sụt áp tại van có cùng thời lượng như vậy. Tại một điểm có khoảng cách x tính từ cửa vào ví dụ điểm B, thời gian cho một chu kỳ sóng áp suất sẽ là $2x/c_j$, vì vậy khoảng thời gian điểm này chịu áp suất tăng hay giảm sẽ là $2x/c_j$ như chỉ ra trên Hình (9.5b). Tại điểm M với $x=0$, sự tăng và giảm áp suất chỉ xảy ra tức thì. Vậy tại các điểm gần M hơn, thời gian xuất hiện áp suất tăng và giảm sẽ ngắn hơn tuy nhiên giá trị cực đại là như nhau tại mọi điểm.

Chúng ta có thể tính sự thay đổi áp suất bởi hiện tượng búa nước như sau. Trên Hình 9.6 chúng ta xem xét khu vực xung quanh van. Nếu van đóng lại đột ngột, không nhất thiết là đóng hoàn toàn, sóng áp suất sẽ truyền đi trong ống với vận tốc c_j . Trong khoảng thời gian ngắn Δt , một phần tử chất lỏng có độ dài $c_j\Delta t$ bị làm chậm lại.



Hình 9.6 Sơ đồ phân tích hiện tượng búa nước trong đường ống

Vì vậy khối lượng chất lỏng m bị làm chậm trong khoảng thời gian đó là: $m = \rho Vol = \rho A(c_j \Delta t)$. Áp dụng định luật 2 Newton, $F \Delta t = m \Delta V$, với $\Delta V = V_{out} - V_{in} = V_2 - V_1$, đổi V_1 thành V và bỏ qua hiệu ứng ma sát ta có:

$$[pA - (p + \Delta p)A] \Delta t = (\rho A c_j \Delta t)(V_2 - V)$$

Từ đó

$$\Delta p = \rho c_j (V - V_2) \quad (9.12)$$

Như vậy thay đổi áp suất ΔP là kết quả của sự thay đổi tức thì của vận tốc dòng chảy ($V - V_2$). Trường hợp van đóng không hoàn toàn sẽ ảnh hưởng đến giá trị $V - V_2$ và Pt. (9.12) chỉ ra rằng thay đổi áp suất tỷ lệ thuận với thay đổi vận tốc.

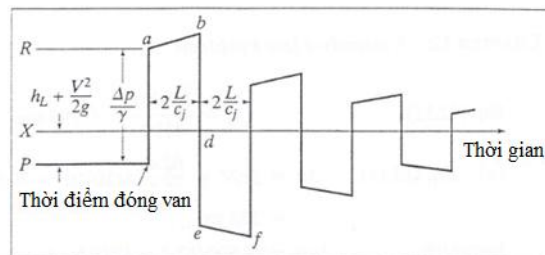
Trong trường hợp ống đàn hồi ta có:

$$\Delta p = (V - V_2) \sqrt{\frac{\rho}{\left(\frac{1}{E_v} + \frac{D}{tE}\right)}} \quad (9.13)$$

Trong đó D là đường kính ống, t là độ dày thành ống, E_v mô đun đàn hồi chất lỏng, E mô đun đàn hồi của vật liệu đường ống.

Trong trường hợp van đóng tức thì và hoàn toàn, khi đó $V_2 = 0$, Pt. (9.13) trở thành :

$$\Delta p = \rho c_j V = V \sqrt{\frac{\rho}{\left(\frac{1}{E_v} + \frac{D}{tE}\right)}} \quad (9.14)$$



Hình 9.7 Quá trình áp suất tại van N của Hình 9.5 gây ra bởi van đóng tức thì có xét đến ảnh hưởng của ma sát và tiêu tán năng lượng.

Bây giờ chúng ta xem xét trường hợp đóng van có tính đến ảnh hưởng của ma sát và sự tiêu tán năng lượng. Trên Hình 9.5a, khi sóng áp suất đi từ N tới điểm B, khối nước trong BN sẽ ở trạng thái dừng và đường mức thủy lực CR phải nằm ngang. Vì vậy đường mức thủy lực trong phần BN sẽ có xu hướng là phẳng. Do đó, thay vì có độ dốc do tổn thất ma sát, như chỉ ra trên hình vẽ, đường mức thủy lực sẽ dần tới CS bởi vì áp suất tại C là không thay đổi. Vì vậy áp suất tại N sẽ gia tăng cao hơn giá trị NR trong khoảng thời gian ngắn sau khi van đóng.

Sự tăng nhẹ áp suất tại van cao hơn giá trị lý thuyết $c_j(V-V_2)$ được khẳng định bởi các kết quả thí nghiệm. Bởi vì mặt sóng (điểm B trong Hình 9.5) chuyển động đến M, điểm C chuyển động cùng nó và vì thế RS sẽ cao hơn. Kết quả là, trên sơ đồ lịch sử áp suất tại van ở Hình 9.7, đường ab có độ dốc hướng lên trên, tương tự như vậy đường ef có độ dốc hướng xuống dưới bởi vì tất cả các điều kiện đều ngược lại. Do sự tiêu tán năng lượng, sóng áp suất sẽ có biên độ nhỏ dần cho đến khi một trạng thái cân bằng đạt được.

Tất cả các phân tích ở trên dựa trên giả thiết áp suất thấp gây ra trong đường ống không xuống thấp hơn áp suất hóa hơi. Trong trường hợp xuất hiện áp suất thấp hơn áp suất hóa hơi, hiện tượng xâm thực xảy ra trong điều kiện này sẽ có sức phá hoại lớn hơn.

9.5.2. Ví dụ 9.4: Tính sự gia tăng áp suất khi đóng van

Nước chảy với vận tốc 10 fps trong ống thép dài 400 ft có đường kính 8 in và độ dày thành ống 0.25 in. Tính chu kỳ dao động và sự gia tăng áp suất cực đại theo lý thuyết gây ra bởi đóng van tức thì (a) hoàn toàn và (b) một phần, vận tốc giảm xuống còn 6 fps.

Vấn đề: Cho trước vận tốc dòng chảy ổn định và các đặc tính của đường ống. Xác định chu kỳ dao động và giá trị gia tăng cực đại của sóng áp suất trong trường hợp đóng van hoàn toàn và một phần.

Giả thiết: Bỏ qua ảnh hưởng của ma sát và tiêu tán năng lượng trong đường ống.

Tính chất: Vận tốc truyền sóng áp suất trong môi trường nước là 4720 fps. Mô đun đàn hồi của nước là $E_v=3 \times 10^5$ psi, của thép là $E=3 \times 10^7$ psi.

Phân tích:

Từ Pt. (9.10):

$$c_j = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{D E_v}{t E}}} = \frac{4720}{\sqrt{1 + \frac{8 \left(\frac{3 \times 10^5}{3 \times 10^7} \right)}}} = 4110 \text{ fps}$$

Từ Pt. (9.11):

$$T_r = \frac{2(400)}{4110} = 0.195 \text{ sec}$$

(a) Từ Pt. (9.14):

$$\begin{aligned}\Delta p &= \rho c_j V = \frac{62.4}{32.2}(4110)10 = 79,600 \text{ psf} \\ &= 553 \text{ psi}\end{aligned}$$

Ta có:

$$\Delta p/\gamma = 79,600/62.4 = 1276 \text{ ft}$$

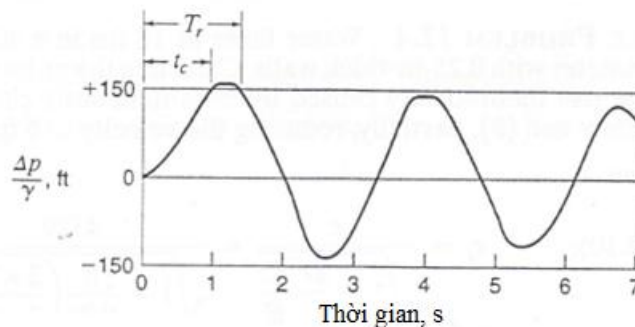
Vậy vào thời điểm ban đầu, búa nước tác động lên đường ống một áp suất gia tăng tương đương cột nước cao 1276 ft và xuất hiện khoảng 5 s một lần.

(b) Với van đóng một phần, c_j và T_r không thay đổi, do đó từ Pt. (9.12) ta có:

$$\Delta p = \frac{62.4}{32.2}(4110)(10 - 6) = 31,800 \text{ psf}$$

9.5.3. Đóng van nhanh

Về mặt vật lý, van không thể đóng tức thì, vì vậy chúng ta sẽ xem xét trường hợp thực tế khi van đóng hoàn toàn hay một phần trong khoảng thời gian hữu hạn t_c lớn hơn 0 và nhỏ hơn $T_r=2L/c_j$. Hình 9.8 chỉ ra quá trình áp suất thực tế tạo ra bởi đóng van trong trường hợp này.



Hình 9.8 Quá trình áp suất thay đổi tại van. Trường hợp đóng van nhanh hoàn toàn trong thời gian $t_c (=1 \text{ s})$ nhỏ hơn $T_r (=1.4 \text{ s})$.

Lưu ý: Hình 9.8 và 9.9 là kết quả nghiên cứu búa nước của Công ty Edison Nam California với các thông số thí nghiệm như sau: $L=3060 \text{ ft}$, đường kính trong $=2.06 \text{ in}$, $c_j=4371 \text{ fps}$, $V=1.11 \text{ fps}$, $\Delta p/\gamma=150.7 \text{ ft}$, $T_r=1.40 \text{ s}$, cột nước tĩnh $=306.7 \text{ ft}$, cột nước trước khi đóng van là 301.6 ft , $h_L=5.1 \text{ ft}$. Trong Hình 9.8 thời gian đóng van hoàn toàn là $t_c=1 \text{ s}$ và chúng ta có thể nhìn thấy cột áp suất dâng cao trên 151 ft. Trong Hình 9.9, thời gian đóng van hoàn toàn là 3 s.

Độ nghiêng của đường cong trong khoảng thời gian t_c phụ thuộc hoàn toàn vào hoạt động của van và hiệu ứng của nó lên vận tốc trong đường ống. Tuy nhiên giá trị gia tăng áp suất cực đại là bằng với trường hợp đóng tức thì. Sự khác nhau duy nhất là thời gian xuất hiện ngắn hơn và các đường thẳng đứng như trên Hình 9.7 chuyển thành các đường nghiêng như Hình 9.8. Khoảng thời gian có áp suất cực đại là $T_r - t_c$ (Hình 9.8). Nếu thời gian đóng van là bằng T_r thì giá trị gia

tăng áp suất cực đại vẫn giữ nguyên, tuy nhiên đường cong trên Hình 9.8 sẽ có các điểm nhọn cực đại và cực tiểu bởi vì khoảng thời gian tồn tại áp suất cực đại là bằng 0.

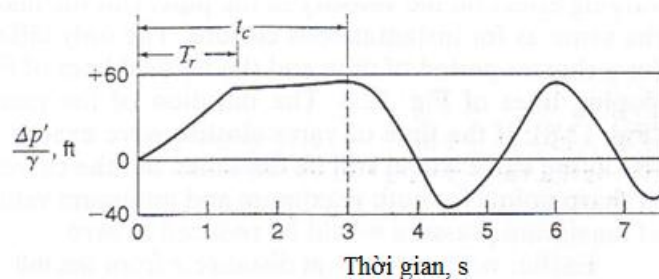
Như trên chúng ta đã thấy tại khoảng cách x tính từ cửa vào, như điểm B trên Hình 9.5, chu kỳ sóng áp suất là $2x/c_j$. Vì vậy, không phụ thuộc vào van được đóng nhanh như thế nào, bởi vì t_c là luôn khác không do đó tồn tại khoảng cách x_0 sao cho $t_c=2x_0/c_j$. Từ đó ta có:

$$x_0 = \frac{c_j t_c}{2} \quad (9.15)$$

Vì vậy, tại điểm E trên Hình 9.5, cách cửa vào khoảng x_0 có chu kỳ chính xác là t_c . Tại các điểm gần cửa vào hơn ($x < x_0$), chu kỳ sẽ nhỏ hơn. Tuy nhiên trên Hình 9.8, ta có thể nhận thấy rằng cần khoảng thời gian t_c để áp suất tại một điểm có thể nhận được giá trị cực đại. Vì vậy tại các điểm gần cửa vào hơn điểm E, sóng áp suất không tải sẽ đến sớm hơn trước khi gia tăng áp suất đạt cực đại. Hiệu ứng này làm giảm giá trị áp suất cực đại tại các điểm với $x < x_0$. Càng gần cửa vào, khi khoảng cách x nhỏ hơn, chu kỳ sóng áp suất sẽ nhỏ hơn và giá trị áp suất cực đại cũng nhỏ hơn. Kết quả là với các trường hợp thực tế, gia tăng áp suất cực đại chỉ xảy ra tại các điểm $x > x_0$, và giá trị này giảm dần từ Δp tại x_0 xuống đến 0 tại cửa vào. Điều này làm thay đổi hình dáng đường mức thủy lực "Đóng van nhanh" trên hình 9.5. Sự thay đổi tuyến tính trong khoảng từ cửa vào đến x_0 thường được cấp nhận, tuy nhiên trong thực tế hình dạng của đường cong phụ thuộc vào đặc thù hoạt động của van.

9.5.4. Van đóng chậm ($t_c > T_r$)

Trong mục trên chúng ta đã thảo luận trường hợp van đóng nhanh (hoặc đường ống đủ dài) sao cho sóng áp suất không đủ thời gian thực hiện một chu kỳ trước khi van dừng đóng. Chúng ta định nghĩa trường hợp van đóng chậm là khi thời gian đóng van lớn hơn $T_r=2L/c_j$. Trong trường hợp này gia tăng áp suất cực đại sẽ nhỏ hơn các trường hợp trước, bởi vì sóng áp suất không tải sẽ đến van trước khi van đóng hoàn toàn. Điều này ngăn cản sự gia tăng áp suất tiếp theo.



Hình 9.9 Quá trình thay đổi áp suất tại van. Trường hợp đóng van chậm và kín hoàn toàn với $t_c=3$ s lớn hơn $T_r=1.4$ s.

Trên Hình 9.9, áp suất tại van có thể tăng thêm nếu tại thời điểm T_r sóng không tải không đến van để dập tắt sự gia tăng áp suất tại giá trị khoảng 53 ft.

Vì vậy toàn bộ đường ống sẽ phải chịu áp suất gia tăng cực đại dao động gần như tuyến tính với x tính từ cửa vào, giá trị cực đại cho bởi các phương trình (9.12-9.14) không bao giờ đạt được.

Các thí nghiệm đã chỉ ra rằng đối với trường hợp đóng van chậm, sự gia tăng áp suất giảm dần đều từ giá trị tại van xuống đến 0 tại cửa ra. Giá trị gia tăng áp suất $\Delta p'$ được tính xấp xỉ như sau:

Giả thiết rằng:

$$\frac{\Delta p'}{\Delta p} \approx \frac{L}{x_0}$$

Từ đó:

$$\begin{aligned} \Delta p' &\approx \frac{L}{x_0} \Delta p = \frac{2L}{c_j t_c} \Delta p = \frac{L \rho c_j (V - V_2)}{x_0} \\ &= \frac{2L \rho (V - V_2)}{t_c} \end{aligned} \quad (9.16)$$

trong đó t_c là thời gian đóng van.

Sau khi sóng áp suất không tải tới van và giá trị cực đại $\Delta p'$ đạt được, sóng áp suất đàn hồi đi tới đi lui và sự thay đổi áp suất rất là phức tạp. Các nghiên cứu chi tiết nằm ngoài mục tiêu của giáo trình này. Có thể xem trong [10].

9.5.5. Ví dụ 9.5: Tính áp suất búa nước cực đại tại van

Giả thiết về độ đàn hồi và kích thước đường ống sao cho vận tốc truyền sóng áp suất là 3200 fps. Cho đường ống có độ dài 2000 ft và đường kính 4 ft. Tìm áp suất búa nước cực đại tại van và tại khoảng cách 300 ft tính từ bồn chứa, (a) nếu van đóng một phần trong thời gian 2.2 s, lưu lượng dòng chảy giảm từ 30 xuống 10 cfs; (b) nếu nước đang chảy với lưu lượng 15 cfs và van đóng hoàn toàn trong 1.0 s.

Vấn đề: Cho trước vận tốc truyền sóng áp suất trong đường ống. Xác định gia tăng áp suất búa nước trong các trường hợp đóng van khác nhau.

Phân tích:

Ta có:

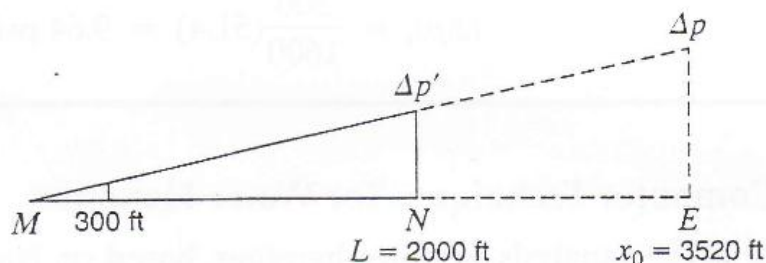
$$A = \pi(2)^2 = 12.57 \text{ ft}^2$$

$$T_r = \frac{2(2000)}{3200} = 1.25 \text{ sec}$$

(a) $t_c=4.0 \text{ s} > T_r$, vì vậy đây là trường hợp van đóng chậm

Từ Pt. (9.15): $x_0=0.5(3200)2.2=3520 \text{ ft}$.

Ta có : $V=Q/A=30/12.57=2.39 \text{ fps}$; $V_2=10/12.57=0.796 \text{ fps}$



Từ Pt. (9.12): $\Delta p=62.4/32.2(3200)(2.39-0.796)=9870 \text{ psf} = 68.5 \text{ psi}$

Tại van N ($x < x_0$)

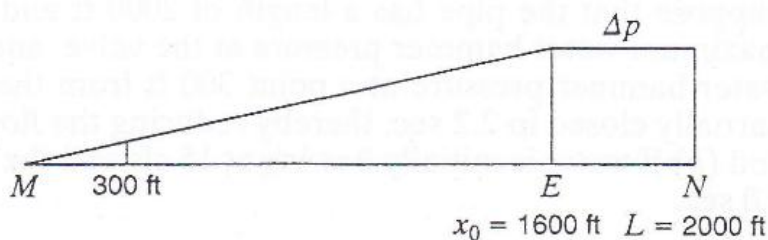
Từ Pt. (9.16): $\Delta p'=2000/3520(68.5)=38.9 \text{ psi}$

Tại điểm $x=300 \text{ ft}$ tính từ bồn chứa, giả thiết sự biến đổi tuyến tính:

$(\Delta p)_x=300/2000(38.9)=5.84 \text{ psi}$

(b) $t_c=1.0 \text{ s} < T_r$, vì vậy đây là trường hợp van đóng nhanh.

Từ Pt. (9.15): $x_0=0.5(3200)1.0=1600 \text{ ft}$



$V=Q/A=15/12.57=1.194 \text{ fps}$

Tại van N ($x > x_0$),

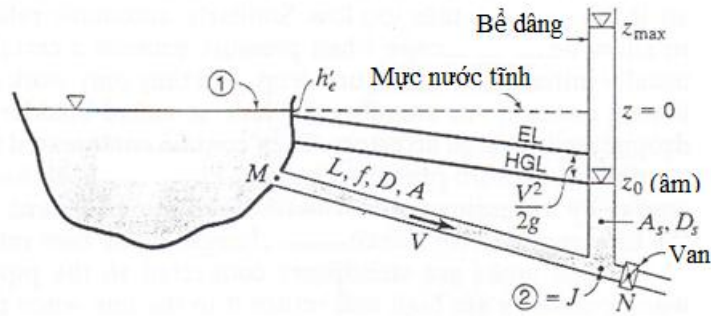
Từ Pt. (9.14): $\Delta p=62.4/32.2(3200)1.194=7400 \text{ psf} = 51.4 \text{ psi}$

Tại điểm $x=300 \text{ ft}$ tính từ bồn chứa, giả thiết sự biến đổi tuyến tính trong khoảng x_0 :

$(\Delta p)_x=300/1600(51.4)=9.64 \text{ psi}$

9.6. Bể dâng

Trong nhà máy thủy điện dòng chảy đến tua bin thường phải giảm rất nhanh khi cần giảm tải đột ngột. Sự giảm lưu lượng nhanh sẽ gây ra hiện tượng búa nước rất mạnh điều đó đòi hỏi đầu tư đường ống cấp nước bền chắc và đắt đỏ.



Hình 9.10 Sơ đồ phân tích bể dâng

Có một vài giải pháp để giải quyết vấn đề: một trong số các giải pháp là sử dụng **bể dâng**. Một bể dâng đơn giản là một ống thẳng đứng nối với đường ống như chỉ ra trên Hình 9.10. Với vận tốc V_0 trong đường ống, mực nước ban đầu trong bể dâng là z_0 thấp hơn mực nước tĩnh (không có dòng chảy và $z=0$), như được chỉ ra trên Hình vẽ. Khi van đóng đột ngột, cột nước dâng lên trong bể dâng. Mực nước trong bể dâng sẽ dao động lên xuống cho đến khi năng lượng bị tiêu tán do ma sát. Đoạn ống thượng du của bể dâng sẽ chịu ảnh hưởng của gia tăng áp suất búa nước rất lớn nếu không có sự hiện diện của bể dâng.

Tính toán các tham số cho bể dâng đơn giản có thể thực hiện như sau. Ban đầu, trong điều kiện dừng, ký hiệu bởi chỉ số 0, mực nước trong bể dâng là dưới mực nước tĩnh một giá trị là tổng tổn thất cột nước do ma sát, cột vận tốc và các tổn thất cục bộ khác (h_e'). Vì vậy, vì z_0 là có giá trị âm:

$$-z_0 = h_f + \frac{V_0^2}{2g} + \sum k \frac{V_0^2}{2g}$$

Hay

$$-z_0 = K \frac{V_0^2}{2g} \quad \text{với} \quad K = \frac{fL}{D} + 1 + \sum k \quad (9.17)$$

ở đây $\sum k$ là tổng các tổn thất cục bộ dọc theo đường ống. Đối với điều kiện ngay sau khi van đóng tức thì, khi nước ở mức z đã dâng lên trong bể dâng, chúng ta có thể viết Pt. năng lượng (9.6) cho dòng chảy không dừng giữa mặt thoáng của hồ chứa (điểm 1 trên Hình 9.10) và đầu cuối của đường ống tại bể dâng (điểm 2= J). Bỏ qua ma sát trong bể dâng và hiệu ứng quán tính trong bể dâng và ký hiệu h là khoảng cách thẳng đứng từ điểm 2 đến cao độ $z=0$, tại điểm 2 chúng ta có $p_2/\gamma = h+z$ và $z_2 = -h$, vì vậy $(p/\gamma + z)_2 = h+z-h = z$. Thay vào Pt. (9.6), ta nhận được :

$$0 - \left(z + \frac{V^2}{2g} \right) = \left(\sum k + \frac{fL}{D} \right) \frac{V^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

Trong Pt. này z đại diện mực nước trong bể dâng tính từ mặt nước tĩnh $z=0$ và $(L/g)(dV/dt)$ đại diện cột nước gây ra bởi gia tốc h_a trong đường ống giữa hồ chứa và bể dâng.

Sử dụng định nghĩa K từ Pt. (9.7), phương trình này có thể viết dưới dạng :

$$-z = K \frac{V^2}{2g} + \frac{L}{g} \frac{dV}{dz} \frac{dz}{dt} \quad (9.18)$$

Với trường hợp van đóng hoàn toàn, bởi vì vận tốc dâng lên trong bể dâng là $V_s=dx/dt$, phương trình liên tục có dạng :

$$AV = A_s \frac{dz}{dt} \quad (9.19)$$

ở đây A và A_s là diện tích mặt cắt ngang của đường ống và bể dâng, tương ứng. Kết hợp các Pt. (12.19) và (12.19), khử dt , giả thiết f và K là hằng số, lấy tích phân cho V , ta nhận được :

$$V^2 = \frac{2g}{K} \left(\frac{LA}{KA_s} - z \right) - C \exp\left(-\frac{KA_s}{LA} z\right) \quad (9.20)$$

Đây là phương trình tổng quát cho mối quan hệ giữa vận tốc V của đường ống và mực nước z trong bể dâng trong khoảng thời gian đóng van và đỉnh của đợt dâng đầu tiên. Sau đó nước thay đổi hướng dòng chảy và vì vậy phương trình này không còn đúng. Tuy nhiên, chúng ta biết rằng các dao động tiếp theo sẽ nhỏ đi do hiệu ứng tiêu hao năng lượng do ma sát.

Trước khi sử dụng phương trình này để tìm mực nước dâng cao nhất z_{max} , chúng ta phải tìm hiểu về hằng số tích phân C . Có thể làm điều đó như sau đây. Điều kiện ban đầu cho khoảng thời gian xem xét là $V=V_0$ và $z=z_0$ (Pt. 9.17). Thay các điều kiện này vào Pt. (9.20), ta có:

$$V_0^2 = \frac{2g}{K} \left(\frac{LA}{KA_s} + K \frac{V_0^2}{2g} \right) - C \exp\left[\left(\frac{KA_s}{LA}\right) K \frac{V_0^2}{2g}\right]$$

Đơn giản hóa thành:

$$\frac{2gLA}{K^2 A_s} = C \exp\left[\left(\frac{KA_s}{LA}\right) K \frac{V_0^2}{2g}\right] \quad (9.21)$$

Điều kiện cuối của khoảng thời gian, tại đỉnh của đợt dâng đầu tiên, là $V=0$ và $z=z_{max}$. Thay vào Pt. (9.20) và sắp xếp lại ta nhận được:

$$\frac{2g}{K} \left(\frac{LA}{KA_s} - z_{max} \right) = C \exp\left(-\frac{KA_s}{LA} z_{max}\right) \quad (9.22)$$

Cuối cùng, khử C từ hai Pt. (9.21-22), ta có:

$$1 - \frac{KA_s}{LA} z_{\max} = \exp \left[-\frac{KA_s}{LA} \left(K \frac{V_0^2}{2g} + z_{\max} \right) \right] \quad (9.23)$$

Xem xét kết quả này, ta nhận thấy rằng Pt. (9.23) là tường minh đối với V_0 , nhưng là ẩn với z_{\max} , A_s , A , L và K , có nghĩa là ẩn đối với cả hệ số ma sát f . Chúng ta có thể nhận thấy rằng vế phải của phương trình có giá trị dương, do đó vế trái cũng phải dương, điều đó dẫn đến điều kiện:

$$\frac{KA_s}{LA} z_{\max} < 1 \quad (9.24)$$

Để tìm z_{\max} hoặc A_s từ Pt. (9.23) thường phải sử dụng phương pháp lặp. Pt. (9.24) có thể dùng để sử dụng để xác định giá trị đầu tiên của z_{\max} hoặc A_s .

9.6.1. Ví dụ 9.6: Thiết kế đường kính bể dâng

Bạn được yêu cầu để thiết kế một bể dâng cho một ống thép dài 800 m, đường kính 1.5 m ($f=0.018$) để cung cấp nước cho một nhà máy thủy điện nhỏ. Bể dâng được nối với đường ống tại vị trí có đường tâm thấp hơn 35 m so với mặt nước trong hồ chứa. Với lưu lượng 12 m³/s, hãy tìm đường kính bể dâng nhỏ nhất để mực nước dâng không cao quá 18.5 m trên mực nước hồ chứa. Bỏ qua hiệu ứng quán tính và ma sát trong bể dâng. Cửa vào đường ống là vuông-sắc cạnh ($ke=0.5$).

Vấn đề: Cho trước độ dài đường ống, hệ số ma sát, độ cao vị trí đặt bể dâng. Tìm đường kính bể dâng nhỏ nhất để mực nước trong bể dâng không vượt quá chiều cao cho trước.

Phân tích: Với cửa vào vuông-sắc cạnh $ke=0.5$. Từ đó

$$K = \frac{0.018(800)}{1.5} + 1 + 0.5 = 11.10$$

$$V_0 = Q_0/A = 12/\pi(1.5/2)^2 = 6.79 \text{ m/s}$$

Từ Pt. (9.17):

$$z_0 = -11.1(6.79)^2/2(9.81) = -26.09 \text{ m.}$$

Từ Pt.(9.24) :

$$A_s < \frac{LA}{Kz_{\max}} = \frac{800\pi(1.5/2)^2}{11.10(18.5)} = 6.88 \text{ m}^2$$

Sử dụng phương pháp lặp với A_s ban đầu là $A_s=6.88$ (sử dụng Pt. (9.23)-> A_s mới, ...).

Cuối cùng:

$$A_s = 6.06 \text{ m}^2 = (\pi/4)D_s^2; \quad D_s = 2.78 \text{ m}$$

TỔNG KẾT

Trong chương này, chúng ta đã nghiên cứu dòng chảy chất lỏng không dừng. Trong chất lỏng chuyển động không dừng, hiệu ứng quán tính là không thể bỏ qua. Các ứng dụng thực tế sau đã được xem xét:

- Lưu lượng xả khi cột nước thay đổi

Thời gian để cột nước thay đổi từ mức z_1 đến z_2 được xác định bởi Pt.:

$$t = \int_{z_1}^{z_2} \frac{A_s dz}{Q_i - Q_o}$$

- Dòng chảy không dừng trong đường ống

Phương trình năng lượng từ điểm 1 đến điểm 2 trong dòng chảy không dừng có dạng:

$$\left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} \right)_1 - h_f - \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} = \left(\frac{p}{\gamma} + z + \frac{V^2}{2g} \right)_2$$

- Sự tiệm cận đến dòng chảy dừng

Thời gian để dòng chảy không dừng tiệm cận đến dòng chảy dừng được xác định như sau:

$$t = \frac{L}{KV_s} \ln \frac{V_s + V}{V_s - V}$$

- Hiện tượng búa nước

Trường hợp vận tốc chất lỏng trong đường ống thay đổi đột ngột bởi van đóng gây ra sóng áp suất mạnh lan truyền trong đường ống, hiện tượng này được gọi là hiện tượng **búa nước**.

Trong trường hợp van đóng tức thì hoặc đóng nhanh, sự gia tăng áp suất cực đại được tính theo công thức:

$$\Delta p = (V - V_2) \sqrt{\rho E_j} = (V - V_2) \sqrt{\frac{\rho}{\left(\frac{1}{E_v} + \frac{D}{tE} \right)}}$$

Trong trường hợp van đóng chậm sự gia tăng áp suất cực đại được tính theo công thức:

$$\frac{\Delta p'}{\Delta p} \approx \frac{L}{x_0}$$

$$\begin{aligned} \Delta p' &\approx \frac{L}{x_0} \Delta p = \frac{2L}{c_j t_c} \Delta p = \frac{L \rho c_j (V - V_2)}{x_0} \\ &= \frac{2L \rho (V - V_2)}{t_c} \end{aligned}$$

- Bể dâng

Bể dâng được thiết kế để giảm ảnh hưởng của hiện tượng búa nước trong đường ống dẫn nước đến tua bin ở các nhà máy thủy điện.

Các tham số của bể dâng được tính toán dựa theo phương trình sau:

$$1 - \frac{KA_s}{LA} z_{\max} = \exp \left[-\frac{KA_s}{LA} \left(K \frac{V_0^2}{2g} + z_{\max} \right) \right]$$

Phương trình này có thể giải lặp để tìm ra z_{\max} , A_s hoặc V_0 , tùy theo các điều kiện thiết kế khác nhau.

Câu hỏi và bài tập

Lưu lượng xả với cột nước thay đổi

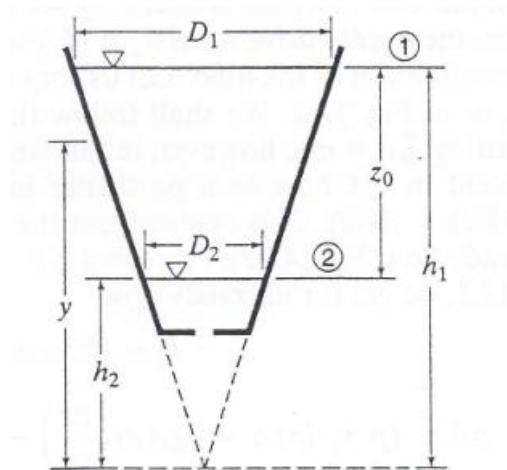
9.1 Một khoang tàu có các thành thẳng đứng. Nước được bơm vào hoặc rút ra khỏi khoang tàu qua đường ống có thiết diện A . Lưu lượng qua đường ống được cho bởi công thức $Q=C_d A(2gz)^{1/2}$, trong đó z là độ chênh lệch giữa mặt thoáng nước trong khoang và trong bồn chứa bên ngoài. Chứng minh rằng thời gian để mực nước trong khoang tàu thay đổi từ cao độ z_1 đến z_2 là:

$$t = \frac{2A_s}{C_d A \sqrt{2g}} (z_1^{1/2} - z_2^{1/2})$$

(b) Giả thiết khoang tàu dài 400 ft, rộng 100 ft, và hệ số lưu lượng $C_d=0.5$. Nếu ban đầu mực nước trong khoang thấp hơn mực nước bên ngoài là 40 ft (cao độ mặt thoáng bên ngoài không thay đổi), xác định thiết diện ống dẫn nếu cần để đầy khoang tàu (đến mực nước bên ngoài) trong 10 phút.

9.2 Lặp lại bài 9.1 nếu khoang tàu có chiều dài 100 m, rộng 30 m và mực nước ban đầu thấp hơn mực nước bên ngoài là 12 m.

9.3 Bồn nước có hình dạng nón như hình P9.3, có lỗ thoát nước dưới đáy diện tích 2-ft^2 ($C_d=0.62$). Cho $D_1=44$ ft, $D_2=20$ ft, $z_0=36$ ft, và mực nước ở bên ngoài là hằng số h_2 , mất bao nhiêu thời gian để mực nước trong bồn hạ thấp từ h_1 xuống h_2 ? (Lưu ý: đường kính bồn ở độ cao y là $=ky$, $y=z+h_2$)

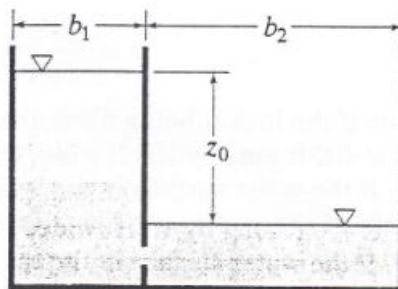


Hình P9.3

9.4 Bồn nước hình dạng như trong hình P9.3 có lỗ thoát 0.2 m^2 với $C_d=0.60$ ở đáy. Cho $D_1=12 \text{ m}$, $D_2=5.6 \text{ m}$, $z_0=10.4 \text{ m}$ và mực nước h_2 là không đổi. Cần bao nhiêu thời gian để nước hạ thấp từ h_1 đến h_2 (như trong hình vẽ).

9.5. Xem xét bài toán 9.3, tuy nhiên cho mực nước bên ngoài là h_1 . Cần bao nhiêu thời gian để mực nước trong bồn dâng lên từ h_2 đến h_1 ?

9.6 Bồn nước có hình học mô tả trên hình P9.4 với $b_1=12 \text{ ft}$, $b_2=24 \text{ ft}$, $z_0=14 \text{ ft}$, và chiều rộng vuông góc với mặt giấy là $a=6 \text{ ft}$. Tấm ngăn cách ở giữa có lỗ thủng với diện tích là 0.7 ft^2 ($C_d=0.65$). Sau thời gian bao lâu thì mực nước hai bên tấm ngăn cách là bằng nhau?



Hình P9.4

9.7 Tương tự như bài 9.6 với $b_1=3.6 \text{ m}$, $b_2=7.2 \text{ m}$, $z_0=4.2 \text{ m}$, và chiều rộng vuông góc với mặt giấy là $a=1.8 \text{ m}$. Tấm ngăn cách ở giữa có lỗ thủng với diện tích là 0.063 m^2 ($C_d=0.65$). Sau thời gian bao lâu thì mực nước hai bên tấm ngăn cách là bằng nhau?

Dòng chảy không dừng trong đường ống

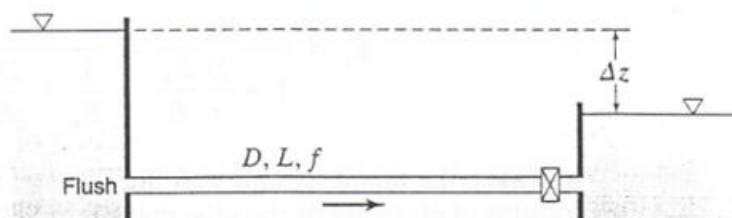
9.8 Kiểm tra xem giả thiết bỏ qua thành phần gia tốc trong Ví dụ 9.1 là có thể chấp nhận được. Tính đại lượng đó với $z=5 \text{ ft}$ từ các giá trị của V và t với $z=4.5$ và 5.5 ft .

9.9 Trong ví dụ 9.2, giả thiết tốc độ bơm giảm từ 1650 xuống 1150 rpm. Lưu lượng dòng chảy thay đổi như thế nào ngay sau khi tốc độ bơm thay đổi.

Tiếp cận đến dòng chảy dừng

9.10 Đường ống thoát nước có đường kính 150 mm có $f=0.030$ dài 500 m dùng để thoát nước từ bồn chứa ở cao độ 60 m dưới mặt nước trong bồn. Ban đầu chưa có dòng chảy vì miệng ống bị đóng kín. Xác định vận tốc của dòng ổn định và sau bao lâu mở van đột ngột thì vận tốc bằng một nửa vận tốc ổn định. Bỏ qua tổn thất cục bộ trong đường ống.

9.11 Đường ống đường kính 250 mm với $f=0.026$ dài 1000 m (cửa vào vuông góc-sắc cạnh, $ke=0.5$) cung cấp nước từ một bồn chứa trên cao xuống bồn chứa thấp hơn (xả ngầm) (Hình 9...). Chênh lệch mực nước giữa 2 bồn là 75 m. Sau khi mở van đột ngột, xác định vận tốc dòng chảy dừng và thời gian sau khi van được mở vận tốc đạt 1/3 và 2/3 vận tốc dòng chảy dừng.



Hình P9.11

9.12 Đường ống đường kính 150 mm với $f=0.023$ dài 140 m (cửa vào ống kéo dài Bảng 6.4: chương 6, $k_L=0.8$) cung cấp nước từ một bồn chứa trên cao xuống bồn chứa thấp hơn (xả ngầm). Chênh lệch mực nước giữa 2 bồn là 12 m. Sau khi mở van đột ngột, xác định vận tốc dòng chảy dừng và thời gian sau khi van được mở vận tốc đạt 90% vận tốc dòng chảy dừng.

Búa nước

9.13. Cho đường ống dài 1500 ft, nước chảy với vận tốc 2 fps, sóng áp suất truyền trong ống với vận tốc 3750 fps, tìm giá trị áp suất búa nước tại van và tại điểm 500 ft và 1000 ft tính từ van, (a) nếu van đóng hoàn toàn và tức thì, (b) nếu van đóng một phần tức thì, giảm vận tốc dòng chảy xuống còn 0.6 fps.

9.14. Cho đường ống dài 300 m, nước chảy với vận tốc 0.8 m/s, sóng áp suất truyền trong ống với vận tốc 1000 m/s, tìm giá trị áp suất búa nước tại van và tại điểm 100 m và 200 m tính từ van, (a) nếu van đóng hoàn toàn và tức thì, (b) nếu van đóng một phần tức thì, giảm vận tốc dòng chảy xuống còn 0.2 m/s.

9.15. Làm lại bài tập 9.13 cho thời gian đóng van là 0.35 s

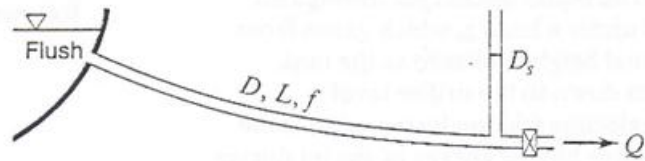
9.16. Làm lại bài tập 9.14 cho thời gian đóng van là 0.33 s

9.17. Làm lại bài tập 9.13 cho thời gian đóng van là 1.00 s

9.18. Làm lại bài tập 9.14 cho thời gian đóng van là 0.84 s

Bể dâng

9.19. Một đường ống thép ($f=0.018$, cửa vào vuông góc-sắc cạnh) dài 850 m, cung cấp 4 m³/s cho một nhà máy phát điện. Đường ống được bảo vệ chống hiện tượng búa nước bởi bể dâng ở vị trí cuối đường ống sát van kiểm soát (Hình 9...). Xác định đường kính bể dâng nhỏ nhất để ngăn chặn nước dâng cao hơn 12 m so với mực nước của hồ chứa. Bỏ qua cột nước vận tốc và các tổn thất cục bộ. Trong bể dâng, bỏ qua hiệu ứng ma sát và quán tính.



Hình P9.19

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. M. S. Bhatti and R. K. Shah. "Turbulent and Transition Flow Convective Heat Transfer in Ducts." In Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, ed. S. Kakaç, R. K. Shah, and W. Aung. New York: Wiley Interscience, 1987.
2. Y. A. Çengel, J. M. Cimbala. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGRAW-Hill series in Mechanical Engineering, 2006.
3. E. J. Finnemore, J.B. Franzini, Fluid Mechanics with Engineering Applications, MacGraw-Hill, 2002
4. W. M. Kays and M. E. Crawford. Convective Heat and Mass Transfer, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1993.
5. H. Schlichting. Boundary Layer Theory, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 1979.
6. R. K. Shah and M. S. Bhatti. "Laminar Convective Heat Transfer in Ducts." In Handbook of Single-Phase Convective Heat Transfer, ed. S. Kakaç, R. K. Shah, and W. Aung. New York: Wiley Interscience, 1987.
7. P. K. Swamee and A. K. Jain. "Explicit Equations for Pipe-Flow Problems," Journal of the Hydraulics Division. ASCE 102, no. HY5 (May 1976), pp. 657–664.
8. Y. S. Touloukian, S. C. Saxena, and P. Hestermans. Thermophysical Properties of Matter, The TPRC Data Series, Vol. 11, Viscosity. New York: Plenum, 1975.
9. Vũ Duy Quang. Thủy khí động lực ứng dụng. NXB Xây dựng, 2006.
10. E.B. Wylie, V.L. Streeter. Fluid Transients in Systems. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, 1993.
11. F. M., White. Fluid Mechanics, Fourth Edition. McGraw-Hill, 1998.
12. W. Zhi-qing. "Study on Correction Coefficients of Laminar and Turbulent Entrance Region Effects in Round Pipes," Applied Mathematical Mechanics, 3 (1982), p. 433.

Phụ lục 1: Bảng tính chất của một số chất lỏng

Bảng A1: Khối lượng mol, Hằng số khí và Nhiệt dung riêng của một số chất

Chất khí	Khối lượng mol M, kg/kmol	Hằng số khí R, kJ/kg.K	Nhiệt dung riêng ở T=25oC		
			cp, kJ/kg.K	cv, kJ/kg.K	k=cp/cv
Không khí	28.97	0.287	1.005	0.718	1.4
Ammonia, NH ₃	17.03	0.4882	2.093	1.605	1.304
Argon, Ar	39.95	0.2081	0.5203	0.3122	1.667
Dioxide Các bon, CO ₂	44.01	0.1889	0.8439	0.655	1.288
Monoxide Các bon, CO	28.01	0.2968	1.039	0.7417	1.4
Chlo, Cl	70.905	0.1173	0.4781	0.3608	1.325
Ethane, C ₂ H ₆	30.07	0.2765	1.744	1.468	1.188
Ethylene, C ₂ H ₄	28.054	0.2964	1.527	1.231	1.241
Fluorine, F ₂	38	0.2187	0.8237	0.605	1.362
Hê li, He	4.003	2.077	5.193	3.116	1.667
Hydro, H ₂	2.016	4.124	14.3	10.18	1.405
Methane, CH ₄	16.04	0.5182	2.226	1.708	1.303
Neon, Ne	20.183	0.4119	1.03	0.618	1.667
Ni to, N ₂	28.01	0.2968	1.04	0.7429	1.4
Oxide nitric, NO	30.006	0.2771	0.9992	0.7221	1.384
Dioxide ni to, NO ₂	46.006	0.1889	0.806	0.6171	1.306
Ô xy, O ₂	32	0.2598	0.918	0.6582	1.395
Hoi nước, H ₂ O	18.015	0.4615	1.865	1.403	1.329
Dioxide Sulfur, SO ₂	64.06	0.1298	0.6228	0.493	1.263
Xê non, Xe	131.3	0.06332	0.1583	0.09499	1.667

Bảng A2: Tính chất của nước bão hòa

Nhiệt độ $T, ^\circ\text{C}$	Áp suất bão hòa $P_{\text{sat}}, \text{kPa}$	Mật độ $\rho, \text{kg/m}^3$		Enthalpy bay hơi $h_{\text{fg}}, \text{kJ/kg}$	Nhiệt dung riêng $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$		Hệ số dẫn nhiệt $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$		Độ nhớt động lực $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$		Số Prandtl Pr		Hệ số dẫn nở $\beta, 1/\text{K}$
		CL	Hơi		CL	Hơi	CL	Hơi	CL	Hơi	CL	Hơi	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2501	4217	1854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2490	4205	1857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2478	4194	1862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2466	4186	1863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2454	4182	1867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2442	4180	1870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2431	4178	1875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2419	4178	1880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2407	4179	1885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2395	4180	1892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2383	4181	1900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2371	4183	1908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2359	4185	1916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2346	4187	1926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2334	4190	1936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2321	4193	1948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2309	4197	1962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2296	4201	1977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2283	4206	1993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2270	4212	2010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2257	4217	2029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}
110	143.27	950.6	0.8263	2230	4229	2071	0.682	0.0262	0.255×10^{-3}	1.261×10^{-5}	1.58	1.00	0.798×10^{-3}
120	198.53	943.4	1.121	2203	4244	2120	0.683	0.0275	0.232×10^{-3}	1.296×10^{-5}	1.44	1.00	0.858×10^{-3}
130	270.1	934.6	1.496	2174	4263	2177	0.684	0.0288	0.213×10^{-3}	1.330×10^{-5}	1.33	1.01	0.913×10^{-3}
140	361.3	921.7	1.965	2145	4286	2244	0.683	0.0301	0.197×10^{-3}	1.365×10^{-5}	1.24	1.02	0.970×10^{-3}
150	475.8	916.6	2.546	2114	4311	2314	0.682	0.0316	0.183×10^{-3}	1.399×10^{-5}	1.16	1.02	1.025×10^{-3}
160	617.8	907.4	3.256	2083	4340	2420	0.680	0.0331	0.170×10^{-3}	1.434×10^{-5}	1.09	1.05	1.145×10^{-3}
170	791.7	897.7	4.119	2050	4370	2490	0.677	0.0347	0.160×10^{-3}	1.468×10^{-5}	1.03	1.05	1.178×10^{-3}
180	1,002.1	887.3	5.153	2015	4410	2590	0.673	0.0364	0.150×10^{-3}	1.502×10^{-5}	0.983	1.07	1.210×10^{-3}
190	1,254.4	876.4	6.388	1979	4460	2710	0.669	0.0382	0.142×10^{-3}	1.537×10^{-5}	0.947	1.09	1.280×10^{-3}

Bảng A3: Tính chất của không khí ở áp suất 1 atm

Nhiệt độ $T, ^\circ\text{C}$	Mật độ $\rho, \text{kg/m}^3$	Nhiệt dung riêng cp $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Hệ số dẫn nhiệt $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Hệ số kt nhiệt $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Độ nhớt động lực $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Độ nhớt động học $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Số Prandtl Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-5}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041

Bảng A4: Tính chất của một số chất khí ở áp suất 1 atm

Nhiệt độ $T, ^\circ\text{C}$	Mật độ $\rho, \text{kg/m}^3$	Nhiệt dung riêng cp $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Hệ số dẫn nhiệt $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Hệ số kt nhiệt $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Độ nhớt động lực $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Độ nhớt động học $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Số Prandtl Pr
<i>Carbon Dioxide, CO₂</i>							
-50	2.4035	746	0.01051	5.860×10^{-6}	1.129×10^{-5}	4.699×10^{-6}	0.8019
0	1.9635	811	0.01456	9.141×10^{-6}	1.375×10^{-5}	7.003×10^{-6}	0.7661
50	1.6597	866.6	0.01858	1.291×10^{-5}	1.612×10^{-5}	9.714×10^{-6}	0.7520
100	1.4373	914.8	0.02257	1.716×10^{-5}	1.841×10^{-5}	1.281×10^{-5}	0.7464
150	1.2675	957.4	0.02652	2.186×10^{-5}	2.063×10^{-5}	1.627×10^{-5}	0.7445
200	1.1336	995.2	0.03044	2.698×10^{-5}	2.276×10^{-5}	2.008×10^{-5}	0.7442
300	0.9358	1060	0.03814	3.847×10^{-5}	2.682×10^{-5}	2.866×10^{-5}	0.7450
400	0.7968	1112	0.04565	5.151×10^{-5}	3.061×10^{-5}	3.842×10^{-5}	0.7458
500	0.6937	1156	0.05293	6.600×10^{-5}	3.416×10^{-5}	4.924×10^{-5}	0.7460
1000	0.4213	1292	0.08491	1.560×10^{-4}	4.898×10^{-5}	1.162×10^{-4}	0.7455
1500	0.3025	1356	0.10688	2.606×10^{-4}	6.106×10^{-5}	2.019×10^{-4}	0.7745
2000	0.2359	1387	0.11522	3.521×10^{-4}	7.322×10^{-5}	3.103×10^{-4}	0.8815
<i>Carbon Monoxide, CO</i>							
-50	1.5297	1081	0.01901	1.149×10^{-5}	1.378×10^{-5}	9.012×10^{-6}	0.7840
0	1.2497	1048	0.02278	1.739×10^{-5}	1.629×10^{-5}	1.303×10^{-5}	0.7499
50	1.0563	1039	0.02641	2.407×10^{-5}	1.863×10^{-5}	1.764×10^{-5}	0.7328
100	0.9148	1041	0.02992	3.142×10^{-5}	2.080×10^{-5}	2.274×10^{-5}	0.7239
150	0.8067	1049	0.03330	3.936×10^{-5}	2.283×10^{-5}	2.830×10^{-5}	0.7191
200	0.7214	1060	0.03656	4.782×10^{-5}	2.472×10^{-5}	3.426×10^{-5}	0.7164
300	0.5956	1085	0.04277	6.619×10^{-5}	2.812×10^{-5}	4.722×10^{-5}	0.7134
400	0.5071	1111	0.04860	8.628×10^{-5}	3.111×10^{-5}	6.136×10^{-5}	0.7111
500	0.4415	1135	0.05412	1.079×10^{-4}	3.379×10^{-5}	7.653×10^{-5}	0.7087
1000	0.2681	1226	0.07894	2.401×10^{-4}	4.557×10^{-5}	1.700×10^{-4}	0.7080
1500	0.1925	1279	0.10458	4.246×10^{-4}	6.321×10^{-5}	3.284×10^{-4}	0.7733
2000	0.1502	1309	0.13833	7.034×10^{-4}	9.826×10^{-5}	6.543×10^{-4}	0.9302
<i>Methane, CH₄</i>							
-50	0.8761	2243	0.02367	1.204×10^{-5}	8.564×10^{-6}	9.774×10^{-6}	0.8116
0	0.7158	2217	0.03042	1.917×10^{-5}	1.028×10^{-5}	1.436×10^{-5}	0.7494
50	0.6050	2302	0.03766	2.704×10^{-5}	1.191×10^{-5}	1.969×10^{-5}	0.7282
100	0.5240	2443	0.04534	3.543×10^{-5}	1.345×10^{-5}	2.567×10^{-5}	0.7247
150	0.4620	2611	0.05344	4.431×10^{-5}	1.491×10^{-5}	3.227×10^{-5}	0.7284
200	0.4132	2791	0.06194	5.370×10^{-5}	1.630×10^{-5}	3.944×10^{-5}	0.7344
300	0.3411	3158	0.07996	7.422×10^{-5}	1.886×10^{-5}	5.529×10^{-5}	0.7450
400	0.2904	3510	0.09918	9.727×10^{-5}	2.119×10^{-5}	7.297×10^{-5}	0.7501
500	0.2529	3836	0.11933	1.230×10^{-4}	2.334×10^{-5}	9.228×10^{-5}	0.7502
1000	0.1536	5042	0.22562	2.914×10^{-4}	3.281×10^{-5}	2.136×10^{-4}	0.7331
1500	0.1103	5701	0.31857	5.068×10^{-4}	4.434×10^{-5}	4.022×10^{-4}	0.7936
2000	0.0860	6001	0.36750	7.120×10^{-4}	6.360×10^{-5}	7.395×10^{-4}	1.0386
<i>Hydrogen, H₂</i>							
-50	0.11010	12635	0.1404	1.009×10^{-4}	7.293×10^{-6}	6.624×10^{-5}	0.6562
0	0.08995	13920	0.1652	1.319×10^{-4}	8.391×10^{-6}	9.329×10^{-5}	0.7071
50	0.07603	14349	0.1881	1.724×10^{-4}	9.427×10^{-6}	1.240×10^{-4}	0.7191
100	0.06584	14473	0.2095	2.199×10^{-4}	1.041×10^{-5}	1.582×10^{-4}	0.7196
150	0.05806	14492	0.2296	2.729×10^{-4}	1.136×10^{-5}	1.957×10^{-4}	0.7174
200	0.05193	14482	0.2486	3.306×10^{-4}	1.228×10^{-5}	2.365×10^{-4}	0.7155
300	0.04287	14481	0.2843	4.580×10^{-4}	1.403×10^{-5}	3.274×10^{-4}	0.7149
400	0.03650	14540	0.3180	5.992×10^{-4}	1.570×10^{-5}	4.302×10^{-4}	0.7179
500	0.03178	14653	0.3509	7.535×10^{-4}	1.730×10^{-5}	5.443×10^{-4}	0.7224
1000	0.01930	15577	0.5206	1.732×10^{-3}	2.455×10^{-5}	1.272×10^{-3}	0.7345
1500	0.01386	16553	0.6581	2.869×10^{-3}	3.099×10^{-5}	2.237×10^{-3}	0.7795
2000	0.01081	17400	0.5480	2.914×10^{-3}	3.690×10^{-5}	3.414×10^{-3}	1.1717

Nhiệt độ $T, ^\circ\text{C}$	Mật độ $\rho, \text{kg/m}^3$	Nhiệt dung riêng cp $\text{J/kg} \cdot \text{K}$	Hệ số dẫn nhiệt $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Hệ số kt nhiệt $\alpha, \text{m}^2/\text{s}$	Độ nhớt động lực $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Độ nhớt động học $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Số Prandtl Pr
<i>Nitrogen, N₂</i>							
-50	1.5299	957.3	0.02001	1.366×10^{-5}	1.390×10^{-5}	9.091×10^{-6}	0.6655
0	1.2498	1035	0.02384	1.843×10^{-5}	1.640×10^{-5}	1.312×10^{-5}	0.7121
50	1.0564	1042	0.02746	2.494×10^{-5}	1.874×10^{-5}	1.774×10^{-5}	0.7114
100	0.9149	1041	0.03090	3.244×10^{-5}	2.094×10^{-5}	2.289×10^{-5}	0.7056
150	0.8068	1043	0.03416	4.058×10^{-5}	2.300×10^{-5}	2.851×10^{-5}	0.7025
200	0.7215	1050	0.03727	4.921×10^{-5}	2.494×10^{-5}	3.457×10^{-5}	0.7025
300	0.5956	1070	0.04309	6.758×10^{-5}	2.849×10^{-5}	4.783×10^{-5}	0.7078
400	0.5072	1095	0.04848	8.727×10^{-5}	3.166×10^{-5}	6.242×10^{-5}	0.7153
500	0.4416	1120	0.05358	1.083×10^{-4}	3.451×10^{-5}	7.816×10^{-5}	0.7215
1000	0.2681	1213	0.07938	2.440×10^{-4}	4.594×10^{-5}	1.713×10^{-4}	0.7022
1500	0.1925	1266	0.11793	4.839×10^{-4}	5.562×10^{-5}	2.889×10^{-4}	0.5969
2000	0.1502	1297	0.18590	9.543×10^{-4}	6.426×10^{-5}	4.278×10^{-4}	0.4483
<i>Oxygen, O₂</i>							
-50	1.7475	984.4	0.02067	1.201×10^{-5}	1.616×10^{-5}	9.246×10^{-6}	0.7694
0	1.4277	928.7	0.02472	1.865×10^{-5}	1.916×10^{-5}	1.342×10^{-5}	0.7198
50	1.2068	921.7	0.02867	2.577×10^{-5}	2.194×10^{-5}	1.818×10^{-5}	0.7053
100	1.0451	931.8	0.03254	3.342×10^{-5}	2.451×10^{-5}	2.346×10^{-5}	0.7019
150	0.9216	947.6	0.03637	4.164×10^{-5}	2.694×10^{-5}	2.923×10^{-5}	0.7019
200	0.8242	964.7	0.04014	5.048×10^{-5}	2.923×10^{-5}	3.546×10^{-5}	0.7025
300	0.6804	997.1	0.04751	7.003×10^{-5}	3.350×10^{-5}	4.923×10^{-5}	0.7030
400	0.5793	1025	0.05463	9.204×10^{-5}	3.744×10^{-5}	6.463×10^{-5}	0.7023
500	0.5044	1048	0.06148	1.163×10^{-4}	4.114×10^{-5}	8.156×10^{-5}	0.7010
1000	0.3063	1121	0.09198	2.678×10^{-4}	5.732×10^{-5}	1.871×10^{-4}	0.6986
1500	0.2199	1165	0.11901	4.643×10^{-4}	7.133×10^{-5}	3.243×10^{-4}	0.6985
2000	0.1716	1201	0.14705	7.139×10^{-4}	8.417×10^{-5}	4.907×10^{-4}	0.6873
<i>Water Vapor, H₂O</i>							
-50	0.9839	1892	0.01353	7.271×10^{-6}	7.187×10^{-6}	7.305×10^{-6}	1.0047
0	0.8038	1874	0.01673	1.110×10^{-5}	8.956×10^{-6}	1.114×10^{-5}	1.0033
50	0.6794	1874	0.02032	1.596×10^{-5}	1.078×10^{-5}	1.587×10^{-5}	0.9944
100	0.5884	1887	0.02429	2.187×10^{-5}	1.265×10^{-5}	2.150×10^{-5}	0.9830
150	0.5189	1908	0.02861	2.890×10^{-5}	1.456×10^{-5}	2.806×10^{-5}	0.9712
200	0.4640	1935	0.03326	3.705×10^{-5}	1.650×10^{-5}	3.556×10^{-5}	0.9599
300	0.3831	1997	0.04345	5.680×10^{-5}	2.045×10^{-5}	5.340×10^{-5}	0.9401
400	0.3262	2066	0.05467	8.114×10^{-5}	2.446×10^{-5}	7.498×10^{-5}	0.9240
500	0.2840	2137	0.06677	1.100×10^{-4}	2.847×10^{-5}	1.002×10^{-4}	0.9108
1000	0.1725	2471	0.13623	3.196×10^{-4}	4.762×10^{-5}	2.761×10^{-4}	0.8639
1500	0.1238	2736	0.21301	6.288×10^{-4}	6.411×10^{-5}	5.177×10^{-4}	0.8233
2000	0.0966	2928	0.29183	1.032×10^{-3}	7.808×10^{-5}	8.084×10^{-4}	0.7833

Bảng A5: Tính chất của không khí ở độ cao khác nhau

Độ cao m	Nhiệt độ °C	Áp suất kPa	Trọng trường g, m/s ²	Vận tốc âm m/s	Mật độ kg/m ³	Độ nhớt động lực μ , kg/m · s	Hệ số dẫn nhiệt W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244
2000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726×10^{-5}	0.0243
2200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720×10^{-5}	0.0242
2400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713×10^{-5}	0.0241
2600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707×10^{-5}	0.0240
2800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700×10^{-5}	0.0239
3000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694×10^{-5}	0.0238
3200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687×10^{-5}	0.0237
3400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681×10^{-5}	0.0236
3600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674×10^{-5}	0.0235
3800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668×10^{-5}	0.0234
4000	-10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661×10^{-5}	0.0233
4200	-12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655×10^{-5}	0.0232
4400	-13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648×10^{-5}	0.0231
4600	-14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642×10^{-5}	0.0230
4800	-16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635×10^{-5}	0.0229
5000	-17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628×10^{-5}	0.0228
5200	-18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622×10^{-5}	0.0227
5400	-20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615×10^{-5}	0.0226
5600	-21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608×10^{-5}	0.0224
5800	-22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602×10^{-5}	0.0223
6000	-24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595×10^{-5}	0.0222
6200	-25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588×10^{-5}	0.0221
6400	-26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582×10^{-5}	0.0220
6600	-27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575×10^{-5}	0.0219
6800	-29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568×10^{-5}	0.0218
7000	-30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561×10^{-5}	0.0217
8000	-36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527×10^{-5}	0.0212
9000	-43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493×10^{-5}	0.0206
10,000	-49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458×10^{-5}	0.0201
12,000	-56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422×10^{-5}	0.0195
14,000	-56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422×10^{-5}	0.0195
16,000	-56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422×10^{-5}	0.0195
18,000	-56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422×10^{-5}	0.0195

Bảng A6: Một số đặc trưng của dòng một chiều đẳng entropy của chất khí lý tương với k=1.4

$$\text{Ma}^* = \text{Ma} \sqrt{\frac{k+1}{2+(k-1)\text{Ma}^2}}$$

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{\text{Ma}} \left[\left(\frac{2}{k+1} \right) \left(1 + \frac{k-1}{2} \text{Ma}^2 \right) \right]^{0.5(k+1)(k-1)}$$

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \text{Ma}^2 \right)^{-k/(k-1)}$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \text{Ma}^2 \right)^{-1/(k-1)}$$

$$\frac{T}{T_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \text{Ma}^2 \right)^{-1}$$

Ma	Ma*	A/A*	P/P ₀	ρ/ρ ₀	T/T ₀
0	0	∞	1.0000	1.0000	1.0000
0.1	0.1094	5.8218	0.9930	0.9950	0.9980
0.2	0.2182	2.9635	0.9725	0.9803	0.9921
0.3	0.3257	2.0351	0.9395	0.9564	0.9823
0.4	0.4313	1.5901	0.8956	0.9243	0.9690
0.5	0.5345	1.3398	0.8430	0.8852	0.9524
0.6	0.6348	1.1882	0.7840	0.8405	0.9328
0.7	0.7318	1.0944	0.7209	0.7916	0.9107
0.8	0.8251	1.0382	0.6560	0.7400	0.8865
0.9	0.9146	1.0089	0.5913	0.6870	0.8606
1.0	1.0000	1.0000	0.5283	0.6339	0.8333
1.2	1.1583	1.0304	0.4124	0.5311	0.7764
1.4	1.2999	1.1149	0.3142	0.4374	0.7184
1.6	1.4254	1.2502	0.2353	0.3557	0.6614
1.8	1.5360	1.4390	0.1740	0.2868	0.6068
2.0	1.6330	1.6875	0.1278	0.2300	0.5556
2.2	1.7179	2.0050	0.0935	0.1841	0.5081
2.4	1.7922	2.4031	0.0684	0.1472	0.4647
2.6	1.8571	2.8960	0.0501	0.1179	0.4252
2.8	1.9140	3.5001	0.0368	0.0946	0.3894
3.0	1.9640	4.2346	0.0272	0.0760	0.3571
5.0	2.2361	25.000	0.0019	0.0113	0.1667
∞	2.2495	∞	0	0	0

Phụ lục 2: Một số thuật ngữ tiếng Anh

Tiếng Anh	Tiếng Việt	Giải thích thêm
Actuators	Bộ truyền động	
Adiabatic flow	Dòng chảy đoạn nhiệt	Không có trao đổi nhiệt với môi trường
Angular momentum/Moment of momentum	Xung lượng góc/Mô men động lượng	
Axial pumps	Bơm hướng trục (thuộc bơm cánh quạt)	
Amount of rotation	Quãng đường quay	Góc quét
Adiabatic process	Quá trình đoạn nhiệt	
Accelerative head	Cột cao gia tốc	Xuất hiện trong phương trình năng lượng đã đưa về cột cao (năng lượng trên một đơn vị trọng lượng)
Barometer	Phong vũ biểu, dụng cụ đo khí áp	
Boundary layer	Lớp biên	
Buoyant force	Lực đẩy nổi	Lực Archimedes
Buffer layer	Lớp đệm	Trong khái niệm lớp biên
Back pressure	Áp suất bên ngoài miệng ống phun	Áp suất bên ngoài môi trường, có thể khác với áp suất miệng ống phun khi dòng đạt tới hạn
Centrifugal pumps	Bơm ly tâm (thuộc bơm cánh quạt)	
Circular flow	Dòng chảy quay tròn xung quanh một trục	
Closed system	Hệ đóng	Một thể tích gắn liền với vật chất (thể tích có thể thay đổi nhưng vật chất không ra khỏi biên của thể tích đó)
Control mass	Khối lượng không chế	Là một hệ đóng
Control volume	Thể tích không chế	Là một hệ mở
Creeping flow, Stokes flow, low Reynolds number flow	Dòng chảy với số Reynolds nhỏ	
Centripetal acceleration	Gia tốc hướng tâm	
Centripetal force	Lực hướng tâm	
Centrifugal pump	Bơm ly tâm	
Critical Reynolds number	Số Reynolds tới hạn	Dòng chảy chuyển từ chế độ chảy tầng sang chế độ rối
Creeping flow	Dòng chảy chậm	$Re \ll 1$
Chord length	Chiều dài chéo cánh	Chiều dài giữa mũi đầu và mũi cuối của mặt cắt cánh

Choked flow	Dòng chảy nghẽn	Dòng chảy đạt vận tốc âm thanh tại miệng ống phun thu hẹp
Density	Mật độ, khối lượng riêng, khối lượng đơn vị	
Displacement Thickness	Bề dày chiếm chỗ, bề dày lớp biên	
Dynamic pressure	Áp suất động lực	
Deformation	biến dạng	
Drag coefficient	Hệ số lực cản	Không thứ nguyên, ký hiệu C_D
Diffuser	Ống phun mở rộng	
Dynamic temperatura	Nhiệt độ động lực	Có giá trị là $V^2/2c_p$
Damping	Sự giảm chấn, mất năng lượng dần dần	
Energy Grade Line (EGL)	Đường mức năng lượng, Đường Năng	
Entrance region	Khu vực phát triển dòng chảy	
Entry length	Độ dài phát triển dòng chảy	Liên quan đến dòng chảy trong đường ống
Expansion wave	Sóng dẫn nở	
External flow	Dòng chảy bao	
Eddy viscosity	Hệ số nhớt xoáy	Hệ số nhớt rối
Exit plane pressure	Áp suất tại cửa ra của ống phun	Có thể khác với áp suất bên ngoài môi trường đối với dòng tới hạn
Flow Separation	Tách dòng	
Flow Visualization	Hiện thị dòng chảy	
Friction Drag	Lực cản (do) ma sát	
Flux	Thông lượng	Lưu lượng trên một đơn vị diện tích
Fully rough flow, fully rough turbulent flow	Dòng chảy rối nhám hoàn toàn	Hệ số ma sát đường ống không còn phụ thuộc vào số Reynolds, chỉ phụ thuộc vào hệ số nhám
Frontal area	Diện tích mặt trước	Diện tích mặt chiếu vuông góc với hướng dòng chảy, sử dụng để tính lực cản và lực nâng
Flow separation.	Hiện tượng tách dòng	
Gradually Varied Flow	Dòng chảy biến đổi chậm	
Head loss	Tổn thất cột áp	
Hydraulic Grade Line (HGL)	đường mức thủy lực, đường đo áp	
Hydraulic jump	Bước nhảy thủy lực	
Hydrostatic pressure	Áp suất thủy tĩnh	
Hydrometer	Tỷ trọng kế	Dùng để đo tỷ trọng riêng của chất lỏng

Hydrodynamic entrance region	Vùng/ khu vực đầu vào thủy động lực	
Hydrodynamic entry length	Chiều dài phát triển dòng vào	
Hypersonic flow	Dòng chảy siêu âm	$Ma \gg 1$
Internal flow	Dòng chảy bên trong	
Irreversible process	Quá trình không thuận nghịch	
Isothermal process	Quá trình đẳng nhiệt	
Isentropic process	Quá trình đẳng entropy	Đoạn nhiệt và không ma sát, $entropy = const$
Kinetic Energy Correction Factor (α)	Hệ số sửa chữa động năng	Ví dụ đối với dòng chảy tầng trong ống hình trụ (phân bố vận tốc parabol) $\alpha = 2.0$
Linear momentum	Động lượng tuyến tính	Động lượng của vật chuyển động tuyến tính (không tự quay)
Line of action	Đường tác dụng	Đường tác dụng của lực, dùng để xác định vị trí đặt của lực
Latent energy form	Dạng năng lượng tiềm ẩn	Ví dụ như nhiệt dung riêng (cùng nhiệt độ nhưng mang năng lượng khác nhau)
Linear velocity	Vận tốc dài	
Linear acceleration	Gia tốc dài	
Laminar flow	Dòng chảy tầng	
Loss/resistance coefficient	Hệ số tổn thất cục bộ	Sử dụng trong tính toán đường ống
Lift coefficient	Hệ số lực nâng	Không thứ nguyên, ký hiệu C_L
Manometer	Áp suất kế	
Metacenter	Tâm nghiêng ngang	Liên quan đến ổn định của vật nổi
Mass flow rate	Lưu lượng khối lượng	Đơn vị: kg/s
Momentum - Flux Correction Factor (β)	Hệ số sửa chữa động lượng	Trong ống hình trụ với dòng chảy tầng (phân bố vận tốc parabol) $\beta = 4/3$
Minor loss	Tổn thất cục bộ, thứ yếu	Tổn thất áp suất trong đường ống do các thiết bị hoặc thay đổi hình học
Major loss	Tổn thất chính, tổn thất dọc đường	Tổn thất áp suất do ma sát với thành ống
Net Positive Suction Head	Độ cao hút cho phép (của máy bơm)	
Non-slip condition	Điều kiện bám dính	Hoặc điều kiện không trơn trượt
Nozzle	Vòi, ống phun	
Normal shock wave	Sóng xung kích vuông góc	Xuất hiện trên mặt phẳng vuông góc với hướng dòng chảy

Obstruction Flowmeters	Thiết bị đo dòng chảy can thiệp trong dòng chảy	
Open system	Hệ mở	Một thể tích chứa chất lỏng trong đó chất lỏng có thể vào, ra qua biên của thể tích đó
Orifice	Lỗ, miệng ống	
Overlap layer	Lớp chồng lấn	Lớp biên giữa lớp đệm và lớp biên rời khi ảnh hưởng của rời đã lớn nhưng chưa chiếm ưu thế hoàn toàn
Oblique shock wave	Sóng xung kích xiên	
Pathline	đường dẫn (đường đi của hạt chất lỏng)	
Piezometer	Ống đo áp suất (bằng cột chất lỏng)	
Pressure Drag	Lực cản (do) áp suất	
Pressure drop	tổn thất áp suất	
Property	Tính chất, tham số, thông số	
Pump Performance Curve	Đường đặc tính máy bơm	
Pump Scaling Law	Quy tắc tương tự cho máy bơm	
Pressure head	Cột áp suất	
Pitching moment	Mô-men lắc dọc	
Planform area	Diện tích nâng cánh	Diện tích chiếu theo hướng thẳng đứng của một vật, sử dụng tính lực nâng tác dụng lên cánh
Pressure drag, form drag	Lực cản áp suất, lực cản hình dạng	Lực cản áp suất gây ra phụ thuộc chủ yếu do hình dạng của vật
Radial-Flow Devices	Thiết bị dòng tia (thiết bị ly tâm)	
Rapidly Varied Flow	Dòng chảy biến đổi nhanh	
Rigid-Body Motion	Chuyển động liên khối, chuyển động bó cứng	Toàn bộ chất lỏng chuyển động cùng gia tốc và cùng vận tốc, không có sự chuyển động tương đối giữa các lớp chất lỏng
Rotary Fuel Atomizers 802	Máy phun nhiên liệu quay	
Revolutions per minute (rpm)	Vòng trên phút	
Radian acceleration	Gia tốc ly tâm	
Radian force	Lực ly tâm	
Rolling moment	Mô-men nghiêng	

Shear stress	Ứng suất trượt, cắt	Ứng suất gây ra lực tiếp tuyến
Shock wave	Sóng xung kích	
Specific energy	Năng lượng riêng/đơn vị	
Specific Gravity or relative density	Tỷ trọng riêng, mật độ tương đối	So với mật độ của nước ở 4°C = 1000 kg/m ³
Stagnation temperature	Nhiệt độ điểm dừng, nhiệt độ dòng hãm	
Stagnation pressure	Áp suất điểm dừng, áp suất dòng hãm	Tổng cộng áp suất thủy tĩnh và áp suất động lực
Steady flow	Dòng chảy dừng/ ổn định	Có các tham số không thay đổi theo thời gian. Đôi khi được gọi là "dòng chảy không ổn định" tuy nhiên dễ nhầm với khái niệm "ổn định" theo nghĩa khác
Streakline	Đường vết (đường đi của chuỗi hạt lỏng xuất phát từ một điểm)	
Streamline	Đường dòng	
Surface tension	Sức căng bề mặt	
Single-stream system	Hệ thống đơn dòng	Hệ thống thủy lực có một cửa vào và một cửa ra
Strain	Độ đo biến dạng	Strain is a description of deformation in terms of <i>relative</i> displacement of particles in the body that excludes rigid-body motions.
Shaft	Trục quay	
Sensible energy form	Dạng năng lượng nhận biết được	Ví dụ như nhiệt độ
Skin friction drag	Lực cản ma sát bề mặt	
Spoiler, inverted airfoil	Cánh ngược	Gắn trên xe đua để hạn chế lực nâng
Stall	Hiện tượng mất tốc ở máy bay	Khi góc tấn đạt tới một tới hạn nào đó
Streamlined body	Vật thể có hình dạng khí động học	
Specific heat	Nhiệt dung riêng	Chất khí có 2 đại lượng nhiệt dung riêng: đẳng áp c_p và đẳng tích c_v
Specific heat ratio	Tỷ số nhiệt dung riêng, hệ số khí	Hệ số khí $k=c_p/c_v$
Sonic	Dòng chảy bằng âm (sonic)	Ma=1
Supersonic	Dòng chảy trên âm	Ma>1

Subsonic	Dòng chảy dưới âm	$Ma < 1$
Torque	Mô-men quay (của vật rắn)/ mô-men xoắn	$M = I \cdot \alpha$ (Mô-men quán tính nhân với gia tốc góc)
Transitional flow	Dòng chảy chuyển tiếp	
Turbulent flow	Dòng chảy rối	
Turbulent shear stress	Ứng suất cắt rối	Ứng suất cắt bổ sung thêm do hiệu ứng rối
Turbulent viscosity	Hệ số nhớt rối	Hệ số nhớt xoáy
Terminal velocity	Vận tốc cuối	Vận tốc tối đa có thể đạt được của một vật chuyển động trong chất lỏng
Turbulent layer	Lớp biên rối	
Transonic	Dòng chảy cận âm	$Ma \approx 1$
Uniform flow	Dòng chảy đồng nhất/đều	
Unsteady flow	Dòng không dừng/ không ổn định	Có các tham số thay đổi theo thời gian. Sử dụng thuật ngữ "không ổn định" trong trường hợp này dễ dẫn đến nhầm lẫn với khái niệm "ổn định" (stability)
Velocity profile	Phân bố vận tốc	
Volume flow rate	Lưu lượng thể tích	Có đơn vị: m^3/s
Viscous sublayer	Lớp biên nhớt	
Wind Tunnel	Ống khí động (hầm gió)	
Wind tunnel	Hầm gió, ống khí động	Sử dụng làm thí nghiệm khí động học
Wake region	Vùng vết dòng chảy	Vùng dòng chảy sau vật cản khi lớp biên đã bị tách ra khỏi bề mặt vật cản
Wingspan	Sải cánh	Khoảng cách giữa hai đầu cánh (kể cả chiều rộng của thân máy bay)
Water hammer	Hiện tượng búa nước	Xảy ra khi đóng, mở van đường ống đột ngột
Yawing moment	Mô-men lắc ngang	

Phụ lục 3: Hướng dẫn giải một số bài tập

Chương 2

Mật độ và tỷ trọng riêng

2.5

Vấn đề: Khí Hê li trong bóng bay ở nhiệt độ và áp suất cho trước. Xác định số mole và khối lượng khí Hê li trong bóng bay.

Giả thiết: Hê li trong bóng bay được coi là một chất khí lý tưởng.

Tính chất: Hằng số khí phổ quát là $R_u=8.314 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K}$. Khối lượng mole của Hê li là 4 (kg/kmol) .

Phân tích: Thể tích bóng bay :

$$V=(4/3)\pi R^3=(4/3)\times 3.14159\times(3)^3=113.1 \text{ (m}^3\text{)}$$

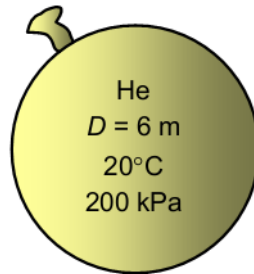
Số mole Hê li trong bóng bay là :

$$N = \frac{PV}{R_u T} = \frac{(200 \text{ kPa})(113.1 \text{ m}^3)}{(8.314 \text{ kPa}\cdot\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}\cdot\text{K}})(293 \text{ K})} = 9.286 \text{ kmol}$$

Khối lượng khí Hê li trong bóng bay là :

$$m=NM=(9.286 \text{ kmol})(4.0 \text{ kg/kmol})=37.1 \text{ kg}$$

Thảo luận: Khối lượng Hê li trong bóng bay là khá lớn. Tuy nhiên khối lượng không khí bị bóng bay chiếm chỗ còn lớn hơn nhiều. Chính vì vậy bóng bay có thể bay lên trong không khí.



2.6

Vấn đề: Lớp ô tô chứa đầy không khí. Xác định áp suất trong lốp nếu nhiệt độ tăng. Xác định khối lượng không khí cần được xả ra để duy trì áp suất.

Giả thiết: Không khí trong lốp được coi là một chất khí lý tưởng. Thể tích của lốp ô tô là không thay đổi.

Tính chất: Hằng số khí phổ quát là $R_u=8.314 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K}$. Khối lượng mole của không khí là 29 (kg/kmol) .

Phân tích: Ban đầu áp suất tuyệt đối trong lốp là :

$$P_1=P_{atm}+P_{1,du}=100+210=310 \text{ kPa}$$

Áp suất P_2 được xác định từ phương trình khí lý tưởng :

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \rightarrow P_2 = \frac{T_2}{T_1} P_1 = \frac{323 \text{ K}}{298 \text{ K}} (310 \text{ kPa}) = 336 \text{ kPa}$$

Áp suất tăng lên là:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 336 - 210 = 26 \text{ kPa}$$

Hằng số khí của không khí là:

$$R = Ru/M = (8.314 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K}) / (29 \text{ kg/kmol}) = 0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$$

Khối lượng không khí trong lốp xe được xác định từ phương trình khí lý tưởng:

$$m_1 = \frac{P_1 V}{RT_1} = \frac{(310 \text{ kPa})(0.025 \text{ m}^3)}{\left(0.287 \text{ kPa}\cdot\frac{\text{m}^3}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)(298 \text{ K})} = 0.0906 \text{ kg}$$

$$m_2 = \frac{P_1 V}{RT_2} = \frac{(310 \text{ kPa})(0.025 \text{ m}^3)}{\left(0.287 \text{ kPa}\cdot\frac{\text{m}^3}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right)(323 \text{ K})} = 0.0836 \text{ kg}$$

$$\Delta m = m_1 - m_2 = 0.0906 - 0.0836 = 0.0070 \text{ kg}$$

Thảo luận: Lưu ý sử dụng áp suất tuyệt đối và độ K trong phương trình khí lý tưởng.

2.27

Vấn đề: Biết mật độ tăng khi áp suất tăng đẳng nhiệt ở dải áp suất trung bình. Xác định mức độ tăng mật độ khi áp suất tăng đẳng nhiệt trong dải áp suất cao.

Giả thiết: Khí xem xét được coi là một chất khí lý tưởng.

Phân tích: Chất khí lý tưởng ở hai trạng thái áp suất P_1 và P_2 cùng nhiệt độ T thỏa mãn phương trình :

$$\frac{P_1}{\rho_1} = \frac{P_2}{\rho_2} = RT \rightarrow P_2 - P_1 = (\rho_2 - \rho_1)RT \rightarrow \frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \rightarrow \frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

Vậy:

$$\text{Ở áp suất 10 atm: } \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{11 - 10}{10} = 10\%$$

$$\text{Ở áp suất 100 atm: } \frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta P}{P} = \frac{101 - 100}{100} = 1\%$$

Thảo luận: Nếu nhiệt độ có thay đổi thì bài toán sẽ phức tạp hơn.

2.32

Vấn đề: Biết bình chứa có thể chịu được sự giãn nở thể tích là 2%. Xác định nhiệt độ nước có thể tăng lên để bình vẫn an toàn.

Giả thiết: Hệ số giãn nở nhiệt là không đổi. Bỏ qua ảnh hưởng của áp suất.

Tính chất: Hệ số giãn nở nhiệt trung bình của nước là $\beta = 0.377 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Phân tích: Sự thay đổi mật độ nước theo nhiệt độ và áp suất được tính theo công thức :

$$\Delta \rho = \alpha \rho \Delta P - \beta \rho \Delta T$$

Bỏ qua ảnh hưởng của áp suất ta có :

$$\Delta \rho = -\beta \rho \Delta T$$

Khi nhiệt độ tăng, bình giãn nở 2% do đó mật độ nước trong bình sẽ giảm 2% như vậy :

$$\Delta \rho = -0.02\rho, \text{ từ đó :}$$

$$-0.02\rho = -\beta \rho \Delta T \rightarrow \Delta T = 0.02/\beta = 0.02/0.377 \cdot 10^{-3} = 53 \text{ K} = 53 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

Vậy nước trong bình có thể tăng thêm tối đa 53 °C

Thảo luận: Kết quả này là an toàn vì khi nhiệt độ tăng áp suất trong bình tăng lên do đó mật độ trong bình sẽ lớn hơn và thực sự giãn nở thể tích sẽ không đạt 2%.

Độ nhớt

2.40

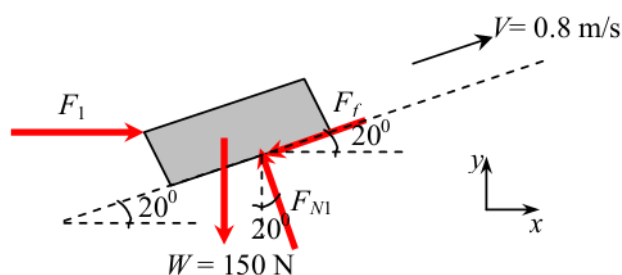
Vấn đề: Một vật chuyển động trên mặt phẳng nằm nghiêng với vận tốc không đổi. Xác định lực kéo khi sần tiếp xúc là khô và khi được phủ một lớp mỏng chất lỏng.

Giả thiết: (1) Hệ số ma sát và bề dày lớp chất lỏng phân bố đều. Trọng lượng lớp chất lỏng là được bỏ qua.

Tính chất: Hệ số nhớt động lực của chất lỏng là $0.012 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 0.012 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

Phân tích:

(a)



Hình P2.40a

Vật chuyển động với vận tốc không đổi nên tổng hợp lực tác động theo các phương phải bằng 0 (Hình P2.40a):

$$\sum F_x = 0: F_1 - F_f \cos 20^\circ - F_{N1} \sin 20^\circ = 0$$

(1)

$$\sum F_y = 0: F_{N1} \cos 20^\circ - F_f \sin 20^\circ - W = 0 \quad (2)$$

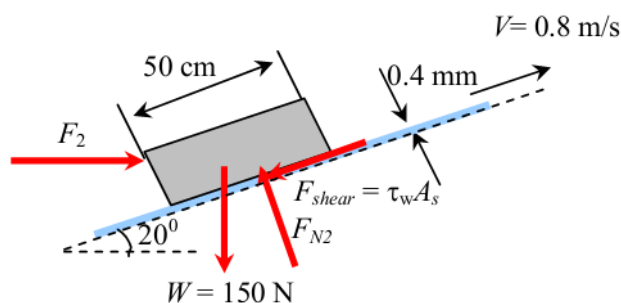
Lực ma sát : $F_f = f F_{N1}$, thay vào (2) ta nhận được :

$$F_{N1} = \frac{W}{\cos 20^\circ - f \sin 20^\circ} = \frac{150 \text{ N}}{\cos 20^\circ - 0.27 \sin 20^\circ} = 177.0 \text{ N}$$

Thay vào (1), ta có :

$$\begin{aligned} F_1 &= F_f \cos 20^\circ + F_{N1} \sin 20^\circ \\ &= (0.27 \times 177 \text{ N}) \cos 20^\circ + (177 \text{ N}) \sin 20^\circ = 105.5 \text{ N} \end{aligned}$$

(b)



Hình P2.40b

Trong trường hợp này lực ma sát được thay thế bằng lực cắt do chất lỏng tác dụng lên đáy của vật. Do điều kiện không trơn trượt, chất lỏng dính vào mặt sàn và đáy vật nên phân bố vận tốc trong chất lỏng được giả thiết là tuyến tính và lực cắt được xác định như sau :

$$F_{shear} = \tau_w A_s = \mu A_s \frac{V}{h} = \left(0.012 \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2}\right) (0.5 \times 0.2 \text{ m}^2) \frac{0.8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{4 \times 10^{-4} \text{ m}} = 2.4 \text{ N}$$

Tổng hợp lực theo các phương phải bằng 0, do đó ta có:

$$\sum F_x = 0: F_2 - F_{shear} \cos 20^\circ - F_{N2} \sin 20^\circ = 0 \quad (3)$$

$$\sum F_y = 0: F_{N2} \cos 20^\circ - F_{shear} \sin 20^\circ - W = 0$$

(4)

Từ (4) ta có :

$$F_{N2} = (F_{shear} \sin 20^\circ + W) / \cos 20^\circ = [(2.4 \text{ N}) \sin 20^\circ + (150 \text{ N})] / \cos 20^\circ = 160.5 \text{ N}$$

Thay vào (3), từ đó ta xác định được:

$$F_2 = F_{shear} \cos 20^\circ + F_{N2} \sin 20^\circ = (2.4 \text{ N}) \cos 20^\circ + (160.5 \text{ N}) \sin 20^\circ = 57.2 \text{ N}$$

Lực đẩy cần thiết đã giảm xuống:

$$\frac{F_1 - F_2}{F_1} \times 100\% = \frac{105.5 - 57.2}{105.5} \times 100\% = 45.8 \%$$

Thảo luận: Có thể nhận thấy rằng, lực đẩy cần thiết để vật chuyển động trên lớp dầu đã giảm đáng kể.

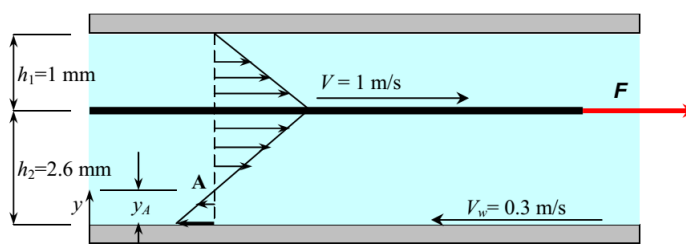
2.42

Vấn đề: Một tấm phẳng chuyển động giữa hai bức tường chứa chất lỏng với vận tốc không đổi. Tường dưới chuyển động ngược chiều với tấm phẳng. Vẽ profile vận tốc trong chất lỏng, xác định vị trí có vận tốc bằng 0 trong chất lỏng và lực tác dụng của chất lên tấm phẳng.

Giả thiết: (1) Bề dày của tấm phẳng không đáng kể, (2) Phân bố vận tốc của chất lỏng giữa tường và tấm phẳng là tuyến tính.

Tính chất: Hệ số nhớt động lực của dầu là $\mu = 0.027 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.027 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$.

Phân tích: (a) Phân bố vận tốc trong chất lỏng được trình bày trên hình P2.42



Hình P2.42

Vị trí nơi vận tốc chất lỏng bằng không được chỉ ra tại điểm A, có tọa độ là y_A :

$$\frac{2.6 - y_A}{y_A} = \frac{1}{0.3} \rightarrow y_A = 0.6 \text{ mm}$$

(b) Lực cắt do chất lỏng tác dụng lên tấm phẳng ở mặt trên và mặt dưới là như sau:

$$F_{shear, trên} = \tau_{w, trên} A_s = \mu A_s \left| \frac{du}{dy} \right| = \mu A_s \frac{V - 0}{h_1}$$

$$= \left(0.027 \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right) (0.2 \times 0.2 \text{ m}^2) \frac{1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.0 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1.08 \text{ N}$$

$$F_{shear, dưới} = \tau_{w, dưới} A_s = \mu A_s \left| \frac{du}{dy} \right| = \mu A_s \frac{V - V_w}{h_1}$$

$$= \left(0.027 \text{ N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right) (0.2 \times 0.2 \text{ m}^2) \frac{[1 - (-0.3)] \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2.6 \times 10^{-3} \text{ m}} = 0.54 \text{ N}$$

Cả hai lực tác dụng ngược chiều với chuyển động của tấm phẳng, do đó tổng hợp lực của chất lỏng tác dụng lên tấm phẳng là:

$$F = F_{shear, trên} + F_{shear, dưới} = 1.08 + 0.54 = 1.63 \text{ N}$$

2.47

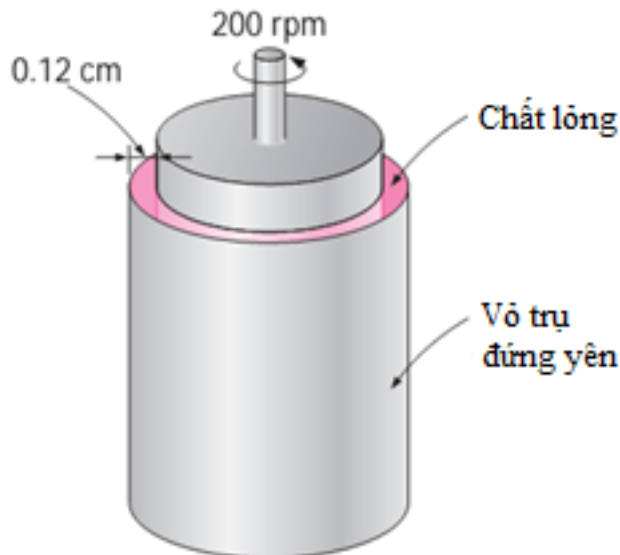
Vấn đề: Cho mô-men xoắn và tốc độ quay của nhớt kế hình trụ đồng tâm. Xác định độ nhớt của chất lỏng.

Giả thiết: (1) Vành khuyên giữa hai hình trụ chứa đầy chất lỏng, (2) ảnh hưởng của nhớt đến hai đầu cuối hình trụ là bỏ qua, (3) chất lỏng xem xét là chất lỏng Newton.

Phân tích: Thay các giá trị tương ứng ta có:

$$\mu = \frac{Tl}{4\pi^2 R^3 \dot{\gamma} L} = \frac{(0.8 \text{ N} \cdot \text{m})(0.0012 \text{ m})}{4\pi^2 (0.075 \text{ m})^3 \left(\frac{200}{60} \text{ s}^{-1} \right) (0.75 \text{ m})} = 0.0231 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$$

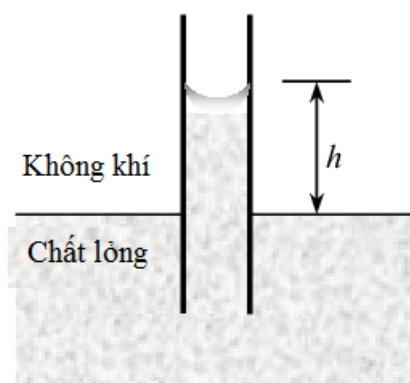
Thảo luận: Đây là độ nhớt của chất lỏng ở nhiệt độ nhất định. Độ nhớt có thể thay đổi khi nhiệt độ thay đổi.



Sức căng bề mặt và hiệu ứng mao dẫn

2.55

Vấn đề: Một ống mao dẫn nhúng vào chất lỏng. Cột mao dẫn được đo. Tính sức căng bề mặt của chất lỏng.



Hình P2.55

Giả thiết: (1) Chất lỏng và thành ống mao dẫn không bị nhiễm bẩn, (2) ống mao dẫn thông với không khí.

Tính chất : Mật độ chất lỏng được cho là 960 kg/m^3 . Góc tiếp xúc $\phi=15^\circ$

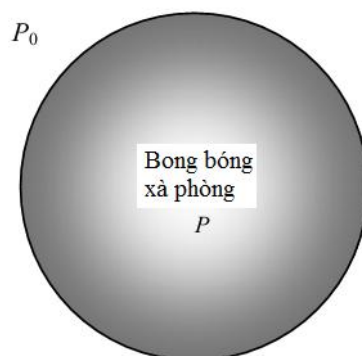
Phân tích: Thay các giá trị tương ứng ta có:

$$\sigma_s = \frac{\rho g R h}{2 \cos \phi} = \frac{(960 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(\frac{0.0019}{2} \text{ m})(0.005 \text{ m})}{2 \cos 15^\circ} = 0.0232 \text{ N/m}$$

Thảo luận: Đây là sức căng của chất lỏng ở nhiệt độ nhất định. Sức căng có thể thay đổi khi nhiệt độ thay đổi.

2.56

Vấn đề: Xác định áp suất dư bên trong bong bóng xà phòng khi biết đường kính và nhiệt độ.



Hình P2.56a

Giả thiết: Bong bóng xà phòng đang ở trong môi trường không khí.

Tính chất : Sức căng bề mặt của nước xà phòng ở nhiệt độ 20oC là 0.025 N/m.

Phân tích: Chênh lệch áp suất bên trong và bên ngoài bong bóng xác định theo công thức :

$$\Delta P_{bb} = P_i - P_0 = \frac{4\sigma_s}{R}$$

Với $P_0 = P_{atm}$, ta có $\Delta P_{bb} = P_{i,dur}$. Vậy:

$$P_{i,dur} = \Delta P_{bb} = \frac{4(0.025 \frac{N}{m})}{\frac{0.002}{2} m} = 100 \frac{N}{m^2} = 100 Pa$$

$$P_{i,dur} = \Delta P_{bb} = \frac{4(0.025 \frac{N}{m})}{\frac{0.05}{2} m} = 4 \frac{N}{m^2} = 4 Pa$$

Thảo luận: Áp suất dư bên trong bong bóng xà phòng tỷ lệ nghịch với đường kính bong bóng. Do đó, đường kính càng nhỏ thì áp suất càng lớn.

2.57

Vấn đề: Chất dinh dưỡng hòa tan trong nước được hút lên thân cây nhờ hiệu ứng mao dẫn. Xác định độ cao nước có thể được hút lên trong thân cây.

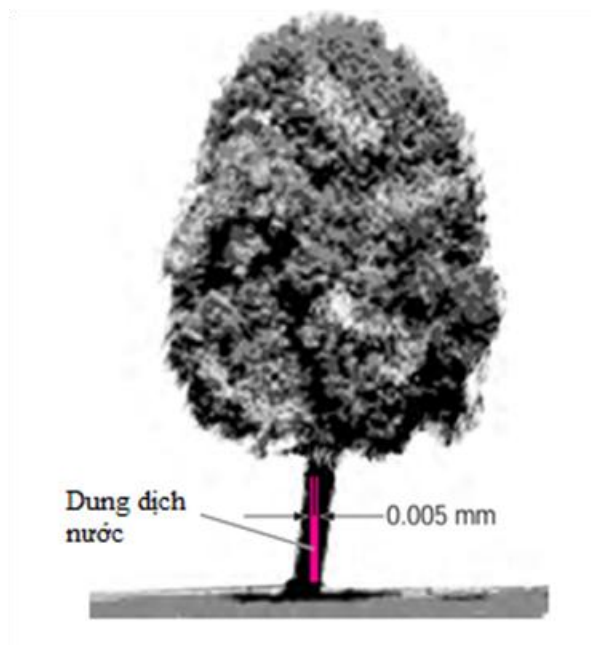
Giả thiết: (1) Nước hòa tan chất dinh dưỡng có tính chất của nước, (2) Đường kính mạch mao dẫn là không đổi, (3) Nhiệt độ ở 20°C.

Tính chất : Nước có mật độ 1000 kg/m³, sức căng bề mặt 0.073 N/m, góc tiếp xúc 15°.

Phân tích: Thay các giá trị vào công thức tính cột mao dẫn ta có :

$$h = \frac{2\sigma_s \cos \phi}{\rho g R} = \frac{2 \left(0.073 \frac{N}{m} \right) (\cos 15^\circ)}{\left(1000 \frac{kg}{m^3} \right) \left(9.81 \frac{m}{s^2} \right) (2.5 \times 10^{-6} m)} = 5.75 m$$

Thảo luận: Ngoài hiệu ứng mao dẫn, các hiệu ứng khác như thế năng hóa học cũng làm cho nước được hút lên thân cây.



Chương 3

Áp suất, áp kế ống và phong vũ biểu

3.8

Vấn đề: Áp suất khí nén trong bình được đo bằng áp kế ống nhiều chất lỏng. Cho biết các số đo, xác định áp suất dư trong bình.

Giả thiết: Bỏ qua trọng lượng của không khí trong bình, vì vậy áp suất khí nén trong bình bằng với áp suất trên mặt phân cách.

Tính chất: Mật độ của thủy ngân, nước và dầu tương ứng là 13600, 1000 và 850 kg/m³.

Phân tích: Bắt đầu từ điểm 1 trên mặt phân cách khí-nước trong bình đi theo ống áp kế đến điểm 2, nơi có áp suất khí quyển, ta có :

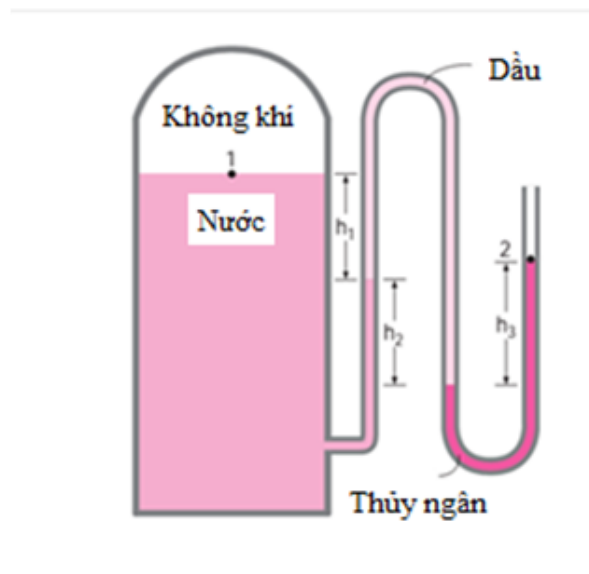
$$P_1 + \rho_{nuoc} gh_1 + \rho_{dau} gh_2 - \rho_{thuyngan} gh_3 = P_{atm}$$

Từ đó ta có:

$$P_{1,dur} = P_1 - P_{atm} = g(\rho_{thuyngan} h_3 - \rho_{nuoc} h_1 - \rho_{dau} h_2)$$

Thay số, ta nhận được:

$$P_{1,dur} = \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) \left[\left(13600 \frac{kg}{m^3}\right) (0.46 m) - \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) (0.2 m) - \left(850 \frac{kg}{m^3}\right) (0.3 m) \right] \left(\frac{1 kPa}{1000 Pa}\right) = 56.9 kPa$$



3.11

Vấn đề: Áp suất tuyệt đối ở trong nước ở độ sâu nhất định đã cho. Xác định áp suất khí quyển tại chỗ và trong một chất lỏng khác ở cùng độ sâu.

Giả thiết: Chất lỏng là không nén được.

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m³. Tỷ trọng riêng của chất lỏng là SG=0.85.

Phân tích: (a) Áp suất khí quyển tại chỗ được xác định từ công thức :

$$P_{atm} = P - \rho gh$$

$$= (145 kPa) - \left(1000 \frac{kg}{m^3}\right) \left(9.81 \frac{m}{s^2}\right) (5 m) \left(\frac{1 kPa}{1000 Pa}\right) = 96.0 kPa$$

(b) Áp suất tuyệt đối ở độ sâu 5m trong chất lỏng khác:

$$P = P_{atm} + \rho gh$$

$$= (96 \text{ kPa}) + \left(850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (5 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}}\right) = 137.7 \text{ kPa}$$

3.16

Vấn đề: Phong vũ biểu được sử dụng để đo chiều cao của tòa nhà. Cho biết áp suất ở dưới mặt đất và áp suất trên đỉnh tòa nhà, xác định chiều cao tòa nhà.

Giả thiết: Thay đổi mật độ không khí theo độ cao là không đáng kể.

Tính chất: Mật độ của không khí là 1.18 kg/m^3 và của thủy ngân là 13600 kg/m^3 .

Phân tích: Chênh lệch áp suất giữa mặt đất và đỉnh tòa nhà là :

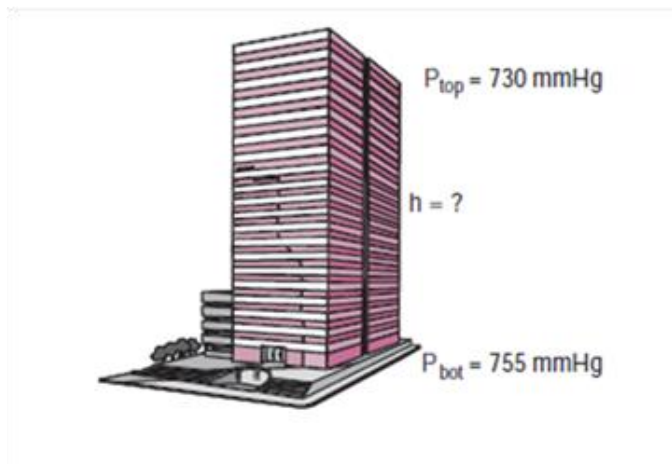
$$P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}} = \rho_{\text{kk}} g h$$

Mặt khác ta có :

$$P_{\text{bottom}} - P_{\text{top}} = (755 - 730) = 25 \text{ (mmHg)} = (0.025 \text{ m}) (9.81 \text{ m/s}^2) (13600 \text{ kg/m}^3) = 3.34 \text{ kPa}$$

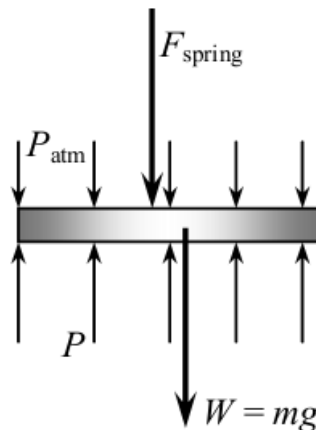
Từ đó

$$h = (3.34 \text{ kPa}) / [(1.18 \text{ kg/m}^3) (9.81 \text{ m/s}^2)] = 288 \text{ m}$$



3.18

Vấn đề: Khí trong xi lanh bị nén bởi lò xo và trọng lượng của piston. Xác định áp suất của khí trong bình.



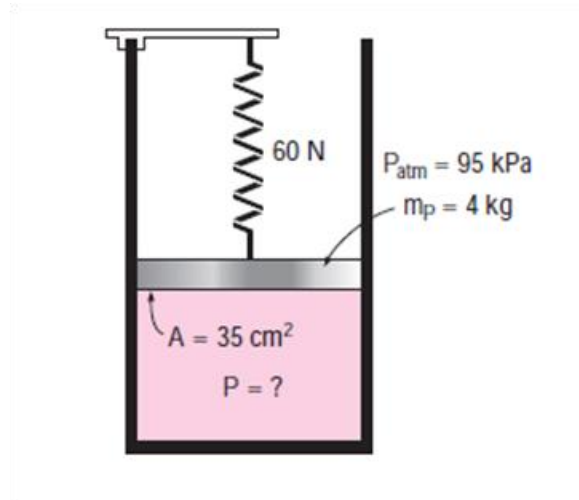
Phân tích: Áp lực của khí lên xi lanh phải cân bằng với các lực khác tác dụng lên xi lanh, do đó :

$$PA = P_{\text{atm}} A + W + F_{\text{spring}}$$

Vì vậy:

$$P = P_{\text{atm}} + \frac{mg + F_{\text{spring}}}{A}$$

$$= (95 \text{ kPa}) + \frac{(4 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) + 60 \text{ N}}{35 \times 10^{-4} \text{ m}^2} \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}}\right) = 123.4 \text{ kPa}$$



3.22

Vấn đề: Một áp kế ống mở ra không khí được nối với tĩnh mạch của người. Xác định độ cao của máu dâng lên trong ống.

Giả thiết: Mật độ của máu là hằng số. Áp suất dư trong tĩnh mạch là 120 mmHg.

Tính chất: Mật độ của máu là 1050 kg/m^3 .

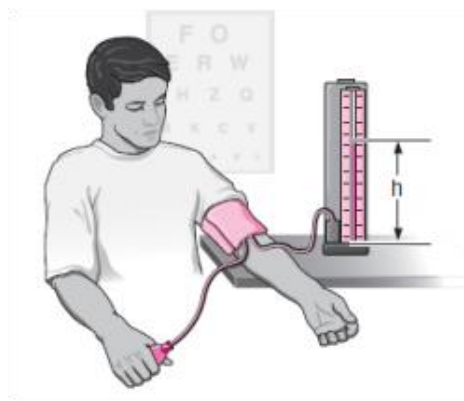
Phân tích: Độ cao của máu dâng lên trong ống được xác định từ phương trình :

$$P = \rho_{\text{máu}} g h_{\text{máu}} = \rho_{\text{thủy ngân}} g h_{\text{thủy ngân}}$$

Từ đó :

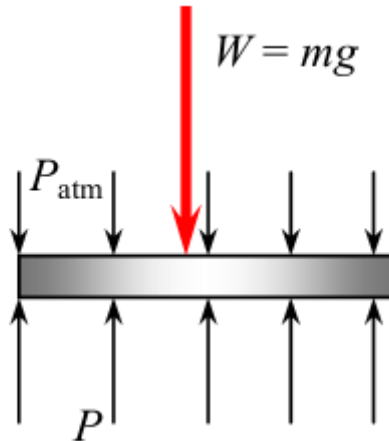
$$h_{\text{máu}} = \frac{\rho_{\text{thủy ngân}}}{\rho_{\text{máu}}} h_{\text{thủy ngân}} = \frac{13600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1050 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} (0.12 \text{ m}) = 1.55 \text{ m}$$

Thảo luận: Trên cơ sở kết quả này ta có thể xác định được độ cao đặt bình tiếp máu cho bệnh nhân.



3.25

Vấn đề: Máy nâng thủy lực được sử dụng để nâng ô tô. Xác định áp suất ở đầu ra của máy nâng.



Giả thiết: Bỏ qua trọng lượng của piston.

Phân tích: Áp suất dư được xác định là trọng lượng ô tô trên diện tích piston, vậy :

$$P_{dư} = \frac{W}{A} = \frac{mg}{\pi D^2/4} = \frac{(2000 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}{\pi \frac{(0.3 \text{ m})^2}{4}} \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ kPa}}\right) = 278 \text{ kPa}$$

Thảo luận: Áp suất trong bình nén có thể giảm nhờ tăng diện tích piston.

3.28

Vấn đề: Áp suất trong bình nén được đo đồng thời bằng áp kế áp suất dư và áp kế ống.

Xác định cột cao của thủy ngân trong áp kế ống.

Giả thiết: Áp suất không khí trong bình là như nhau.

Phân tích: Viết phương trình áp suất xuất phát từ bình nén khí theo ống áp kế ta có:

$$P_1 + \rho_w g h_w - \rho_{Hg} g h_{Hg} - \rho_{oil} g h_{oil} = P_{atm}$$

Từ đó :

$$P_1 - P_{atm} = \rho_{Hg} g h_{Hg} + \rho_{oil} g h_{oil} - \rho_w g h_w$$

Hay :

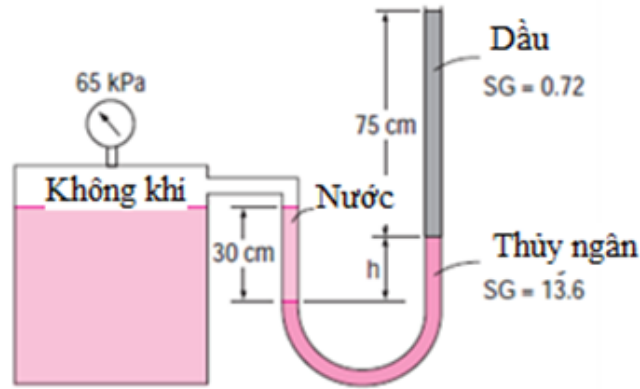
$$\frac{P_{1,dư}}{\rho_w} = SG_{Hg} h_{Hg} + SG_{oil} h_{oil} - h_w$$

Vậy :

$$h_{Hg} = \frac{1}{SG_{Hg}} \left(\frac{P_{1,dư}}{\rho_w g} - SG_{oil} h_{oil} + h_w \right)$$

Thay số vào ta có :

$$h_{Hg} = \frac{1}{13.6} \left[\frac{(65000 \text{ Pa})}{\left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} - 0.72(0.75 \text{ m}) + (0.3 \text{ m}) \right] = 0.47 \text{ m}$$



3.31

Vấn đề: Một vật nặng được nâng lên trên bàn nâng của máy thủy lực. Xác định cột dầu cần phải rót vào ống nhỏ để vật được bắt đầu nâng lên.

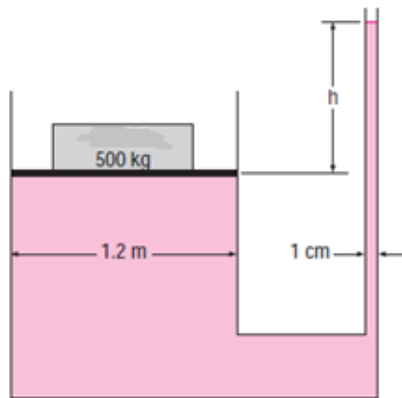
Giả thiết: Các ống hình trụ là thẳng đứng.

Phân tích: Áp suất dư ở mặt dưới bàn nâng do vật gây ra là :

$$P_{dư} = \frac{W}{A} = \frac{mg}{\pi D^2/4} = \frac{(500 \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)}{\pi (1.2 \text{ m})^2/4} \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ Pa}}\right) = 4.34 \text{ kPa}$$

Từ đó:

$$P_{dư} = \rho g h \rightarrow h = \frac{P_{dư}}{\rho g} = \frac{4.34 \cdot 10^3 \text{ Pa}}{\left(780 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 0.567 \text{ m}$$



3.38

Vấn đề: Hai bình chứa nước nối với nhau bằng áp kế ống với các ống nghiêng. Biết hiệu áp suất giữa hai bình. Xác định các tham số a và θ .

Giả thiết: Nước và thủy ngân là chất lỏng không nén được.

Tính chất : Mật độ nước là 1000 kg/m^3 và tỷ trọng riêng của thủy ngân là 13.6.

Phân tích: Viết phương trình áp suất dọc theo ống áp kế ta có :

$$P_A + \rho_w g a + \rho_{Hg} g 2a - \rho_w g a = P_B \rightarrow 2\rho_{Hg} g a = P_B - P_A$$

Vậy:

$$a = \frac{P_B - P_A}{2\rho_{Hg} g} = \frac{20 \times 10^3 \text{ Pa}}{2(13.6) \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 0.075 \text{ m} = 7.5 \text{ cm}$$

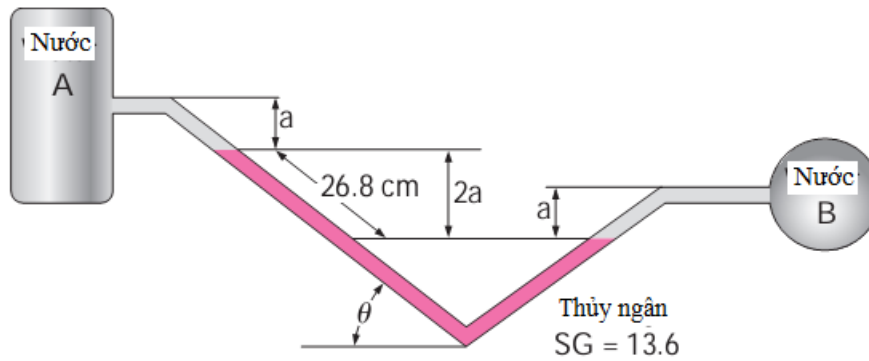
Quan hệ hình học cho thấy rằng:

$$26.8 \sin \theta = 2a \quad (\text{cm})$$

Vì vậy:

$$\sin \theta = \frac{2a}{26.8} = \frac{2 \times 7.5}{26.8} = 0.56 \quad \rightarrow \quad \theta = 34.0^\circ$$

Thảo luận: Chỉ chiều cao thẳng đứng có ý nghĩa khi tính áp suất. Chiều dài nghiêng là không quan trọng.



Áp lực thủy tĩnh lên tấm phẳng và mặt cong

3.45

Vấn đề: Xem xét một phòng ở dưới mực nước của một tàu du lịch. Xác định tổng hợp lực và điểm đặt của áp lực lên cửa sổ.

Giả thiết: Áp lực khí quyển tác dụng lên cả hai mặt của cửa sổ nên có thể bỏ qua.

Tính chất: Mật độ nước biển là 1025 kg/m^3 .

Phân tích: Áp suất tại trọng tâm cửa sổ là:

$$P_C = \rho g h_C = \left(1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) (5 \text{ m}) = 50276 \text{ Pa}$$

Tổng hợp lực tác dụng lên cửa sổ là:

$$F_R = P_C A = (50276 \text{ Pa}) \left[\frac{\pi (0.3 \text{ m})^2}{4} \right] = 3554 \text{ N}$$

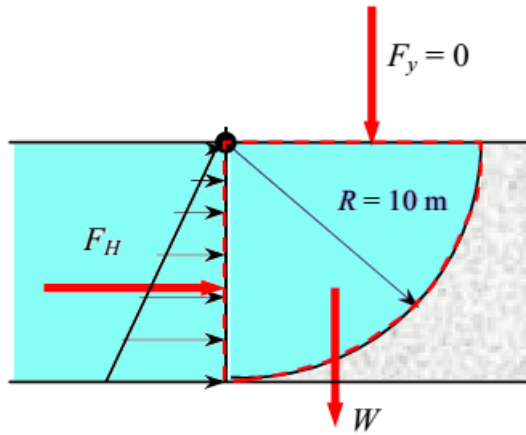
Tâm áp suất (điểm đặt của lực) nằm dưới tâm cửa sổ, cách mặt nước một khoảng cách là:

$$y_P = y_C + \frac{I_{xx,C}}{y_C A} = y_C + \frac{\pi R^4 / 4}{y_C \pi R^2} = y_C + \frac{R^2}{4 y_C} = 5 + \frac{(0.15 \text{ m})^2}{4(5 \text{ m})} = 5.0011 \text{ m}$$

Thảo luận: Đối với bề mặt nhỏ ngập sâu dưới nước, tâm áp suất gần như trùng với trọng tâm của bề mặt.

3.46

Vấn đề: Mặt cắt phần chứa nước của đập là 1/4 hình tròn. Xác định tổng hợp lực và đường tác dụng của tổng hợp lực lên đập.



Hình P3.46

Giả thiết: Áp lực khí quyển tác dụng lên hai mặt của đập nên có thể bỏ qua.

Tính chất: Mật độ nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Xem xét khối chất lỏng giới hạn bởi 1/4 hình tròn như trên hình vẽ. Các thành phần lực nằm ngang và thẳng đứng tác dụng lên các mặt phẳng của khối chất lỏng được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
 F_H = F_x &= P_c A = \rho g h_c A = \rho g \left(\frac{R}{2} \right) A \\
 &= \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \left(\frac{10}{2} \text{ m} \right) (10 \text{ m} \times 100 \text{ m}) = 4.905 \times 10^7 \text{ N} \\
 F_V = W &= \rho g V = \rho g \left(b \times \frac{\pi R^2}{4} \right) \\
 &= \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \left(\frac{10}{2} \text{ m} \right) [(100 \text{ m})\pi(10 \text{ m})^2/4] = 7.705 \times 10^7 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Theo định luật thứ 3 của Newton, các thành phần lực này bằng với lực tác dụng lên đập. Vậy tổng hợp lực tác dụng lên đập là:

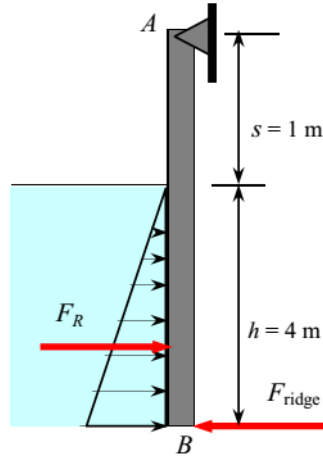
$$F_R = \sqrt{F_H^2 + F_V^2} = \sqrt{(4.905 \times 10^7)^2 + (7.705 \times 10^7)^2} = 9.134 \times 10^7 \text{ N}$$

Góc tác dụng:

$$\tan \theta = \frac{F_V}{F_H} = \frac{7.705 \times 10^7}{4.905 \times 10^7} = 1.571 \rightarrow \theta = 57.5^\circ$$

Vậy đường tác dụng của tổng hợp lực đi qua tâm và làm với phương nằm ngang một góc 57.5° .

Thảo luận: Nếu mặt cắt bề mặt đập không phải là đường tròn, việc xác định đường tác dụng sẽ khó khăn hơn.



Hình P3.47

3.47

Vấn đề: Cánh cửa hình chữ nhật ngăn nước dựa vào mấu B. Xác định của mấu B tác dụng lên cánh cửa.

Giả thiết: Áp lực khí quyển tác dụng lên hai mặt của cánh cửa nên có thể bỏ qua.

Tính chất: Mật độ nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Áp suất tại trọng tâm của cánh cửa (đồng thời là tâm của hình chữ nhật) là:

$$P_C = \rho g h_C = \rho g h / 2$$

$$= \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(\frac{4}{2} \text{ m}\right) \left(\frac{1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}{1000 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}\right) = 19.62 \text{ kN/m}^2$$

Tổng hợp áp lực tác dụng lên cánh cửa là:

$$F_R = P_C A = \left(19.62 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) (4 \text{ m} \times 5 \text{ m}) = 392 \text{ kN}$$

Điểm đặt áp lực nằm dưới trọng tâm cách mặt thoáng khoảng cách là $2h/3$:

$$y_P = \frac{2h}{3} = \frac{2 \times (4 \text{ m})}{3} = 2.667 \text{ m}$$

Để cửa ở trạng thái cân bằng, tổng mô-men các lực tác dụng lên cánh cửa đối với điểm A phải bằng 0:

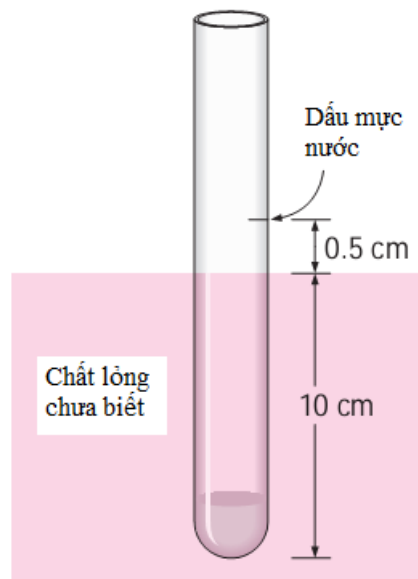
$$\sum M_A = 0 \rightarrow F_R (s + y_P) = F_{\text{ridge}} \overline{AB}$$

Từ đó ta tìm được F_{ridge} :

$$F_{\text{ridge}} = \frac{s + y_P}{\overline{AB}} = \frac{(1 + 2.667) \text{ m}}{5 \text{ m}} (392 \text{ kN}) = 288 \text{ kN}$$

Thảo luận: Chênh lệch giữa áp lực và lực tác dụng ở mấu B là lực tác dụng lên bản lề A.

Lực đẩy nổi



Hình P3.54

3.54

Vấn đề: Tỷ trọng riêng của một chất lỏng cần được xác định bằng tỷ trọng kế thông qua vạch ghi trong nước và trong chất lỏng và số đo khoảng cách giữa hai vạch.

Tính chất: Mật độ nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Tỷ trọng kế nổi trong chất lỏng và ở trạng thái cân bằng do đó ta luôn có lực đẩy nổi bằng trọng lượng của tỷ trọng kế $F_B = W$:

$$F_B = \rho g V_{sub} = \rho g h A_c$$

Trong đó h là độ sâu chìm trong chất lỏng và A_c là thiết diện của tỷ trọng kế.

Đối với nước: $W = \rho_{nuoc} g h_{nuoc} A_c$

Đối với chất lỏng: $W = \rho_{chatlong} g h_{chatlong} A_c$

Vì trọng lượng của tỷ trọng kế là không đổi, từ đó:

$$\rho_{nuoc} g h_{nuoc} A_c = \rho_{chatlong} g h_{chatlong} A_c$$

Vậy mật độ chất lỏng là:

$$\rho_{chatlong} = \frac{h_{nuoc}}{h_{chatlong}} \rho_{nuoc} = \frac{10 \text{ cm}}{(10 - 0.5) \text{ cm}} \left(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 1053 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Thảo luận: Đối với một tỷ trọng kế, tích giữa mật độ và chiều sâu ngập nước của chất lỏng là không đổi.



Hình P3.56

3.56

Vấn đề: Độ cao của tảng băng trên mặt nước đã được xác định. Tính bề dày của tảng băng chìm trong nước.

Giả thiết: (1) Lực đẩy nổi của không khí được bỏ qua; (2) bề mặt của tảng băng song song với mặt nước biển.

Tính chất: Mật độ của tảng băng là 920 kg/m^3 và của nước biển là 1025 kg/m^3 .

Phân tích: Tảng băng ở trạng thái cân bằng do đó lực đẩy nổi bằng tổng trọng lượng của tảng băng, vì vậy:

$$W = F_B \quad \rightarrow \quad \rho_{\text{băng}} g V_{\text{tong}} = \rho_{\text{nước biển}} g V_{\text{chìm}}$$

$$\frac{V_{\text{chìm}}}{V_{\text{tong}}} = \frac{\rho_{\text{băng}}}{\rho_{\text{nước biển}}}$$

Ký hiệu A là diện tích một mặt của hình lập phương ta có:

$$\frac{V_{\text{chìm}}}{V_{\text{tong}}} = \frac{hA}{(h + 0.1)A} = \frac{h}{(h + 0.1)} = \frac{\rho_{\text{băng}}}{\rho_{\text{nước biển}}} = \frac{0.92}{1.025}$$

Vậy, chiều sâu của phần bị chìm là:

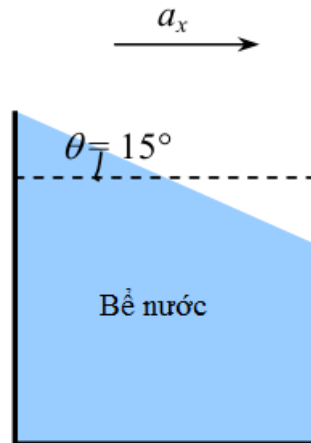
$$h = 0.876 \text{ m} = 87.6 \text{ cm}$$

Thảo luận: Thể tích phần chìm của tảng băng chiếm $0.92/1.025 = 90\%$ thể tích của tảng băng.

Chất lỏng trong chuyển động bó cứng

3.65

Vấn đề: Góc nghiêng chất lỏng trên xe tải đang tăng tốc đã biết. Xác định gia tốc của xe tải.



Hình P3.65

Giả thiết : (1) Đường nằm ngang và bằng phẳng ($a_z=0$); (2) Gia tốc xe tải là hằng số.

Tính chất : Lấy mật độ của nước hồ là 1000 kg/m^3 và của nước biển là 1030 kg/m^3 .

Phân tích: Lấy trục x nằm ngang theo hướng chuyển động của xe tải, trục z thẳng đứng hướng lên. Khi đó góc giữa bề mặt tự do của chất lỏng và mặt nằm ngang được tính theo công thức :

$$\tan \theta = \frac{a_x}{(g + a_z)}$$

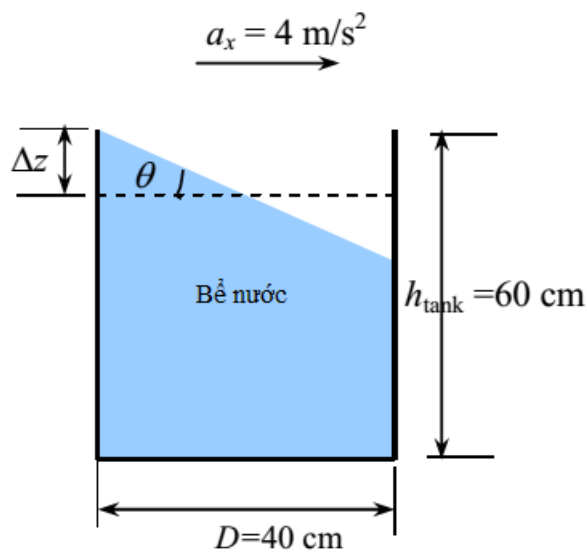
Từ đó :

$$a_x = (g + a_z) \tan \theta = \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} + 0\right) \tan 15^\circ = 2.63 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Thảo luận: Gia tốc của xe tải không phụ thuộc vào mật độ của chất lỏng.

3.68

Vấn đề: Bể nước hình trụ chứa chất lỏng Góc nghiêng chất lỏng trên xe tải đang tăng tốc đã biết. Xác định gia tốc của xe tải.



Hình P3.68

Giả thiết : (1) Đường nằm ngang và bằng phẳng ($a_z=0$); (2) Gia tốc xe tải là hằng số.

Phân tích: Lấy trục x nằm ngang theo hướng chuyển động của xe tải, trục z thẳng đứng hướng lên. Khi đó góc giữa bề mặt nước tự do và mặt nằm ngang được tính theo công thức :

$$\tan \theta = \frac{a_x}{g + a_x} = \frac{4}{9.81 + 0} = 0.4077 \rightarrow \theta = 22.2^\circ$$

Mức nước dâng cao nhất ở điểm sau cùng của thành bình và mức chất lỏng ở tâm bình có độ dâng là 0. Do đó mực nước dâng ở điểm cuối so với mực nước ở tâm bình là:

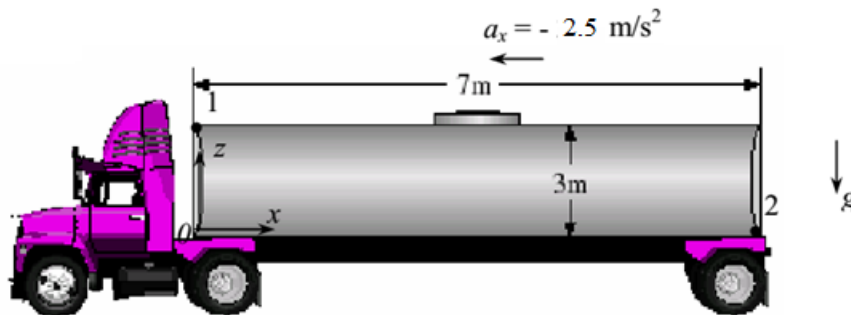
$$\Delta z_{max} = \left(\frac{D}{2}\right) \tan \theta = \left[\frac{0.4 \text{ m}}{2}\right] \times 0.4077 = 0.082 \text{ m} = 8.2 \text{ cm}$$

Vì vậy, mực nước ban đầu cao nhất là:

$$h_{max} = h_{b\grave{e}} - \Delta z_{max} = 60 - 8.2 = 51.8 \text{ cm}$$

3.72

Vấn đề: Xe chở đầy sữa trong bình kín đang tăng tốc với gia tốc không đổi. Xác định áp suất tối đa và vị trí của điểm đó trong bình khi biết áp suất tối thiểu ở trong bình.



Giả thiết : (1) Đường nằm ngang và bằng phẳng ($a_z=0$); (2) Gia tốc xe tải là hằng số; (3) Sữa là chất lỏng không nén được.

Tính chất: Mật độ của sữa là 1020 kg/m^3 .

Phân tích: Lấy trục x nằm ngang theo hướng chuyển động của xe tải, trục z thẳng đứng hướng lên. Khi đó chênh lệch áp suất giữa hai điểm (1 và 2) bất kỳ trong bình là :

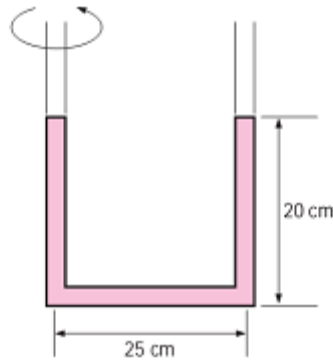
$$P_2 - P_1 = -\rho a_x (x_2 - x_1) - \rho (g + a_z) (z_2 - z_1) \rightarrow P_2 - P_1 = -\rho a_x (x_2 - x_1) - \rho g (z_2 - z_1)$$

Thành phần thứ nhất là sự gia tăng áp suất theo chiều x và thành phần thứ hai đơn giản là sự gia tăng áp suất theo chiều sâu. Vì vậy áp suất nhỏ nhất sẽ đạt tại điểm 1 (cao nhất ở đầu bình) và lớn nhất sẽ đạt tại điểm 2 (thấp nhất ở cuối bình). Do đó ta có $(x_1, z_1) = (0, 3)$, $(x_2, z_2) = (7, 0)$ và:

$$\begin{aligned} \Delta P_{max} &= P_2 - P_1 = -\rho [a_x (x_2 - x_1) + g (z_2 - z_1)] \\ &= -\left(1020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left[(-2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(7 \text{ m}) + (9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2})(-3 \text{ m})\right] = 47.9 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Vậy áp suất cao nhất đạt tại điểm thấp nhất ở cuối bình và có giá trị là:

$$P_2 = P_1 + \Delta P_{max} = 100 \text{ kPa} + 47.9 \text{ kPa} = 147.9 \text{ kPa}$$



3.73

Vấn đề: Ống hình chữ U chứa rượu mở ra không khí quay xung quang trục một nhánh. Xác định chênh lệch độ cao chất lỏng giữa 2 nhánh.

Giả thiết : Rượu là chất lỏng không nén được.

Phân tích: Lấy đáy và trục quay của nhánh làm gốc tọa độ ($r=0, z=0$), khi đó độ cao mặt thoáng xác định bởi phương trình:

$$z_s(r) = h_0 - \frac{\omega^2}{4g} (R^2 - 2r^2)$$

Với $h_0=0.2$ m, $\omega=4.2$ rad/s ta có:

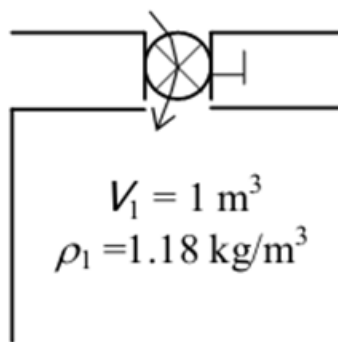
$$\Delta h = z_s(R) - z_s(0) = \left(h_0 + \frac{\omega^2 R^2}{4g} \right) - \left(h_0 - \frac{\omega^2 R^2}{4g} \right) = \frac{\omega^2 R^2}{2g} = \frac{(4.2 \text{ rad/s})^2 (0.25 \text{ m})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = \mathbf{0.056 \text{ m}}$$

Chênh lệch mực chất lỏng giữa hai nhánh là 5.6 cm.

Chương 4

Bảo toàn khối lượng

4.6



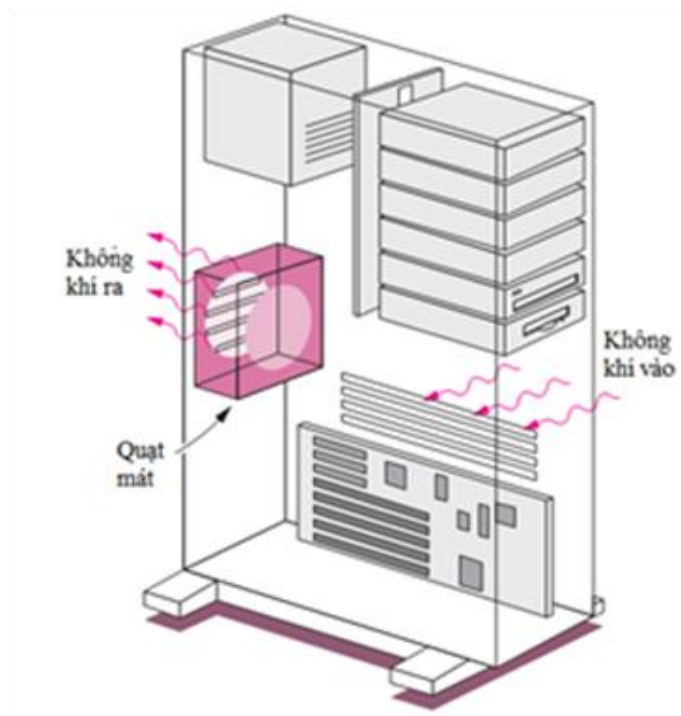
Vấn đề: Một bể cứng chứa không khí ở điều kiện bình thường. Không khí được bơm thêm vào bể đến một mật độ nhất định. Xác định khối lượng không khí thêm vào.

Phân tích: Lấy bể làm thể tích không chế. Khi đó phương trình bảo toàn khối lượng có dạng :

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{system} \quad \rightarrow \quad m_{in} = m_2 - m_1 = \rho_2 V - \rho_1 V$$

$$m_{in} = (\rho_2 - \rho_1) V = [(7.20 - 1.18.) \text{ kg/m}^3](1 \text{ m}^3) = 6.02 \text{ kg}$$

4.8



Vấn đề: Một máy tính để bàn được làm mát ở độ cao có không khí loãng ở mật độ thấp. Xác định lưu lượng khối lượng luồng không khí và kích thước cửa ra nếu biết vận tốc của luồng không khí.

Giả thiết: Dòng chảy là ổn định.

Tính chất: Mật độ của không khí là 0.7 kg/m^3 .

Phân tích: Lưu lượng khối lượng của luồng khí là :

$$\dot{m}_{air} = \rho Q_{air} = (0.7 \text{ kg/m}^3)(0.34 \text{ m}^3/\text{min}) = 0.238 \text{ kg/min} = 0.004 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Đường kính cửa ra tối thiểu là :

$$Q = AV = \frac{\pi D^2}{4} V \quad \rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4(0.34 \text{ m}^3/\text{min})}{\pi(110 \text{ m/min})}} = 0.063 \text{ m}$$

4.10

Vấn đề: Trong tòa nhà ở, không khí mới cần được thay 0.35 lần trong mỗi giờ. Xác định lưu lượng của quạt và đường kính của kênh thông gió nếu biết tốc độ của luồng gió.

Phân tích: Thể tích của nhà và lưu lượng gió cần thiết là :

$$V_{\text{room}} = (2.7 \text{ m})(200 \text{ m}^2) = 540 \text{ m}^3$$

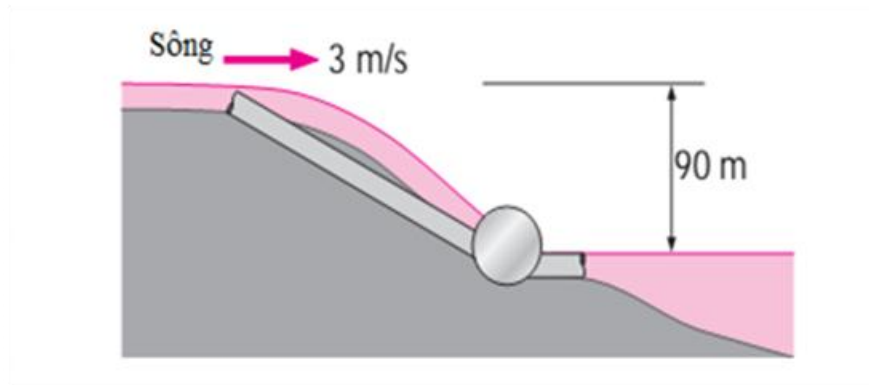
$$Q = V_{\text{room}} \times \text{ACH} = (540 \text{ m}^3)(0.35/\text{h}) = 189 \text{ m}^3/\text{h} = 3150 \text{ L/min}$$

Đường kính của ống thông gió là :

$$Q = VA = V(\pi D^2/4) \quad \rightarrow \quad D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} = \sqrt{\frac{4\left(\frac{189}{3600} \text{ m}^3/\text{s}\right)}{\pi(6 \text{ m/s})}} = 0.106 \text{ m}$$

Năng lượng cơ học và hiệu suất

4.14



Vấn đề: Cho biết vận tốc, lưu lượng và cao độ của dòng sông. Xác định năng lượng trên đơn vị khối lượng của dòng chảy và tiềm năng phát điện của dòng sông.

Giả thiết : (1) Cao độ đã cho là cao độ trên mặt thoáng; (2) Vận tốc là vận tốc trung bình; (3) Bỏ qua năng lượng của dòng chảy sau tua bin.

Phân tích: Chúng ta biết rằng tổng công của dòng chảy và thế năng của chất lỏng là hằng số. Do đó, khi lấy thế năng của chất lỏng trên bề mặt thoáng, năng lượng trên một đơn vị khối lượng chất lỏng là :

$$e_{mech} = pe + ke = gh + \frac{V^2}{2}$$

$$= (9.81 \text{ m/s}^2)(90 \text{ m}) + \frac{(3 \text{ m/s})^2}{2} = 0.887 \text{ kJ/kg}$$

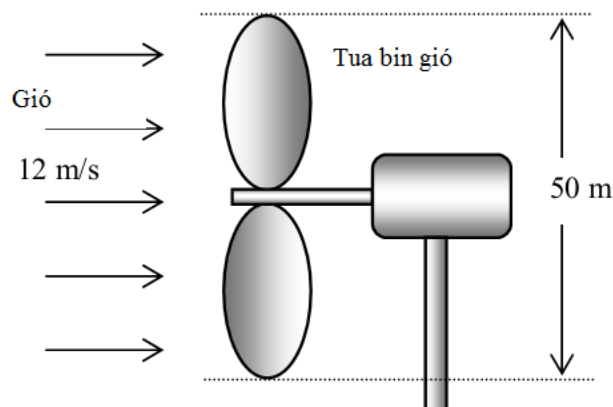
Công suất phát điện tiềm năng bằng tích tổng năng lượng cơ học và lưu lượng khối lượng, do đó :

$$\dot{m} = \rho Q = (1000 \text{ kg/m}^3)(500 \text{ m}^3/\text{s}) = 500000 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{max} = \dot{E}_{mech} = \dot{m}e_{mech} = (500000 \text{ kg/s})(0.887 \text{ kJ/kg}) = 444000 \text{ kW} = 444 \text{ MW}$$

Thảo luận : Động năng của dòng chảy là rất nhỏ so với thế năng và có thể bỏ qua. Trong thực tế công suất phát điện sẽ nhỏ hơn 444 MW do tổn thất ma sát trong dòng chảy.

4.16



Vấn đề: Gió thổi với vận tốc cho trước. Xác định năng lượng trên đơn vị khối lượng của gió, tiềm năng phát điện của dòng sông và công suất thực tế của máy phát điện.

Giả thiết: (1) Dòng chảy gió là ổn định và đều; (2) Hiệu suất của máy không phụ thuộc vận tốc gió.

Tính chất: Mật độ của không khí là 1.25 kg/m^3 .

Phân tích: Năng lượng của gió chỉ là động năng và động năng có thể chuyển đổi hoàn toàn thành công cơ học. Do đó năng lượng trên đơn vị khối lượng và tiềm năng phát điện của gió là:

$$e_{mech} = ke = \frac{V^2}{2} = \frac{(12 \text{ m/s})^2}{2} = 0.072 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m} = \rho VA = \rho V \frac{\pi D^2}{4} = (1.25 \text{ kg/m}^3)(12 \text{ m/s}) \frac{\pi(50 \text{ m})^2}{4} = 29452 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{max} = \dot{E}_{mech} = \dot{m}e_{mech} = (29452 \text{ kg/s})(0.072 \text{ kJ/kg}) = 2121 \text{ kW}$$

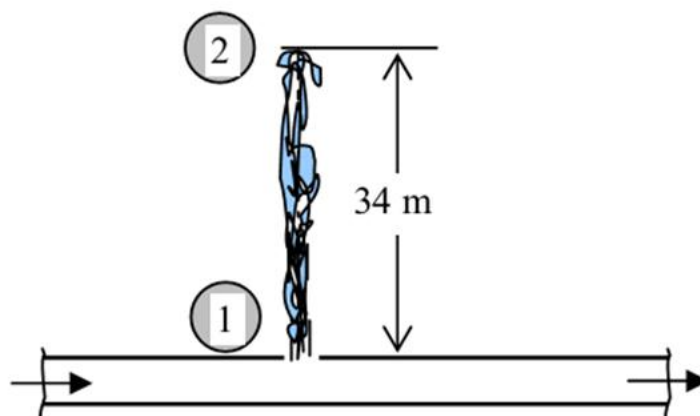
Công suất phát điện thực tế là:

$$\dot{W}_{elect} = \eta_{wind \text{ turbine}} \dot{W}_{max} = (0.30)(2121 \text{ kW}) = 636 \text{ kW}$$

Thảo luận: Công suất của gió tỷ lệ với lập phương vận tốc vì vậy công suất máy phát tăng lên rất nhanh khi tốc độ gió tăng.

Phương trình Bernoulli

4.28



Vấn đề: Một ống dẫn nước bị thủng, nước phun ra lên một độ cao nhất định. Xác định áp suất dư trong đường ống.

Giả thiết: (1) Dòng chảy của tia nước là ổn định, không nén được, không xoáy và bỏ qua ma sát (để áp dụng được phương trình Bernoulli); (2) Áp suất tại lỗ thủng bằng áp suất nước trong ống; (3) Bỏ qua các tổn thất khác.

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Viết phương trình Bernoulli cho điểm 1 và 2, với $z_1=0$, $V_2=0$ và $V_1 \sim 0$, ta có:

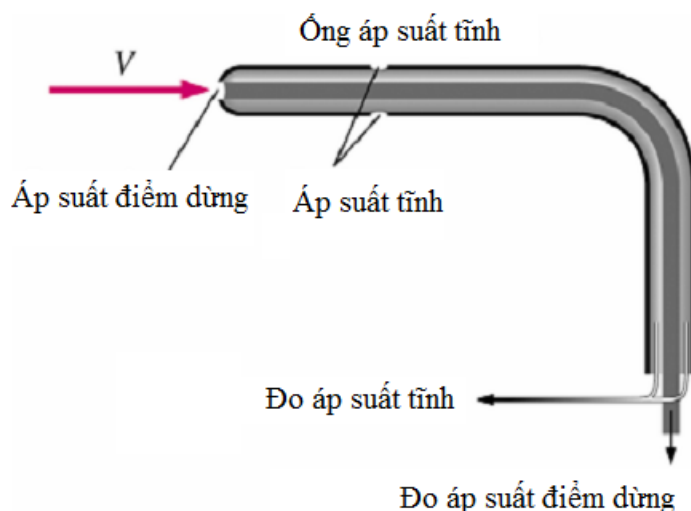
$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow \frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + z_2 \rightarrow \frac{P_1 - P_{atm}}{\rho g} = z_2 \rightarrow \frac{P_{1,gage}}{\rho g} = z_2$$

Từ đó:

$$P_{1,gage} = \rho g z_2 = (1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(34 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1 \text{ kN/m}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 334 \text{ kPa}$$

Thảo luận : Quá trình tính toán đã bỏ qua các tổn thất khác nhau, do đó trong thực tế áp suất dư trong đường ống lớn hơn 334 kPa.

4.29



Vấn đề: Vận tốc máy bay được đo bằng ống Pitot. Xác định vận tốc máy bay nếu biết chênh lệch áp suất.

Giả thiết : (1) Dòng chảy của không khí là ổn định, không nén được, không xoáy và bỏ qua ma sát (để áp dụng được phương trình Bernoulli); (2) Áp suất ở điều kiện tiêu chuẩn; (3) Bỏ qua hiệu ứng của gió.

Tính chất : Mật độ của không khí ở độ cao 3000 m là 0.909 kg/m^3 .

Phân tích: Lấy điểm 1 là miệng lỗ mở song song với dòng chảy và điểm 2 là miệng lỗ mở vuông góc với dòng chảy. Viết phương trình Bernoulli giữa 2 điểm có dạng (với $V_2=0$, $z_1=z_2$), ta có :

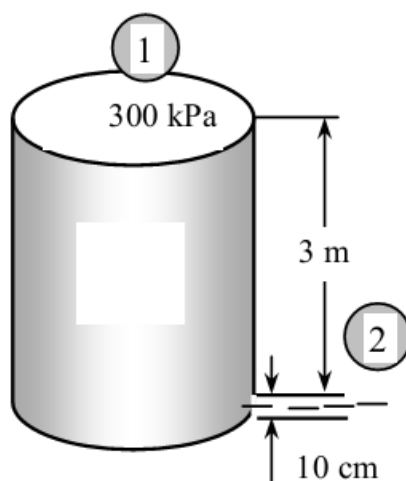
$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \rightarrow \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_{stag} - P_1}{\rho}$$

Từ đó :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_{stag} - P_1)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2(3000 \text{ N/m}^2)}{0.909 \text{ kg/m}^3} \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right)} = 81.2 \text{ m/s} = 292 \text{ km/h}$$

Thảo luận : Quá trình tính toán đã bỏ qua các tổn thất khác nhau, do đó trong thực tế áp suất dư trong đường ống lớn hơn 334 kPa.

4.30



Vấn đề: Nước phun ra qua vòi ở dưới đáy của bình chứa có khí nén. Xác định lưu lượng dòng chảy nếu bỏ qua các tổn thất do ma sát.

Giả thiết: Dòng chảy là ổn định, không nén được, không xoáy và bỏ qua ma sát (để áp dụng được phương trình Bernoulli).

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Viết phương trình Bernoulli giữa 2 điểm có dạng (với $V_1=0, z_2=0$), ta có :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow \frac{V_2^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + z_1$$

Từ đó :

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} + 2gz_1} = \sqrt{\frac{2(300 - 100) \text{ kPa}}{1000 \text{ kg/m}^3} \left(\frac{1000 \text{ N/m}^2}{1 \text{ kPa}} \right) \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right) + 2(9.81 \text{ m/s}^2)(3 \text{ m})}$$

$$= 21.4 \text{ m/s}$$

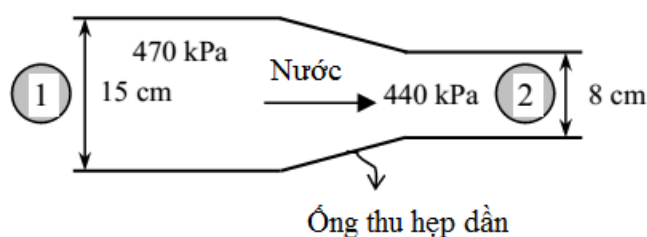
Vậy :

$$Q = AV_2 = \frac{\pi D^2}{4} V_2 = \frac{\pi (0.1 \text{ m})^2}{4} (21.4 \text{ m/s}) = 0.168 \text{ m}^3/\text{s}$$

Thảo luận: Đây là lưu lượng lớn nhất vì quá trình tính toán đã bỏ qua các tổn thất. Ngoài ra lưu lượng còn giảm khi mực nước trong bình giảm xuống.

Phương trình năng lượng

4.38



Vấn đề: Nước chảy với lưu lượng đã cho trong đoạn ống nằm ngang thu hẹp dần. Áp suất trước và sau đoạn ống đã được đo. Xác định tổn thất cột nước qua đoạn ống.

Giả thiết: Dòng chảy là ổn định, không nén được.

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: Viết phương trình năng lượng giữa điểm 1 và 2, lưu ý rằng $z_1 = z_2$, $h_{\text{pump,u}} = h_{\text{turbine,e}} = 0$, ta có:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump,u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine,e}} + h_L \rightarrow h_L = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{\alpha(V_1^2 - V_2^2)}{2g}$$

ở đây

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\pi D_1^2/4} = \frac{0.035 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.15 \text{ m})^2/4} = 1.98 \text{ m/s}$$

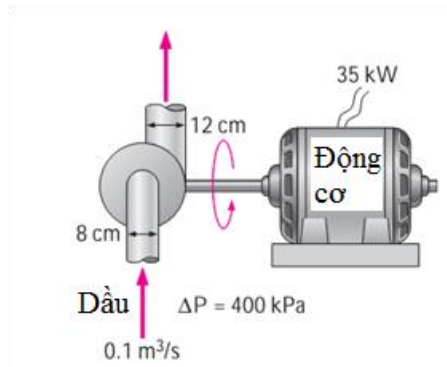
$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{Q}{\pi D_2^2/4} = \frac{0.035 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.08 \text{ m})^2/4} = 6.96 \text{ m/s}$$

Vậy:

$$h_L = \frac{(470 - 440) \text{ kPa}}{(1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} \left(\frac{1 \text{ kN/m}^2}{1 \text{ kPa}} \right) \left(\frac{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ kN}} \right) + \frac{1.05[(1.98 \text{ m/s})^2 - (6.96 \text{ m/s})^2]}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

$$= 3.06 - 2.38 = \mathbf{0.68 \text{ m}}$$

4.41



Vấn đề: Dầu được bơm với lưu lượng cho trước. Gia tăng áp suất trong máy bơm và hiệu suất máy bơm đã biết. Xác định hiệu suất cơ học của máy bơm.

Giả thiết: Dòng chảy là ổn định, không nén được. Chênh lệch độ cao cửa vào và cửa ra của máy bơm được bỏ qua. Tất cả tổn thất đưa vào hiệu suất của máy bơm, có nghĩa là $h_L = 0$.

Tính chất: Mật độ của dầu là 860 kg/m^3 .

Phân tích: Lấy điểm 1 là cửa vào và 2 là cửa ra của bơm. Viết phương trình năng lượng giữa điểm 1 và 2, lưu ý rằng $z_1 = z_2$, $h_{\text{turbine,e}} = 0$, ta có:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump,u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine,e}} + h_L \rightarrow h_{\text{pump,u}}$$

$$= \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{\alpha(V_2^2 - V_1^2)}{2g}$$

ở đây

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\pi D_1^2/4} = \frac{0.1 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.08 \text{ m})^2/4} = 19.9 \text{ m/s}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{Q}{\pi D_2^2/4} = \frac{0.1 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.12 \text{ m})^2/4} = 8.84 \text{ m/s}$$

Vậy:

$$h_{pump,u} = \frac{400000 \text{ N/m}^2}{(860 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} + \frac{1.05[(8.84 \text{ m/s})^2 - (19.9 \text{ m/s})^2]}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

$$= 47.4 - 17.0 = 30.4 \text{ m}$$

$$\dot{W}_{pump,u} = \rho Q g h_{pump,u} = (860 \text{ kg/m}^3)(0.1 \text{ m}^3/\text{s})(9.81 \text{ m/s}^2)(30.4 \text{ m}) = 25.6 \text{ kW}$$

Hiệu suất cơ học của máy bơm sẽ là:

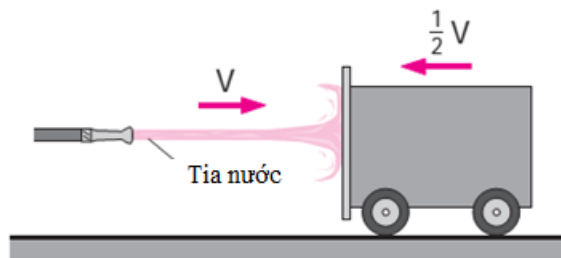
$$\dot{W}_{pump,shaft} = \eta_{motor} \dot{W}_{electric} = 0.90(35 \text{ kW}) = 31.5 \text{ kW}$$

$$\eta_{pump} = \frac{\dot{W}_{pump,u}}{\dot{W}_{pump,shaft}} = \frac{25.6 \text{ kW}}{31.5 \text{ kW}} = 0.813 = 81.3\%$$

Chương 5

Phương trình động lượng tuyến tính

5.16



Vấn đề: Tia nước với vận tốc V đập vào tấm phẳng đang chuyển động về phía tia nước với vận tốc $1/2V$. Xác định lực đẩy tấm phẳng theo lực F giữ tấm cố định.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) tấm phẳng thẳng đứng và tia nước vuông góc với tấm; (3) Bỏ qua các lực ma sát; (4) Nước thoát ra trên bề mặt tấm phẳng vuông góc với tia nước; (5) Phân bố vận tốc trong tia nước là đều, do đó hệ số hiệu chỉnh động lượng $\beta=1$.

Phân tích: Lấy bản thân tấm phẳng làm thể tích khống chế. Vận tốc tương đối giữa tia nước và tấm phẳng là V khi tấm cố định và là $1.5V$ khi tấm chuyển động. Phương trình động lượng theo hướng tia nước được rút gọn như sau:

$$\sum \vec{F} = \sum_{\text{out}} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{\text{in}} \beta \dot{m} \vec{V} \rightarrow -F_R = -\dot{m}_i V_i \rightarrow F_R = \dot{m}_i V_i$$

Đối với tấm cố định, ta có:

$$(V_i = V \text{ and } \dot{m}_i = \rho A V_i = \rho A V) \rightarrow F_R = \rho A V^2 = F$$

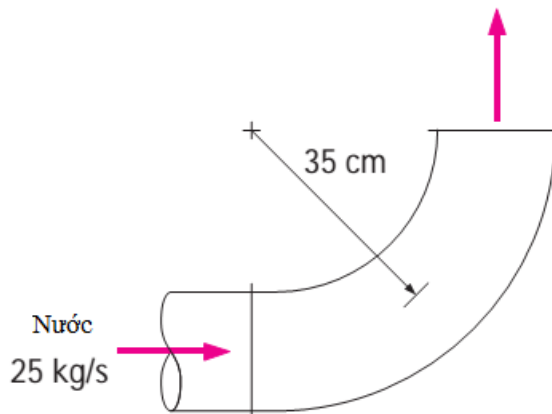
Đối với tấm chuyển động, ta có:

$$(V_i = 1.5V \text{ and } \dot{m}_i = \rho A V_i = \rho A (1.5V)) \\ \rightarrow F_R = \rho A (1.5V)^2 = 2.25 \rho A V^2 = 2.25F$$

Như vậy lực tác dụng tăng lên 2.25 lần trong khi vận tốc tăng 1.5 lần.

Thảo luận: Khi tấm phẳng chuyển động về phía tia nước với vận tốc $1/2V$, lưu lượng nước thoát ra trên tấm phẳng cũng tăng lên 1.5 lần.

5.17



Vấn đề: Vòng khuỷu tròn 90° dẫn nước hướng lên trên và xả nước ra ngoài khí quyển với lưu lượng đã cho. Xác định áp suất dư tại đầu vòng khuỷu và lực cần thiết để giữ khuỷu đứng yên.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định, không ma sát, không nén được và không xoáy (để có thể áp dụng phương trình Bernoulli); (2) trọng lượng của khuỷu và nước trong khuỷu được bỏ qua; (3) hệ số hiệu chỉnh động lượng ở cửa ra và vào là như nhau và bằng 1.03.

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: (a) Lấy khuỷu làm thể tích khống chế và ký hiệu đầu vào bởi chỉ số 1, đầu ra bởi chỉ số 2. Khi đó, phương trình bảo toàn khối lượng đối với dòng ổn định có dạng:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m} = 25 \text{ kg/s}$$

Từ đó, với $\dot{m} = \rho AV$, ta có:

$$V_1 = V_2 = V = \frac{\dot{m}}{\rho A} = \frac{\dot{m}}{\rho(\pi D^2/4)} = \frac{25 \text{ kg/s}}{(1000 \text{ kg/m}^3)[\pi(0.1 \text{ m})^2/4]} = 3.18 \text{ m/s}$$

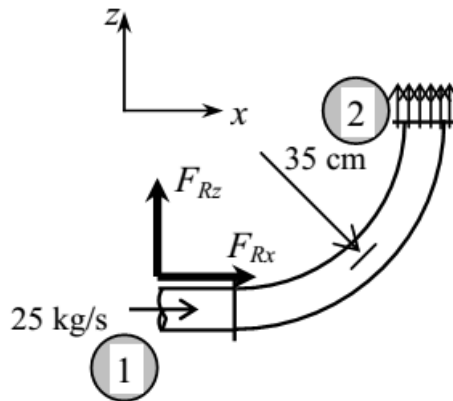
Với $V_1=V_2$ và $P_2=P_{atm}$, phương trình Bernoulli giữa 1 và 2 đơn giản thành:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow P_1 - P_2 = \rho g(z_2 - z_1) \rightarrow P_{1,gage} = \rho g(z_2 - z_1)$$

Từ đó:

$$P_{1,gage} = (1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.35 \text{ m}) = 3.434 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 3.433 \text{ kPa}$$

(b)



Phương trình động lượng có dạng:

$$\sum \vec{F} = \sum_{out} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{in} \beta \dot{m} \vec{V}$$

Các phương trình thành phần theo hướng x và z:

$$F_{Rx} + P_{1,gage} A_1 = 0 - \beta \dot{m} (+V_1) = -\beta \dot{m} V$$

$$F_{Rz} = \beta \dot{m} (+V_2) = \beta \dot{m} V$$

Ở đây F_{Rx} và F_{Rz} là lực tác dụng lên CV theo chiều dương của các trục x và z.

Giải cho F_{Rx} , F_{Rz} và thay số vào ta có:

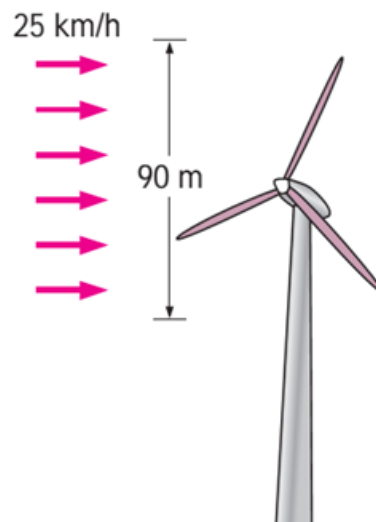
$$\begin{aligned}
 F_{Rx} &= -\beta \dot{m} V - P_{1, \text{gage}} A_1 \\
 &= -1.03(25 \text{ kg/s})(3.18 \text{ m/s}) \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) - (3434 \text{ N/m}^2) [\pi(0.1 \text{ m})^2 / 4] \\
 &= -109 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$F_{Rx} = \beta \dot{m} V = 1.03(25 \text{ kg/s})(3.18 \text{ m/s}) = 81.9 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 F_R &= \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Rz}^2} = \sqrt{(-109)^2 + 81.9^2} = 136 \text{ N}, \quad \theta = \tan^{-1} \frac{81.9}{-109} = -37^\circ \\
 &= 143^\circ
 \end{aligned}$$

Như vậy lực tác dụng lên khuỷu có giá trị là 136 N hướng xuống dưới sang bên phải.

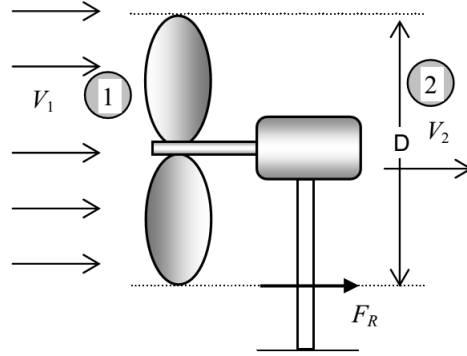
5.19



Vấn đề: Tua bin gió với đường kính cánh và hiệu suất phát điện đã cho. Tính công suất phát điện và lực tác dụng theo chiều ngang lên tua bin

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định, không nén được; (2) hiệu suất tua bin - máy phát điện không phụ thuộc vào vận tốc gió; (3) bỏ qua hiệu ứng ma sát qua tua bin; (4) phân bố vận tốc gió là đều và hệ số hiệu chỉnh động lượng $\beta=1$.

Tính chất: Mật độ của không khí là 1.25 kg/m^3 .



Phân tích: (a) Năng lượng cơ học của gió chỉ có thành phần động năng. Công suất tiềm năng của gió đối với lưu lượng khối lượng \dot{m} sẽ là $\dot{m}V^2/2$. Ta có:

$$V_1 = (25 \text{ km/h}) \left(\frac{1 \text{ m/s}}{3.6 \text{ km/h}} \right) = 6.94 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = \rho_1 V_1 A_1 = \rho_1 V_1 \frac{\pi D^2}{4} = (1.25 \text{ kg/m}^3)(6.94 \text{ m/s}) \frac{\pi(90 \text{ m})^2}{4} = 55,200 \text{ kg/s}$$

$$\dot{W}_{\max} = \dot{m} k e_1 = \dot{m} \frac{V_1^2}{2} = (55,200 \text{ kg/s}) \frac{(6.94 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kN} \cdot \text{m/s}} \right) = 1330 \text{ kW}$$

Vậy công suất phát điện là:

$$\dot{W}_{\text{act}} = \eta_{\text{wind turbine}} \dot{W}_{\max} = (0.32)(1330 \text{ kW}) = \mathbf{426 \text{ kW}}$$

(b) Khi ma sát gió qua tua bin được bỏ qua thì phần năng lượng còn lại của gió đi qua tua bin là động năng. Do đó:

$$\dot{m} k e_2 = \dot{m} k e_1 (1 - \eta_{\text{wind turbine}}) \rightarrow \dot{m} \frac{V_2^2}{2} = \dot{m} \frac{V_1^2}{2} (1 - \eta_{\text{wind turbine}})$$

Từ đó:

$$V_2 = V_1 \sqrt{1 - \eta_{\text{wind turbine}}} = (6.94 \text{ m/s}) \sqrt{1 - 0.32} = 5.72 \text{ m/s}$$

Chúng ta chọn thể tích khối chế xung quanh tua bin sao cho mặt biên của cửa vào và cửa ra vuông góc với hướng gió và xung quanh mặt biên có áp suất là áp suất khí quyển. Phương trình động lượng cho CV có dạng:

$$\sum \vec{F} = \sum_{\text{out}} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{\text{in}} \beta \dot{m} \vec{V}$$

Chiếu trên trục nằm ngang ta có:

$$F_R = \dot{m}V_2 - \dot{m}V_1 = \dot{m}(V_2 - V_1) = (55,200 \text{ kg/s})(5.72 - 6.94 \text{ m/s}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = -\mathbf{67.3 \text{ kN}}$$

Vậy lực tác dụng lên tua bin có giá trị 67.3 N và hướng theo chiều gió.

5.20



Vấn đề: Những người lính cứu hỏa cầm vòi phun nước nằm ngang khi dập lửa. Xác định vận tốc nước ở đầu vòi phun và lực nằm ngang cần giữ vòi.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định, không nén được; (2) trọng lượng của vòi và nước trong vòi được bỏ qua; (3) hệ số hiệu chỉnh động lượng ở cửa ra và vào là như nhau và bằng 1.0.

Tính chất: Mật độ của nước là 1000 kg/m^3 .

Phân tích: (a) Chúng ta lấy phần đầu vòi và phần đường ống làm CV sao cho nước đi vào CV theo phương thẳng đứng và ra CV theo phương nằm ngang (bằng cách này, lực và dòng động lượng tại cửa ra chỉ có thành phần thẳng đứng nên không có ảnh hưởng đến thành phần lực nằm ngang tác dụng lên CV. Vận tốc trung bình tại và lưu lượng khối lượng tại cửa ra được xác định như sau:

$$V = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dot{V}}{\pi D^2 / 4} = \frac{5 \text{ m}^3/\text{min}}{\pi (0.06 \text{ m})^2 / 4} = 1768 \text{ m/min} = \mathbf{29.5 \text{ m/s}}$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = (1000 \text{ kg/m}^3)(5 \text{ m}^3/\text{min}) = 5000 \text{ kg/min} = 83.3 \text{ kg/s}$$

(b) Phương trình động lượng có dạng:

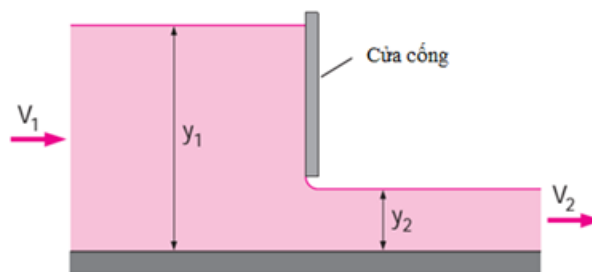
$$\sum \vec{F} = \sum_{\text{out}} \beta \dot{m} \vec{V} - \sum_{\text{in}} \beta \dot{m} \vec{V}$$

Phương trình thành phần theo hướng nằm ngang là:

$$F_{Rx} = \dot{m}V_e - 0 = \dot{m}V = (83.3 \text{ kg/s})(29.5 \text{ m/s}) \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 2457 \text{ N} \cong \mathbf{2460 \text{ N}}$$

Lực này tương đương với trọng lượng của vật nặng 250 kg nên vòi cứu hỏa này cần nhiều người lính cứu hỏa để giữ vòi.

5.24



Vấn đề: Dòng chảy trong kênh được điều khiển bằng cánh cửa nâng lên, hạ xuống theo chiều thẳng đứng. Xác định lực tác dụng lên cánh cửa có chiều dài w .

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định, không nén được, không ma sát và có phân bố vận tốc đều (có thể áp dụng phương trình Bernoulli); (2) dòng chảy nằm ngang; (3) kênh hở với mặt thoáng tiếp xúc với khí quyển; (4) phân bố vận tốc là đều nên hệ số hiệu chỉnh động lượng ở cửa ra và vào là như nhau và bằng 1.0.

Phân tích: Chúng ta lấy điểm 1 trên mặt thoáng thượng du trước cánh cửa và điểm 2 trên mặt thoáng ở hạ du sau cánh cửa. Lấy mặt đáy của kênh là mặt phẳng nằm ngang tham chiếu, như vậy vận tốc của điểm 1 và 2 là y_1 và y_2 tương ứng. Phương trình Bernoulli giữa 1 và 2 có dạng:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + y_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + y_2 \quad \rightarrow \quad V_2^2 - V_1^2 = 2g(y_1 - y_2) \quad (1)$$

Vì dòng chảy là không nén được, nên mật độ là hằng số do đó phương trình bảo toàn cho CV giữa mặt cắt 1 và 2 có dạng:

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad \rightarrow \quad A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q \quad \rightarrow \quad V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{wy_1} \quad \text{và} \quad V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{Q}{wy_2} \quad (2)$$

Thay vào phương trình (1) ta có:

$$\left(\frac{Q}{wy_2}\right)^2 - \left(\frac{Q}{wy_1}\right)^2 = 2g(y_1 - y_2) \rightarrow Q = w \sqrt{\frac{2g(y_1 - y_2)}{\frac{1}{y_2^2} - \frac{1}{y_1^2}}} \rightarrow Q = wy_2 \sqrt{\frac{2g(y_1 - y_2)}{1 - \frac{y_2^2}{y_1^2}}} \quad (3)$$

Từ (3) và (2) ta có:

$$V_1 = \frac{y_2}{y_1} \sqrt{\frac{2g(y_1 - y_2)}{1 - y_2^2 / y_1^2}} \quad \text{và} \quad V_2 = \sqrt{\frac{2g(y_1 - y_2)}{1 - y_2^2 / y_1^2}} \quad (4)$$

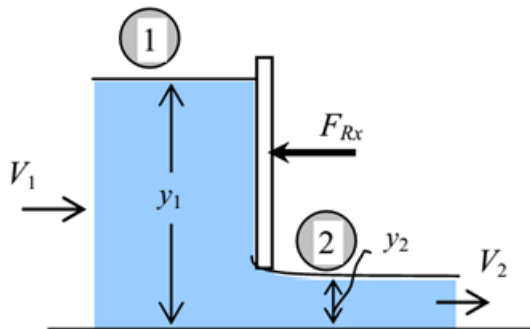
Chọn thể tích không chế (CV) là khối chất lỏng nằm giữa hai mặt cắt thẳng đứng ở thượng du và hạ du cánh cửa, khi đó phương trình động lượng cho phương nằm ngang có dạng:

$$-F_{Rx} + P_1 A_1 - P_2 A_2 = \dot{m} V_2 - \dot{m} V_1 \rightarrow -F_{Rx} + \left(\rho g \frac{y_1}{2}\right)(wy_1) - \left(\rho g \frac{y_2}{2}\right)(wy_2) = \dot{m}(V_2 - V_1)$$

Vậy lực tác dụng lên cánh cửa là:

$$\boxed{F_{Rx} = \dot{m}(V_1 - V_2) + \frac{w}{2} \rho g (y_1^2 - y_2^2)} \quad (5)$$

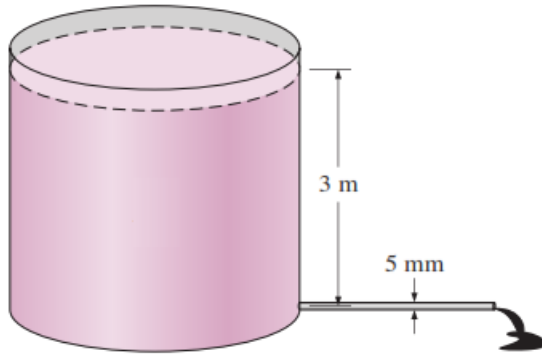
trong đó V_1 và V_2 được xác định bởi (4).



Chương 6

Dòng chảy phát triển hoàn toàn trong đường ống

6.24



Vấn đề: Dầu được xả qua ống nằm ngang từ bể chứa mở ra khí quyển. Xác định lưu lượng dòng dầu qua đường ống.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, do đó dòng chảy được cho là phát triển hoàn toàn; (3) Bỏ qua tổn thất cửa vào và cửa ra; (4) Dòng chảy là chảy tầng (cần được xác minh); (5) Ống không bao gồm các thành phần uốn cong, van, đầu nối...; (6) Không bao gồm các thiết bị làm việc như máy bơm và tua bin.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của dầu được cho là $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$ và $\nu = 0.00062 \text{ m}^2/\text{s}$. Độ nhớt động học sẽ là

$$\mu = \rho\nu = (850 \text{ kg/m}^3)(0.00062 \text{ m}^2/\text{s}) = 0.527 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$$

Phân tích: Áp suất dư đáy bể là :

$$\begin{aligned} P_{1,\text{gage}} &= \rho gh \\ &= (850 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(3 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2} \right) \\ &= 25.02 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Bỏ qua các tổn thất cửa vào và cửa ra, tổn thất áp suất qua ống là :

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_1 - P_{\text{atm}} = P_{1,\text{gage}} = 25.02 \text{ kN/m}^2 = 25.02 \text{ kPa}$$

Lưu lượng dòng chảy tầng trong ống nằm ngang

$$Q_{\text{horiz}} = \frac{\Delta P \pi D^4}{128 \mu L} = \frac{(25.02 \text{ kN/m}^2) \pi (0.005 \text{ m})^4}{128 (0.527 \text{ kg/m}\cdot\text{s})(40 \text{ m})} \left(\frac{1000 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2}{1 \text{ kN}} \right) = 1.821 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$$

Vận tốc trung bình và số Reynolds được xác định từ:

$$\begin{aligned} V &= \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} = \frac{1.821 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (0.005 \text{ m})^2 / 4} = 9.27 \times 10^{-4} \text{ m/s} \\ \text{Re} &= \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(850 \text{ kg/m}^3)(9.27 \times 10^{-4} \text{ m/s})(0.005 \text{ m})}{0.527 \text{ kg/m}\cdot\text{s}} = 0.0075 \end{aligned}$$

Số Reynolds nhỏ hơn 2300 vậy giả thiết ban đầu cho dòng chảy tầng đã được chấp nhận.

Thảo luận: Lưu lượng sẽ nhỏ hơn khi tính đến các tổn thất, đặc biệt là khi cửa vào không được làm trơn.

6.26

Vấn đề: Lưu lượng dòng chảy qua đường ống đã cho. Xác định tổn thất áp suất, tổn thất cột áp, và công suất bơm.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, do đó dòng chảy được cho là phát triển hoàn toàn; (3) Ống không bao gồm các thành phần uốn cong, van, đầu nối...; (4) Không bao gồm các thiết bị làm việc như máy bơm và tua bin.

Tính chất : Mật độ và độ nhớt động học của nước được cho là $\rho = 999.1 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 1.138 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. Độ nhám của thép không gỉ là 0.002 mm .

Phân tích: Trước tiên chúng ta tính vận tốc trung bình và số Reynolds để xác định chế độ dòng chảy:

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} = \frac{0.008 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi (0.04 \text{ m})^2 / 4} = 6.366 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(999.1 \text{ kg/m}^3)(6.366 \text{ m/s})(0.04 \text{ m})}{1.138 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}} = 2.236 \times 10^5$$

Số Reynolds lớn hơn 4000 vậy dòng chảy là rối. Độ nhám tương đối của ống là:

$$\varepsilon / D = \frac{2 \times 10^{-6} \text{ m}}{0.04 \text{ m}} = 5 \times 10^{-5}$$

Hệ số ma sát nhận được từ phương trình Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{5 \times 10^{-5}}{3.7} + \frac{2.51}{2.236 \times 10^5 \sqrt{f}} \right)$$

Cho $f = 0.01573$.

Từ đó xác định được tổn thất áp suất, tổn thất cột áp, và công suất bơm:

$$\Delta P = \Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} = 0.01573 \frac{30 \text{ m}}{0.04 \text{ m}} \frac{(999.1 \text{ kg/m}^3)(6.366 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg}\cdot\text{m/s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1 \text{ kN/m}^2} \right) = 239 \text{ kPa}$$

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.01573 \frac{30 \text{ m}}{0.04 \text{ m}} \frac{(6.366 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 24.4 \text{ m}$$

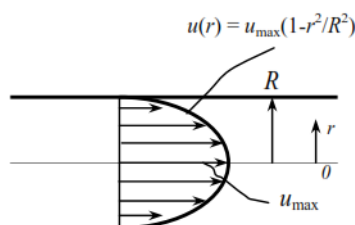
$$\dot{W}_{\text{pump}} = Q \Delta P = (0.008 \text{ m}^3 / \text{s})(239 \text{ kPa}) = 1.91 \text{ kW}$$

Thảo luận: Hệ số ma sát cũng có thể được xác định một cách dễ dàng từ phương trình Haaland. Nó sẽ cho $f = 0.0155$, gần với 0.0157 . Ngoài ra, hệ số ma sát tương ứng với $\varepsilon = 0$ là 0.0153 , cho thấy các ống thép không gỉ trong trường hợp này có thể được giả định là mịn với sai số khoảng 2%. Lưu ý rằng, công suất xác định ở đây là công suất hiệu quả.

Do đó cần phải tính đến hiệu suất của bơm và hiệu suất của động cơ để xác định công suất điện đầu vào.

6.27

Vấn đề: Trong dòng chảy tầng trong ống tròn, đã biết vận tốc tại $r=R/2$. Xác định vận tốc trên trục đường ống ($r=0$).



Giải thiết: Dòng chảy ổn định, chảy tầng và phát triển hoàn toàn.

Phân tích: Phân bố vận tốc trong dòng chảy tầng trong ống tròn có dạng:

$$u(r) = u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

Ở đây u_{\max} là vận tốc trên trục ống. Tại $r=R/2$ ta có:

$$u(R/2) = u_{\max} \left(1 - \frac{(R/2)^2}{R^2} \right) = u_{\max} \left(1 - \frac{1}{4} \right) = \frac{3u_{\max}}{4}$$

Từ đó:

$$u_{\max} = \frac{4u(R/2)}{3} = \frac{4(6 \text{ m/s})}{3} = \mathbf{8.00 \text{ m/s}}$$

6.28

Vấn đề: Trong dòng chảy tầng trong ống tròn, đã biết phân bố vận tốc. Xác định vận tốc trung bình, cực đại trong đường ống và lưu lượng dòng chảy.

Giải thiết: Dòng chảy ổn định, chảy tầng và phát triển hoàn toàn.

Phân tích: Phân bố vận tốc trong dòng chảy tầng trong ống tròn có dạng:

$$u(r) = u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

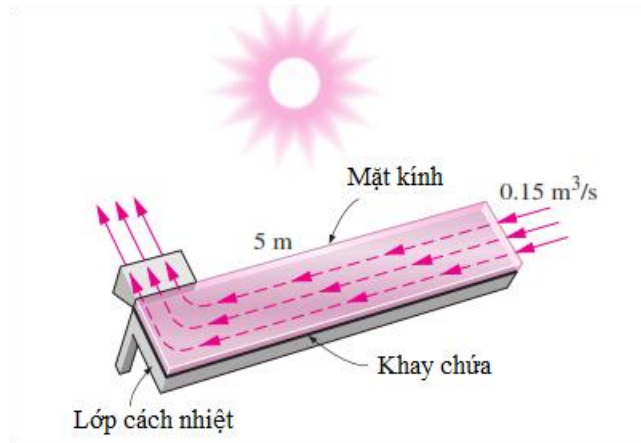
Từ đó ta có $u_{\max}=4 \text{ m/s}$.

Vậy:

$$V_{\text{avg}} = \frac{u_{\max}}{2} = \frac{4 \text{ m/s}}{2} = 2 \text{ m/s}$$

$$Q = V_{\text{avg}} A_c = (2 \text{ m/s})(\pi(0.02 \text{ m})^2) = 0.00251 \text{ m}^3/\text{s}$$

6.29



Vấn đề: Không khí đi qua khoảng không giữa vỏ thủy tinh và khay chứa của bộ thu năng lượng mặt trời. Xác định tổn thất áp suất trong bộ thu.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, và do đó dòng chảy là phát triển hoàn toàn; (3) Bề mặt thành ống bên trong được giả thiết là trơn, $\epsilon=0$; (4) Không khí là khí lý tưởng; (5) Áp suất khí quyển tại chỗ là 1 atm.

Tính chất: Các tính chất của không khí ở 1 atm và 45°C là $\rho=1.109 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.941 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, và $\nu=1.750 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Phân tích: Lưu lượng khối lượng, diện tích mặt cắt, đường kính thủy lực, vận tốc trung bình, và số Reynolds là:

$$\dot{m} = \rho \dot{V} = (1.11 \text{ kg/m}^3)(0.15 \text{ m}^3/\text{s}) = 0.1665 \text{ kg/s}$$

$$A_c = a \times b = (1 \text{ m})(0.03 \text{ m}) = 0.03 \text{ m}^2$$

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4(0.03 \text{ m}^2)}{2(1+0.03) \text{ m}} = 0.05825 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{0.15 \text{ m}^3/\text{s}}{0.03 \text{ m}^2} = 5 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{VD_h}{\nu} = \frac{(5 \text{ m/s})(0.05825 \text{ m})}{1.750 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.664 \times 10^4$$

Số Re lớn hơn 4000 do đó dòng chảy là rối. Hệ số ma sát được xác định từ phương trình Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(0 + \frac{2.51}{16,640 \sqrt{f}} \right)$$

Cho $f=0.0271$. Từ đó:

$$\Delta P = \Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} = 0.0271 \frac{5 \text{ m}}{0.05825 \text{ m}} \frac{(1.11 \text{ kg/m}^3)(5 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ Pa}}{1 \text{ N/m}^2} \right) = \mathbf{32.3 \text{ Pa}}$$

6.30

Vấn đề: Dầu chảy qua một đoạn đường ống với vận tốc đã biết. Xác định công suất bơm cần thiết.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, và do đó dòng chảy là phát triển hoàn toàn; (3) Bề mặt thành ống bên trong được giả thiết là trơn, $\epsilon=0$.

Tính chất: Các tính chất của dầu được cho là $\rho=894 \text{ kg/m}^3$ và $\mu= 2.33 \text{ kg/m.s}$.

Phân tích: Lưu lượng thể tích và số Reynolds được xác định như sau:

$$Q = VA_c = V \frac{\pi D^4}{4} = (0.5 \text{ m/s}) \frac{\pi(0.4 \text{ m})^2}{4} = 0.0628 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(894 \text{ kg/m}^3)(0.5 \text{ m/s})(0.4 \text{ m})}{2.33 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}} = 76.6$$

Số Reynolds $Re < 2300$, do đó dòng chảy là chảy tầng. Ta có:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{76.7} = 0.834$$

Từ đó, tổn thất áp suất và công suất bơm được xác định:

$$\Delta P = \Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} = 0.834 \frac{300 \text{ m}}{0.4 \text{ m}} \frac{(894 \text{ kg/m}^3)(0.5 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1 \text{ kN/m}^2} \right) = 69.9 \text{ kPa}$$

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \dot{V} \Delta P = (0.0628 \text{ m}^3/\text{s})(69.9 \text{ kPa}) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}} \right) = 4.39 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{\text{pump}} = Q \Delta P = (0.0628 \text{ m}^3/\text{s})(69.9 \text{ kPa}) = 4.39 \text{ kW}$$

6.31

Vấn đề: Xem xét dòng chảy tầng trong kênh có mặt cắt hình vuông. Xác định sự thay đổi tổn thất cột áp khi vận tốc trung bình tăng gấp đôi.

Giả thiết: (1) Dòng chảy vẫn ở chế độ chảy tầng; (2) Bỏ qua hiệu ứng cửa vào, do đó dòng chảy được coi là phát triển hoàn toàn.

Phân tích: Hệ số ma sát cho dòng chảy tầng phát triển hoàn toàn trong kênh vuông là:

$$f = \frac{56.92}{Re} \quad \text{với} \quad Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Từ đó, khi vận tốc là V ta có:

$$h_{L,1} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{56.92}{Re} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{56.92 \mu}{\rho V D} \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 28.46V \frac{\mu L}{\rho g D^2}$$

Khi vận tốc là $2V$ ta có:

$$h_{L,2} = 28.46(2V) \frac{\mu L}{\rho g D^2} = 28.46(2V) \frac{\mu L}{\rho g D^2} = 2 \left(28.46V \frac{\mu L}{\rho g D^2} \right) = 2h_{L,1}$$

Vậy khi vận tốc tăng gấp đôi thì tổn thất cột áp tăng gấp đôi.

Thảo luận: Điều này cũng đúng với dòng chảy tầng ở các kênh có thiết diện hình học khác.

6.32

Vấn đề: Áp suất dầu trong đường ống thoát ra trong khí quyển được đo tại một địa điểm nhất định. Xác định lưu lượng dòng chảy theo 3 hướng đặt ống khác nhau.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, do đó dòng chảy được coi là phát triển hoàn toàn; (3) Dòng chảy là chảy tầng (cần được xác minh); Ống không có các thành phần như uốn cong, van, và các đầu nối; (5) Ống không bao gồm các thiết bị làm việc như máy bơm và tua bin.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động lực của dầu được cho là $\rho = 876 \text{ kg/m}^3$ và $\nu = 0.24 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.

Phân tích: Tồn tại áp suất trên đoạn đường ống và diện tích mặt cắt ngang là:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 135 - 88 = 47 \text{ kPa}$$

$$A_c = \pi D^2 / 4 = \pi(0.015 \text{ m})^2 / 4 = 1.767 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Lưu lượng trong đường ống được xác định theo công thức:

$$Q = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L}$$

(a) Trường hợp ống nằm ngang $\theta=0^\circ$, ta có:

$$Q_{\text{horiz}} = \frac{\Delta P \pi D^4}{128 \mu L} = \frac{(47 \text{ kPa}) \pi (0.015 \text{ m})^4}{128 (0.24 \text{ kg/m}\cdot\text{s})(15 \text{ m})} \left(\frac{1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right) \left(\frac{1000 \text{ N/m}^2}{1 \text{ kPa}} \right) = \mathbf{1.62 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}$$

(b) Trường hợp ống dốc lên $\theta=+8^\circ$, ta có:

$$\begin{aligned} Q_{\text{uphill}} &= \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \\ &= \frac{[(47,000 \text{ Pa} - (876 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(15 \text{ m}) \sin 8^\circ] \pi (0.015 \text{ m})^4}{128 (0.24 \text{ kg/m}\cdot\text{s})(15 \text{ m})} \left(\frac{1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2}{1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2} \right) \\ &= \mathbf{1.00 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

(c) Trường hợp ống dốc xuống $\theta=-8^\circ$, ta có:

$$\begin{aligned} Q_{\text{downhill}} &= \frac{(\Delta P - \rho g L \sin \theta) \pi D^4}{128 \mu L} \\ &= \frac{[(47,000 \text{ Pa} - (876 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(15 \text{ m}) \sin(-8^\circ)] \pi (0.015 \text{ m})^4}{128 (0.24 \text{ kg/m}\cdot\text{s})(15 \text{ m})} \left(\frac{1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2}{1 \text{ Pa}\cdot\text{m}^2} \right) \\ &= \mathbf{2.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}} \end{aligned}$$

Trong trường hợp lưu lượng lớn nhất (dốc xuống), ta có:

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{2.24 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}{1.767 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 0.127 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(876 \text{ kg/m}^3)(0.127 \text{ m/s})(0.015 \text{ m})}{0.24 \text{ kg/m}\cdot\text{s}} = 7.0$$

Vậy Re trong cả 3 trường hợp đều nhỏ hơn 2300, do đó dòng chảy là chảy tầng. Giả thiết ban đầu đã được kiểm chứng.

6.34

Vấn đề: Không khí trong hệ thống sưởi ấm được cấp qua một ống hình chữ nhật làm bằng thép thương mại với vận tốc đã biết. Xác định tổn thất áp suất và cột áp trên một đoạn ống.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, do đó dòng chảy được coi là phát triển hoàn toàn; (3) Không khí là khí lý tưởng; (4) Ống không có các thành phần như uốn cong, van, và các đầu nối; (5) Ống không bao gồm các thiết bị làm việc như máy bơm và tua bin.

Tính chất: Độ nhám của bề mặt thép thương mại là $\varepsilon=0.000045$ m. Độ nhớt động lực của không khí ở 40 °C là $\mu = 1.918 \times 10^{-5}$ kg/m.s, không phụ thuộc vào áp suất. Mật độ được liệt kê trong bảng đó là 1 atm. Mật độ không khí ở áp suất 105 kPa và nhiệt độ 40 °C được xác định từ phương trình khí lý tưởng là

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{105 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(40 + 273 \text{ K})} = 1.169 \text{ kg/m}^3$$

Đường kính thủy lực, vận tốc và số Reynolds của dòng chảy được xác định như sau:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4ab}{2(a+b)} = \frac{4(0.3 \text{ m})(0.20 \text{ m})}{2(0.3 + 0.20) \text{ m}} = 0.24 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{a \times b} = \frac{0.5 \text{ m}^3/\text{s}}{(0.3 \text{ m})(0.2 \text{ m})} = 8.333 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{(1.169 \text{ kg/m}^3)(8.333 \text{ m/s})(0.24 \text{ m})}{1.918 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 121,900$$

Số Reynolds lớn hơn 4000, vậy dòng chảy ở chế độ chảy rối. Hệ số ma sát có thể xác định được từ phương trình Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon / D_h}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{1.875 \times 10^{-4}}{3.7} + \frac{2.51}{121,900 \sqrt{f}} \right)$$

Từ đó, ta có $f=0.0183$. Tổn thất áp suất và cột áp trên một đoạn ống dài 40 m là:

$$\Delta P = \Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{\rho V^2}{2} = 0.01833 \frac{40 \text{ m}}{0.24 \text{ m}} \frac{(1.169 \text{ kg/m}^3)(8.333 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 124 \text{ N/m}^2 = \mathbf{124 \text{ Pa}}$$

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0.01833 \frac{40 \text{ m}}{0.24 \text{ m}} \frac{(8.333 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = \mathbf{10.8 \text{ m}}$$

Tổn thất cục bộ

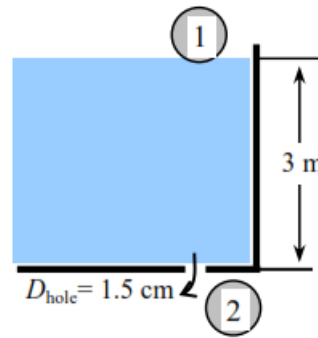
6.41

Vấn đề: Nước được rút ra khỏi bể chứa qua lỗ khoan mặt đáy. Xác định lưu lượng dòng chảy qua lỗ cho 2 trường hợp: lỗ đã được làm trơn và chưa được làm trơn.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Bể chứa được mở ra khí quyển; (3) Bỏ qua yếu tố hiệu chỉnh động năng, và do đó $\alpha = 1$.

Phân tích: Hệ số tổn thất cục bộ là $K_L = 0.5$ cho cửa vào chưa làm tròn, và $K_L = 0.03$ cho cửa vào đã làm tròn. Lấy điểm 1 trên bề mặt tự do của bể chứa và điểm 2 tại cửa ra của lỗ. Lấy độ cao tham chiếu tại cửa ra của lỗ ($z = 0$). Lưu ý rằng chất lỏng ở cả hai điểm đều mở ra khí quyển, do đó $P_1 = P_2 = P_{atm}$ và vận tốc chất lỏng tại bề mặt tự do là bằng 0 ($V = 0$), phương trình năng lượng từ điểm 1 đến điểm 2 được đơn giản thành:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump,u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine,e}} + h_L \rightarrow z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$



Thay thế biểu thức $h_L = K_L \frac{V_2^2}{2g}$, ta nhận được:

$$z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + K_L \frac{V_2^2}{2g} \rightarrow 2gz_1 = V_2^2 (\alpha_2 + K_L) \rightarrow V_2 = \sqrt{\frac{2gz_1}{\alpha_2 + K_L}} = \sqrt{\frac{2gz_1}{1 + K_L}}$$

Với $\alpha=1$ ta có lưu lượng qua lỗ (hole) là:

$$Q = A_c V_2 = \frac{\pi D_{\text{hole}}^2}{4} \sqrt{\frac{2gz_1}{1 + K_L}}$$

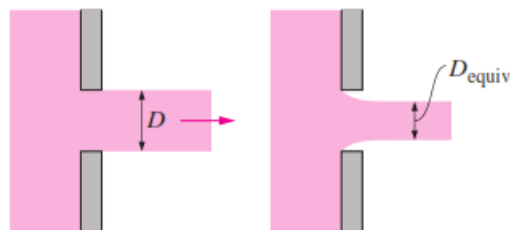
Thay số vào cho 2 trường hợp ta nhận được:

1. Lỗ được làm tròn

$$Q = \frac{\pi D_{\text{hole}}^2}{4} \sqrt{\frac{2gz_1}{1 + K_L}} = \frac{\pi (0.015 \text{ m})^2}{4} \sqrt{\frac{2(9.81 \text{ m/s}^2)(3 \text{ m})}{1 + 0.03}} = 1.34 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

2. Lỗ chưa được làm tròn

$$Q = \frac{\pi D_{\text{hole}}^2}{4} \sqrt{\frac{2gz_1}{1 + K_L}} = \frac{\pi (0.015 \text{ m})^2}{4} \sqrt{\frac{2(9.81 \text{ m/s}^2)(3 \text{ m})}{1 + 0.5}} = 1.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$



Không ma sát

Thực tế

6.42

Vấn đề: Nước được xả ra từ một hồ chứa nước qua một lỗ tròn có đường kính D trên tường thẳng đứng cách bề mặt tự do khoảng cách H . Thu được mối quan hệ cho "đường kính tương đương" được sử dụng trong dòng chảy không ma sát cho trường hợp lỗ chứa được làm tròn.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Bể chứa được mở ra khí quyển; (3) Bỏ qua yếu tố hiệu chỉnh động năng, và do đó $\alpha = 1$.

Phân tích: Hệ số tổn thất cục bộ là $K_L = 0.5$ cho cửa vào chưa làm tròn. Lấy điểm 1 trên bề mặt tự do của bể chứa và điểm 2 tại cửa ra của lỗ. Lấy độ cao tham chiếu tại cửa ra của lỗ ($z = 0$). Lưu ý rằng chất lỏng ở cả hai điểm đều mở ra khí quyển, do đó $P_1 = P_2 = P_{atm}$ và vận tốc chất lỏng tại bề mặt tự do là bằng 0 ($V = 0$), phương trình năng lượng từ điểm 1 đến điểm 2 được đơn giản thành:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump,u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine,e}} + h_L \quad \rightarrow \quad H = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

Thay thế biểu thức $h_L = K_L \frac{V_2^2}{2g}$, ta nhận được:

$$H = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + K_L \frac{V_2^2}{2g} \quad \rightarrow \quad 2gH = V_2^2 (\alpha_2 + K_L) \quad \rightarrow \quad V_2 = \sqrt{\frac{2gH}{\alpha_2 + K_L}} = \sqrt{\frac{2gH}{1 + K_L}}$$

Với $\alpha=1$ ta có lưu lượng qua lỗ (hole) là:

$$Q = A_c V_2 = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gH}{1 + K_L}} \quad (1)$$

Trong trường hợp không ma sát, vận tốc được xác định từ phương trình Toricelli. Khi đó lưu lượng tính qua "đường kính tương đương", D_{equiv} , sẽ là:

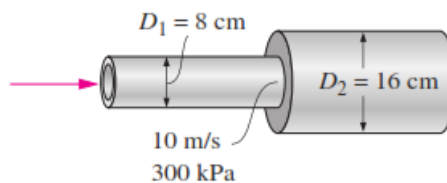
$$Q = A_{c,\text{equiv}} V_{2,\text{frictionless}} = \frac{\pi D_{\text{equiv}}^2}{4} \sqrt{2gH} \quad (2)$$

So sánh (1) và (2), ta có:

$$\frac{\pi D_{\text{equiv}}^2}{4} \sqrt{2gH} = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gH}{1 + K_L}}$$

Từ đó rút ra

$$D_{\text{equiv}} = \frac{D}{(1 + K_L)^{1/4}} = \frac{D}{(1 + 0.5)^{1/4}} = \mathbf{0.904 D}$$



6.43

Vấn đề: Một ống nước nằm ngang có mặt cắt mở rộng đột ngột. Vận tốc và áp suất trong ống đường kính nhỏ hơn ống đã biết. Xác định áp suất sau mặt cắt mở rộng và sai số nếu công thức sử dụng phương trình Bernoulli không tồn thất.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định, nằm ngang, và không nén được; (2) Dòng chảy ở cả cửa vào và cửa ra là phát triển hoàn toàn và rối với các hệ số điều chỉnh động năng $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.06$.

Tính chất: Mật độ của nước là $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $\alpha_1 = \alpha_2 = 1.06$.

Phân tích: Sử dụng phương trình bảo toàn khối lượng với $\rho = \text{const}$, vận tốc dòng chảy trong ống to hơn là:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 \rightarrow V_2 = \frac{A_1}{A_2} V_1 = \frac{\pi D_1^2 / 4}{\pi D_2^2 / 4} V_1 = \frac{D_1^2}{D_2^2} V_1 = \frac{(0.08 \text{ m})^2}{(0.16 \text{ m})^2} (10 \text{ m/s}) = 2.5 \text{ m/s}$$

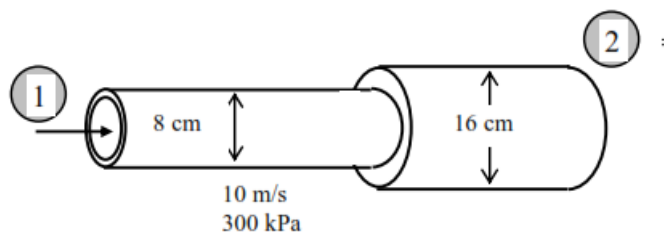
Hệ số tổn thất cục bộ và tổn thất cột áp qua mặt cắt đột mở là:

$$K_L = \left(1 - \frac{A_{\text{small}}}{A_{\text{large}}} \right)^2 = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right)^2 = \left(1 - \frac{0.08^2}{0.16^2} \right)^2 = 0.5625$$

$$h_L = K_L \frac{V_1^2}{2g} = (0.5625) \frac{(10 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 2.87 \text{ m}$$

Với $z_1 = z_2$ và trong hệ thống không có bơm và tua bin, phương trình năng lượng giữa điểm qua mặt cắt đột mở đơn giản thành:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump,u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine,e}} + h_L \rightarrow \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$



Từ đó P_2 được xác định:

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 + \rho \left\{ \frac{\alpha_1 V_1^2 - \alpha_2 V_2^2}{2} - gh_L \right\} \\ &= (300 \text{ kPa}) + (1000 \text{ kg/m}^3) \left\{ \frac{1.06(10 \text{ m/s})^2 - 1.06(2.5 \text{ m/s})^2}{2} - (9.81 \text{ m/s}^2)(2.87 \text{ m}) \right\} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1 \text{ kN/m}^2} \right) \\ &= \mathbf{322 \text{ kPa}} \end{aligned}$$

Mặc dù có tổn thất áp suất qua mặt cắt đột mở, áp suất trong ống vẫn tăng lên sau ảnh hưởng đột mở. Điều này là do sự chuyển đổi động năng thành áp suất trong dòng chảy.

Khi viết phương trình Bernoulli không tồn thất cho dòng chảy ta có:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \rightarrow \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \rightarrow P_1 = P_2 + \rho \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

Từ đó rút ra:

$$P_2 = (300 \text{ kPa}) + (1000 \text{ kg/m}^3) \frac{(10 \text{ m/s})^2 - (2.5 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1 \text{ kN/m}^2} \right) = 347 \text{ kPa}$$

Vậy sai số sẽ là:

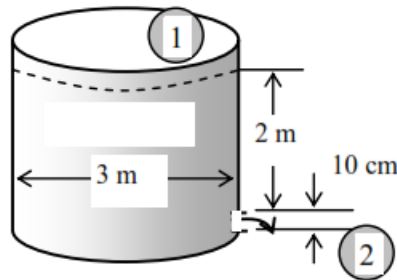
$$P_{2, \text{Bernoulli}} - P_2 = 347 - 322 = 25.0 \text{ kPa}$$

Phần trăm sai số là $25/322 = 7.8 \%$

Thảo luận: Thông thường chúng ta cho rằng áp suất cần cao hơn ở đầu vào để tạo ra dòng chảy. Có thể là điều bất ngờ khi thấy rằng áp suất ở hạ lưu dòng chảy đã tăng lên sau mặt cắt mở rộng đột ngột, mặc dù có tổn thất. Điều này xảy ra là do phương trình Bernoulli bao gồm tổng số của 3 đại lượng bao gồm cột cao áp suất, cột vận tốc, độ cao, tức là $[P/\rho g + 1/2 V^2/g + z]$, là các đại lượng tạo ra dòng chảy. Với sự mở rộng hình học của dòng chảy, cột cao vận tốc ban đầu được chuyển thành cột cao áp suất hạ lưu, và sự gia tăng này lớn hơn sự mất mát cột áp do các quá trình không thuận nghịch.

Hệ thống đường ống và lựa chọn bơm

6.48



Vấn đề: Một bể nước mở ra khí quyển ban đầu được đổ đầy nước. Một lỗ thủng chưa làm tròn ở đáy bể mở ra khí quyển. Xác định vận tốc ban đầu từ bể và thời gian cần thiết để cạn bể.

Giả thiết: (1) Dòng chảy đều và không nén được; (2) Dòng chảy là rời để có thể sử dụng hệ số tổn thất cục bộ trong bảng tra cứu; (3) Ảnh hưởng của hệ số hiệu chỉnh động năng là không đáng kể, $\alpha = 1$.

Tính chất: Hệ số tổn thất cục bộ là $K_L = 0.5$ cho cửa vào chứ được làm tròn.

Phân tích: (a) Lấy điểm 1 trên bề mặt tự do của bể, và điểm 2 tại cửa ra của lỗ, lấy độ cao tâm của lỗ thủng làm mặt phẳng tham chiếu ($z = 0$). Lưu ý rằng chất lỏng ở cả hai điểm mở ra khí quyển (do đó $P_1 = P_2 = P_{\text{atm}}$) và vận tốc chất lỏng trên mặt tự do là rất nhỏ ($V_1 \cong 0$), phương trình năng lượng giữa 2 điểm đơn giản hoá thành:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump, u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine, e}} + h_L \quad \rightarrow \quad z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

Thay thế biểu thức $h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$, ta nhận được:

$$z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + K_L \frac{V_2^2}{2g} \quad \rightarrow \quad 2gz_1 = V_2^2 (\alpha_2 + K_L) \quad \rightarrow \quad V_2 = \sqrt{\frac{2gz_1}{\alpha_2 + K_L}}$$

Với $\alpha_2 = 1$, độ cao mặt thoáng ban đầu $z_2 = 2 \text{ m}$, ta có

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gz_1}{1+K_L}} = \sqrt{\frac{2(9.81 \text{ m/s}^2)(2 \text{ m})}{1+0.5}} = \mathbf{5.11 \text{ m/s}}$$

Tương tự, vận tốc tại một thời điểm bất kỳ của nước qua lỗ thủng sẽ là

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gz}{1+K_L}}$$

Trong đó z là độ cao của mặt thoáng tự do.

(b) Ký hiệu đường kính bể là D_0 , đường kính lỗ thủng là D . Lưu lượng qua lỗ thủng tại thời điểm bất kỳ là:

$$Q = A_{\text{orifice}} V_2 = \frac{\pi D^2}{4} V_2$$

Thể tích nước đi qua lỗ thủng trong thời gian dt là:

$$dV = Q dt = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gz}{1+K_L}} dt \quad (1)$$

Theo định luật bảo toàn khối lượng, thể tích này phải bằng với thể tích mất đi trong bể:

$$dV = A_{\text{tank}} (-dz) = -\frac{\pi D_0^2}{4} dz \quad (2)$$

Trong đó dz là thay đổi mực nước trong bể trong thời gian dt .

$$\frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gz}{1+K_L}} dt = -\frac{\pi D_0^2}{4} dz \rightarrow dt = -\frac{D_0^2}{D^2} \sqrt{\frac{1+K_L}{2gz}} dz \rightarrow dt = -\frac{D_0^2}{D^2} \sqrt{\frac{1+K_L}{2g}} z^{-1/2} dz$$

Phương trình vi phân này có thể dễ dàng giải bằng phương pháp tách biến. Với $t=0$ là thời điểm ban đầu ($z=z_1$), t_f là thời điểm bình đã cạn ($z=0$), ta có:

$$\int_{t=0}^{t_f} dt = -\frac{D_0^2}{D^2} \sqrt{\frac{1+K_L}{2g}} \int_{z=z_1}^0 z^{-1/2} dz \rightarrow t_f = -\frac{D_0^2}{D^2} \sqrt{\frac{1+K_L}{2g}} \left[z^{-\frac{1}{2}+1} \right]_{z_1}^0 = \frac{2D_0^2}{D^2} \sqrt{\frac{1+K_L}{2g}} z_1^{1/2}$$

Thay các giá trị vào biểu thức cho t_f , ta nhận được:

$$t_f = \frac{D_0^2}{D^2} \sqrt{\frac{2z_1(1+K_L)}{g}} = \frac{(3 \text{ m})^2}{(0.1 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{2(2 \text{ m})(1+0.5)}{9.81 \text{ m/s}^2}} = \mathbf{704 \text{ s} = 11.7 \text{ min}}$$

Thảo luận: Ảnh hưởng của K_L có thể được đánh giá thông qua việc đặt $K_L=0$. Trong trường hợp này với $K_L=0$ ta có:

$$t_{f, \text{zero loss}} = \frac{D_0^2}{D^2} \sqrt{\frac{2z_1}{g}} = \frac{(3 \text{ m})^2}{(0.1 \text{ m})^2} \sqrt{\frac{2(2 \text{ m})}{9.81 \text{ m/s}^2}} = 575 \text{ s} = 9.6 \text{ min}$$

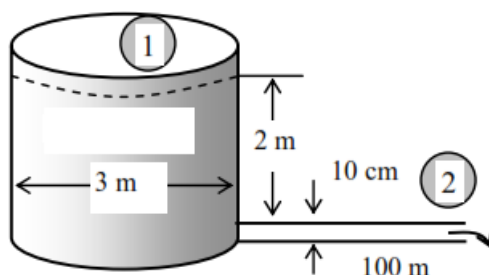
Như vậy thời gian xả cạn bể sẽ giảm $(11.7-9.6)/11.7=18\%$. Ảnh hưởng này là đáng kể, vì vậy hệ số tổn thất cục bộ cần được xem xét trong quá trình xả bồn.

6.49

Vấn đề: Một bể nước mở ra khí quyển ban đầu được đổ đầy nước. Một lỗ ở đáy chưa được làm tròn nối với một đường ống dài xả nước ra khí quyển. Xác định vận tốc dòng chảy ban đầu.

Giả thiết: (1) Dòng chảy đều và không nén được; (2) Đường ống nằm ngang; (3) Dòng chảy là rối để có thể sử dụng hệ số tổn thất cục bộ trong bảng tra cứu; (4) Hệ số ma sát không đổi; (5) Ảnh hưởng của hệ số hiệu chỉnh động năng là không đáng kể, $\alpha = 1$.

Tính chất: Hệ số tổn thất cục bộ cửa vào là $K_L=0.5$. Hệ số ma sát của đường ống được cho là 0.015.



Phân tích: (a) Lấy điểm 1 trên bề mặt tự do của bể, và điểm 2 tại cửa ra của đường ống, lấy độ cao tâm của lỗ thùng làm mặt phẳng tham chiếu ($z = 0$). Lưu ý rằng chất lỏng ở cả hai điểm mở ra khí quyển (do đó $P_1 = P_2 = P_{atm}$) và vận tốc chất lỏng trên mặt tự do là rất nhỏ ($V_1 \approx 0$), phương trình năng lượng giữa 2 điểm đơn giản hoá thành:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump, u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine, e}} + h_L \quad \rightarrow \quad z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

ở đây

$$h_L = h_{L, \text{total}} = h_{L, \text{major}} + h_{L, \text{minor}} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g} = \left(f \frac{L}{D} + K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$

vì đường kính đường ống không thay đổi. Giải cho V_2 ta nhận được:

$$z_1 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \left(f \frac{L}{D} + K_L \right) \frac{V_2^2}{2g} \quad \rightarrow \quad V_2 = \sqrt{\frac{2gz_1}{\alpha_2 + fL/D + K_L}}$$

Với $\alpha_2=1$, $z_1=2$ m, ta có:

$$V_{2,i} = \sqrt{\frac{2gz_1}{1 + fL/D + K_L}} = \sqrt{\frac{2(9.81 \text{ m/s}^2)(2 \text{ m})}{1 + 0.015(100 \text{ m})/(0.1 \text{ m}) + 0.5}} = \mathbf{1.54 \text{ m/s}}$$

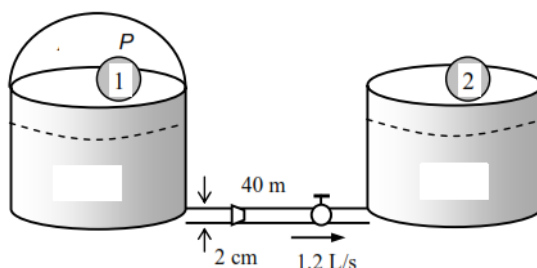
6.51

Vấn đề: Lưu lượng dòng chảy thông qua hệ thống đường ống kết nối hai bể chứa nước đã biết. Xác định áp suất tuyệt đối trong bể nén.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, do đó dòng chảy được coi phát triển hoàn toàn; (3) Dòng chảy là rối để có thể sử dụng giá trị đã được lập ra trong bảng hệ số tổn thất cục bộ (sẽ được xác minh); (4) Không có máy bơm hoặc tuabin trong hệ thống đường ống.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động lực của nước tại 10 °C là $\rho = 999.7 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 1.307 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$. Các hệ số tổn thất là $K_L = 0.5$ cho cửa vào, $K_L = 2$ cho van một chiều,

$K_L = 0.2$ cho van cánh mở hoàn toàn và $K_L = 1$ cho cửa ra. Độ nhám của ống gang đúc là $\varepsilon = 0.00026$ m.



Phân tích: Lấy điểm 1 và 2 trên bề mặt tự do của hai hồ chứa. Lưu ý rằng vận tốc chất lỏng ở cả hai điểm là 0 ($V_1 = V_2 = 0$), chất lỏng ở điểm 2 mở ra khí quyển (do đó $P_2 = P_{atm}$), cả hai điểm đều ở cùng một độ cao ($z_1 = z_2$). Khi đó, phương trình năng lượng giữa hai điểm được đơn giản hóa thành

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{pump,u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbine,e} + h_L \rightarrow \frac{P_1}{\rho g} = \frac{P_{atm}}{\rho g} + h_L \rightarrow P_1 = P_{atm} + \rho g h_L$$

Ở đây:

$$h_L = h_{L,total} = h_{L,major} + h_{L,minor} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V_2^2}{2g}$$

vì đường kính là hằng số.

Vận tốc trung bình và số Reynolds được xác định:

$$V_2 = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} = \frac{0.0012 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi (0.02 \text{ m})^2 / 4} = 3.82 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{\rho V_2 D}{\mu} = \frac{(999.7 \text{ kg/m}^3)(3.82 \text{ m/s})(0.02 \text{ m})}{1.307 \times 10^{-3} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 58,400$$

$Re > 4000$ do đó dòng chảy là rối và hệ số ma sát được xác định từ phương trình Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{0.013}{3.7} + \frac{2.51}{58,400 \sqrt{f}} \right)$$

Cho $f = 0.0424$.

Tổng hệ số tổn thất cục bộ là:

$$\sum K_L = K_{L,entrance} + K_{L,check\ valve} + K_{L,gate\ valve} + K_{L,exit} = 0.5 + 2 + 0.2 + 1 = 3.7$$

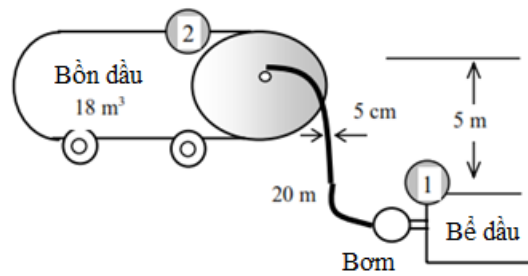
Vậy tổng tổn thất cột áp là:

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V_2^2}{2g} = \left((0.0424) \frac{40 \text{ m}}{0.02 \text{ m}} + 3.7 \right) \frac{(3.82 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 65.8 \text{ m}$$

Từ đó ta có:

$$P_1 = P_{atm} + \rho g h_L = (88 \text{ kPa}) + (999.7 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(65.8 \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kPa}}{1 \text{ kN/m}^2} \right) = \mathbf{734 \text{ kPa}}$$

6.52



Vấn đề : Xe chở dầu cần được đổ đầy dầu nhiên liệu từ một bể chứa ngầm bằng ống dẫn plastic. Xác định yêu cầu công suất máy bơm cần sử dụng.

Giả thiết : (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cửa vào là không đáng kể, do đó dòng chảy được coi là phát triển hoàn toàn; (3) Dòng chảy là rối để có thể sử dụng giá trị hệ số tổn thất cục bộ đã được thiết lập trong bảng(cần được xác minh); (4) Mức dầu nhiên liệu trong bể ngầm không đổi; (5) Bể chứa mở ra khí quyển.

Tính chất : Mật độ và độ nhớt động lực của dầu nhiên liệu được cho là $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 0.045 \text{ kg/m.s}$. Hệ số tổn thất cục bộ cho cửa vào được làm trơn là $K_I = 0.12$ và $K_L = 0.3$ cho đoạn ống cong trơn 90°. Ống plastic có $\epsilon = 0$. Hệ số hiệu chỉnh động năng ở cửa xả được cho là $\alpha = 1.05$.

Phân tích : Chọn điểm 1 trên bề mặt tự do của dầu trong bể ngầm và điểm 2 tại cửa xả của ống trong xe chở dầu. Lưu ý rằng chất lỏng ở cả hai điểm đều mở ra khí quyển (do đó $P_1 = P_2 = P_{atm}$) và vận tốc chất lỏng tại điểm 1 là bằng 0 ($V_1 = 0$). Lấy bề mặt tự do của bể chứa làm mức tham chiếu ($z_1 = 0$). Phương trình năng lượng giữa hai điểm này được đơn giản hóa thành :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{\text{pump, u}} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{\text{turbine, e}} + h_L \quad \rightarrow \quad h_{\text{pump, u}} = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

Ở đây:

$$h_L = h_{L, \text{total}} = h_{L, \text{major}} + h_{L, \text{minor}} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V_2^2}{2g}$$

vì đường kính là hằng số.

Vì xe dầu cần được bơm đầy trong 30 phút do đó lưu lượng bơm sẽ là :

$$Q = \frac{V_{\text{tanker}}}{\Delta t} = \frac{18 \text{ m}^3}{(30 \times 60 \text{ s})} = 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$$

Vận tốc dòng chảy và số Reynolds được xác định như sau

$$V_2 = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} = \frac{0.01 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi(0.05 \text{ m})^2 / 4} = 5.093 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho V_2 D}{\mu} = \frac{(920 \text{ kg/m}^3)(5.093 \text{ m/s})(0.05 \text{ m})}{0.045 \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 5206$$

Số Re >4000 do đó dòng chảy là rối và hệ số ma sát có thể xác định từ phương trình Colebrook :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon / D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(0 + \frac{2.51}{5206 \sqrt{f}} \right)$$

Giải phương trình ta nhận được $f=0.0372$.

Tổng tổn thất cục bộ trong dòng chảy là

$$\sum K_L = K_{L,\text{entrance}} + 2K_{L,\text{bend}} = 0.12 + 2 \times 0.3 = 0.72$$

Từ đó xác định được tổn thất cột áp, cột bơm hữu ích và công suất máy bơm :

$$h_L = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V_2^2}{2g} = \left((0.0370) \frac{20 \text{ m}}{0.05 \text{ m}} + 0.72 \right) \frac{(5.093 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} = 20.5 \text{ m}$$

$$h_{\text{pump,u}} = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L = 1.05 \frac{(5.093 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)} + 5 \text{ m} + 20.5 \text{ m} = 26.9 \text{ m}$$

$$\dot{W}_{\text{pump}} = \frac{Q \rho g h_{\text{pump,u}}}{\eta_{\text{pump}}} = \frac{(0.01 \text{ m}^3/\text{s})(920 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(26.9 \text{ m})}{0.82} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kN} \cdot \text{m/s}} \right) = 2.96 \text{ kW}$$

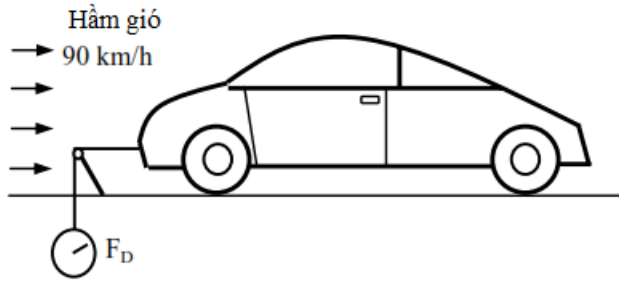
Thảo luận: Tổng tổn thất cục bộ là rất nhỏ, có thể bỏ qua (chỉ chiếm $0.72/15.52=4.6\%$). Hệ số ma sát có thể dễ dàng tính từ công thức Haaland cho $f=0.0372$ với sai số không đáng kể.

Chương 7

Lực cản, lực nâng và hệ số lực cản

7.15

Vấn đề: Lực cản tác dụng trên một chiếc xe được đo trong một đường hầm gió. Xác định hệ số lực cản của xe các điều kiện thí nghiệm.



Giả thiết : (1) Dòng không khí ổn định và không nén được; (2) Mặt cắt ngang của đường hầm là đủ lớn (so với kích thước xe) để dòng chảy được coi là tự do bao quanh xe; (3) Phần đáy của đường hầm cũng di chuyển với tốc độ không khí để điều kiện lái xe gần đúng hoặc hiệu ứng khác là không đáng kể; (4) Không khí là khí lý tưởng.

Tính chất: Mật độ không khí ở 1 atm và 25 °C là

Phân tích: Lực cản và hệ số cản được xác định bởi các công thức:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{and} \quad C_D = \frac{2F_D}{\rho A V^2}$$

ở đây A là diện tích mặt trước. Thay giá trị đã biết vào ta nhận được:

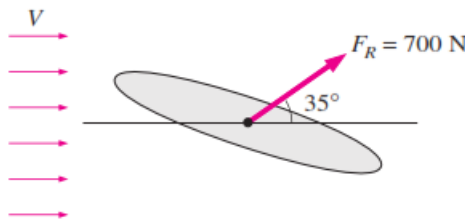
$$C_D = \frac{2 \times (350 \text{ N})}{(1.164 \text{ kg/m}^3)(1.40 \times 1.65 \text{ m}^2)(90 / 3.6 \text{ m/s})^2} \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right) = \mathbf{0.42}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng hệ số lực cản phụ thuộc vào điều kiện thiết kế và giá trị của nó sẽ khác nhau ở các điều kiện khác nhau. Do đó, hệ số lực cản của các loại phương tiện khác nhau chỉ có thể được so sánh một cách có ý nghĩa nếu chúng được xác định trong điều kiện giống hệt nhau. Điều này cho thấy tầm quan trọng của việc phát triển các quy trình kiểm tra tiêu chuẩn trong công nghiệp.

7.17

Vấn đề: Tổng hợp lực do áp suất và ứng suất bề mặt tác dụng lên vật thể đã biết. Xác định lực cản và lực nâng tác dụng lên vật thể.

Phân tích: Lực cản và lực nâng được xác định bằng cách phân chia lực tổng hợp thành các thành phần theo hướng dòng chảy và hướng vuông góc với dòng chảy,



Lực cản : $F_D = F_R \cos \theta = (700 \text{ N}) \cos 35^\circ = \mathbf{573 \text{ N}}$

Lực nâng : $F_L = F_R \sin \theta = (700 \text{ N}) \sin 35^\circ = \mathbf{402 \text{ N}}$

7.18

Vấn đề: Tổng hợp lực cản tác dụng lên một vật thể hình cầu được đo và lực cản do áp lực tác dụng lên vật thể là được xác định bằng cách tích phân phân bố áp suất trên bề mặt. Xác định hệ số lực cản ma sát.

Giả thiết: (1) Dòng không khí ổn định và không nén được; (2) Bề mặt của quả cầu là trơn nhẵn; (3) Dòng chảy bao quả cầu là dòng chảy rối (sẽ được xác minh).

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của không khí ở 1 atm và 5 °C là $\rho = 1.269 \text{ kg/m}^3$ và $\nu = 1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Hệ số cản của quả cầu trong dòng chảy rối là $C_D = 0.2$ (tra bảng), và diện tích mặt trước là $A = \pi D^2/4$.

Phân tích: Tổng lực cản là tổng lực ma sát và lực áp suất. Vì thế,

$$F_{D,\text{friction}} = F_D - F_{D,\text{pressure}} = 5.2 - 4.9 = 0.3 \text{ N}$$

ở đây $F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2}$ và $F_{D,\text{friction}} = C_{D,\text{friction}} A \frac{\rho V^2}{2}$

Từ đó ta có:

$$C_{D,\text{friction}} = \frac{F_{D,\text{friction}}}{F_D} C_D = \frac{0.3 \text{ N}}{5.2 \text{ N}} (0.2) = \mathbf{0.0115}$$

Để kiểm tra chế độ dòng chảy, chúng ta xác định số Reynolds như sau:

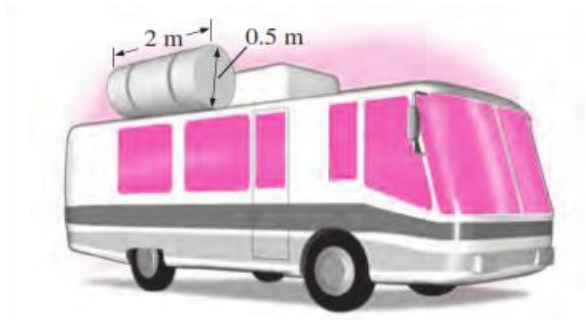
$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} \rightarrow V = \sqrt{\frac{2F_D}{\rho C_D A}} = \sqrt{\frac{2(5.2 \text{ N})}{(1.269 \text{ kg/m}^3)(0.2)[\pi(0.12 \text{ m})^2 / 4] \left(\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{1 \text{ N}} \right)}} = 60.2 \text{ m/s}$$

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(60.2 \text{ m/s})(0.12 \text{ m})}{1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}} = 5.23 \times 10^5$$

Ta có $Re > 2 \times 10^5$ do đó dòng chảy là ở chế độ chảy rối.

Thảo luận: Chế độ dòng chảy là quan trọng. Vì đối với dòng chảy rối ta có $C_D = 0.2$ trong khi đó đối với dòng chảy tầng $C_D = 0.5$.

7.19



Vấn đề: Để đáp ứng nhu cầu về nước của một chiếc xe du lịch (RV) người ta lắp đặt một bồn hình trụ phía trên xe. Xác định yêu cầu năng lượng bổ sung cho RV ở tốc độ cho trước với hai hướng đặt bể khác nhau.

Giả thiết: (1) Dòng không khí ổn định và không nén được; (2) Ảnh hưởng của bồn và RV đối với hệ số cản của nhau là không đáng kể (không gây nhiễu); (3) Dòng chảy là rối để có thể sử dụng giá trị bảng biểu của hệ số lực cản.

Tính chất: Hệ số lực cản cho một hình trụ với $L/D = 2/0.5 = 4$ là $C_D = 0.9$ khi hình trụ đặt song song với xe, và $C_D = 0.8$ khi hình trụ đặt ngang RV. Mật độ không khí ở các điều kiện quy định là

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{87 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(295 \text{ K})} = 1.028 \text{ kg/m}^3$$

Phân tích: (a) Lực cản khi bồn đặt song song với xe:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = (0.9) [\pi (0.5 \text{ m})^2 / 4] \frac{(1.028 \text{ kg/m}^3)(95 \text{ km/h})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ m/s}}{3.6 \text{ km/h}} \right)^2 \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 63.3 \text{ N}$$

Công suất cần bổ sung để thắng lực cản này là:

$$\dot{W}_{\text{drag}} = F_D V = (63.3 \text{ N})(95/3.6 \text{ m/s}) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ N} \cdot \text{m/s}} \right) = \mathbf{1.67 \text{ kW}}$$

(b) Lực cản khi bồn đặt ngang xe:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = (0.8) [0.5 \times 2 \text{ m}^2] \frac{(1.028 \text{ kg/m}^3)(95 \text{ km/h})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ m/s}}{3.6 \text{ km/h}} \right)^2 \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 286 \text{ N}$$

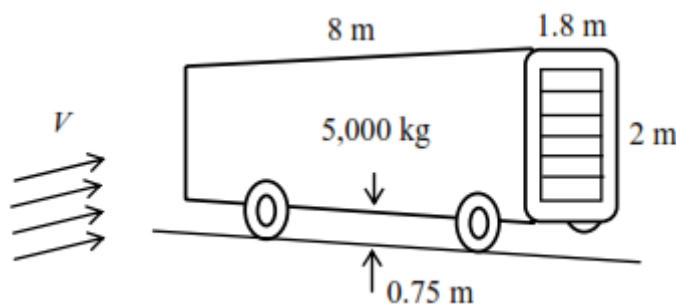
Công suất cần bổ sung để thắng lực cản này là:

$$\dot{W}_{\text{drag}} = F_D V = (286 \text{ N})(95/3.6 \text{ m/s}) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ N} \cdot \text{m/s}} \right) = \mathbf{7.55 \text{ kW}}$$

Thảo luận: Xe sẽ tốn nhiên liệu ít hơn khi đặt bình song song với xe. Vì trong trường hợp này mặt trước của bồn nhỏ hơn nhiều lần so với diện tích thiết diện.

7.21

Vấn đề: Một xe tải bán tiếp xúc với gió từ bên mặt bên. Xác định tốc độ gió lật đổ xe tải sang.



Giả thiết: (1) Dòng không khí ổn định và không nén được; (2) Các hiệu ứng cạnh trên xe bán tải là không đáng kể (một xấp xỉ thô) và tổng hợp lực cản tác dụng tại trung tâm của mặt bên; (3) Dòng chảy là rối để có thể sử dụng giá trị bảng biểu của hệ số lực cản; (4)

Khoảng cách giữa các bánh xe trên cùng một trục là 2 m; (5) Dải trọng được sắp xếp đều sao cho trọng lượng của xe tác dụng qua tâm xe.

Tính chất: Mật độ không khí được cho là $\rho = 1.10 \text{ kg/m}^3$. Hệ số lực cản đối với một mặt cắt hình chữ nhật tương ứng với $L/D = 2/2 = 1$ là $C_D = 2.2$ khi gió vuông góc với mặt bên (Bảng 11.2).

Phân tích: Khi xe bắt đầu nghiêng, bánh xe ở phía đối diện với gió sẽ rời khỏi mặt đất, do đó tất cả các lực phản ứng từ mặt đất sẽ tác dụng trên các bánh xe ở phía bên kia. Lấy mô-men đối với trục đi qua các bánh xe và đặt nó bằng không cho lực cản cần thiết, ta nhận được

$$\sum M_{\text{wheels}} = 0 \rightarrow F_D \times (1 \text{ m}) - W \times (1 \text{ m}) = 0 \rightarrow F_D = W$$

Thay số vào, ta nhận được

$$F_D = mg = (5000 \text{ kg})(9.81 \text{ m/s}^2) \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 49,050 \text{ N}$$

Vận tốc gió sẽ là:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} \rightarrow 49,050 \text{ N} = (2.2)(2 \times 8 \text{ m}^2) \frac{(1.10 \text{ kg/m}^3)V^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) \rightarrow V = 50.3 \text{ m/s}$$

Chiều lồi $F_{D1} = C_{D1} A \frac{\rho V^2}{2} = (0.4)[\pi(0.08 \text{ m})^2 / 4] \frac{(1.25 \text{ kg/m}^3)(15 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 0.283 \text{ N}$

Chiều lõm $F_{D2} = C_{D2} A \frac{\rho V^2}{2} = (1.2)[\pi(0.08 \text{ m})^2 / 4] \frac{(1.25 \text{ kg/m}^3)(15 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 0.848 \text{ N}$

7.23



Vấn đề: Một tàu ngầm có hình dạng elipsoid với chiều dài và đường kính đã cho. Xác định công suất cần thiết để tàu ngầm di chuyển theo chiều nằm ngang trong nước biển.

Giả thiết: (1) Tàu ngầm được coi như một elipsoid; (2) Dòng chảy là rối; (3) Chuyển động của tàu ngầm là ổn định.

Tính chất: Hệ số lực cản cho một ellipsoid với $L/D = 25/5 = 5$ là $C_D = 0.1$ trong dòng chảy rối (Bảng 7.2 11-2). Mật độ nước biển là 1025 kg/m^3 . Mật độ không khí được cho là 1.30 kg/m^3 . Lực cản tác dụng lên tàu ngầm sẽ là:

Trong nước:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = (0.1)[\pi(5 \text{ m})^2 / 4] \frac{(1025 \text{ kg/m}^3)(11.11 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 124.2 \text{ kN}$$

Trong không khí:

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = (0.1) [\pi (5 \text{ m})^2 / 4] \frac{(1.30 \text{ kg/m}^3) (11.11 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kN}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = 0.158 \text{ kN}$$

Lưu ý rằng công suất là lực nhân với vận tốc, do đó công suất cần để thắng lực cản là:

Trong nước:

$$\dot{W}_{\text{drag}} = F_D V = (124.2 \text{ kN}) (11.11 \text{ m/s}) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kN} \cdot \text{m/s}} \right) = \mathbf{1380 \text{ kW}}$$

Trong không khí:

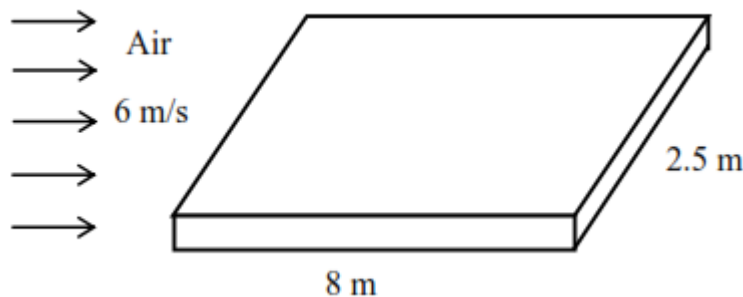
$$\dot{W}_{\text{drag}} = F_D V = (0.158 \text{ kN}) (11.11 \text{ m/s}) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kN} \cdot \text{m/s}} \right) = \mathbf{1.75 \text{ kW}}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng năng lượng cần thiết để di chuyển tàu ngầm trong nước là khoảng 800 lần năng lượng cần thiết để di chuyển trong không khí. Điều này là do mật độ nước cao hơn so với không khí (nước biển nặng gấp 800 lần so với không khí).

Dòng chảy bao tấm phẳng

7.28

Vấn đề: Cho biết vận tốc không khí thổi bao tấm phẳng ở độ cao nhất định. Xác định lực cản tác dụng lên bề mặt trên của tấm cho trường hợp chiều dài đặt theo hướng dòng chảy và trường hợp hai cạnh bên đặt theo hướng dòng chảy.



Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Số Reynolds tới hạn là $Re_{cr} = 5 \times 10^5$; (3) Không khí là khí lý tưởng; (4) Bề mặt tấm phẳng là trơn nhẵn.

Tính chất: Độ nhớt động lực là độc lập với áp lực, đối với không khí ở 25 °C là $\mu = 1.849 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$. Mật độ Không khí ở 25 °C = 298 K và 83.4 kPa là:

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{83.4 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(298 \text{ K})} = 0.9751 \text{ kg/m}^3$$

Phân tích:

(a) Khi cạnh dài 8 m đặt song song với dòng chảy, số Reynolds là:

$$Re_L = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{(0.9751 \text{ kg/m}^3) (6 \text{ m/s}) (8 \text{ m})}{1.849 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 2.531 \times 10^6$$

Số này lớn hơn số Reynolds tới hạn. Dòng chảy bao gồm vùng chảy tầng và vùng rối, hệ số ma sát C_f được xác định là:

$$C_f = \frac{0.074}{\text{Re}_L^{1/5}} - \frac{1742}{\text{Re}_L} = \frac{0.074}{(2.531 \times 10^6)^{1/5}} - \frac{1742}{2.531 \times 10^6} = 0.003189$$

Trong trường hợp tấm phẳng, lực cản do áp suất bằng 0, do đó tổng hợp lực cản tác dụng lên tấm là:

$$F_D = C_f A \frac{\rho V^2}{2} = 0.003189 \times (8 \times 2.5 \text{ m}^2) \frac{(0.9751 \text{ kg/m}^3)(6 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = \mathbf{1.12 \text{ N}}$$

(b) Khi cánh dài 2.5m đặt song song với dòng chảy, số Reynolds là:

$$\text{Re}_L = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{(0.9751 \text{ kg/m}^3)(6 \text{ m/s})(2.5 \text{ m})}{1.849 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}} = 7.910 \times 10^5$$

Số này lớn hơn số Reynolds tới hạn. Dòng chảy bao gồm vùng chảy tầng và vùng rối, hệ số ma sát C_f được xác định là:

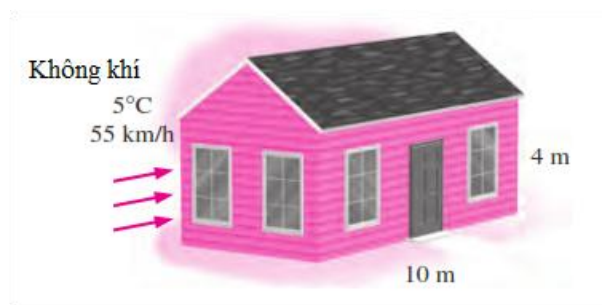
$$C_f = \frac{0.074}{\text{Re}_L^{1/5}} - \frac{1742}{\text{Re}_L} = \frac{0.074}{(7.910 \times 10^5)^{1/5}} - \frac{1742}{7.910 \times 10^5} = 0.002691$$

Trong trường hợp tấm phẳng, lực cản do áp suất bằng 0, do đó tổng hợp lực cản tác dụng lên tấm là:

$$F_D = C_f A \frac{\rho V^2}{2} = 0.002691 \times (8 \times 2.5 \text{ m}^2) \frac{(0.9751 \text{ kg/m}^3)(6 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = \mathbf{0.94 \text{ N}}$$

Thảo luận: Có thể nhận thấy là lực cản tỷ lệ thuận với mật độ, mà mật độ cũng tỷ lệ thuận với áp suất. Vì vậy độ cao có ảnh hưởng quan trọng đến lực cản tác dụng lên bề mặt. Vì vậy các máy bay thương mại thường bay ở độ cao lớn để tiết kiệm xăng.

7.29



Vấn đề: Gió thổi song song với bức tường bên cạnh của tòa nhà. Xác định lực cản tác dụng lên tường cho hai tốc độ gió khác nhau.

Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Số Reynolds tới hạn là $\text{Re}_{cr} = 5 \times 10^5$; (3) Không khí là khí lý tưởng; (4) Bề mặt tường là trơn nhẵn (trong thực tế bề mặt tường thường rất thô); (5) Gió thổi song song với bức tường.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của không khí ở 1 atm và 5 °C là $\rho = 1.269 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Phân tích: Số Reynolds là

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{[(55/3.6) \text{ m/s}](10 \text{ m})}{1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 1.105 \times 10^7$$

Số này lớn hơn số Reynolds tới hạn. Dòng chảy bao gồm vùng chảy tầng và vùng rối, hệ số ma sát C_f được xác định là:

$$C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} - \frac{1742}{Re_L} = \frac{0.074}{(1.105 \times 10^7)^{1/5}} - \frac{1742}{1.105 \times 10^7} = 0.002730$$

Trong trường hợp tấm phẳng, lực cản do áp suất bằng 0, do đó tổng hợp lực cản tác dụng lên tấm là:

$$F_D = C_f A \frac{\rho V^2}{2} = 0.00273 \times (10 \times 4 \text{ m}^2) \frac{(1.269 \text{ kg/m}^3)(55/3.6 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = \mathbf{16.2 \text{ N}}$$

Khi vận tốc gió tăng gấp đôi lên 110 km/h, số Reynolds là:

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{[(110/3.6) \text{ m/s}](10 \text{ m})}{1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 2.211 \times 10^7$$

Hệ số ma sát và lực cản được xác định là:

$$C_f = \frac{0.074}{Re_L^{1/5}} - \frac{1742}{Re_L} = \frac{0.074}{(2.211 \times 10^7)^{1/5}} - \frac{1742}{2.211 \times 10^7} = 0.002435$$

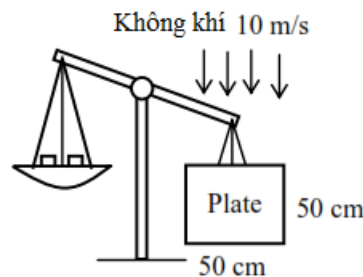
$$F_D = C_f A \frac{\rho V^2}{2} = 0.002435 \times (10 \times 4 \text{ m}^2) \frac{(1.269 \text{ kg/m}^3)(110/3.6 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = \mathbf{57.7 \text{ N}}$$

Việc coi dòng chảy bao bức tường bên của ngôi nhà như dòng chảy trên một tấm phẳng là không thực tế. Khi dòng chảy bao một vật thể thân dày như một ngôi nhà, phân tách dòng chảy sẽ xảy ra tại các cạnh góc do đó khu vực dòng chảy xoáy có thể tồn tại trên hầu hết các tường bên của ngôi nhà. Vì vậy, sử dụng xấp xỉ phương trình xỉ lớp biên phẳng là không thích hợp cho vấn đề này, toàn bộ ngôi nhà nên được xem xét.

Thảo luận: Lưu ý rằng lực cản thực tế có lẽ sẽ cao hơn nhiều vì bề mặt tường thường rất thô. Lực cản tăng gần bốn lần khi vận tốc tăng gấp đôi. Điều này là như mong đợi, bởi vì lực cản tỷ lệ với bình phương vận tốc và ảnh hưởng của vận tốc đến hệ số ma sát là nhỏ.

7.30

Vấn đề: Trọng lượng của một tấm phẳng mỏng tiếp xúc với luồng không khí ở cả hai bên được cân bằng bởi một đối trọng. Xác định khối lượng của đối trọng cần được thêm vào để cân bằng tấm.



Giả thiết: (1) Dòng chảy là ổn định và không nén được; (2) Số Reynolds tới hạn là $Re_{cr} = 5 \times 10^5$; (3) Không khí là khí lý tưởng; (4) Bề mặt tấm phẳng là trơn nhẵn

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của không khí ở 1 atm và 25 °C là $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$, $\nu = 1.562 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Phân tích: Số Reynolds là

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} = \frac{(10 \text{ m/s})(0.5 \text{ m})}{1.562 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 3.201 \times 10^5$$

Số này nhỏ hơn số Reynolds tới hạn. Dòng chảy là chảy tầng, hệ số ma sát C_f và lực cản được xác định như sau:

$$C_f = \frac{1.328}{Re_L^{0.5}} = \frac{1.328}{(3.201 \times 10^5)^{0.5}} = 0.002347$$

$$F_D = C_f A \frac{\rho V^2}{2} = (0.002347)[(2 \times 0.5 \times 0.5) \text{ m}^2] \frac{(1.184 \text{ kg/m}^3)(10 \text{ m/s})^2}{2} = 0.0695 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 0.0695 \text{ N}$$

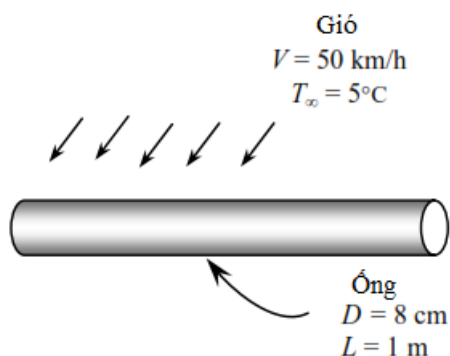
Khối lượng đối trọng cần được thêm vào là

$$m = \frac{F_D}{g} = \frac{0.0695 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2}{9.81 \text{ m/s}^2} = \mathbf{0.0071 \text{ kg} = 7.1 \text{ g}}$$

Dòng chảy bao ống hình trụ và quả cầu

7.34

Vấn đề: Một đường ống tiếp xúc với gió tốc độ cao. Xác định lực cản tác dụng lên ống bởi gió.



Giả thiết: (1) Bề mặt bên ngoài của đường ống là trơn nhẵn (có thể sử dụng các bảng tra để xác định hệ số cản); (2) Dòng chảy gió là ổn định và không nén được; (3) Hướng gió là vuông góc với đường ống.

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của không khí ở 1 atm và 5 °C là $\rho = 1.269 \text{ kg/m}^3$ và $\nu = 1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Phân tích: Lưu ý rằng $D = 0.08 \text{ m}$ và $1 \text{ m/s} = 3.6 \text{ km/h}$, số Reynolds cho dòng chảy bao đường ống là

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{(50 / 3.6 \text{ m/s})(0.08 \text{ m})}{1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} = 0.8040 \times 10^5$$

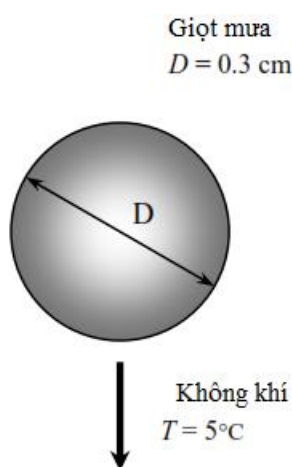
Hệ số cản tương ứng với giá trị này, từ Hình 7.17, $C_D = 1.0$. Ngoài ra, diện tích mặt trước của dòng chảy bao hình trụ là $A = LD$. Vậy lực cản là

$$F_D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = 1.0(1 \times 0.08 \text{ m}^2) \frac{(1.269 \text{ kg/m}^3)(50/3.6 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ N}}{1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2} \right) = \mathbf{9.79 \text{ N}} \text{ (per m length)}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng lực cản tác dụng lên một đơn vị chiều dài của đường ống tương đương với trọng lượng 1 kg khối lượng. Tổng lực cản tác dụng lên toàn bộ đường ống có thể thu được bằng cách nhân giá trị thu được với chiều dài đường ống. Cần lưu ý rằng chuyển động rối của gió có thể làm giảm hệ số cản do tạo ra lớp biên rối và làm chậm quá trình tách dòng.

7.36

Vấn đề: Hạt mưa đá rơi tự do trong khí quyển. Xác định vận tốc đầu cuối của hạt mưa đá.



Giả thiết: (1) Bề mặt của hạt mưa đá là trơn nhẵn để có thể được sử dụng các bảng tra cứu xác định hệ số cản; (2) Sự biến thiên tính chất của không khí trong khoảng độ cao xem xét là không đáng kể; (3) Lực đẩy nổi của không khí lên hạt mưa đá là không đáng kể kể bởi vì $\rho_{\text{không khí}} \ll \rho_{\text{hạt mưa đá}}$ (ngoài ra, sai số trong việc xác định mật độ hạt mưa đá còn có thể lớn hơn mật độ không khí); (4) Dòng chảy không khí bao quanh hạt mưa đá là ổn định và không nén được; (5) Khí quyển ở trạng thái tĩnh (không có gió).

Tính chất: Mật độ và độ nhớt động học của không khí ở 1 atm và 5 °C là $\rho = 1.269 \text{ kg/m}^3$ và $\nu = 1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Mật độ mưa đá được cho là 910 kg/m^3 .

Phân tích: Vận tốc cuối của vật rơi tự do trong chất lỏng đạt được khi lực kéo cân bằng với trọng lượng của vật trừ lực nổi bởi chất lỏng, mà trong trường hợp này là không đáng kể,

$$F_D = W - F_B \quad \text{where} \quad F_D = C_D A \frac{\rho_f V^2}{2}, \quad W = mg = \rho_s g V = \rho_s g (\pi D^3 / 6), \quad \text{and} \quad F_B \cong 0$$

Trong đó diện tích mặt trước là $A = \pi D^2 / 4$. Từ đó:

$$C_D A \frac{\rho_f V^2}{2} = W \rightarrow C_D \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho_f V^2}{2} = \rho_s g \frac{\pi D^3}{6} \rightarrow C_D \rho_f V^2 = \rho_s g \frac{4D}{3}$$

Giải cho V, ta nhận được:

$$V = \sqrt{\frac{4g\rho_s D}{3C_D \rho_f}} = \sqrt{\frac{4(9.81 \text{ m/s}^2)(910 \text{ kg/m}^3)(0.008 \text{ m})}{3C_D(1.269 \text{ kg/m}^3)}} \rightarrow V = \frac{8.662}{\sqrt{C_D}} \quad (1)$$

Lưu ý rằng, từ các bảng tra cứu, ta thấy hệ số lực cản C_D phụ thuộc vào số Re . Mặt khác Re lại phụ thuộc vào V theo phương trình dưới đây.

$$Re = \frac{VD}{\nu} = \frac{V(0.008 \text{ m})}{1.382 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \rightarrow Re = 578.9V \quad (2)$$

Để tìm V từ (1) ta có thể dùng phương pháp lặp theo các bước sau đây:

1. Giả thiết V
2. Xác định Re từ (2)
3. Xác định C_D theo Re bằng cách tra bảng
4. Xác định V theo (1)

Quá trình này sẽ lặp đi lặp lại cho đến khi V tính toán trùng với V giả thiết (trong khoảng sai số rất nhỏ cho trước). Bằng phương pháp này ta xác định được:

$V=13.7 \text{ m/s}$, tương ứng với $Re=7390$ và $C_D=0.4$.

Thảo luận: Phân tích đơn giản ở trên cho chúng ta một giá trị hợp lý cho vận tốc cuối của hạt mưa đá. Câu trả lời chính xác hơn có thể thu được bằng cách phân tích chi tiết hơn (và phức tạp hơn) bằng cách xem xét sự biến thiên tính chất của không khí theo độ cao và xem xét sự không chắc chắn của hệ số cản (một hạt mưa đá không nhất thiết phải hình cầu và trơn nhẵn).

7.37

Vấn đề: Một hạt bụi hình cầu lơ lửng trong không khí tại một điểm cố định là kết quả của một luồng không khí thổi theo chiều thẳng đứng. Xác định vận tốc luồng gió bằng định luật Stokes.

Giả thiết: (1) Số Reynolds nhỏ (có độ lớn cỡ 1) để định luật Stokes có thể áp dụng được (sẽ được xác minh); (2) Dòng gió là ổn định và không nén được; (3) Lực đẩy nổi của không khí lên hạt mưa đá là không đáng kể bởi vì $\rho_{\text{không khí}} \ll \rho_{\text{hạt mưa đá}}$ (ngoài ra, sai số trong việc xác định mật độ hạt mưa đá còn có thể lớn hơn mật độ không khí).

Tính chất: Mật độ của hạt bụi được cho là $\rho_s = 2.1 \text{ g/cm}^3 = 2100 \text{ kg/m}^3$. Mật độ và độ nhớt động của không khí ở 1 atm và 25 °C là $\rho_f = 1.184 \text{ kg/m}^3$ và $\mu = 1.849 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$.

Phân tích: Vận tốc cuối của một vật rơi tự do trong chất lỏng được thiết lập (hoặc vật đó đứng yên trong dòng chảy) khi lực cản cân bằng với trọng lượng của vật trừ đi lực đẩy nổi tác dụng bởi chất lỏng lên vật,

$$F_D = W - F_B$$

ở đây $F_D = 3\pi\mu VD$ (định luật Stokes), $W = \rho_s gV$, và $F_B = \rho_f gV$.

Với $V = \pi D^3/6$, thay vào ta có:

$$3\pi\mu VD = \rho_s gV - \rho_f gV \rightarrow 3\pi\mu VD = (\rho_s - \rho_f)g \frac{\pi D^3}{6}$$

Từ đó:

$$V = \frac{gD^2(\rho_s - \rho_f)}{18\mu} = \frac{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.0001 \text{ m})^2(2100 - 1.184) \text{ kg/m}^3}{18(1.849 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s})} = \mathbf{0.619 \text{ m/s}}$$

Số Reynolds cho trường hợp này là:

$$\text{Re} = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{(1.184 \text{ kg/m}^3)(0.619 \text{ m/s})(0.0001 \text{ m})}{1.849 \times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m/s}} = 4.0$$

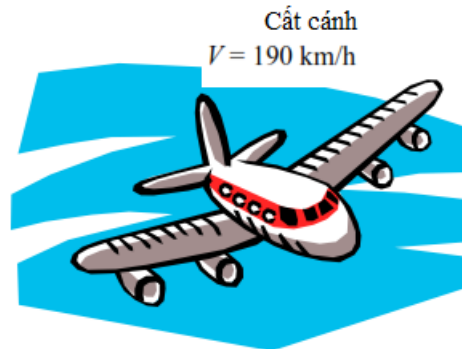
Như vậy số Reynolds là đủ nhỏ để có thể áp dụng định luật Stokes.

Thảo luận: Sự tách dòng có thể xuất hiện với Reynolds cỡ giá trị 10. Vì vậy việc sử dụng định luật Stokes khi số Reynolds lớn hơn 10 cần được xem xét cẩn thận.

Lực nâng

7.43

Vấn đề: Vận tốc cất cánh của một chiếc máy bay khi được nạp đầy đã được biết. Xác định tốc độ cất cánh khi trọng lượng của máy bay tăng 20% do quá tải.



Giả thiết: (1) Các điều kiện khí quyển (tính chất của không khí) vẫn giữ nguyên; (2) Các thiết lập cất cánh được duy trì như nhau trong hai trường hợp để hệ số nâng của máy bay vẫn giữ nguyên.

Phân tích: Máy bay sẽ bắt đầu cất cánh khi lực nâng cân bằng với tổng trọng lượng của máy bay. Vì thế,

$$W = F_L \rightarrow W = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A \rightarrow V = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_L A}}$$

Có thể nhận thấy rằng vận tốc cất cánh tỷ lệ thuận với căn bậc hai của trọng lượng của máy bay. Khi mật độ, hệ số nâng và diện tích cánh nâng không thay đổi, tỷ lệ vận tốc của máy bay quá tải và đầy tải sẽ là:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{2W_2 / \rho C_L A}}{\sqrt{2W_1 / \rho C_L A}} = \frac{\sqrt{W_2}}{\sqrt{W_1}} \rightarrow V_2 = V_1 \sqrt{\frac{W_2}{W_1}}$$

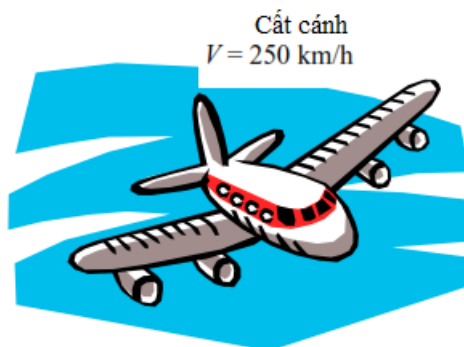
Từ đó vận tốc cất cánh quá tải sẽ là:

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{1.2W_1}{W_1}} = (190 \text{ km/h})\sqrt{1.2} = \mathbf{208 \text{ km/h}}$$

Thảo luận: Phân tích tương tự có thể thực hiện để xác định vận tốc cất cánh khi có sự thay đổi về mật độ không khí, hệ số lực nâng và diện tích mặt trước.

7.45

Vấn đề: Vận tốc cất cánh của một chiếc máy bay hành khách khi được nạp đầy đã được biết. Xác định tốc độ cất cánh khi máy bay có 100 chỗ trống.



Giả thiết: (1) Các điều kiện khí quyển (tính chất của không khí) vẫn giữ nguyên; (2) Các thiết lập cất cánh được duy trì như nhau trong hai trường hợp để hệ số nâng của máy bay vẫn giữ nguyên; (3) Khối lượng trung bình của một hành khách và hành lý là 140 kg.

Phân tích: Máy bay sẽ bắt đầu cất cánh khi lực nâng cân bằng với tổng trọng lượng của máy bay. Vì thế,

$$W = F_L \rightarrow W = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A \rightarrow V = \sqrt{\frac{2W}{\rho C_L A}}$$

Có thể nhận thấy rằng vận tốc cất cánh tỷ lệ thuận với căn bậc hai của trọng lượng của máy bay. Khi mật độ, hệ số nâng và diện tích nâng cánh không thay đổi, tỷ lệ vận tốc của máy bay dưới tải và đầy tải sẽ là:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\sqrt{2W_2 / \rho C_L A}}{\sqrt{2W_1 / \rho C_L A}} = \frac{\sqrt{W_2}}{\sqrt{W_1}} = \frac{\sqrt{m_2 g}}{\sqrt{m_1 g}} = \frac{\sqrt{m_2}}{\sqrt{m_1}} \rightarrow V_2 = V_1 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$$

ở đây

$$m_2 = m_1 - m_{\text{chứa sử dụng}} = 400000 - (140)(100) = 386000 \text{ kg}$$

Từ đó ta có:

$$V_2 = V_1 \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} = (250 \text{ km/h}) \sqrt{\frac{386,000}{400,000}} = \mathbf{246 \text{ km/h}}$$

Thảo luận: Ảnh hưởng của số ghế trống lên vận tốc cất cánh là không nhiều bởi vì trọng lượng của riêng máy bay thường lớn hơn nhiều trong lượng của hành khách và hành lý của họ.

Chương 8

Các thông số dòng hãm

8.3

Vấn đề: Trạng thái và vận tốc không khí được cho tại một điểm. Xác định nhiệt độ và áp suất dòng hãm.

Giả thiết : (1) Quá trình là đẳng entropy; (2) Không khí là chất khí lý tưởng.

Tính chất : Không khí có $c_p=1.005$ kJ/kg.K và $k=1.4$

Phân tích: Nhiệt độ dòng hãm được xác định từ công thức:

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} = 245.9 \text{ K} + \frac{(470 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 355.8 \text{ K} \cong \mathbf{356 \text{ K}}$$

Các thông số khác của dòng hãm được xác định trên cơ sở của giả thiết quá trình là đẳng entropy:

$$P_0 = P \left(\frac{T_0}{T} \right)^{k/(k-1)} = (44 \text{ kPa}) \left(\frac{355.8 \text{ K}}{245.9 \text{ K}} \right)^{1.4/(1.4-1)} = 160.3 \text{ kPa} \cong \mathbf{160 \text{ kPa}}$$

Thảo luận: Có thể thấy rằng các thông số dòng hãm có thể khác nhiều so với các thông số dòng chảy nhiệt động.

8.4

Vấn đề: Không khí chuyển động trong kênh có nhiệt độ 300 K. Xác định nhiệt độ ở đầu ống đo Pito với các vận tốc dòng chảy khác nhau.

Giả thiết : (1) Quá trình là đẳng entropy; (2) Không khí là chất khí lý tưởng.

Tính chất : Không khí có $c_p=1.005$ kJ/kg.K.

Phân tích: Không khí tại đầu ống Pito ở trạng thái dừng ứng với trạng thái dòng hãm. Nhiệt độ dòng hãm được xác định từ công thức:

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p}$$

Từ đó ta có:

$$(a) \quad T_0 = 300 \text{ K} + \frac{(1 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{300.0 \text{ K}}$$

$$(b) \quad T_0 = 300 \text{ K} + \frac{(10 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{300.1 \text{ K}}$$

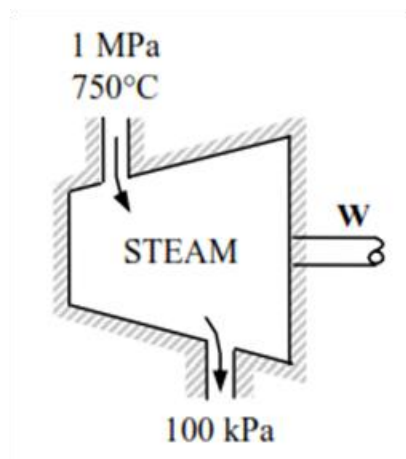
$$(c) \quad T_0 = 300 \text{ K} + \frac{(100 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{305.0 \text{ K}}$$

$$(d) \quad T_0 = 300 \text{ K} + \frac{(1000 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{797.5 \text{ K}}$$

Thảo luận: Có thể thấy rằng nhiệt độ dòng hãm có thể rất gần với nhiệt độ dòng chảy với vận tốc thấp và có thể lớn hơn rất nhiều nhiệt độ dòng chảy ở vận tốc lớn.

12.10 Hỗn hợp cháy nổ đi vào một tua bin khí với áp suất dòng hãm là 1.0 Mpa và nhiệt độ dòng hãm là 750°C, và nó được dẫn nổ đến áp suất bên ngoài là 100 kPa. Lấy $k=1.33$ và $R=0.287$ kJ/kg.K cho hỗn hợp cháy nổ và giả thiết quá trình dẫn nổ là đẳng entropy, xác định công năng ra của tua bin trên một đơn vị khối lượng dòng chảy.

8.6



Vấn đề: Nhiệt độ và áp suất dòng hãm cửa vào và áp suất cửa của dòng khí cháy nổ đi qua tua bin đã được cho. Xác định công năng của tua bin trên một đơn vị khối lượng dòng chảy.

Giả thiết : (1) Quá trình là đẳng entropy; (2) Chất khí cháy nổ là chất khí lý tưởng.

Tính chất: Tham số của khí cháy nổ là $c_p=1.157$ kJ/kg.K, $R=0.287$ kJ/kg.K và $k=1.33$.

Phân tích: Nhiệt độ dòng chảy ở cửa ra được xác định như sau:

$$T_{02} = T_{01} \left(\frac{P_{02}}{P_{01}} \right)^{(k-1)/k} = (1023.2 \text{ K}) \left(\frac{0.1}{1} \right)^{(1.33-1)/1.33} = 577.9 \text{ K}$$

Ta có

$$\begin{aligned} c_p = kc_v = k(c_p - R) &\longrightarrow c_p = \frac{kR}{k-1} \\ &= \frac{1.33(0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})}{1.33-1} \\ &= 1.157 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Áp dụng định luật bảo toàn enthalpy, ta có:

$$-w_{\text{out}} = (h_{20} - h_{01})$$

$$w_{\text{out}} = c_p (T_{01} - T_{02}) = (1.157 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1023.2 - 577.9) \text{ K} = 515.2 \text{ kJ/kg} \cong \mathbf{515 \text{ kJ/kg}}$$

8.7

Vấn đề: Nhiệt độ và áp suất dòng hãm và vận tốc của dòng không khí đi qua thiết bị đã được cho. Xác định nhiệt độ và áp suất tại chỗ của dòng khí.

Giả thiết : (1) Quá trình là đẳng entropy; (2) Không khí là chất khí lý tưởng.

Tính chất: Tham số của không khí ở nhiệt độ dự đoán 600 K là $c_p=1.051$ kJ/kg.K và $k=1.376$.

Phân tích: Nhiệt độ và áp suất tại điểm có vận tốc 750 m/s được xác định như sau:

$$T = T_0 - \frac{V^2}{2c_p} = 673.2 - \frac{(570 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.051 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2} \right) = \mathbf{518.6 \text{ K}}$$

$$P_2 = P_{02} \left(\frac{T_2}{T_{02}} \right)^{k/(k-1)} = (0.6 \text{ MPa}) \left(\frac{518.6 \text{ K}}{673.2 \text{ K}} \right)^{1.376/(1.376-1)} = \mathbf{0.23 \text{ MPa}}$$

Vận tốc âm và số Mach

8.15

Vấn đề: Số Mach và của máy bay và vận tốc âm thanh của không khí cần xác định cho hai trường hợp nhiệt độ không khí cho trước.

Giả thiết: Không khí là chất khí lý tưởng và có các hệ số nhiệt dung là hằng số.

Tính chất: Hằng số khí của không khí là $R=0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ và hệ số khí là $k=1.4$.

Phân tích: Từ định nghĩa vận tốc âm thanh và số Mach, ta có:

(a) ở 300 K

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{(1.4)(0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(300 \text{ K}) \left(\frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}} \right)} = \mathbf{347 \text{ m/s}}$$

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{240 \text{ m/s}}{347 \text{ m/s}} = \mathbf{0.692}$$

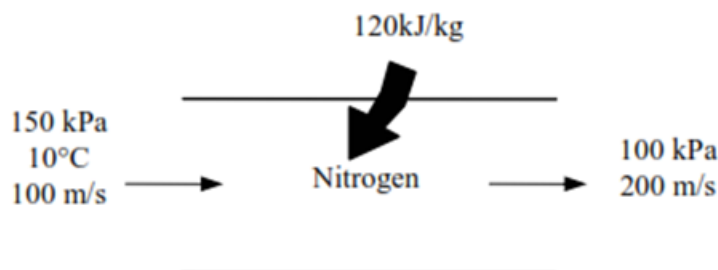
(b) ở 1000 K

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{(1.4)(0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(1000 \text{ K}) \left(\frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}} \right)} = \mathbf{634 \text{ m/s}}$$

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{240 \text{ m/s}}{634 \text{ m/s}} = \mathbf{0.379}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng số Mach là hằng số không có nghĩa là tốc độ không đổi. Ví dụ, số Mach của tên lửa sẽ tăng lên thậm chí khi vận tốc giảm (vì trên cao không khí loãng hơn nên vận tốc âm thanh giảm). Ngoài ra, hệ số khí có thể thay đổi, kết quả chính xác hơn nếu lấy k ở nhiệt độ 1000 K là 1.386 thay vì 1.4. Khi đó ta có $V=619 \text{ m/s}$ và $Ma=0.388$.

8.17



Vấn đề: Khí ni tơ đi qua một thiết bị trao đổi nhiệt. Nhiệt độ, áp suất và vận tốc tại cửa vào và áp suất và vận tốc tại cửa ra đã được cho. Xác định số Mach tại cửa vào và cửa ra của thiết bị.

Giả thiết: N_2 là chất khí lý tưởng; (2) Dòng chảy là dừng; (3) bỏ qua thế năng.

Tính chất: Hằng số khí của N₂ là R=0.2968 kJ/kg.K, c_p=1.040 kJ/kg.K và hệ số khí là k=1.4.

Phân tích: Ta có

$$c_1 = \sqrt{k_1 R T_1} = \sqrt{(1.400)(0.2968 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(283 \text{ K}) \left(\frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}} \right)} = 342.9 \text{ m/s}$$

$$\text{Ma}_1 = \frac{V_1}{c_1} = \frac{100 \text{ m/s}}{342.9 \text{ m/s}} = \mathbf{0.292}$$

Từ pt năng lượng, ta nhận được

$$q_{\text{in}} = c_p(T_2 - T_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}$$

$$120 \text{ kJ/kg} = (1.040 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(T_2 - 10^\circ\text{C}) + \frac{(200 \text{ m/s})^2 - (100 \text{ m/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2} \right)$$

Do đó

$$T_2 = 111^\circ\text{C} = 384 \text{ K}$$

$$c_2 = \sqrt{k_2 R T_2} = \sqrt{(1.4)(0.2968 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(384 \text{ K}) \left(\frac{1000 \text{ m}^2 / \text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}} \right)} = 399 \text{ m/s}$$

us,

$$\text{Ma}_2 = \frac{V_2}{c_2} = \frac{200 \text{ m/s}}{399 \text{ m/s}} = \mathbf{0.501}$$

Thảo luận: Lưu ý rằng hệ số khí thay đổi theo nhiệt độ, kết quả chính xác hơn có thể nhận được:

$$\text{At } 10^\circ\text{C} : c_p = 1.038 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, k = 1.400 \rightarrow c_1 = 343 \text{ m/s}, \quad V_1 = 100 \text{ m/s}, \quad \text{Ma}_1 = 0.292$$

$$\text{At } 111^\circ\text{C} \quad c_p = 1.041 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, k = 1.399 \rightarrow c_2 = 399 \text{ m/s}, \quad V_2 = 200 \text{ m/s}, \quad \text{Ma}_2 = 0.501$$

Tuy nhiên trong trường hợp này sai số là không đáng kể.

8.19

Vấn đề: Trạng thái đầu vào và áp suất đầu ra của không khí được biết trong quá trình dẫn nở đẳng entropy. Xác định tỷ số vận tốc âm thanh ở trạng thái ban đầu và cuối.

Giả thiết : Không khí là chất khí lý tưởng có các hệ số nhiệt riêng là hằng số.

Tính chất: Hằng số khí của không khí là R=0.287 kJ/kg.K, hệ số khí là k=1.4.

Phân tích: Nhiệt độ ở trạng thái cuối được xác định từ công thức:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(k-1)/k} = (333.2 \text{ K}) \left(\frac{0.4 \text{ MPa}}{1.5 \text{ MPa}} \right)^{(1.4-1)/1.4} = 228.4 \text{ K}$$

Với k là hằng số, ta nhận được tỷ số giữa các vận tốc âm thanh là:

$$\text{Ratio} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{\sqrt{k_1 R T_1}}{\sqrt{k_2 R T_2}} = \frac{\sqrt{T_1}}{\sqrt{T_2}} = \frac{\sqrt{333.2}}{\sqrt{228.4}} = \mathbf{1.21}$$

Dòng chảy một chiều đẳng entropy

8.27

Vấn đề: Không khí vào trong ống phun thu hẹp-mở rộng ở điều kiện cho trước. Xác định áp suất thấp nhất có thể đạt được tại cổ ống.

Giả thiết: (1) Không khí là chất khí lý tưởng có các hệ số nhiệt riêng là hằng số; (2) dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Hệ số khí của không khí là $k=1.4$.

Phân tích: Áp suất thấp nhất đạt được ở cổ ống là áp suất tới hạn P^* , được xác định bởi:

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} = (1.2 \text{ MPa}) \left(\frac{2}{1.4+1} \right)^{1.4/(1.4-1)} = \mathbf{0.634 \text{ MPa}}$$

Thảo luận: Áp suất nhỏ nhất đạt được tại cổ ống khí dòng khí thoát ra là trên âm.

8.28

Vấn đề: Khí Hê li vào trong ống phun thu hẹp-mở rộng ở điều kiện cho trước. Xác định nhiệt độ và áp suất thấp nhất có thể đạt được tại cổ ống.

Giả thiết: (1) Hê li là chất khí lý tưởng có các hệ số nhiệt riêng là hằng số; (2) dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Hệ số khí của Hê li là $k=1.4$, $c_p=5.1926 \text{ kJ/kg.K}$.

Phân tích: Nhiệt độ và áp suất thấp nhất đạt được ở cổ ống là nhiệt độ tới hạn T^* và áp suất tới hạn P^* . Trước tiên chúng ta cần xác định nhiệt độ và áp suất dòng hãm P_0 , T_0 :

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} = 800 \text{ K} + \frac{(100 \text{ m/s})^2}{2 \times 5.1926 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 801 \text{ K}$$

$$P_0 = P \left(\frac{T_0}{T} \right)^{k/(k-1)} = (0.7 \text{ MPa}) \left(\frac{801 \text{ K}}{800 \text{ K}} \right)^{1.667/(1.667-1)} = \mathbf{0.702 \text{ MPa}}$$

Vậy

$$T^* = T_0 \left(\frac{2}{k+1} \right) = (801 \text{ K}) \left(\frac{2}{1.667+1} \right) = \mathbf{601 \text{ K}}$$

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} = (0.702 \text{ MPa}) \left(\frac{2}{1.667+1} \right)^{1.667/(1.667-1)} = \mathbf{0.342 \text{ MPa}}$$

8.29

Vấn đề: Xác định nhiệt độ, áp suất và mật độ của không khí và Hê li ở điều kiện cho trước.

Giả thiết: Hê li và không khí là chất khí lý tưởng có các hệ số nhiệt riêng là hằng số.

Tính chất: Các tính chất của không khí là $R=0.287 \text{ kJ/kg.K}$, $k=1.4$ và $c_p=1.005 \text{ kJ/kg.K}$ và của Hê li là $R=2.0769 \text{ kJ/kg.K}$, $k=1.4$, và $c_p=5.1926 \text{ kJ/kg.K}$.

Phân tích: (a) Trước khi tính nhiệt độ, áp suất và mật độ tới hạn T^* , P^* , ρ^* . chúng ta cần xác định nhiệt độ, áp suất và mật độ dòng hãm P_0 , T_0 , ρ_0 :

$$T_0 = 100^\circ\text{C} + \frac{V^2}{2c_p} = 100 + \frac{(250 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 131.1^\circ\text{C}$$

$$P_0 = P \left(\frac{T_0}{T} \right)^{k/(k-1)} = (200 \text{ kPa}) \left(\frac{404.3 \text{ K}}{373.2 \text{ K}} \right)^{1.4/(1.4-1)} = 264.7 \text{ kPa}$$

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} = \frac{264.7 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(404.3 \text{ K})} = 2.281 \text{ kg/m}^3$$

Vậy

$$T^* = T_0 \left(\frac{2}{k+1} \right) = (404.3 \text{ K}) \left(\frac{2}{1.4+1} \right) = \mathbf{337 \text{ K}}$$

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} = (264.7 \text{ kPa}) \left(\frac{2}{1.4+1} \right)^{1.4/(1.4-1)} = \mathbf{140 \text{ kPa}}$$

$$\rho^* = \rho_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} = (2.281 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{2}{1.4+1} \right)^{1/(1.4-1)} = \mathbf{1.45 \text{ kg/m}^3}$$

(b) Đối với Hê li:

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} = 40 + \frac{(300 \text{ m/s})^2}{2 \times 5.1926 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = 48.7^\circ\text{C}$$

$$P_0 = P \left(\frac{T_0}{T} \right)^{k/(k-1)} = (200 \text{ kPa}) \left(\frac{321.9 \text{ K}}{313.2 \text{ K}} \right)^{1.667/(1.667-1)} = 214.2 \text{ kPa}$$

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} = \frac{214.2 \text{ kPa}}{(2.0769 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(321.9 \text{ K})} = 0.320 \text{ kg/m}^3$$

Vậy

$$T^* = T_0 \left(\frac{2}{k+1} \right) = (321.9 \text{ K}) \left(\frac{2}{1.667+1} \right) = \mathbf{241 \text{ K}}$$

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} = (200 \text{ kPa}) \left(\frac{2}{1.667+1} \right)^{1.667/(1.667-1)} = \mathbf{97.4 \text{ kPa}}$$

$$\rho^* = \rho_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{1/(k-1)} = (0.320 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{2}{1.667+1} \right)^{1/(1.667-1)} = \mathbf{0.208 \text{ kg/m}^3}$$

Thảo luận: Đây là các giá trị nhiệt độ, áp suất, mật độ của chất khí tại cổ ống phun khi mà chất khí ra khỏi cổ ống với tốc độ trên âm.

8.31

Vấn đề: Không khí chuyển động trong đường ống. Trạng thái của không khí và số Mach được cho. Xác định vận tốc, nhiệt độ, áp suất dòng hãm và mật độ của không khí.

Giả thiết: Không khí là chất khí lý tưởng có các hệ số nhiệt riêng là hằng số.

Tính chất: Hệ số khí của không khí là $k=1.4$ và $R=0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$.

Phân tích: Vận tốc âm thanh của không khí trong điều kiện đã cho là:

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{(1.4)(0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(373.2 \text{ K}) \left(\frac{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}} \right)} = 387.2 \text{ m/s}$$

Vì vậy

$$V = Ma \times c = (0.8)(387.2 \text{ m/s}) = \mathbf{310 \text{ m/s}}$$

Ta cũng có

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{200 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K})(373.2 \text{ K})} = 1.867 \text{ kg/m}^3$$

Các đặc trưng dòng hãm được xác định từ:

$$T_0 = T \left(1 + \frac{(k-1)Ma^2}{2} \right) = (373.2 \text{ K}) \left(1 + \frac{(1.4-1)(0.8)^2}{2} \right) = \mathbf{421 \text{ K}}$$

$$P_0 = P \left(\frac{T_0}{T} \right)^{k/(k-1)} = (200 \text{ kPa}) \left(\frac{421.0 \text{ K}}{373.2 \text{ K}} \right)^{1.4/(1.4-1)} = \mathbf{305 \text{ kPa}}$$

$$\rho_0 = \rho \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/(k-1)} = (1.867 \text{ kg/m}^3) \left(\frac{421.0 \text{ K}}{373.2 \text{ K}} \right)^{1/(1.4-1)} = \mathbf{2.52 \text{ kg/m}^3}$$

8.32

Vấn đề: Máy bay được thiết kế để bay với số Mach, cao độ và nhiệt độ khí quyển cho trước. Xác định nhiệt độ cạnh phía trước của cánh máy bay.

Giả thiết: Không khí là chất khí lý tưởng có các hệ số nhiệt riêng là hằng số.

Tính chất: Hệ số khí của không khí là $k=1.4$, $c_p=1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ và $R=0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K}$.

Phân tích: Vận tốc âm thanh của không khí trong điều kiện đã cho là:

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{(1.4)(0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(236.15 \text{ K}) \left(\frac{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}} \right)} = 308.0 \text{ m/s}$$

$$V = Ma \times c = (1.4)(308.0 \text{ m/s}) = 431.2 \text{ m/s}$$

$$T_0 = T + \frac{V^2}{2c_p} = 236.15 + \frac{(431.2 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2} \right) = \mathbf{329 \text{ K}}$$

Thảo luận: Nhiệt độ cạnh cánh phía trước tăng lên do động năng được chuyển đổi thành enthalpy.

Dòng chảy đẳng entropy qua ống phun

8.41

Vấn đề: Cần giải thích tại sao lưu lượng cực đại trên một đơn vị diện tích chỉ phụ thuộc vào $P_0/\sqrt{T_0}$. Đối với một chất khí, xác định hằng số a sao cho $\frac{\dot{m}}{A^*} = aP_0/\sqrt{T_0}$.

Tính chất: Chất khí xem xét có các tính chất $R=0.287$ kPa.m³/kg.K và $k=1.4$.

Phân tích: Lưu lượng khối lượng cực đại được xác định bởi:

$$\dot{m}_{\max} = A^* P_0 \sqrt{k/R T_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/2(k-1)} \quad \text{or} \quad \dot{m}_{\max} / A^* = (P_0 / \sqrt{T_0}) \sqrt{k/R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/2(k-1)}$$

Vậy lưu lượng cực đại trên một đơn vị diện tích chỉ phụ thuộc vào $P_0/\sqrt{T_0}$. Hằng số a được xác định bởi :

$$a = \sqrt{k/R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/2(k-1)} = \sqrt{\frac{1.4}{(0.287 \text{ kJ/kg.K}) \left(\frac{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}}\right)}} \left(\frac{2}{1.4+1}\right)^{2.4/0.8} = 0.0404 \text{ (m/s)}\sqrt{\text{K}}$$

8.42

Vấn đề: Đối với một chất khí lý tưởng, xác định tỷ số vận tốc âm của dòng tới hạn và vận tốc âm của dòng hãm.

Phân tích: Đối với chất khí lý tưởng, vận tốc âm được xác định bởi $a=\sqrt{kRT}$, do đó:

$$\frac{c^*}{c_0} = \frac{\sqrt{kRT^*}}{\sqrt{kRT_0}} = \left(\frac{T^*}{T_0}\right)^{1/2} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{1/2}$$

8.43

Vấn đề: Không khí đi vào ống phun với nhiệt độ, áp suất và vận tốc cho trước. Xác định áp suất, nhiệt độ, và tỷ số diện tích cửa ra và cửa vào cho trường hợp $Ma=1$ tại cửa ra.

Giả thiết : (1) Không khí là chất khí lý tưởng với các nhiệt dung là hằng số; (2) dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Không khí có các tính chất $k=1.4$, $c_p=1.005$ kJ/kg.K.

Phân tích: Trước tiên chúng ta xác định các đặc trưng dòng hãm:

$$T_0 = T_i + \frac{V_i^2}{2c_p} = 350 \text{ K} + \frac{(150 \text{ m/s})^2}{2 \times 1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}} \left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}\right) = 361.2 \text{ K}$$

and

$$P_0 = P_i \left(\frac{T_0}{T_i}\right)^{k/(k-1)} = (0.2 \text{ MPa}) \left(\frac{361.2 \text{ K}}{350 \text{ K}}\right)^{1.4/(1.4-1)} = 0.223 \text{ MPa}$$

Từ Bảng (8.1)

$$T = 0.8333T_0 = 0.8333(361.2 \text{ K}) = \mathbf{301 \text{ K}}$$

$$P = 0.5283P_0 = 0.5283(0.223 \text{ MPa}) = \mathbf{0.118 \text{ MPa}}$$

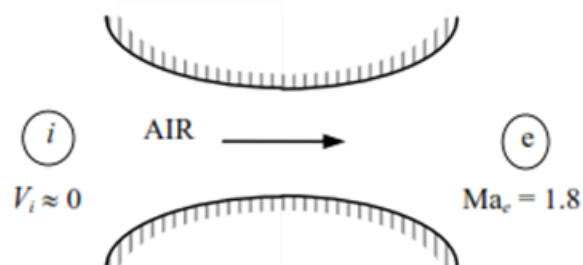
Mặt khác

$$\text{Ma}_i = \frac{V_i}{c_i} = \frac{150 \text{ m/s}}{375 \text{ m/s}} = \mathbf{0.40}$$

Sử dụng công thức (8.32), ta nhận được:

$$\frac{A^*}{A_i} = \frac{1}{1.5901} = \mathbf{0.629}$$

8.45



Vấn đề: Không khí đi vào ống phun thu hẹp - mở rộng với áp suất cho trước. Xác định áp suất bên ngoài với số Mach đã biết tại cửa ra.

Giả thiết: (1) Không khí là chất khí lý tưởng với các nhiệt dung là hằng số; (2) dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Không khí có $k=1.4$.

Phân tích: Vì vận tốc ở cửa vào là không đáng kể nên áp suất dòng hãm bằng với áp suất cửa vào. Dòng chảy là đẳng entropy nên áp suất dòng hãm là không thay đổi,

$$P_0 = P_i = 0.8 \text{ MPa}$$

Ta có $Ma=1.8$ vì vậy từ công thức (8.19):

$$P_e/P_0 = 0.1740.$$

Từ đó:

$$P = 0.1740P_0 = 0.1740(0.8 \text{ MPa}) = \mathbf{0.139 \text{ MPa}}$$

8.46

Vấn đề: Khí ni tơ đi vào ống phun thu hẹp - mở rộng với áp suất và nhiệt độ cho trước. Xác định vận tốc, áp suất, nhiệt độ và mật độ tới hạn.

Giả thiết: (1) Ni tơ là chất khí lý tưởng với các nhiệt dung là hằng số; (2) dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Ni tơ có $k=1.4$, $R=0.2968 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$.

Phân tích: Vì vận tốc ở cửa vào là không đáng kể nên các tính chất dòng hãm bằng với các tính chất tại cửa vào. Dòng chảy là đẳng entropy nên áp suất dòng hãm là không thay đổi,

$$P_0 = P_i = 700 \text{ kPa}$$

$$T_0 = T_i = 400 \text{ K}$$

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} = \frac{700 \text{ kPa}}{(0.2968 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K})(400 \text{ K})} = 5.896 \text{ kg/m}^3$$

Từ đó ta nhận được các tính chất của dòng tới hạn:

$$T^* = 0.8333T_0 = 0.8333(400 \text{ K}) = \mathbf{333 \text{ K}}$$

$$P^* = 0.5283P_0 = 0.5283(700 \text{ kPa}) = \mathbf{370 \text{ MPa}}$$

$$\rho^* = 0.6339\rho_0 = 0.6339(5.896 \text{ kg/m}^3) = \mathbf{3.74 \text{ kg/m}^3}$$

$$V^* = c^* = \sqrt{kRT^*} = \sqrt{(1.4)(0.2968 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K})(333 \text{ K})\left(\frac{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}}\right)} = \mathbf{372 \text{ m/s}}$$

8.47

Vấn đề: Khí lý tưởng chảy trong ống phun. Diện tích tại mặt cắt có $Ma=2.4$ đã biết. Xác định diện tích tại mặt cắt có $Ma=1.2$.

Giả thiết: Dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Hệ số khí là $k=1.4$.

Phân tích: Sử dụng công thức A/A^* (8.32) ta có:

$$Ma_1 = 2.4 : \frac{A_1}{A^*} = 2.4031 \longrightarrow A^* = \frac{A_1}{2.4031} = \frac{25 \text{ cm}^2}{2.4031} = 10.40 \text{ cm}^2$$

$$Ma_2 = 1.2 : \frac{A_2}{A^*} = 1.0304 \longrightarrow A_2 = (1.0304)A^* = (1.0304)(10.40 \text{ cm}^2) = \mathbf{10.7 \text{ cm}^2}$$

8.48

Vấn đề: Không khí đi vào ống phun thu hẹp với nhiệt độ, áp suất cho trước và vận tốc không đáng kể. Xác định áp suất, vận tốc và lưu lượng khối lượng theo áp suất bên ngoài trong khoảng cho trước.

Giả thiết: (1) Không khí là chất khí lý tưởng với các nhiệt dung là không đổi; (2) Dòng chảy là dừng, một chiều và đẳng entropy.

Tính chất: Hệ số khí là $k=1.4$, $R=0.287 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ và $c_p=1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$.

Phân tích: Trong trường hợp vận tốc cửa vào là không đáng kể, các đặc trưng dòng hầm là trùng với các đặc trưng dòng tại cửa vào:

$$P_0 = P_i = 900 \text{ kPa}$$

$$T_0 = T_i = 400 \text{ K}$$

Áp suất tới hạn được xác định như sau:

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{k+1} \right)^{k/(k-1)} = (900 \text{ kPa}) \left(\frac{2}{1.4+1} \right)^{1.4/0.4} = 475.5 \text{ kPa}$$

Ta xem xét 2 trường hợp:

$$P_e = P_b \quad \text{for} \quad P_b \geq 475.5 \text{ kPa}$$

$$P_e = P^* = 475.5 \text{ kPa} \quad \text{for} \quad P_b < 475.5 \text{ kPa} \text{ (choked flow)}$$

Áp suất bên ngoài sẽ không ảnh hưởng đến dòng chảy khi $100 < P_b < 475.5 \text{ kPa}$. Đối với áp suất P_e xác định, nhiệt độ, vận tốc và lưu lượng khối lượng được xác định như sau:

$$T_e = T_0 \left(\frac{P_e}{P_0} \right)^{(k-1)/k} = (400 \text{ K}) \left(\frac{P_e}{900} \right)^{0.4/1.4}$$

$$V = \sqrt{2c_p(T_0 - T_e)} = \sqrt{2(1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(400 - T_e) \left(\frac{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}{1 \text{ kJ/kg}} \right)}$$

$$\rho_e = \frac{P_e}{RT_e} = \frac{P_e}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3 / \text{kg} \cdot \text{K})T_e}$$

$$\dot{m} = \rho_e V_e A_e = \rho_e V_e (0.001 \text{ m}^2)$$

Vậy ta có các đặc trưng dòng chảy theo áp suất bên ngoài như sau:

P_b , kPa	P_e , kPa	T_e , K	V_e , m/s	ρ_e , kg/m ³	\dot{m} kg/s
900	900	400	0	7.840	0
800	800	386.8	162.9	7.206	1.174
700	700	372.3	236.0	6.551	1.546
600	600	356.2	296.7	5.869	1.741
500	500	338.2	352.4	5.151	1.815
475.5	475.5	333.3	366.2	4.971	1.820
400	475.5	333.3	366.2	4.971	1.820
300	475.5	333.3	366.2	4.971	1.820
200	475.5	333.3	366.2	4.971	1.820
100	475.5	333.3	366.2	4.971	1.820

Hay trên đồ thị:

