

Замалеев З.Х. Посохин В.Н. Чефанов В.М.

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ

Б
А
К
А
Л
А
В
Р

Издательство АСВ

З.Х. Замалеев, В.Н. Посохин, В.М. Чефанов

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ

Под общей редакцией профессора В.Н. Посохина

Рекомендуется Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский государственный строительный университет» в качестве учебника для студентов ВПО, обучающихся по программе бакалавриата по направлению 270800 «Строительство»



Издательство АСВ
Москва
2014

УДК 532.5 (075.8)
ББК 30.123я73
Ш90

Рецензенты:

профессор, кандидат технических наук кафедры «Теплотехника и теплогазоснабжение» Московского государственного строительного университета *А.О. Мирам*; доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и энергетического машиностроения Национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева *А.В. Шукин*.

Замалеев З.Х., Посохин В.Н., Чефанов В.М.

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ: Учебное издание / Под общей ред. проф. В.Н. Посохина. – М.: Издательство АСВ, 2014. – 424 с.

ISBN 978-5-4323-0021-8

Содержит дидактический материал, отвечающий требованиям федерального государственного образовательного стандарта профессионального образования по направлению подготовки 270800 «Строительство» в области базовой (общепрофессиональной) части профессионального цикла, необходимый бакалаврам для освоения основных положений термодинамики, механики жидкости, тепло-массообмена.

Регистрационный № рецензии 2424 от 21.06.2013 г.

ISBN 978-5-4323-0021-8

© Издательский дом АСВ, 2014
© Замалеев З.Х., Посохин В.Н.,
Чефанов В.М., 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
Краткий исторический очерк развития теплотехники и гидравлики.....	8
ЧАСТЬ I. ГИДРАВЛИКА	13
Глава 1. ПРЕДМЕТ ГИДРАВЛИКИ	14
Глава 2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ	17
2.1. Жидкости и газы. Гипотеза сплошности	17
2.2. Физические характеристики и свойства жидкости.....	20
2.3. Основные положения молекулярно-кинетической теории газов	27
2.4. Самодиффузия.....	29
2.5. Перенос импульса – вязкость.....	30
2.6. Перенос теплоты – теплопроводность	36
2.7. Вспомогательные физические характеристики.....	38
2.8. Модели жидкости.....	42
2.9. Модели течения.....	43
2.10. Использование буквенных индексов.....	43
Глава 3. ГИДРОСТАТИКА	49
3.1. Силы, действующие в жидкости	49
3.2. Свойство гидростатического давления. Основной закон гидростатики	51
3.3. Закон Архимеда.....	57
Глава 4. ОСНОВЫ ДИНАМИКИ	59
4.1. Некоторые понятия	59
4.2. Уравнение неразрывности.....	63
4.3. Уравнение количества движения.....	69
4.4. Теорема Коши-Гельмгольца.....	73
4.5. Уравнение Навье-Стокса	76
4.6. Уравнение моментов количества движения	79
4.7. Уравнение энергии.....	79
4.8. Режимы течения жидкости.....	81
4.9. Турбулентные течения.....	85
4.10. Общие принципы применения численных методов при решении задач гидравлики.....	94
4.11. Схема применения численных методов	101
4.12. Физическое моделирование гидродинамических явлений	105
Глава 5. УРАВНЕНИЯ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕН- ТАРНОЙ СТРУЙКИ И ОДНОМЕРНОГО ПОТОКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ	114
5.1. Уравнение неразрывности.....	114
5.2. Уравнение количества движения.....	117
5.3. Уравнение момента количества движения	120
5.4. Уравнение энергии.....	122
5.5. Гидравлические потери	127
5.6. Подобие течений вязкой жидкости в трубах	145

Глава 6. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРАВЛИКИ	148
6.1. Ламинарное течение в круглых трубах	148
6.2. Коэффициент местных потерь при внезапном расширении канала	154
6.3. Истечение жидкости из отверстий и насадков при постоянном напоре	157
6.4. Опорожнение сосуда.....	168
6.5. Гидравлический расчет трубопроводов	169
6.6. Равномерное движение жидкости в открытых руслах	191
6.7. Гидравлический удар в трубопроводах.....	196
6.8. Приближенные расчеты течения газа в трубопроводах	197
Глава 7. СТРУЙНЫЕ ТЕЧЕНИЯ	206
7.1. Основные понятия.....	206
7.2. Свободные струи	209
7.3. Полуограниченные струи	216
7.4. Стесненные струи.....	218
Глава 8. ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ТЕЧЕНИЯ ИДЕАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ	221
8.1. Общие сведения. Постановка задачи анализа течений.....	221
8.2. Течения вблизи точечных и линейных стоков	225
8.3. Течения вблизи реальных стоков	230

ЧАСТЬ II. ТЕПЛОТЕХНИКА ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА..237

Глава 9. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ	238
9.1. Термодинамическая система.....	238
9.2. Термодинамические параметры состояния	238
9.3. Уравнение состояния идеального газа	240
9.4. Смеси идеальных газов.....	243
9.5. Уравнение состояния для реальных газов и паров	245
9.6. Термодинамический процесс	246
9.7. Термодинамическое равновесие	247
9.8. Теплоемкость идеального газа.....	247
Глава 10. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ	250
10.1. Теплота и работа.....	250
10.2. Внутренняя энергия	251
10.3. Уравнение первого закона термодинамики	252
10.4. Энтальпия.....	253
10.5. Первый закон термодинамики в применении к движущейся среде	254
Глава 11. ОСНОВНЫЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ	256
11.1. Изохорный процесс	256
11.2. Изобарный процесс	257
11.3. Изотермический процесс.....	258
11.4. Адиабатный процесс	258
11.5. Политропные процессы	260

Глава 12. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ	262
12.1. Основные положения второго закона термодинамики.....	262
12.2. Круговые процессы, или циклы.....	263
12.3. Циклы Карно. Теорема Карно.....	264
12.4. Энтропия.....	266
Глава 13. ВОДЯНОЙ ПАР.....	268
13.1. Процесс парообразования. Основные понятия и определения.....	268
13.2. Определение термодинамических свойств водяного пара.....	270
13.3. Термодинамические диаграммы водяного пара.....	271
Глава 14. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ.....	274
14.1. Основные свойства влажного воздуха.....	274
14.2. <i>I-d</i> -диаграмма влажного воздуха.....	277
Глава 15. ЦИКЛЫ ТЕПЛОСИЛОВЫХ УСТАНОВОК	280
15.1. Циклы двигателей внутреннего сгорания.....	280
15.2. Циклы газотурбинных установок.....	283
15.3. Компрессоры.....	286
15.4. Циклы холодильных установок.....	290
15.5. Цикл работы теплового насоса.....	295
15.6. Теплосиловые паровые циклы. Цикл Ренкина.....	296
15.7. Бинарные циклы.....	301
15.8. Теплофикационный цикл.....	303
Часть III. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ТЕПЛОМАССОБМЕНА	306
Глава 16. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ.....	306
Глава 17. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ.....	308
17.1. Температурное поле.....	308
17.2. Градиент температуры.....	309
17.3. Закон Фурье. Плотность теплового потока.....	309
17.4. Теплопроводность.....	310
17.5. Дифференциальное уравнение теплопроводности.....	311
17.6. Условия однозначности.....	313
Глава 18. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ РЕ-	
ЖИМЕ.....	315
18.1. Распределение температуры в однослойной плоской стенке.....	315
18.2. Распределение температуры в многослойной плоской стенке.....	316
18.3. Распределение температуры в однослойной цилиндрической стенке.....	317
18.4. Распределение температуры в многослойной	
цилиндрической стенке.....	319
18.5. Распределение температуры в сферической стенке.....	320
Глава 19. КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН	322
19.1. Основные понятия.....	322
19.2. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена.....	324
19.3. Подобие процессов конвективного теплообмена.....	325
19.4. Обработка и обобщение результатов опыта.....	330
19.5. Теплоотдача при свободном движении жидкости.....	332
19.6. Конвективные струи.....	336

19.7. Теплоотдача при вынужденном продольном омывании плоской поверхности	343
19.8. Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в горизонтальных трубах.....	346
19.9. Теплоотдача в изогнутых трубах (змеевиках).....	351
19.10. Теплоотдача при движении жидкости в шероховатых трубах	352
19.11. Теплоотдача в трубах некруглого поперечного сечения.....	352
19.12. Теплоотдача при вынужденном поперечном омывании одиночных труб и трубных пучков	353
Глава 20. ТЕПЛООБМЕН ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	357
20.1. Общие сведения о тепловом излучении.....	357
20.2. Законы теплового излучения. Закон Планка	360
20.3. Теплообмен в системе тел с плоскопараллельными поверхностями	364
Глава 21. ТЕПЛОПЕРЕДАЧА	367
21.1. Сложный теплообмен	367
21.2. Теплопередача через плоскую однослойную и многослойную стенки.....	368
21.3. Теплопередача через цилиндрическую однослойную и многослойную стенки	371
21.4. Критический диаметр цилиндрической стенки	375
21.5. Теплопередача через шаровую стенку	377
21.6. Теплопередача через ребристую стенку	378
21.7. Теплообменные аппараты	380
21.8. Пути интенсификации теплопередачи	388
Глава 22. ТЕПЛООБМЕН ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ	391
22.1. Теплообмен при кипении жидкости	391
22.2. Теплообмен при конденсации водяного пара.....	394
Глава 23. ТЕПЛО- И МАССООБМЕН В ДВУКОМПОНЕНТНЫХ СРЕДАХ.....	398
23.1. Основные положения тепло- и массообмена.....	398
23.2. Тепло- и массоотдача при испарении жидкости в парогазовую среду	401
Глава 24. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ	406
Глава 25. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ.....	410
25.1. Топливо, процесс горения	410
25.2. Тепловые электростанции	415
25.3. Атомные электростанции	416
25.4. Установки с магнитогидродинамическими генераторами	418
25.5. Ветроэлектростанции.....	421
ЛИТЕРАТУРА	422

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник предназначен для бакалавров по направлению подготовки 270800 «Строительство» по профилям «Теплогасоснабжение и вентиляция», «Промышленное и гражданское строительство», «Водоснабжение и водоотведение», «Производство и применение строительных материалов и конструкций», «Профессиональное обучение и педагогика».

Учебник написан в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта профессионального образования по направлению подготовки 270800 «Строительство».

Авторы поставили перед собой цель создать книгу небольшого объема, которая содержала бы весь круг вопросов, включенных в рабочую программу дисциплины «Основы гидравлики и теплотехники».

Учебник, с точки зрения системного подхода к изучению дисциплины, разделен на три части.

В первой части рассматриваются вопросы механики несжимаемой и сжимаемой жидкости, которые являются основой для расчета переноса механической энергии и свойств жидкости в изотермических потоках. Течение сжимаемой жидкости (газа) изучается как приложение термодинамики к поточным процессам.

Во второй рассматриваются положения технической термодинамики, относящиеся к формам энергии и их преобразованиям в технических процессах. Общие соотношения классической термодинамики для макроскопических свойств веществ демонстрируются на примерах рассмотрения водяного пара и влажного воздуха.

В третьей части работы изложены основные положения теории тепломассообмена во всех его проявлениях: теплопроводность, естественная и вынужденная конвекция, излучение. Рассмотрены вопросы теплопередачи, а также теплообмен при фазовых превращениях, тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах. Последняя глава третьей части знакомит читателя с некоторыми аспектами нестационарной теплопроводности.

Краткий исторический очерк развития гидравлики и теплотехники

Теоретические основы процессов характерные для строительной отрасли базируются на трех фундаментальных науках: *термодинамике, гидравлике и теплопередаче.*

Т е р м о д и н а м и к а – это наука о закономерностях превращения энергии в различных физических, химических и других процессах, рассматриваемых на макроуровне. Термодинамика основывается на двух фундаментальных законах природы: первом и втором началах термодинамики. Эти законы были сформулированы в XIX в. и явились развитием основ механической теории теплоты и закона сохранения и превращения энергии, сформулированных Ломоносовым (1711–1765).

Наиболее важным направлением термодинамики для специалистов в области строительства является техническая термодинамика, занимающаяся изучением процессов взаимного превращения теплоты в работу и условий, при которых эти процессы совершаются наиболее эффективно.

Зарождение технической термодинамики было связано с изобретением в конце XVIII в. паровой машины и изучением условий превращения теплоты в механическую работу.

Основой термодинамики как науки можно считать опубликованный в 1824 г. французским военным инженером Карно его единственный трактат «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». В этой работе Карно впервые изложил проблему превращения теплоты в работу в общем виде, ввел понятия «идеальная машина» и «обратимый круговой» процесс. Его выводы, отвлеченные от определенной конструкции машины и от конкретного рабочего тела, привели к открытию закономерности, которая теперь называется *вторым законом термодинамики.*

В записях Карно, опубликованных лишь спустя 10 лет после его смерти, уже содержится первая формулировка принципа эквивалентности теплоты и работы, в соответствии с которым теплота и работа взаимопревращаемы. Этот принцип был высказан в 1842 г. немецким врачом Майером, а затем в 1845 г. сформулирован им как *первый закон термодинамики.*

Джоуль в 1843–1848 гг. экспериментально подтвердил *первый закон термодинамики* путем многочисленных опытов.

В 1850 г. немецкому ученому Клаузиусу на основе идей Карно, Майера и Джоуля удалось четко сформулировать оба закона термодинамики и дать количественную формулировку *первого закона термодинамики* в виде уравнения, связывающего теплоту и работу с внутренней энергией. При формулировке второго закона термодинамики он ввел новую величину, которую назвал энтропией. Введенное Клаузиусом понятие энтропии занимает ключевое место в построении термодинамики. Утверждение *второго закона термодинамики* о направлении всех естественных процессов нашло проявление в *принципе возрастания энтропии.* Независимо от Клаузиуса в

1851 г. Томсон (лорд Кельвин) дал другую формулировку *второго закона термодинамики*. Томсон показал, что из выводов *второго закона термодинамики* следует существование универсальной температурной шкалы, которая не зависит от свойств вещества. При этом он обосновал термодинамические соотношения для реализации абсолютной температурной шкалы, названной в его честь *шкалой Кельвина*.

Благодаря классическим работам Клаузиуса и Томсона к концу XIX в., термодинамика достигла в своем развитии определенной степени завершенности.

В середине XX столетия был разработан новый раздел термодинамики – *термодинамика необратимых процессов*, которая позволяет расширить и уточнить область применения законов термодинамики.

Зарождение отдельных представлений в области гидравлики следует отнести к глубокой древности. Они формировались на основе опыта, накопленного в Египте, Месопотамии, Греции и Китае в процессе гидротехнических работ. В Древнем Риме сооружались сложные системы водоснабжения. Первым научным трудом по гидравлике считается работа Архимеда (287–212 гг. до н.э.) «О плавающих телах», содержащая его известный закон о равновесии тела, погруженного в жидкость.

Период Средневековья обычно характеризуется как регресс. Однако именно в это время были созданы универсальные энергетические машины – водяные колеса различных типов и размеров, послуживших основой промышленной революции нового времени.

Эпоха Возрождения неразрывно связана, прежде всего, с именем Леонардо да Винчи (1452–1519), явившимся основоположником гидравлики как науки. Многие труды великого Леонардо стали известны сравнительно недавно, однако некоторые достижения в механике и гидротехнике (например, улучшение конструкции шлюзовых ворот) влияли на развитие европейской техники и при его жизни. Он написал труд «О движении воды в речных сооружениях», первый установил понятие сопротивления движению твердых тел в жидкостях и газах и положил начало экспериментальной гидравлике, поставив лабораторные опыты. Галилео Галилей опубликовал в 1612 г. трактат по гидростатике «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о телах, которые в ней движутся». Он показал, что сила гидравлического сопротивления возрастает с увеличением скорости движущегося в жидкости твердого тела и с ростом плотности жидкой среды.

Паскаль (1623–1662) сформулировал основной закон гидростатики о независимости значения гидростатического давления от ориентировки поверхности в рассматриваемой точке. Он же показал возможность применения для измерения атмосферного давления различных жидкостей. Ньютон (1643–1727) установил квадратичный закон сопротивления при обтекании и дал описание закона вязкого трения в жидкости. Важный этап в становлении инженерного образования связан с созданием Эйлером (1707–1783), Д. Аламбером (1717–1783) и Лагранжем (1736–1813) аналитической меха-

ники. Постепенно именно эта дисциплина стала основой инженерного образования. Первоначально единый курс распался на теоретическую механику, сопротивление материалов и гидравлику. Бернулли (1700–1782) впервые в 1738 г. ввел термин «гидродинамика». Так был назван и его знаменитый труд, изданный в Страсбурге. Его отец, Бернулли-старший (1667–1748), опубликовал в 1743 г. трактат под названием «Гидравлика». основополагающая работа Эйлера с выводом системы уравнений движения идеальной жидкости увидела свет в 1735 г.

Наибольшие успехи в рамках модели идеальной жидкости были достигнуты Гельмгольцем и Кирхгофом, разработавшим методы теории функции комплексной переменной. Дальнейшее развитие эти методы получили в работах Жуковского, Чаплыгина.

Теорией теплопередачи или теплообмена называется наука, изучающая процессы переноса тепла в пространстве с неоднородным температурным полем, *Процессы теплообмена возникают между различными телами или отдельными частями одного и того же тела при наличии разности температур.*

Наука о теплообмене насчитывает несколько столетий, но настоящего расцвета она достигла лишь в XX веке, найдя широкое применение при решении назревших практических задач техники. Из раздела теоретической физики учение о теплообмене превратилось в самостоятельную научно-техническую дисциплину.

Основоположником современной теории теплоты является Ломоносов (1711–1765). В своей диссертации «Размышления о причине теплоты и холода», написанной в 1747–1748 гг. и напечатанной в 1750 г., Ломоносов сформулировал основы кинетической теории материи. Ему принадлежит заслуга установления закона сохранения и превращения движущейся материи, из которого естественно вытекает закон сохранения и превращения энергии.

Основной закон излучения был открыт экспериментально в 1872 г. Стефаном, а теоретически был выведен на основе второго закона термодинамики Больцманом в 1884 г.

Планк в 1902 г. теоретическим путем нашел закон распределения интенсивности теплового излучения по длинам волны при различных температурах.

В начале своего развития теория теплообмена строилась на так называемой феноменологической основе, заключающейся в рассмотрении отдельных явлений только лишь как некоторых изолированных закономерностей, могущих быть математически описанными, без раскрытия физической сущности этих явлений. Примером такого феноменологического рассмотрения явлений теплообмена может служить формальная математическая теория теплопроводности, созданная Фурье в 1828 г. и развитая Пуассоном в 1835 г.

Однако успехи физики двадцатого столетия позволили глубже выявить физическую сущность процессов теплообмена. Одновременно с этим

была разработана общая методология исследования, обработки и обобщения опытных данных основанная на теории подобия.

Большое значение в технике имеют процессы теплообмена в движущихся средах. При этом перенос тепла осуществляется путем перемещения конечных объемов жидкости или газа, а следовательно, этот вид теплообмена неразрывно связан с переносом самой среды.

Теплообмен между потоком жидкости, газа и поверхностью твердого тела называют конвективной теплоотдачей. *Различают свободную (гравитационную) и вынужденную конвекции.*

Свободная конвекция осуществляется в потоке жидкости или газа в поле массовых сил при наличии разности плотностей; вынужденная конвекция - в потоке жидкости или газа, создаваемом внешними воздействиями (насос, вентилятор, статическая разность давлений и др.).

При промышленном использовании теплопередачи наибольшее значение имеет вынужденная конвекция при турбулентном течении. Скорости, возникающие при свободной конвекции, сравнительно малы, так что при наличии вынужденной конвекции, последняя и определяет картину течения и теплообмена. Теплопередача при вынужденной конвекции в турбулентном потоке зависит от распределения осредненной скорости и пульсаций скорости. Однако эти вопросы исследованы еще далеко не полно.

До начала развития учения о турбулентных течениях жидкостей и газов, т. е. примерно до 1925 г., исследования теплопередачи при турбулентном течении основывались на предположении, сделанном Рейнольдсом, о том, что механизм переноса тепла количества движения един. Отсюда Рейнольдс пришел к выводу, что теплообмен пропорционален поверхностному трению.

В дальнейшем математический анализ осредненных уравнений движения и теплообмена в турбулентном потоке показал, что эти уравнения оказываются незамкнутыми, так как в них появляются члены, содержащие неизвестные величины пульсаций скорости и температуры. До сих пор не удалось построить теорию, позволяющую вычислить эти величины, не прибегая к эксперименту. Поэтому в настоящее время широкое распространение получили полуэмпирические вычислительные модели турбулентности, в основу которых положено предположение о том или ином виде связи между переносимой турбулентными пульсациями величиной (количеством движения, количеством теплоты и т. п.) и осредненными параметрами потока. Основы полуэмпирической теории теплообмена в турбулентном потоке были заложены Прандтлем и Тейлором.

Современные научно-технические проблемы теплообмена в потоках жидкости, газа и плазмы требуют знания законов турбулентного движения для определения как интегральных, так и локальных характеристик. Можно утверждать, что двадцатое столетие (выдвинуло как одну из крупнейших научных проблем современности - создание теории турбулентности.

В области теплообмена во второй половине XX столетия наметился также определенный пересмотр взглядов на явления теплообмена и методов их изучения. Так, наряду со среднеинтегральными характеристиками (средними по времени и пространству) наметилось использование мгновенных локальных значений характеристик потока температур. Появились теоретические обобщения перехода от среднеинтегральных соотношений к отдельным локальным переменным характеристикам теплообмена.

Были широко развиты физические основы теплообмена в газовых потоках. Различные виды теплообмена имеют различную физическую сущность. Эти процессы представляют собой сложные физические явления, в ряде случаев еще недостаточно изученные. Все это заставляет исследователей в области теплообмена обращаться к экспериментам.

В настоящее время основные проблемы расчета различных видов теплообмена (решение сложных задач теплопроводности, расчет ламинарного пограничного слоя, расчет теплообмена при наличии химических реакций и др.) более эффективно решаются с помощью компьютеров, что позволило значительно расширить и углубить теорию теплообмена.

Современное развитие молекулярно-кинетической теории также способствовало развитию ряда разделов учения о теплообмене (переносные свойства газов и газовых смесей при высоких: температурах, разреженные газы и др.).

Большие задачи в области теории и практики теплообмена лежат в направлении создания компактных теплообменников различного назначения, начиная от стационарных установок и кончая теплообменниками на космических летательных аппаратах.

Для решения этой важной проблемы требуется применение современного математического аппарата, дальнейшая разработка методов интенсификации процессов теплообмена и получение надежных данных, обеспечивающих быстрое проектирование теплообменников методами машинного проектирования.

Таким образом, теплопередача является одной из важнейших дисциплин, необходимых для современного специалиста в любой области техники.

ЧАСТЬ I. ГИДРАВЛИКА

В построение ч. I заложено следующее рассуждение. Любое знание необходимо для пользования им, для решения практических задач. Пользование знанием должно быть сознательным, а не формальным. Под сознательностью пользования дисциплиной понимается не безоглядная вера в полученную на учебных занятиях информацию, а ее обоснованность с точки зрения законов природы. Поэтому во введении ч. I учебника излагается методика решения задач гидравлики. Затем рассматриваются основные положения гидравлики с общих позиций – в трехмерной постановке. Такое рассмотрение необходимо для грамотного использования пакетов программ для численного расчета возникающих в практике задач. Логическим продолжением после этого служит одномерное моделирование задач гидравлики. Оно необходимо для решения производственных задач и для проведения тестирования используемых численных методов решения. С целью усвоения теории и приобретения навыков пользования гидравликой в завершение первой части рассматриваются прикладные задачи, в том числе и струйные, которые демонстрируют приложение теоретической базы к решению практических задач.

Введение

Глава 1. ПРЕДМЕТ ГИДРАВЛИКИ

Раздел механики, в котором изучают равновесие и движение жидкости, а также силовое взаимодействие между жидкостью и обтекаемыми ею телами или ограничивающими ее поверхностями, называют гидромеханикой. Если же помимо жидкостей изучают движение газов и обтекание им поверхностей и тел, то науку называют аэрогидродинамикой или механикой жидкости и газа (МЖГ).

Термину «жидкость» в МЖГ часто придают более широкий смысл, чем это принято в обыденной жизни. В понятие «жидкость» включают все тела, для которых свойственна *текучесть* – *способность изменять свою форму под действием сколь угодно малых сил*. Таким образом, в это понятие включают как обычные жидкости, называемые капельными, так и газы. Первые отличаются тем, что в малом количестве под действием поверхностного натяжения принимают сферическую форму, а в большом – образуют свободную поверхность раздела с газом. Важной особенностью капельных жидкостей является их несжимаемость – они ничтожно мало изменяют свой объем при изменении давления. Газы, наоборот, могут значительно изменять свой объем при изменении давления, т.е. они обладают большой сжимаемостью.

Несмотря на это различие, законы движения капельных жидкостей и газов при определенных условиях можно считать одинаковыми. Основным из этих условий является малая скорость газа по сравнению со скоростью распространения в нем слабых возмущений, скоростью звука.

В гидравлике изучают движение главным образом капельных жидкостей, причем в подавляющем большинстве случаев последние рассматривают как несжимаемые. В газовой динамике рассматриваются течения сжимаемых жидкостей – газов. Внутренние течения газа относятся к области гидравлики лишь в тех случаях, когда их скорости значительно меньше скорости звука (не более 30% скорости звука). Такие случаи движения встречаются в практике довольно часто (например, течение воздуха в вентиляционных системах, в системах кондиционирования воздуха, газопроводах). В настоящее время дисциплины «Гидравлика» и «Газовая динамика» часто объединяются под названием «Механика жидкости и газа» (МЖГ).

Гидравлика дает методы расчета разнообразных гидротехнических устройств и сооружений, гидромашин, а также трубопроводных систем.

Газовая динамика посвящается решению задач течения газов в проточной части энергоустановок, элементах трубопроводных систем, предназначенных для перемещения газов и трубопроводных систем в целом.

Актуальность механики жидкости и газа в повседневной жизни человека обусловлена главным свойством жидкости – текучестью. Благодаря этому свойству жидкость способна переносить не только свои свойства, но и энергию. И поэтому жизнь человека оснащена гидравлическими и газодинамическими устройствами – от систем водоснабжения и водоотведения до двигателей для космических полетов.

Теоретической базой решения задач МЖГ является теоретическая механика – механика твердого тела. Но так как при своем движении жидкость может менять объем и форму, то теоретическая механика дополняется сведениями из физики жидкости и газа.

Методика решения гидравлических задач заключается в следующем. Выделяется расчетный участок гидравлической системы, который называется *контрольным объемом*. Все, что окружает жидкость в контрольном объеме (*окружающая среда*), отбрасывается. Чтобы движение жидкости в контрольном объеме не изменилось, действие окружающей среды на выделенный объем заменяется соответствующими силами, которые и определяют движение жидкости. Для жидкости, протекающей через контрольный объем, записываются *уравнения законов сохранения*: закона сохранения массы, закона количества движения (второго закона Ньютона), закона сохранения и превращения энергии. К уравнениям законов сохранения должны быть добавлены *уравнения и зависимости, определяющие свойства жидкости и термодинамический процесс течения*. Полученная система уравнений должна быть совместной – число уравнений должно быть равно числу неизвестных. Поскольку уравнения законов сохранения имеют всеобщий характер для заданной жидкости, то особенность, конкретность задачи определяется заданием *начальных и граничных условий*. Граничными условиями являются форма и расположение границ контрольного объема, а также значения параметров жидкости на границах выделенного объема. Под начальными условиями понимаются значения параметров жидкости во всех точках контрольного объема в начальный момент времени.

Полученная система уравнений и вспомогательных зависимостей вместе с начальными и граничными условиями должна быть решена каким-либо методом – аналитическим, численным, экспериментальным. Из-за сложностей решения уравнений исследуемое течение реальной жидкости сначала упрощают (моделируют), затем упрощенное (модельное) течение рассчитывают. Полученные результаты сравнивают с опытом, выявляют степень расхождения, уточняют и исправляют постановку задачи. Многие явления, трудно поддающиеся теоретическому анализу, исследуют экспериментальным путем, а результаты представляют в виде эмпирических формул. В настоящее время в связи с развитием численных методов расчета доля аналитического метода в гидромеханике несколько снизилась. *Важность экспериментальных методов заключается в том, что опыт служит как для первичного изучения явления, так и для создания адекватных расчетных схем.* Первичное изучение явления необходимо для правильного выбора границ контрольного объема и формулирования граничных условий. Экспериментальное изучение явления необходимо для установления адекватности расчетных методов.

Рассмотренная методика изучения движения жидкости позволяет сформулировать следующие этапы изучения дисциплины «Гидравлика»:

1-й этап – это знакомство с основными свойствами жидкостей и газов. Для того чтобы описать поведение какого-то объекта, необходимо знать свойства этого объекта.

2-м этапом является, естественно, вывод законов сохранения для рассматриваемого объекта – жидкости.

3-й этап – упрощения и допущения, используемые при решении уравнений МЖГ.

4-й – решение задач механики жидкости и газа.

Глава 2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

2.1. Жидкости и газы. Гипотеза сплошности

Предметом изучения механики жидкости и газа является физическое тело, у которого относительное положение его элементов значительно изменяется при приложении достаточно малых сил. Таким образом, основным свойством жидкого тела (или просто жидкости) является *текучесть*. Свойством текучести обладают как капельные жидкости (собственно жидкости, такие, например, как вода, бензин, технические масла), так и газы (воздух, азот, водород, углекислый газ). Существенное различие в поведении жидкостей и газов, объясняемое с точки зрения молекулярного строения, будет определяться наличием у капельной жидкости свободной поверхности, граничащей с газом, наличие поверхностного натяжения, возможность фазового перехода и т.д.

Все материальные тела, независимо от их агрегатного состояния: твердого, жидкого или газообразного, обладают внутренней молекулярной (атомной) структурой с характерным внутренним тепловым, *микроскопическим* движением молекул. В зависимости от количественного соотношения между кинетической энергией движения молекул и потенциальной энергией межмолекулярного силового взаимодействия возникают различные молекулярные структуры и разновидности внутреннего движения молекул.

В *твердых телах* основное значение имеет *молекулярная энергия взаимодействия*, вследствие чего под действием сил сцепления молекулы располагаются в правильные кристаллические решетки с положениями устойчивого равновесия в узлах этой решетки. Тепловые движения в твердом теле представляют собой колебания молекул относительно узлов решетки с частотой порядка 10^{12} Гц и амплитудой, пропорциональной расстоянию между узлами решетки.

В противоположность твердому телу в *газах* отсутствуют силы сцепления между молекулами. Молекулы газа совершают беспорядочные движения, причем взаимодействие их сводится только к столкновениям. В промежутках между столкновениями взаимодействием между молекулами можно пренебречь, что соответствует малости потенциальной энергии силового взаимодействия молекул по сравнению с кинетической энергией их хаотического движения. Среднее расстояние между двумя последовательными столкнове-

ниями молекул определяет *длину свободного пробега*. Средняя скорость теплового движения молекул сравнима со скоростью распространения малых возмущений (скоростью звука) в данном состоянии газа.

Жидкие тела по своей молекулярной структуре и тепловому движению молекул занимают промежуточное состояние между твердыми и газообразными телами. По существующим воззрениям, вокруг некоторой, *центральной*, молекулы группируются соседние молекулы, совершающие малые колебания с частотой, близкой к частоте колебаний молекул в решетке твердого тела и амплитудой порядка среднего расстояния между молекулами. Центральная молекула либо (при покое жидкости) остается неподвижной, либо мигрирует со скоростью, по значению и направлению совпадающей со средней скоростью макроскопического движения жидкости. В жидкости потенциальная энергия взаимодействия молекул *сравнима по порядку* с кинетической энергией их теплового движения. Доказательством наличия колебаний молекул в жидкостях служит «броуновское движение» мельчайших твердых частиц, внесенных в жидкость. Колебания этих частиц легко наблюдаются в поле микроскопа и могут рассматриваться как результат соударения твердых частиц с молекулами жидкости. Наличие в жидкостях межмолекулярного взаимодействия обуславливает существование поверхностного натяжения жидкости на ее границе с любой другой средой, что заставляет ее принять такую форму, при которой ее поверхность минимальна. Небольшие объемы жидкости обычно имеют форму шаровидной капли. В силу этого жидкости в гидравлике называют *капельными*.

Следует отметить, что граница между твердыми и жидкими телами не всегда четко очерчена. Струя жидкости при больших давлениях перед отверстием обладает свойствами, близкими к свойствам твердого тела. Например, при давлениях больше 10^8 Па водяная струя режет стальную пластину; при давлении порядка $5 \cdot 10^7$ Па – режет гранит, при давлениях $1,5 \cdot 10^7$ – $2 \cdot 10^7$ Па – разрушает каменные угли. Давления $(1,5-2) \cdot 10^6$ Па достаточно для разрушения различных грунтов.

При определенных условиях граница между жидкими и газообразными телами также может отсутствовать. Газы заполняют весь предоставленный им объем, их плотность может меняться в широких пределах в зависимости от приложенных сил. Жидкости, заполняя сосуд большего объема, чем объем жидкости, образуют свобод-

ную поверхность – границу раздела между жидкостью и газом. В обычных условиях объем жидкости мало зависит от приложенных к ней сил. Вблизи критического состояния разница между жидкостью и газом становится малозаметной. В последнее время появилось понятие флюидного состояния, когда частицы жидкости с размерами несколько нанометров достаточно равномерно перемешаны со своим паром. В этом случае не наблюдается визуального различия между жидкостью и паром.

Пар отличается от газа тем, что его состояние при движении близко к состоянию насыщения. Поэтому он может при определенных условиях частично конденсироваться и образовывать двухфазную среду. При быстром расширении процесс конденсации запаздывает, а затем при достижении определенного переохлаждения происходит лавинообразно. В этом случае законы течения пара могут существенно отличаться от законов течения жидкостей и газов.

Свойства твердых тел, жидкостей и газов обусловлены их различным молекулярным строением. Однако основной гипотезой механики жидкости и газа является гипотеза *сплошной среды*, в соответствии с которой жидкость представляется непрерывно распределенным веществом (континуумом), без пустот заполняющим пространство.

Вследствие слабых связей между молекулами жидкостей и газов (потому-то они и текучи) к их поверхностям не может быть приложена сосредоточенная сила, а только распределенная нагрузка. Направленное движение жидкости складывается из движения хаотически перемещающихся во всех направлениях относительно друг друга огромного числа молекул. В механике жидкости и газа, которая изучает их направленное движение, полагается непрерывным распределение всех характеристик жидкости в рассматриваемом пространстве. Молекулярная структура принимается во внимание только при математическом описании физических характеристик жидкости или газа.

Модель сплошной среды весьма полезна при изучении ее движения, так как позволяет использовать хорошо развитый математический аппарат непрерывных функций.

Количественно пределы применимости математического аппарата механики сплошной среды для газа устанавливаются значением критерия Кнудсена – отношением средней длины свободного пробега молекул газа l к характерному размеру течения L :

$$Kn = \frac{l}{L}.$$

Если $Kn < 0,01$, то течение газа можно рассматривать как течение сплошной среды. При обтекании твердой поверхности сплошной средой ее молекулы прилипают к ней (гипотеза Прандтля о прилипанию), и поэтому скорость жидкости на поверхности твердых тел всегда равна скорости этой поверхности, а температура жидкости на стенке равна температуре стенки.

Если $Kn > 0,01$, то рассматривается движение разреженного газа с использованием математического аппарата молекулярно-кинетической теории.

Гипотеза сплошной среды может не выполняться при расчете течения жидкости или газа в узких зазорах. Молекулы имеют размеры порядка 10^{-10} м; при зазорах порядка 10^{-9} м, характерных для нанотехнологии, могут наблюдаться существенные отклонения расчетных данных, полученных посредством обычных уравнений динамики жидкости

2.2. Физические характеристики и свойства жидкости

Свойством называется любая измеряемая характеристика изучаемой системы (какого-то объема жидкости). Если две системы проявляют одни и те же свойства так, что они неразличимы, то говорят, что они находятся в одном и том же состоянии.

Гипотеза сплошной среды приводит к понятию *плотности* для тел, находящихся в твердом, жидком или газообразном состояниях. Распределение массы жидкости в объеме характеризуется *средней плотностью* ρ – массой жидкости, приходящейся на единицу объема:

$$\rho = \frac{M}{V}.$$

Здесь M – масса жидкости, содержащаяся в объеме V . При неравномерном распределении вещества по объему весь объем разбивается на столь малые объемы ΔV , что распределение массы ΔM можно полагать в нем равномерным и местная плотность (плотность в данной точке) вычисляется как предел:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V}, \text{ кг/м}^3.$$

Обратная величина называется удельным объемом:

$$v = \frac{1}{\rho}.$$

По смыслу удельный объем – это объем, занимаемый единицей массы жидкости или газа.

Значение плотности газа в любой точке объема определяется уравнением состояния Клапейрона-Менделеева

$$p = \rho RT. \quad (2.1)$$

Здесь R – газовая постоянная.

Как уже упоминалось ранее, основной особенностью газа, с которой связано большинство его характерных свойств, заключается в том, что молекулы газа находятся на большом удалении друг от друга и каждая молекула с динамической точки зрения изолирована от других молекул в течение времени свободного пробега. При температуре 0°C и давлении 10^5 Па число молекул в одном кубическом сантиметре газа равно $2,69 \cdot 10^{19}$ (оно называется *числом Лошмидта*, а тот факт, что оно одинаково для всех газов, известен как *закон Авогадро*), поэтому, если бы молекулы были размещены в углах кубической решетки, расстояния между соседними молекулами было бы $3,3 \cdot 10^{-7}$ см. Диаметр молекулы точно не определен, однако его обоснованной мерой служит расстояние между центрами двух отдельных молекул, на котором межмолекулярная сила меняет знак. Для многих простых молекул этот эффективный диаметр находится в интервале $d_0 = (3 - 4) \cdot 10^{-8}$ см, так что средняя величина удаления молекул друг от друга составляет величину порядка $10 d_0$. На этом расстоянии силы сцепления молекул столь малы, что молекулы движутся свободно по прямым линиям с постоянной скоростью (полагаем, что они электрически нейтральны). Среднее расстояние, проходимое молекулой между столкновениями, равно $7 \cdot 10^{-6}$ см или $200 d_0$.

Представление о газе как о скоплении молекул, движущихся почти свободно, исключая случайные столкновения, лежит в основе кинетической теории газов. В этой теории принято рассматривать свойства *совершенного газа*, молекулы которого не оказывают никакого силового воздействия друг на друга, не считая актов столкновений, и занимают пренебрежимо малый объем. При нормальных

условиях реальные газы обладают свойствами, которые мало отличаются от свойств совершенного газа.

При больших плотностях на динамическое поведение молекул влияют расположенные поблизости другие молекулы, уравнение состояния для совершенного газа нуждается в уточнении. Уточненное уравнение состояния называется *уравнением Ван-дер-Ваальса*

$$p = \frac{\rho RT}{1 - b\rho} - a\rho^2, \quad (2.2)$$

где опытные значения коэффициентов для воздуха приблизительно равны $a = 3 \cdot 10^{-3} \frac{P_0}{\rho_0^2}$, $b = 3 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\rho}$, причем значения берутся при стандартных условиях. Это уравнение непригодно для газов вблизи точки конденсации.

При очень высоких температурах столкновения между молекулами могут стать настолько интенсивными, что может происходить диссоциация многоатомных молекул на отдельные атомы. Поэтому уравнение Клапейрона-Менделеева (2.1) также нуждается в уточнении.

Хотя жидкости обладают общим с газами свойством текучести и способностью к свободному изменению формы, существование сил сцепления, под действием которых находятся молекулы жидкости, не позволяет разработать простую модель, связывающую давление, плотность и температуру (подобно модели совершенного газа) с динамически независимыми молекулами. Поэтому зависимость плотности жидкости от давления и температуры принято оценивать коэффициентами, определяемыми опытным путем и приводимыми в справочниках.

Так, *сжимаемость жидкости*, свойство жидкости изменять свой объем при изменении давления, количественно характеризуется *коэффициентом объемного сжатия* β_V :

$$\beta_V = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp}.$$

При равномерно распределенной по объему V плотности ρ жидкости в соответствии с законом сохранения массы жидкости в рассматриваемом объеме при изменении объема масса его не изменяется:

Учебное издание

Зуфар Харисович **Замалеев**
Владимир Николаевич **Посохин**
Владимир Матвеевич **Чефанов**

ОСНОВЫ ГИДРАВЛИКИ И ТЕПЛОТЕХНИКИ

Под общей редакцией профессора В.Н. Посохина

Компьютерная верстка *Е.М. Лютова*
Дизайн обложки *Т. Негрозова*
Редактор *В.Ш. Мерзлякова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Формат 60×90/16. Бумага офс. Гарнитура Таймс.
Печать офсетная. Усл. 27 п.л. Заказ №

ООО «Издательство АСВ»
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511
тел., факс: (499)183-56-83, e-mail: iasv@iasv.ru,
интернет-магазин: <http://www.iasv.ru/>