

Г.Н. АБРАМОВИЧ

ТЕОРИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Репринтное издание

ЭКОЛИТ
2011

УДК 533
ББК 30.124
А16

Абрамович Г.Н.

А16 Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович / Репринтное воспроизведение издания 1960 г. — М. : ЭКОЛИТ, 2011. — 720 с.

ISBN 978-5-4365-0031-7

Рассмотрены задачи о свободной струе, следе за плохо обтекаемым телом, струе, стесненной твердыми стенками и др. Дается систематический анализ многочисленных экспериментальных данных о профилях скорости, температуры и концентрации примеси, а также об очертании зоны турбулентного перемешивания. Излагается теория турбулентных газовых струй, в том числе сильно подогретых и сверхзвуковых. Решено несколько задач о растекании струи в ограниченном и полуограниченном пространстве. Также содержит различные приложения теории струи, многие из которых разработаны впервые или переработаны заново.

**УДК 533
ББК 30.124**

Абрамович Генрих Наумович

ТЕОРИЯ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ

Изд. № 3968. Подписано в печать 30.08.2011. Формат 60×90/16.

Гарнитура «Литературная». Печать офсетная.

Усл. печ. л. 45,0. Уч.-изд. л. 42,2. Тираж 300 экз. Заказ №

ООО «Эколит».

115088, Москва, ул. Новоостاپовская, д. 4, корп. 2.

Отпечатано в полном соответствии с качеством предоставленного издательством электронного оригинал-макета в ГУП МО «Коломенская типография».

140400, Московская обл., г. Коломна, ул. III Интернационала, 2а.

Тел.: 8 (496) 618-69-33, 618-60-16. E-mail: bab40@yandex.ru.

ISBN 978-5-4365-0031-7

© Абрамович Г.Н., 1960
© ООО «Эколит», 2011

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ	
ТУРБУЛЕНТНЫЕ СТРУИ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ	
Глава I. Общие свойства турбулентных струй	9
§ 1. Основные понятия	9
§ 2. Затопленная струя	11
§ 3. Профили скорости в затопленной струе	12
§ 4. Расширение турбулентной затопленной струи	17
§ 5. Линии равных значений скорости в затопленной струе	19
§ 6. Изменение скорости вдоль оси затопленной струи	23
§ 7. Перенос тепла в затопленной струе	24
§ 8. Диффузия примесей в затопленной струе	31
§ 9. Профили скорости, температуры и концентраций примеси в турбулентной струе, распространяющейся в спутном потоке жидкости	34
§ 10. Расширение турбулентной струи в спутном или встречном потоке жидкости	46
§ 11. Характеристики турбулентности в свободной струе	52
Глава II. Теория свободной турбулентности для случая затопленной струи	61
§ 1. Теория свободной турбулентности	61
§ 2. Старая теория свободной турбулентности Прандтля	63
§ 3. Применение старой теории свободной турбулентности Прандтля к тепловой и диффузионной задачам	68
§ 4. Теория пограничного слоя плоско-параллельной турбулентной затопленной струи несжимаемой жидкости	74
§ 5. Плоский турбулентный источник Толмина	80
§ 6. Осесимметричный турбулентный источник Толмина	89
§ 7. Распределение температуры и концентрации примеси в основном участке струи согласно старой теории свободной турбулентности Прандтля	99
§ 8. Теория свободной турбулентности Тейлора и ее приложения	103
§ 9. Новая теория свободной турбулентности Прандтля и ее приложения	117

§ 10. Теория турбулентного перемешивания Рейхардта и ее приложения	129
§ 11. Определение профиля температуры в струе на основе новой теории турбулентности Прандтля—Гертлера и теории Рейхардта	136
Глава III. Теория турбулентного следа за телом	142
§ 1. Картина течения жидкости в следе за телом	142
§ 2. Плоский след за телом. Теория Шлихтинга	144
§ 3. Исследование теплового следа за нагретым телом на основе гипотезы турбулентности Тейлора	150
§ 4. Расчет осесимметричного следа за телом по теориям Прандтля и Тейлора	154
§ 5. Расчет следа за телом по новой теории турбулентности Прандтля и по теории Рейхардта	160
Глава IV. Турбулентное смешение на границе двух плоско-параллельных потоков жидкости при спутном и встречном движениях	165
§ 1. Кинематическая схема пограничного слоя	165
§ 2. Геометрические характеристики пограничного слоя	172
§ 3. Зона смешения плоской струи конечной толщины с безграничным потоком жидкости	180
§ 4. Зона турбулентного смешения при переменном давлении	181
Глава V. Струя несжимаемой жидкости в спутном потоке	190
§ 1. Начальный участок плоской струи	190
§ 2. Начальный участок осесимметричной струи	194
§ 3. Общие зависимости, характеризующие основной участок струи, в спутном потоке	199
§ 4. Основной участок плоско-параллельной струи	208
§ 5. Основной участок осесимметричной струи	215
§ 6. Переходный участок струи	222
§ 7. Турбулентный след за телом	228
§ 8. Влияние начальной неравномерности потока на начальный участок струи	232
§ 9. Влияние начальной неравномерности потока на основной участок струи	240
§ 10. Сопоставление теории струи с опытными данными	246
§ 11. Приближенная теория струи жидкости в спутном потоке	252
РАЗДЕЛ ВТОРОЙ	
ТУРБУЛЕНТНЫЕ ГАЗОВЫЕ СТРУИ	
Глава VI. Теория свободной турбулентности в сжимаемом газе	257
§ 1. Уравнения движения и неразрывности	257
§ 2. Уравнение энергии	261
§ 3. Преобразование основных уравнений пограничного слоя струи	265

§ 4. Профили температуры и скорости в плоском пограничном слое дозвуковой газовой струи	268
§ 5. Пограничный слой сверхзвуковой изобарической газовой струи	275
§ 6. Перераспределение температуры торможения в сверхзвуковой газовой струе	280
§ 7. Газовая струя очень высокой температуры	283
Глава VII. Турбулентные газовые струи	289
§ 1. Общие свойства турбулентных струй сжимаемого газа	289
§ 2. Зона турбулентного смешения на границе спутных неизотермических потоков газа	303
§ 3. Зона турбулентного смешения на границе спутных газовых потоков большой скорости	319
§ 4. Основные соотношения для расчета начального участка струи газа в спутном потоке	329
§ 5. Основной участок струи нагретого газа	333
§ 6. Основной участок газовой струи большой скорости	353
§ 7. Истечение сверхзвуковой газовой струи из сопла при нерасчетном режиме	366
Глава VIII. Турбулентная газовая струя при наличии фронта пламени (факел)	377
§ 1. Возможные режимы горения	377
§ 2. Распределение полной энергии, концентрации и температуры в пограничном слое струи	379
§ 3. Физическая картина горения в турбулентном пограничном слое	384
§ 4. Определенис температуры горения	389
§ 5. Расчет плоско-параллельного пограничного слоя	392
§ 6. Факел горения в основном участке струи	395
§ 7. Горение однородного газа в плоско-параллельном пограничном слое	398
§ 8. Турбулентная струя с диффузионным фронтом пламени	407
§ 9. Экспериментальные исследования диффузионного факела	421

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

СТРУИ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Глава IX. Течение жидкости в канале за плохо обтекаемым телом	426
§ 1. Схема течения в циркуляционной зоне	426
§ 2. Первый участок плоско-параллельной циркуляционной зоны	428
§ 3. Второй участок плоско-параллельной циркуляционной зоны	438
§ 4. Общие характеристики плоско-параллельной циркуляционной зоны	451
§ 5. Диффузорный участок плоского канала с циркуляционной зоной	456
§ 6. Осесимметричное течение жидкости в канале за плохо обтекаемым телом	465
§ 7. Диффузорный участок осесимметричного канала с циркуляционной зоной	473

Глава X. Турбулентная струя, бьющая в тупик	482
§ 1. Постановка задачи	482
§ 2. Первый участок плоско-параллельного течения, образованного турбулентной струей, втекающей в тупик	483
§ 3. Второй участок плоско-параллельного течения, образованного струей, втекающей в тупик	490
§ 4. Общие характеристики плоско-параллельного течения, образованного струей, втекающей в тупик	498
§ 5. Осесимметричное течение жидкости, образованное струей, втекающей в тупик	500
§ 6. О влиянии начальной неравномерности поля скорости	507
§ 7. Сравнение результатов расчета и эксперимента	511
Глава XI. Течение, образованное полуограниченной турбулентной струей	515
§ 1. Постановка задачи	515
§ 2. Начальный участок полуограниченной струи	517
§ 3. Основной участок полуограниченной струи при $u_0 > u_n$	519
§ 4. Основной участок полуограниченной струи при $u_0 < u_n$	530

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

**НЕКОТОРЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ
ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ**

Глава XII. Струи в неограниченном пространстве	544
§ 1. Расчет затопленной струи несжимаемой жидкости	544
§ 2. Расчет открытой рабочей части аэродинамической трубы	564
§ 3. Струя в потоке относительно большой турбулентности	575
§ 4. О форме струи в сносящем потоке	581
§ 5. Воздушная завеса	596
§ 6. Вертикальная затопленная турбулентная струя подогретого газа	603
§ 7. Траектории теплых и холодных струй воздуха	621
§ 8. Двухфазная струя в воздухе	627
§ 9. Об истечении газа в жидкость	642
§ 10. Турбулентная теплопередача от пара к водяной струе	653
§ 11. Веерная струя	663
Глава XIII. Струи в ограниченном пространстве	667
§ 1. Сопrotивление лабиринтного уплотнения воздухоудвки	667
§ 2. Внешнее сопротивление коридорного пучка труб	671
§ 3. Использование теории свободной струи для расчета воздушного сопротивления поезда	674
§ 4. К расчету камеры смещения эжектора	675
§ 5. О выравнивании профилей скорости и температуры в турбулентном потоке	697
Литература	706
Предметный указатель	712

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга представляет собой монографию о турбулентных струях, в которой рассмотрены задачи о свободной струе, следе за плохо обтекаемым телом, струе, стесненной твердыми стенками, и др. Первая монография автора на данную тему, вышедшая в свет в 1936 г., была посвящена только проблеме свободной затопленной струи [1]. С тех пор теория турбулентной струи получила дальнейшее развитие в десятках работ, опубликованных в СССР и за границей, обогатилась большим количеством экспериментальных данных и нашла применение в различных областях техники.

Быстро накапливавшиеся новые сведения по теории свободной струи и ее приложениям автор дважды суммировал и публиковал в 1940 г. [2] и 1948 г. [3]. Однако особенно существенные результаты в этой области достигнуты за последние десять лет, когда удалось выйти за рамки свободной затопленной струи и, в частности, решить задачу о струе, находящейся в потоке жидкости, учесть взаимодействие струи с твердыми стенками, выявить зависимость очертаний струи от отношения плотности вещества струи к плотности внешней среды, установить особенности сверхзвуковой струи и т. п.

Настоящая монография содержит результаты новых работ автора и его сотрудников, лишь частично опубликованные в журнальных статьях, а также плоды критической переработки наиболее важных теоретических и экспериментальных материалов, опубликованных многими другими авторами.

Первый раздел посвящен теории турбулентной струи несжимаемой жидкости. Здесь дается систематический анализ многочисленных экспериментальных данных о профилях скорости, температуры и концентрации примеси, а также об очертании зоны турбулентного перемешивания. Большое внимание уделено сравнительному рассмотрению различных теорий свободной турбулентности. Исследуются струи не только затопленные, но и распространяющиеся в потоке жидкости (спутном и встречном). Разработанная автором теория струи в спутном потоке не требует введения каких-либо дополнительных (по сравнению с затопленной струей) экспериментальных постоянных и вместе с тем хорошо согласуется с экспериментальными данными. В этой теории учитывается влияние начальной неравномерности полей

скорости, температуры и концентрации примеси, причем удается избавиться от имевшейся прежде известной неопределенности в выборе значения эмпирической константы, зависящей от структуры струи. Рассмотрено влияние продольного градиента давления на характер растекания струи. Теория струи в спутном потоке распространена на случай турбулентного следа за телом; в результате получены расчетные формулы для определения толщины следа и скорости на его оси, пригодные как на большом расстоянии от тела, так и вблизи от него.

Во втором разделе книги излагается теория турбулентных газовых струй, в том числе сильно подогретых и сверхзвуковых. Вновь разработана теория свободной турбулентности в газе, в принципе пригодная для любой степени сжимаемости, и составлены уравнения движения и теплообмена в пограничном слое струи очень высокой температуры, причем указано, что в этом случае влияние молекулярной вязкости может оказаться не только соизмеримым с влиянием турбулентного перемешивания, но даже превалирующим. Далее даются экспериментально проверенные методы практического расчета сверхзвуковых неизотермических струй газа, справедливые как в изобарическом случае, так и при неравных давлениях в начальном сечении струи и в окружающем ее потоке газа, причем удается учесть прямое влияние сжимаемости газа на толщину струи. В этом же разделе книги исследуются газовые струи при горении с диффузионным и нормальным фронтами пламени.

В третьем разделе книги решено несколько задач о растекании струи в ограниченном и полуграниченном пространстве: 1) течение непосредственно за кормой плохо обтекаемого тела, установленного в канале постоянного сечения (особенно детально изучена область обратных токов жидкости); 2) струя, бьющая в канал, закрытый с одной стороны («тупик»); 3) защитная струя, отделяющая поток жидкости от твердой стенки («однородная пленка»).

Четвертый раздел книги содержит различные приложения теории струи, многие из которых разработаны впервые или переработаны заново (струя в боковом потоке жидкости, конвективная струя, двухфазная струя смеси газа с каплями жидкости или твердыми частицами, камера смешения эжектора и др.).

Несколько глав книги написано при участии и под редакцией автора другими лицами: глава VII—О. В. Яковлевским, глава VIII—В. С. Авдеевским, главы X и XI—И. П. Смирновой, § 4 главы XIII—А. Я. Черкезом. Большую практическую помощь при подготовке к печати всей рукописи оказал О. В. Яковлевский.

Автор пользуется случаем выразить благодарность всем перечисленным лицам.
