

## ГЛАВА VI

# ДИНАМИКА ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

### § 1. Ламинарное и турбулентное движения вязкой жидкости

Вязкостью жидкости, как уже известно из гл. I, называется свойство реальных жидкостей сопротивляться напряжениям сдвига, т. е. напряжениям, касательным к поверхности, ограничивающей выделенный объем жидкости.

Вязкость жидкости, как увидим в дальнейшем, проявляется также и в изменении нормальных напряжений и отражается на внешних формах движения жидкости.

Наблюдения показывают, что для вязкой жидкости возможны две существенно разные, качественно отличные друг от друга формы движения, причем каждая из них соответствует своей области чисел Рейнольдса. Основные законы, которые управляют переходом течения из одной формы в другую, впервые были экспериментально установлены Осборном Рейнольдсом<sup>1)</sup> (1883). Опыты Рейнольдса заключались в следующем. По стеклянной трубе, присоединенной к водопроводу, протекала под напором вода (рис. 6.1); для того чтобы движение воды было видимым, в трубу вводились с помощью тонких насадков подкрашенные струйки жидкости примерно такого же, как вода, объемного веса. Так как окрашенные частицы поступали в трубу с той же скоростью, что и вода, то по их траекториям можно было составить себе представление о движении частиц воды. Специальный кран в конце трубы позволял регулировать скорость движения. С помощью такой установки можно было наблюдать, что при малых скоростях течения окрашенные струйки текут приблизительно параллельно стенкам трубы и на всем ее протяжении (рис. 6.1, а) они не смешиваются между собою, двигаясь как бы по отдельным трубочкам. Такое движение называется *ламинарным* или слоистым (*lamina* — по-латыни — пластинка, слой).

На первый взгляд кажется, что эта форма движения единственно возможна и что жидкость в цилиндрической трубе всегда должна двигаться вдоль оси трубы, т. е. так, как этого требует направляющее воздействие стенок. Однако опыты показывают, что на самом деле

---

<sup>1)</sup> С работами Рейнольдса читатель может познакомиться по их русскому переводу, который имеется в сборнике «Проблемы турбулентности», ОНТИ, 1936.

это не так: в одной и той же трубе возможны разные формы движения жидкости.

Если скорость течения превосходит некоторую определенную для данного опыта скорость  $v_{кр}$  (она называется *критической скоростью*), то можно наблюдать другую форму течения. Окрашенные струйки текут, не смешиваясь друг с другом лишь на небольшом расстоянии от выхода из насадков, затем они размываются, начинают пульсировать, перемешиваются, и различить их становится невозможным. При больших скоростях течения перемешивание настолько интенсивно, что окрашенные частицы попадают во все места трубы и вся масса жидкости почти равномерно окрашивается (рис. 6.1, б). Такое движение

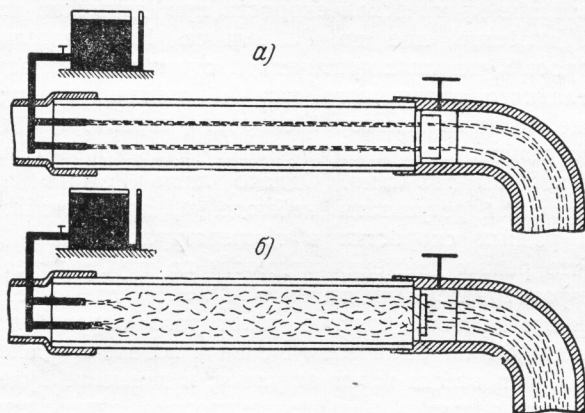


Рис. 6.1. Схема опыта Рейнольдса:  
а) ламинарное движение; б) турбулентное движение.

В. Томсон предложил называть *турбулентным* (в переводе с латинского слово «турбулентный» означает бурный, возмущенный); сам Рейнольдс называл это движение извилистым.

Основное отличие турбулентного движения от ламинарного заключается в том, что в турбулентном движении, кроме компонентов скорости, параллельных оси трубы, имеются компоненты скорости, перпендикулярные к оси. Вследствие этого и происходит поперечное перемешивание частиц жидкости в трубе. Другое отличие турбулентного движения от ламинарного состоит в том, что ламинарное движение может быть и установившимся, и неустановившимся; *турбулентное же движение по своей сути есть движение неустановившееся*, даже в том случае, если оно происходит под действием постоянной во времени разности напоров. Частицы жидкости при турбулентном движении ведут себя примерно так, как молекулы, по представлениям кинетической теории газов: они находятся в состоянии беспорядочного, хаотического движения. Поэтому турбулентное движение можно

охарактеризовать как движение, не направляемое твердыми границами потока.

Иногда, даже в специальной литературе, дают неправильное определение турбулентного движения, характеризуя его как движение вихревое, тогда как ламинарное движение якобы безвихревое. На самом деле как при ламинарном движении, так и при турбулентном имеет место вращение частиц в каждой точке потока. Таким образом, *и ламинарный и турбулентный потоки представляют собой вихревые течения, точнее говоря, течения с вращением частиц*. Различие между ними, как уже указывалось, заключается в том, что одно течение может быть установившимся или неустановившимся, другое — всегда неустановившееся, сопровождающееся перемешиванием частиц.

Существование критической скорости при движении жидкости по трубе было известно еще до Рейнольдса. Наблюдатели отмечали, что при скоростях, меньших критической, струя, вытекающая из трубы, имеет вид гладкого, прозрачного, как бы стеклянного стержня; при скоростях же, больших некоторой скорости, характерной для данного опыта, струя становится мутной, начинает пульсировать и истечение происходит как бы толчками. Однако лишь Рейнольдс установил закон, обобщающий результаты наблюдений, проведенных в разных трубах при разных скоростях и температурах потока. Именно он установил, что режим движения жидкости по трубе определяется величиной безразмерного выражения  $v_{cp}d/\nu = R$ , где  $d$  есть диаметр трубы. Если эта величина меньше некоторого определенного значения, то, каковы бы ни были возмущения в потоке при входе в трубу или до входа, они всегда затем затухают, и движение будет ламинарное; если же эта величина больше некоторого определенного значения, то (при данных условиях входа потока в трубу и при данной шероховатости) возмущения, которые возникают в потоке, разрастаются в развитую турбулентность. Выражение  $v_{cp}d/\nu$  было названо впоследствии *числом Рейнольдса*. Это число можно рассматривать как критерий устойчивости той или иной формы движения жидкости<sup>1)</sup>.

Как ламинарное, так и турбулентное движения возможны, вообще говоря, при всех числах Рейнольдса. Однако фактически имеет место лишь тот режим движения, который при данных условиях оказывается устойчивым. При малых значениях числа Рейнольдса устойчив ламинарный режим движения; при больших значениях числа Рейнольдса этот режим неустойчив и при всяком, даже малом, возмущении внезапно, скачком, переходит в турбулентный режим. Между малыми и

<sup>1)</sup> Рейнольдс указывает в связи с установлением этого критерия, что его можно сформулировать и несколько иначе. Так как для газов коэффициент кинематической вязкости  $\nu \sim cl$  (см. гл. I), то выражение  $v_{cp}d/\nu$  пропорционально  $v_{cp}d/cl$ ; можно следовательно, сказать, что характер движения жидкости определяется величиной отношения произведения размеров потока на его скорость к произведению молекулярных размеров (путь свободного пробега молекулы) на молекулярную скорость.

большими значениями числа Рейнольдса имеется промежуточная, так называемая переходная, область, в которой оба режима движения неустойчивы; здесь можно наблюдать как ламинарное течение, так и его внезапный переход в турбулентное. Значение числа Рейнольдса, отделяющее область ламинарного течения от переходной области, называется критическим числом Рейнольдса и обозначается  $R_{кр}$ . Иногда его называют первым критическим числом Рейнольдса, в отличие от второго критического числа Рейнольдса, отделяющего переходную область от области развитой турбулентности.

Опыты самого Рейнольдса и других исследователей показали, что значение критического числа Рейнольдса весьма существенно зависит от условий входа жидкости в трубу. Если, например, труба приключена непосредственно к водопроводу и, следовательно, жидкость подается в трубу с некоторой начальной турбулентностью, если вход в трубу не плавный или если имеются другие источники возмущений, вроде насадков, выпускающих подкрашенную жидкость, то переход от ламинарного движения к турбулентному начнется при сравнительно малых числах Рейнольдса. Однако, как бы велики ни были возмущения при входе жидкости в трубу, они, как показывает опыт, затухают, если

$$R < 2300.$$

Таким образом, значение  $R_{кр} = 2300$  можно считать нижним пределом критических чисел Рейнольдса.

Что касается верхнего предела, то он до настоящего времени не найден, и можно сомневаться в том, существует ли он вообще. Во всяком случае установлено, что, впуская жидкость в трубу из большого по сравнению с размерами трубы резервуара, в котором она предварительно отстоялась, выполняя вход в трубу в виде плавного закругления и устранив другие источники возмущения, можно затянуть переход ламинарного течения в турбулентное до весьма больших чисел Рейнольдса, порядка  $R = 50\,000$ . Однако достаточно при этом самого небольшого сотрясения, изменения скорости или другой причины возмущения для того, чтобы ламинарное движение мгновенно, скачком, перешло в турбулентное. Таким образом, ламинарное движение при этих числах Рейнольдса неустойчиво.

Исследование движения жидкости в расширяющихся или сужающихся трубах показывает, что критическое значение числа Рейнольдса зависит не только от начальных возмущений и условий входа потока в трубу, но также от продольного ускорения частиц. В сужающейся трубе давление вдоль потока убывает и, следовательно, частицы движутся ускоренно (рис. 6.2, а); при этом их тенденция к поперечному перемещению уменьшается и критическое значение числа Рейнольдса увеличивается.

Наоборот, в расширяющейся трубе (рис. 6.2, б) частицы движутся замедленно, против нарастающего давления; при этом тенденция к

поперечному перемещению усиливается и критическое значение числа Рейнольдса уменьшается. Изменяя продольные ускорения частиц, можно в весьма широких пределах управлять переходом ламинарного движения в турбулентное.

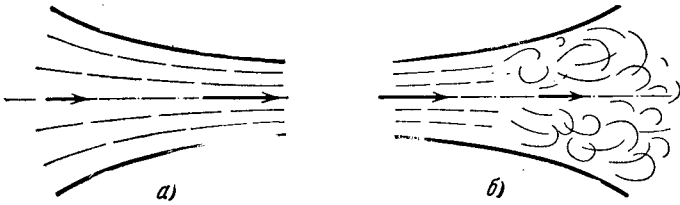


Рис. 6.2. При положительном ускорении частиц критическое значение числа Рейнольдса больше, чем при неускоренном движении, а при отрицательном — меньше.

На практике чаще всего приходится иметь дело с турбулентным движением. Оно имеет место не только при течении жидкости по трубам при больших значениях числа Рейнольдса, но и при обтекании жидкостью тел; атмосферные течения также турбулентны.

В большинстве технических важных случаев турбулентность играет отрицательную роль. Турбулентное движение, как уже указывалось, есть движение беспорядочное, сопровождающееся перемешиванием отдельных масс жидкости. Результат этого перемешивания такой же, как если бы вязкость жидкости возросла в тысячи, а иногда в десятки тысяч раз. Поэтому сопротивление при течении по трубам, сопротивление самолетов, ракет, морских судов при турбулентном потоке во много раз больше, нежели оно было бы при ламинарном.

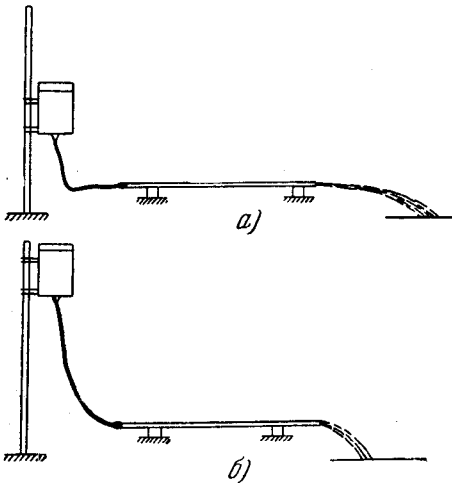


Рис. 6.3. Схема прибора для демонстрации изменения сопротивления трубы при переходе от ламинарного течения к турбулентному: а) ламинарное течение; б) турбулентное течение.

С помощью весьма наглядного опыта можно продемонстрировать внезапное увеличение сопротивления трубы при переходе от ламинарного течения к турбулентному. Схема этого опыта представлена на рис. 6.3. Вода из напорного бака течет по резиновому шлангу и затем по длинной тонкой трубке. Из свободного конца этой трубки вода вытекает в виде струи. Перемещая напорный бак снизу вверх,

можно наблюдать, что сначала с увеличением напора скорость истечения увеличивается и струя из трубки бьет все дальше и дальше. Но, если, поднимая бак, достигнуть высоты, при которой ламинарное течение в трубке переходит в турбулентное, то струя начинает пульсировать и при дальнейшем увеличении напора расстояние, на которое бьет струя, уменьшается. Это свидетельствует о том, что потери на трение увеличились вследствие смены ламинарного режима течения турбулентным.

Однако в некоторых случаях, как увидим в дальнейшем, влияние турбулентности потока в известном смысле слова обратно. Так, например, для неудобообтекаемых тел при переходе от ламинарного движения к турбулентному точка отрыва вихрей сдвигается в направлении потока и обтекание улучшается. Искусственно турбулизируя поток, можно, например, уменьшить сопротивление шара более чем в два раза. Положительную роль играет турбулентность также в вопросах теплоотдачи от нагретой поверхности в жидкую среду: благодаря перемешиванию жидких масс теплоотдача в турбулентном потоке значительно превосходит теплоотдачу в ламинарном. Наоборот, турбулентность невыгодна, если мы заинтересованы в уменьшении нагрева тел жидкостью или газом (например, аэродинамического нагрева при полете с большой скоростью). Все это показывает, какое огромное значение имеет в технических вопросах проблема турбулентности и насколько важно для инженера умение использовать свойства ламинарного и турбулентного движений и управлять переходом от одного из них к другому.

## § 2. Ламинарное движение жидкости в круглой цилиндрической трубе

Установим сначала некоторые зависимости, общие для всякого (как ламинарного, так и турбулентного) движения жидкости в круглой цилиндрической трубе. Рассмотрим участок трубы, находящийся на большом расстоянии от места входа в трубу; предположим, что это расстояние такое, что во всех поперечных сечениях рассматриваемого участка движение одинаково (одинаковы касательные напряжения, распределение скоростей и т. д.). Иными словами, это означает, что в рассматриваемом участке  $v$  и  $\tau$  не зависят от  $x$ , а являются функциями лишь от  $r$ :  $v = f(r)$ ,  $\tau = F(r)$ . Проведем два поперечных сечения (рис. 6.4) на расстоянии  $L$  друг от друга. Так как распределение скоростей в обоих сечениях, по предположению, одинаково, то частицы жидкости, переходя от первого сечения ко второму, не испытывают ускорения. Поэтому можно считать, что силы, приложенные к объему, который выделен сечениями 1 и 2, находятся в равновесии. Запишем сначала уравнение равновесия для всего объема жидкости, который заключен между сечениями 1 и 2. Проектируя силы на ось трубы, получаем:

$$(p_1 - p_2) \frac{\pi d^2}{4} - \tau_0 \pi dL = 0,$$