

И. О. Хинце

Турбулентность

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 53
ББК 22.3
И11

И11 **И. О. Хинце**
Турбулентность / И. О. Хинце – М.: Книга по Требованию, 2013. – 680 с.

ISBN 978-5-458-26829-5

Книга И. Хинце «Турбулентность», вышедшая в 1959 году в США, отражает современные представления о физической сущности турбулентности, содержит изложение важнейших теорий, методов и результатов экспериментальных исследований. Главное внимание удалено статистическим теориям, с помощью которых получены некоторые нетривиальные результаты. Современность, полнота и ясность изложения материала делают монографию И. Хинце весьма полезной и доступной не только для научных работников, но также для широких кругов инженеров и студентов, интересующихся вопросами турбулентных течений.

ISBN 978-5-458-26829-5

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2013

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2013

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

СОДЕРЖАНИЕ

5

§ 7. 3. Ламинарный пограничный слой и явление перехода	534
§ 7. 4. Турублентный пограничный слой на плоской пластине. Классические теории	538
§ 7. 5. Экспериментальные данные о распределении осредненной скорости	551
§ 7. 6. Измерение характеристик турбулентности в пограничном слое	563
§ 7. 7. Сводка результатов и новые формулы для распределений осредненной скорости и напряжения сдвига	581
§ 7. 8. Турублентное течение в прямой круглой трубе. Распределение осредненной скорости	593
§ 7. 9. Измерение характеристик турбулентности при течении в трубе	601
§ 7.10. Структура турублентного потока в трубе	614
§ 7.11. Перенос скалярной субстанции при пристеночной турублентности	619
§ 7.12. Отдельные задачи пристеночной турублентности	637
 Приложение. Элементы тензорного исчисления в декартовой системе координат	651
Литература	661
Именной указатель	672
Предметный указатель	677

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Теория турбулентных течений представляет собой важнейший для практики и одновременно наиболее трудный раздел гидродинамики. Имеющиеся экспериментальные данные о структуре турбулентности являются далеко не полными. Существующие теории турбулентности делятся на две категории: в первой оперируют осредненными характеристиками потока, который считается квазистационарным (например, в теории пути смешения Прандтля); во второй используют статистические особенности структуры турбулентности (теория Колмогорова). В работах первого направления удается получить суммарные характеристики потока (напряжение трения и т. д.); работы второго направления пока еще такой возможности не дают, но являются более перспективными, так как опираются на близкую к действительности модель турбулентности.

Успешное развитие теории турбулентности должно основываться на обширных и детальных фактических сведениях о микро- и макроструктуре турбулентных течений, а это, в свою очередь, требует развития новых тонких методов диагностики таких течений.

Книга И. Хинце «Турбулентность», вышедшая в 1959 году в США, отражает современные представления о физической сущности турбулентности, содержит изложение важнейших теорий, методов и результатов экспериментальных исследований. Главное внимание уделено статистическим теориям, с помощью которых получены некоторые нетривиальные результаты.

Современность, полнота и ясность изложения материала делают монографию И. Хинце весьма полезной и доступной не только для научных работников, но также для широких кругов инженеров и студентов, интересующихся вопросами турбулентных течений.

Наряду с известной монографией А. Таунсенда, книга И. Хинце является важнейшим вкладом в гидродинамику турбулентных течений.

Г. Абрамович

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ АВТОРА

Основным материалом для создания настоящей книги послужило содержание цикла лекций, прочитанных автором группе инженеров-химиков лабораторий фирмы «Ройял Датч-Шелл» в Амстердаме и Дельфте в 1950 году.

Цель этого курса состояла в том, чтобы познакомить слушателей с современными представлениями и теориями турбулентного течения жидкости и при этом дать им теоретическую базу, достаточную не только для изучения специальной литературы по турбулентности, но и для самостоятельных теоретических исследований тех проблем химической технологии, в которых турбулентность играет существенную роль, например перемешивания, а также тепло- и массообмена.

Книга, по существу, преследует ту же цель, однако содержание ее расширено, видоизменено и приведено в соответствие с последними достижениями в этой области. Она будет, по-видимому, представлять интерес для научных работников не только в области химической технологии, но и прикладной механики, поскольку в ней уделено особое внимание анализу механизма турбулентности в применении к задачам сопротивления течению, а также к задачам тепло- и массообмена.

Соответственно этому был сделан и выбор проблем, подлежащих рассмотрению. В книге затронуты не все вопросы, связанные с турбулентностью, поскольку в намерения автора не входило создание учебника по турбулентности. Так, теория устойчивости течения и переход ламинарного течения в турбулентное не рассмотрены вовсе, а влияния сжимаемости жидкости на различные явления турбулентности автор касался лишь от случая к случаю.

Автор пытался представить предмет рассмотрения таким образом, чтобы облегчить восприятие его читателями, которые не являются еще специалистами в гидродинамике. Однако, хотя изложение начинается с самых основных понятий, а использование математики сведено к минимуму, все же, если читатель намерен успешно ознакомиться с содержанием книги, то он должен обладать необходимым кругом знаний в области математики и физики.

Материал главы 1 служит, прежде всего, общим введением, которое знакомит читателя с различными специальными понятиями теории турбулентности. Кроме того, здесь выводятся основные формулы, которые используются в качестве исходных соотношений в других главах.

В главе 2 описываются методы и аппаратура, обычно применяемые для измерения количественных характеристик турбулентности. Эти вопросы рассмотрены более подробно, нежели можно было бы ожидать. Поводом для этого послужили соображения о целесообразности познакомить инженера-исследователя с существующими методами и присущими им особенностями, с тем чтобы вооружить его для критического анализа и интерпретации экспериментальных данных.

В главе 3 излагаются общеизвестные теории изотропной турбулентности. Представляется, что эти теории рассмотрены здесь достаточно полно, чтобы послужить в качестве отправной точки для дальнейшего теоретического изучения турбулентности.

В отличие от изотропной турбулентности, теоретические сведения о неизотропной турбулентности значительно беднее. Некоторые из наиболее важных попыток разработки статистической теории подобного рода турбулентности рассмотрены в главе 4.

Типичным для турбулентных течений является диффузионный характер процессов переноса, что связано с неупорядоченностью турбулентных движений. Эту характерную особенность турбулентности можно, по-видимому, считать настолько определяющей, что этим оправдывается рассмотрение теоретических и экспериментальных исследований процессов переноса в отдельной главе (глава 5).

Две последние главы, 6 и 7, имеют дело соответственно с неизотропной свободной турбулентностью и с турбулентным течением вдоль твердой стенки.

Приложение содержит краткое введение в тензорное исчисление в декартовых координатах, которое можно признать полезным в связи с широким использованием в книге понятий и формул тензорного анализа.

Полный перечень условных обозначений для каждой главы приводится в конце главы.

И. О. Хинце

ГЛАВА 1

ОБЩЕЕ ВВЕДЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

§ 1.1. Определение турбулентности и вводные понятия

Термин «турбулентность» является в настоящее время общепринятым, и, вообще говоря, его смысл понятен, по крайней мере людям, имеющим дело с техникой. Тем более любопытно отметить, что слово «турбулентный» для характеристики определенного типа течения, а именно антипода ламинарного (слоистого) движения, стало использоваться сравнительно недавно. Осборн Рейнольдс, один из пионеров изучения турбулентных течений, называл этот тип движения «извилистым».

Турбулентность является довольно знакомым понятием; однако его несложно определить так, чтобы охватить все присущие турбулентности характерные особенности и сделать это определение соответствующим современным воззрениям на турбулентность, распространенным среди профессионалов в этой области прикладной науки.

Согласно «Новому международному словарю» Вебстера, турбулентность означает: возбуждение, сморщивание, возмущение... Однако это определение является слишком общим и не может удовлетворительно характеризовать турбулентное движение жидкости, как оно понимается сегодня. В 1937 году Тэйлор и Карман [1] *) дали следующее определение: «Турбулентность — это неупорядоченное движение, которое в общем случае возникает в жидкостях, газообразных или капельных, когда они обтекают непроницаемые поверхности или же когда соседние друг с другом потоки одной и той же жидкости следуют рядом или проникают один в другой». Согласно этому определению, рассматриваемое течение должно удовлетворять условию неупорядоченности.

В самом деле, неупорядоченность является очень важной особенностью. Вследствие неупорядоченности не представляется возможным описать движение во всех деталях как функцию времени и простран-

*) Цифры в квадратных скобках указывают на литературу, помещенную в конце книги к каждой главе в отдельности.

ственных координат. Но, к счастью, турбулентное движение не упорядочено в таком смысле, что поддается описанию с помощью законов теории вероятности. При этом оказывается возможным указать точные средние значения различных величин, например: скорости, давления, температуры и т. п., что является весьма важным обстоятельством. Если бы турбулентное движение было полностью неупорядоченным, оно не поддавалось бы никакому математическому анализу.

Поэтому недостаточно лишь констатировать, что турбулентность — это неупорядоченное движение, и остановиться на этом. Определение турбулентности может быть сформулировано, по-видимому, несколько более точно следующим образом: турбулентное движение жидкости предполагает наличие неупорядоченности течения, в котором различные величины претерпевают хаотическое изменение по времени и пространственным координатам и при этом могут быть выделены статистически точные их осредненные значения.

Добавление «по времени и пространственным координатам» является необходимым, так как недостаточно определить турбулентное движение как неупорядоченное только по времени. Возьмем, к примеру, случай, когда данное количество жидкости движется как целое неупорядоченным образом; тогда движение каждой части жидкости будет неупорядоченным по времени относительно неподвижного наблюдателя, но не по отношению к наблюдателю, движущемуся вместе с жидкостью. Турбулентное движение нельзя также мыслить как неупорядоченное только в пространстве, ибо в этом случае под определение турбулентности попадало бы и установившееся течение с нeregулярными линиями тока.

Как указали в своем определении Тэйлор и Карман, турбулентность может быть возбуждена силами трения вблизи неподвижных стенок (течение в трубопроводах, след за телом) или при течении слоев жидкости с различными скоростями вдоль или поперек друг друга. Как будет ясно из дальнейшего, между видами турбулентности, возбужденной в каждом из этих двух случаев, существует резкое различие. Поэтому целесообразно называть турбулентность, возбужденную неподвижной стенкой и непрерывно подвергающуюся ее влиянию, «пристеночной турбулентностью», а турбулентность при отсутствии твердых стенок — общепринятым термином «свободная турбулентность».

В случае реальной вязкой жидкости влияние вязкости проявляется в преобразовании кинетической энергии потока в тепло; следовательно, турбулентный поток, как и любое течение такой жидкости, является по своей природе диссипативным. Если отсутствует непрерывный внешний источник энергии, необходимой для непрерывного возбуждения турбулентного движения, то это движение вырождается. Другие проявления вязкости приводят к тому, что турбулентность

становится более однородной и менее зависимой от направления. В предельном случае турбулентность во всех областях поля течения имеет количественно одну и ту же структуру; тогда турбулентность называют однородной. Турбулентность называется изотропной, если ее статистические характерные особенности не зависят от направления, так что имеет место совершенная неупорядоченность. Как мы увидим позже, в этом случае не может существовать среднего напряжения сдвига и, следовательно, градиента осредненной скорости. Эта осредненная скорость, если она существует, будет постоянна по всему полю течения.

Во всех других случаях, когда осредненная скорость имеет градиент, турбулентность будет неизотропной, или анизотропной. Поскольку градиент осредненной скорости связан с существованием среднего напряжения сдвига, то для обозначения этого класса течений часто используется выражение «турбулентность в потоке со сдвигом». Пристеночная турбулентность и анизотропная свободная турбулентность относятся именно к этому классу течений.

Для случая постоянного по всему полю течения среднего напряжения сдвига, например для плоского течения Куттга, Карман [2] ввел понятие гомологичной турбулентности.

Довольно часто используется выражение «псевдотурбулентность», которое соответствует гипотетическому случаю потока с упорядоченной картиной течения, имеющей строго постоянную периодичность во времени и пространстве. Различие между псевдо- и реальной турбулентностью станет ясным, если сравнить картины течения в обоих случаях. Первая картина характеризуется регулярными линиями тока с постоянной периодичностью по всему полю, в то время как вторая может соответствовать этому условию только в некоторый момент времени, а в следующий момент картина течения может измениться как качественно, так и количественно. Поля псевдотурбулентного течения могут оказаться очень полезными для имитации реальных турбулентных полей, поскольку они легче поддаются теоретическому анализу; так, расчет диссипации кинетической энергии под действием вязкости в подобных полях оказывается относительно более простым. В своей книге «Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом» *) Таунсенд описывает несколько типов псевдотурбулентных течений, пригодных для изучения различных характеристик, типичных для реальных турбулентных потоков. С другой стороны, при использовании понятия псевдотурбулентности в теоретических исследованиях, посвященных анализу некоторых характерных особенностей реальной турбулентности, порой следует быть очень осторожным при интерпретации полученных результатов. Так, можно допустить серьезную

*) Таунсенд А., Структура турбулентного потока с поперечным сдвигом, перев. с англ., ИЛ, Москва, 1959.

ошибку, если пытаться оценить расчетным путем явления переноса и диффузию, сопровождающие турбулентность, по заранее выбранной модели псевдотурбулентного течения, потому что эти процессы определяются, в основном (если не полностью), неупорядоченностью и хаотичностью реальных турбулентных движений.

Эта неупорядоченность и хаотичность турбулентности наглядно может быть продемонстрирована на следующем примере. Рассмотрим осциллограмму пульсаций скорости в некоторой точке потока. Если по этой осциллограмме находить число амплитуд, имеющих определенную величину, то в случае изотропной турбулентности получится гауссова кривая ошибок. Для турбулентного потока со сдвигом это распределение в общем случае будет более или менее асимметричным.

Как указывалось в связи с нашим определением турбулентности, в этом случае существуют средние значения величин по времени и пространству. Простое наблюдение турбулентных потоков и анализ осциллограмм различных параметров этих потоков показывают, что эти средние значения существуют по следующим причинам:

1. В некоторой данной точке турбулентной области более или менее регулярно по времени повторяется одна и та же четкая картина течения.

2. В некоторый данный момент времени одна и та же четкая картина течения повторяется более или менее регулярно в пространстве; следовательно, турбулентность имеет, вообще говоря, одинаковоую всеобъемлющую структуру во всей рассматриваемой области.

Если сравнить различные турбулентные движения, в каждом из которых может быть фиксирована определенная картина течения, то будут наблюдаться различия, например, в размере этих картин течения. Это означает, что для количественного описания турбулентного движения необходимо ввести понятие масштаба турбулентности: определенный масштаб времени и определенный пространственный масштаб. Величины этих масштабов будут определяться размерами устройства, в котором имеется турбулентный поток, и скоростью движения жидкости внутри него. Например, для турбулентного потока в трубе масштаб времени следует, по-видимому, считать величиной порядка отношения диаметра трубы к скорости потока, а пространственный масштаб — величиной порядка диаметра трубы.

Очевидно, что характеризовать турбулентное движение лишь одним его масштабом недостаточно, поскольку это еще ничего не говорит об интенсивности движения. В качестве меры этой интенсивности нельзя взять среднюю величину скорости, поскольку интенсивность пульсаций по отношению к этой средней скорости — это как раз то, что хотят знать.

Если мгновенную величину скорости записать в виде

$$U = \bar{U} + u,$$

где черта сверху обозначает среднее значение и, следовательно, $\bar{u} = 0$, то среднее значение абсолютных величин пульсаций, т. е. $\overline{|u|}$, можно было бы взять в качестве меры этой интенсивности. Однако так делать не принято. По причинам, которые станут очевидными из последующего изложения, принято, как это предложили Драйден и Кьюз [36] в 1930 году, определять силу, или интенсивность, турбулентных пульсаций среднеквадратичной величиной

$$u' = \sqrt{\overline{u^2}}.$$

Тогда относительная интенсивность *) определится отношением

$$\frac{u'}{U}.$$

Средние значения могут быть определены различными путями. Если турбулентное течение является квазистационарным, то можно пользоваться осреднением по времени. В случае потока с однородной турбулентностью можно ввести в рассмотрение осреднение по пространству. Однако если течение не является ни стационарным, ни однородным, то не всегда оказывается возможным произвести осреднение по времени или по пространству. В подобных случаях можно предположить, что среднее определяется из большого числа опытов, в которых сохраняются одинаковые начальные и граничные условия. Тогда речь идет о значениях, средних по множеству.

Если пользоваться эйлеровым методом описания течения, то к некоторой изменяющейся величине в произвольной точке потока может быть применен любой из трех перечисленных выше способов осреднения.

Если же мы хотим исследовать процессы турбулентного переноса или диффузии, то зачастую удобнее пользоваться лагранжевым описанием пути движения отдельных жидких частиц. В этом случае осреднение может быть произведено по большому числу частиц, которые характеризуются либо одинаковым начальным моментом времени, но различными исходными положениями (это требование накладывается на осреднение в однородном течении), либо одинаковым исходным положением, но различными начальными моментами времени (это требование накладывается на осреднение в квазистационарном течении). Кроме того, конечно, рассматривать и средние по множеству значения.

Вообще говоря, процесс осреднения может быть произведен только в тех случаях, когда выполняются определенные условия.

*) Многие исследователи, в том числе Драйден и Кьюз [36], используют для только что определенной относительной интенсивности термины «интенсивность», или «степень турбулентности», либо «уровень турбулентности».

Чтобы ясно представить, о каких условиях идет речь, рассмотрим в качестве примера среднюю по времени величину скорости в некоторой точке течения. Эта средняя величина определяется следующим образом:

$$\bar{U} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} U dt.$$

Однако из практических соображений мы не можем выбрать период осреднения T бесконечно большим. В потоке могут иметься и очень медленные изменения, которые мы не причисляем к турбулентному движению этого потока. Возьмем, к примеру, случай, когда турбулентный поток в трубе имеет слабые пульсации низкой частоты, или случай, встречающийся в метеорологии, когда мы хотим провести различие между средней скоростью ветра за определенный период порядка одного дня и средней скоростью в течение более длительного периода.

Поэтому будем считать период времени T конечной величиной. Этот период должен быть достаточно большим по сравнению с временным масштабом турбулентности T_1 или, поскольку это соответствует определенной квазипериодичности, с главным периодом изменения картины течения. С другой стороны, он должен быть мал по сравнению с периодом T_2 любых медленных изменений течения, которые мы не причисляем к турбулентности. Ясно, что в выборе пульсаций, подлежащих анализу, имеется определенный произвол. К счастью, на практике этот выбор может быть сделан без особых затруднений. Если взять осциллограмму турбулентного потока, то на ней обычно очень легко выделить некоторый средний главный период изменения картины течения. Кроме того, полезно иметь в виду, что порядок величины главного периода соответствует размеру объекта, возбуждающего турбулентность, или аппарата, в котором исследуется турбулентный поток.

Считая период времени T конечной величиной, определим его среднее значение по формуле

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t + \tau) d\tau$$

при условии $T_1 \ll T \ll T_2$.

Это среднее значение не должно зависеть от начального момента процесса осреднения, если $t < T_2$. Следовательно, производная $\partial \bar{U} / \partial t$ должна быть либо равна нулю, либо, при незначительном изменении основного течения, — пренебрежимо малой величиной.

Среднее значение обозначалось выше чертой сверху. Подобной чертой в этой книге обозначается любой процесс осреднения. При