

в СССР превысило 48 млрд. киловатт-часов, а в 1961 г. достигло 327 млрд. киловатт-часов.

В первые послевоенные годы усилия нашего народа были направлены на устранение разрушений, причиненных войной. Днепровскую гидроэлектростанцию, которая по своей мощности (около полумиллиона киловатт) занимала третье место в мире, пришлось отстраивать заново.

В нашей стране построены мощные гидроэлектростанции: Волжская имени В. И. Ленина мощностью около 2,3 млн. киловатт, Волжская имени XII съезда КПСС, мощностью около 2,5 млн. киловатт, Каховская на Днестре, Цимлянский гидроузел. Начато строительство ряда крупнейших в мире ГЭС на Ангаре и Енисее: Братской 4,5 и Красноярской около 5 млн. *квт.* Одна Волжская ГЭС им. В. И. Ленина вырабатывает в шесть раз больше электроэнергии, чем все электростанции дореволюционной России.

### § 51. Вязкость и течение жидкости при трении

Чтобы установить меру вязкости, представим себе следующий опыт: возьмем две пластинки, смоченные какой-либо жидкостью (рис. 99), и станем перемещать верхнюю пластинку относительно

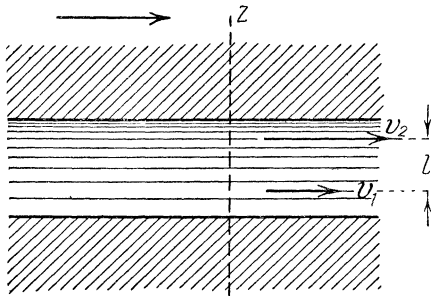


Рис. 99. К рассмотрению внутреннего трения жидкостей.

нижней в направлении, указанном стрелкой. Слои жидкости, непосредственно соприкасающиеся с этими пластинками, прилипают к ним, все же остальные слои перемещаются, скользят друг по другу со скоростью тем большей, чем больше их расстояние от пластинок. Вязкость жидкости сказывается в том, что возникает сила, препятствующая перемещению слоев жидкости, а значит, и пластинок.

Проведем ось  $z$  перпендикулярно к слоям (а значит, и к скоростям движения слоев). Производная  $\frac{dv}{dz}$  от скорости слоев называется *градиентом*<sup>1)</sup> скорости. Если скорость слоев равномерно возрастает с увеличением координаты  $z$ , то градиент скорости является постоянным для всей массы жидкости или газа и может быть выражен также через  $\frac{v_2 - v_1}{l}$ , где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости перемещения каких-нибудь двух тонких слоев,  $l$  — их расстояние друг от друга (рис. 99).

<sup>1)</sup> Понятие градиента было пояснено на стр. 139.

Ньютон установил для силы вязкости  $F$  следующий закон:

$$F = \eta S \frac{dv}{dz}, \quad (3)$$

где  $\eta$  называется *коэффициентом вязкости*, или *коэффициентом внутреннего трения* (обратная величина  $\frac{1}{\eta}$  носит название *коэффициента текучести*),  $S$  — площадь соприкасающихся слоев.

Сила вязкости стремится остановить тот из двух смежных слоев, который движется быстрее, и ускорить тот, который движется медленнее (аналогично тому, что бывает при скользящем трении твердых тел).

Коэффициент вязкости<sup>1)</sup> показывает, скольким динам должна быть равна сила, чтобы в слое жидкости, имеющем толщину 1 см и площадь 1 см<sup>2</sup>, эта сила двигала верхнюю поверхность слоя относительно нижней со скоростью 1 см/сек. Единицу вязкости 1 *дин·сек/см<sup>2</sup>*, или, что то же, 1 *г/см·сек*, называют *пуазом*<sup>2)</sup>.

Приборы, служащие для измерения вязкости жидкостей и газов, носят название *вискозиметров*. Для определения вязкости наблюдают: течение жидкости через узкую капиллярную трубку (вискозиметр Пинкевича); относительное вращение двух цилиндров, пространство между которыми заполнено вязкой средой (вискозиметры Воларовича); падение шарика в вязкой среде.

Коэффициент вязкости, как показывает опыт, колеблется для разных веществ в широких пределах и зависит от температуры. Ниже приведены *коэффициенты вязкости некоторых жидких и газообразных веществ* (в пуазах) при 18° С:

|                            |        |                    |          |
|----------------------------|--------|--------------------|----------|
| Касторовое масло . . . . . | 12     | Эфир . . . . .     | 0,0026   |
| Глицерин . . . . .         | 11     | Кислород . . . . . | 0,0002   |
| Спирт . . . . .            | 0,017  | Воздух . . . . .   | 0,00018  |
| Вода . . . . .             | 0,0106 | Водород . . . . .  | 0,000088 |

При течении жидкости по трубе некоторая часть ее энергии расходуется на работу против сил трения и превращается в энергию молекулярно-теплового движения. Поэтому можно написать,

<sup>1)</sup> Из формулы Ньютона легко установить размерность коэффициента вязкости:

$$[\eta] = \left[ \frac{f \Delta l}{S \Delta v} \right] = \frac{ML L}{T^2 L^2 L} = ML^{-1} T^{-1}.$$

<sup>2)</sup> В честь французского физиолога и физика Пуазеля, который первый произвел точное исследование влияния вязкости на течение жидкости по капиллярной трубке.

приняв во внимание сказанное в § 49:

$$\left(\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 + \rho g h_1\right) - \left(\frac{\rho v_2^2}{2} + p_2 + \rho g h_2\right) = \text{const} =$$

= работе трения в единице объема за 1 сек. (4)

Течение при трении бывает или слоистым — *ламинарным*<sup>1)</sup>, или *турбулентным*<sup>2)</sup>. При ламинарном течении слои жидкости скользят друг по другу со скоростями, увеличивающимися по мере удаления

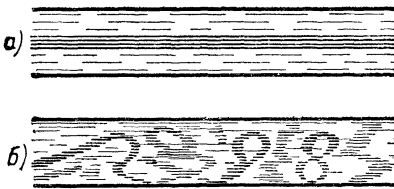


Рис. 100. Ламинарное (а) и турбулентное (б) течения вдоль трубки.

от стенок сосуда. Особенно удобно наблюдать ламинарное течение в узкой стеклянной трубке (рис. 100, а). Пока течение имеет слоистый характер, струя краски, пущенная в трубку, остается резко ограниченной. При увеличении скорости наступает такой момент, когда течение переходит в турбулентное: резкая граница между чистой и подкрашенной жидкостью исче-

зает, и вся трубка оказывается заполненной неправильными вихревыми движениями (рис. 100, б). Скорость, при которой ламинарное течение превращается в турбулентное, называют *критической скоростью*.

При установившемся течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей всюду одинаковое сечение, скорость является наибольшей в тех точках поперечного сечения потока, которые наиболее удалены от стенок трубы. Частицы жидкости, непосредственно прилегающие к стенкам трубы, остаются неподвижными. На рис. 101 показано, как распределены скорости в трубе при ламинарном течении. Если радиус трубы есть  $r$ , то скорость  $v_x$  на расстоянии  $x$  от центра поперечного сечения трубы равна:

$$v_x = K(r^2 - x^2), \quad (5)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от падения давления на единицу длины трубы и от вязкости жидкости ( $K = \frac{1}{4} \frac{p_1 - p_2}{l} \frac{1}{\eta}$ ). Приведенное уравнение представляет собой уравнение параболы, которая на рис. 101 изображена пунктиром; поэтому говорят, что *скорости ламинарного течения в трубе распределены по параболическому закону*.

При турбулентном течении (рис. 102) скорость течения, как показывает опыт, пропорциональна примерно корню седьмой степени из расстояния от стенки:

$$v_x = K' \sqrt[7]{r - x} \quad (6)$$

(при шероховатых стенках степень корня ниже, например шестая или пятая).

<sup>1)</sup> От латинского *lamina* — пластинка.

<sup>2)</sup> От латинского *turbulentus* — неспокойный.

Одномолекулярный слой жидкости, непосредственно прилегающий к стенкам, и при турбулентном течении остается неподвижным; в смежном тонком слое сохраняется ламинарное течение жидкости.

Практически важной является средняя скорость  $v$  течения жидкости по трубе. Очевидно, что количество жидкости  $Q$ , протекающей в 1 сек. через поперечное сечение трубы  $S$ , равно произведению средней скорости течения на площадь поперечного сечения:  $Q = vS$ .

Экспериментально изучая скорость течения жидкостей по трубам, Гаген (в 1839 г.) и независимо от него Пуазель (в 1841 г.) нашли, что *средняя скорость ламинарного течения жидкости по трубе пропорциональна падению давления на*

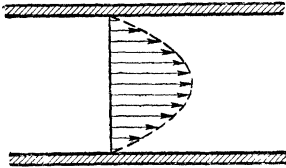


Рис. 101. Параболическое распределение скоростей при ламинарном течении в трубе.

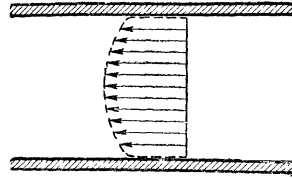


Рис. 102. Распределение скоростей при турбулентном течении в трубе.

*единицу длины трубы, пропорциональна квадрату радиуса трубы и обратно пропорциональна коэффициенту вязкости:*

$$v = \frac{p_1 - p_2}{l} \frac{r^2}{8\eta}. \quad (7)$$

Поскольку  $Q = vS$ , а для круглой трубы  $S = \pi r^2$ , то легко видеть, что закон Гагена — Пуазеля можно переписать так:

$$Q = \frac{p_1 - p_2}{l} \frac{\pi r^4}{8\pi}. \quad (7')$$

Закон Пуазеля можно вывести теоретически из уравнения Ньютона (3).

*При турбулентном течении скорость течения пропорциональна не первой степени падения давления, а корню квадратному из падения давления:*

$$\frac{p_1 - p_2}{l} = \lambda \frac{\rho v^2}{2r}. \quad (8)$$

Это — **формула Шези**. Величину  $\lambda$ , входящую в формулу Шези, называют *коэффициентом сопротивления течению жидкости*.

Формула Шези применима для труб любого сечения, а также и для открытых русел; в этом случае в вышеприведенной формуле Шези радиус трубы  $r$  нужно заменить так называемым *гидравлическим радиусом*  $r_h$ , который представляет собой отношение площади поперечного сечения потока к «смачиваемому периметру» (для открытого потока ширина свободной поверхности в смачиваемый периметр не входит)<sup>1)</sup>.

Чтобы не оперировать с двумя различными законами течения жидкости по трубе (законом Пуазеля и формулой Шези), иногда пользуются формулой Шези

<sup>1)</sup> В технических расчетах формулу Шези обычно пишут следующим образом:

$$v = C \sqrt{r h i};$$

здесь  $i$  есть уклон русла:  $i = \frac{h_1 - h_2}{l}$  [с падением давления вдоль русла уклон связан понятным соотношением:  $p_1 - p_2 = \rho g (h_1 - h_2)$ ]. Для открытых русел с гладкими каменными стенками при глубине воды от полуметра до нескольких метров  $C \approx 80 \text{ м}^{1/2}/\text{сек}$ ; для русел с земляными стенками  $C \approx$  от 30 до 50  $\text{м}^{1/2}/\text{сек}$ .

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

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

(нетрудно убедиться, что подстановка этого выражения для  $\lambda$  в формулу Шези превращает формулу Шези в закон Пуазеля). Следовательно, для ламинарного течения коэффициент сопротивления убывает с увеличением скорости; для турбулентного течения  $\lambda$  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-