

не только для турбулентного, но также и для ламинарного течения. Это допустимо, если считать, что для ламинарного течения коэффициент сопротивления течению λ равен:

$$\lambda = \frac{16\eta}{\rho r v}$$

(нетрудно убедиться, что подстановка этого выражения для λ в формулу Шези превращает формулу Шези в закон Пуазеля). Следовательно, для ламинарного течения коэффициент сопротивления убывает с увеличением скорости; для турбулентного течения λ почти не зависит от скорости.

§ 52. Пограничный слой и вихреобразование. Строение турбулентного потока

Если сравнивать для какого-либо конкретного случая действительное течение маловязкой жидкости (например, воды или газов) с тем течением, которое имело бы место при абсолютном отсутствии вязкости, т. е. для идеальной жидкости, то, как уже пояснено выше (в § 48), картина действительного течения оказывается существенно отличной (в связи с вихреобразованиями) от картины течения идеальной жидкости. Однако главное отличие здесь заключается не в том, что в жидкости имеются вихри; и в идеальной жидкости вихри не только могут существовать, но и сами вихри в идеальной жидкости сходны с вихрями в маловязкой жидкости (разница только в том, что в первом случае они абсолютно устойчивы, во втором — они постепенно затормаживаются и энергия их рассеивается в энергию молекулярно-теплового движения).

Главное отличие заключается в обстоятельствах, влекущих за собой возникновение вихрей: в идеальной жидкости вихри не возникали бы, тогда как в самой маловязкой жидкости при определенных скоростях движения они возникают. Стало быть, как бы ни была мала вязкость, имеются такие места в потоке жидкости, обтекающей твердое тело, где вязкость проявляет себя с большим эффектом. Очевидно, что таким местом может быть только то место, где скорости весьма близких слоев жидкости резко различаются по величине, где градиент скорости весьма велик и где поэтому сила трения тоже велика. Из сказанного следует, что существо дела состоит в природе *пограничного слоя* жидкости, — слоя, прилегающего к поверхности обтекаемого тела.

В идеальной жидкости должно было бы происходить скольжение жидкости по поверхности твердого тела. В действительности частицы реальной жидкости самым тончайшим (мономолекулярным) слоем прилипают к поверхности жидкости и остаются в потоке жидкости неподвижными. С другой стороны, при малой вязкости жидкости уже на самом ничтожном расстоянии от поверхности обтекаемого твердого тела обнаруживаются почти такие же скорости течения, как если бы жидкость была идеальной. Стало быть, в очень тонком пограничном слое скорость течения возрастает от нуля до значи-

тельной величины. Большой градиент скорости создает здесь большую величину внутреннего трения.

Если тонкий пограничный слой все время и на всей обтекаемой поверхности тела остается прилегающим к поверхности тела, то в окружающей жидкости течение остается сходным с течением идеальной жидкости и образования

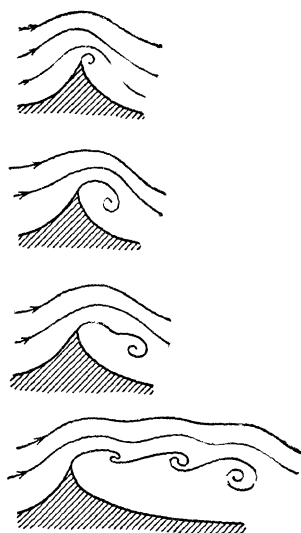


Рис. 103. Различные стадии образования вихря при обтекании острого угла.

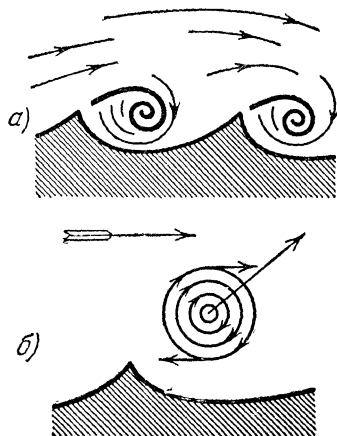


Рис. 104. Схема, поясняющая возникновение и отрыв вихрей.

вихрей не наблюдается. Но когда жидкость, текущая в пограничном слое, отрывается от поверхности тела, этот оторвавшийся пограничный слой производит завихрение жидкости; вихри, образующиеся в месте срыва пограничного слоя, уносятся вдаль от поверхности тела, и вся картина течения приобретает тем самым совершенно иной характер, чем течение идеальной жидкости.

На рис. 103 сверху показана картина потенциального течения идеальной жидкости, обтекающей острый угол тела. Такова же картина течения и для вязкой жидкости при небольших скоростях, когда в пограничном слое жидкость всюду следует очертаниям тела. При большой скорости течения жидкость, двигавшаяся в пограничном слое, вследствие инерции движения отрывается у края пластины, как это показано на том же рисунке; за краем пластины создается область пониженного давления, куда засасываются струи оторвавшегося пограничного слоя, что и приводит к образованию вихря; вихрь относится течением, но вслед за ним создаются все новые и новые вихри.

На рис. 104, *a* показано возникновение вихрей у неровностей (выступов) поверхности обтекаемого тела, где вследствие инерции

происходит отрыв пограничного слоя. Обращаясь к рис. 104, б, мы видим, что на поверхности вихря, которая является ближайшей к поверхности тела, линейная скорость вращения направлена против течения; это создает здесь замедление движения жидкости и, стало быть, по уравнению Бернулли, местное повышение давления, тогда как на противоположной поверхности вихря скорость вращения совпадает по направлению со скоростью течения, что в связи с местным ускорением жидкости ведет, по уравнению Бернулли, к понижению

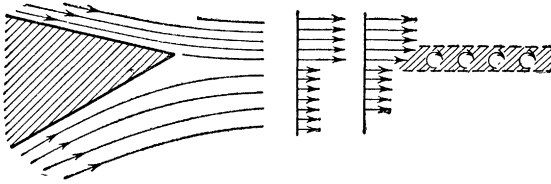


Рис. 105. Поверхность раздела, образующаяся у острого заднего края тела, где встречаются слои жидкости с различными скоростями, переходит (в случае существования вязкости, даже незначительной) в слой с вращением частиц.

здесь давления. В итоге на вихрь действует разность давлений, отбрасывающая его от того участка поверхности тела, где вихрь образовался.

Рис. 105 поясняет, как образуется вихревой слой за острым задним краем тела. В случае идеальной жидкости здесь возникла бы поверхность раздела потенциального течения. При самой незначительной вязкости такая поверхность раздела заменяется непрерывным изменением скорости в слое, в котором макрочастицы жидкости приходят во вращательное движение, — вихревым слоем.

В последующих параграфах приведен еще ряд рисунков, поясняющих условия возникновения вихрей в местах отрыва пограничного слоя и на поверхностях раздела, а в § 54 сообщены дополнительные данные, касающиеся этого вопроса.

Две классификации видов течения жидкости — с одной стороны, на потенциальное (без вращения макрочастиц жидкости) и вихревое (с вращением частиц) и, с другой стороны, на ламинарное (слоистое) и турбулентное — касаются разных сторон явления. Иногда ошибочно представляют себе, что ламинарное течение — это течение потенциальное, а турбулентное — вихревое. В действительности ламинарное течение в одних случаях является потенциальным, в других — вихревым. В турбулентном течении основное переносное движение жидкости часто соответствует потенциальному течению; однако в турбулентном потоке обычно существуют и вихри, накладывающиеся на основное течение и ведущие к перемешиванию жидкости.

Является ли течение безвихревым (потенциальным) или вихревым, это зависит от того, имеет ли место вращение макрочастиц жидкости. Противопоставление же ламинарного течения турбулентному не относится в главном к этой характери-

стике движения, а определяет скорее регулярность, упорядоченность движения — отсутствие или наличие перемешивания масс жидкости при ее течении.

В настоящее время мы еще не имеем в совершенстве ясного и всеми признанного взгляда на строение турбулентного потока. Этот вопрос в важных деталях не одинаково трактуется авторитетными механиками (например, Прандтлем, Карманом, М. А. Великановым и др.). Но в понимании главных характерных особенностей турбулентности существенных разногласий не имеется.

При турбулентном течении «траектории частиц жидкости — даже при движении по прямой круглой трубе — представляют собой не прямые, параллельные оси трубы, а сложные пространственные кривые. Это означает, что компоненты скорости, нормальные к оси трубы, не равны нулю. Вместе с тем траектории неустойчивы во времени — отдельные частицы, проходящие последовательно через данную точку входного сечения, отнюдь не описывают тождественных друг другу кривых.

Поэтому если фиксировать некоторый элемент пространства, то условия в нем будут непрерывно изменяться, какова бы ни была обстановка процесса. Однако в случае потока жидкости, совершающей движение под влиянием постоянных внешних воздействий, происходящие изменения имеют характер пульсаций около некоторых средних постоянных значений. Поэтому если суждение о свойствах такого потока строится на основании наблюдения средних по времени величин, то движение жидкости воспринимается как установившееся.

Таким образом, понятие стационарного турбулентного течения является в известной мере условным. Оно законно только по отношению к усредненным по времени величинам. Почти для всех практических задач определение свойств потока с помощью средних величин является достаточным, и, следовательно, вполне возможно рассматривать движение как установившееся.

Эти особенности турбулентного режима — нестационарность процесса по самой его природе и наличие компонентов скорости, нормальных к направлению основного переносного движения жидкости, — являются существенными признаками его отличия от ламинарного режима. Именно они сообщают турбулентному потоку черты хаотичности в противоположность ламинарному потоку, который представляет собой вполне организованную форму течения¹⁾.

На рис. 106 показана картина турбулентного потока в трубе, сфотографированная при движении фотокамеры со скоростью движения ядра (т. е. средней части) потока; здесь видны нестационарные вихревые движения в ядре. На рис. 107 тот же поток сфотографирован при более медленном движении фотокамеры — со скоростью в граничном слое; здесь видны завихрения в граничном слое. Эти фотографии показывают, что при турбулентном течении происходит интенсивное перемешивание масс соседних слоев жидкости.

Для потока, ограниченного стенками, характерно, что завихрения направлены вдоль движения (как это и видно на приведенных фотографиях). В свободном потоке (в турбулентной струе) вихри обычно перпендикулярны к направлению движения.



Рис. 106. Турбулентный поток в трубе.

¹⁾ А. А. Г у х м а н, Физические основы теплопередачи, т. I. Теория подобия и ее приложения, М.—Л., 1934.

Прандтль в одной из своих статей пишет: «Для точного исследования турбулентного движения с перемешиванием масс жидкости удобно ввести понятие длины пути перемешивания, имеющее для турбулентного движения с перемешиванием масс жидкости такое же значение, как и понятие о средней длине свободного пробега молекул в теории молекулярной диффузии газов. При движении как одного, так и другого рода возникают касательные напряжения (вернее сказать, кажущиеся напряжения) благодаря непрерывному переносу и обмену количествами движения между слоями жидкости, имеющими разные скорости. При объяснении этого довольно сложного в действительности явления можно исходить из следующего упрощенного представления.

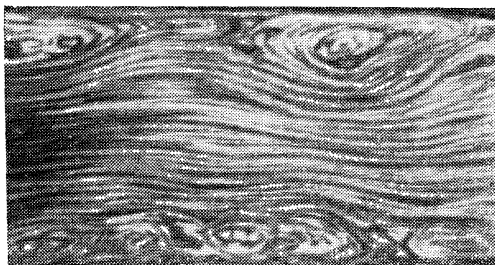


Рис. 107. Картина движения при развитой турбулентности.

Предположим, что некоторая масса жидкости под влиянием столкновения с соседними массами получает движение в перпендикулярном направлении к общей скорости потока, сохраняя ту же скорость в направлении потока, какую имеет тот слой жидкости, из которого выходит рассматриваемая масса. Предположим, что эта масса проходит в поперечном к потоку направлении расстояние l (путь перемешивания), пока она не столкнется или не перемешается с другими массами жидкости. Такого рода движения с обменом и перемешиванием масс жидкости происходят в обоих направлениях, а потому в слой с большей скоростью движения попадают все время массы, проникающие из слоев, движущихся медленнее. Скорость движения более быстрых слоев, таким образом, замедляется, и, наоборот, те массы, которые поступают в слой с более медленным движением из слоев с большей скоростью, ускоряют движение слоев с меньшей скоростью. Взаимное действие друг на друга двух жидких слоев получается таким же, как если бы между ними существовало взаимное трение».

Академик А. Н. Колмогоров, исследовав строение турбулентного потока, установил, что если в каждый данный момент сопоставлять значения скоростей v_1 и v_2 в двух точках потока, находящихся на расстоянии r друг от друга (небольшом в сравнении с размерами крупных вихрей в потоке), то *средний квадрат разности пульсации скоростей* определяется соотношением

$$\overline{(v_1 - v_2)^2} = C \cdot r^{\frac{2}{3}},$$

где C — некоторая постоянная величина, называемая *характеристикой турбулентности* (для условий атмосферы она имеет значение порядка $1 \text{ см}^2/\text{сек}^{-1}$ и с увеличением скорости ветра несколько возрастает). Приведенное соотношение часто называют «законом $2/3$ ». А. Н. Обухова показал, что аналогичное соотношение имеет место и для среднего квадрата пульсаций температуры.