

## РЕФЕРАТЫ

A. Fage and H. Townend. An Examination of Turbulent Flow with an Ultramicroscope. Proc. of the Royal Soc. of London, Ser. A. Vol. CXXXV, 1932.

Физические методы экспериментирования все глубже проникают в современную гидродинамику и позволяют надеяться, что мы действительно в ближайшем будущем с достаточной ясностью представим себе механизм движения жидкости и структуру турбулентности. Очень много помогли развитию физической гидродинамики оптические методы Дворжака и Тёплера, тепловой метод Кинга, блестяще развитый и примененный Бюргерсом и др. физические методы. Наряду с ними следует поставить новую, обещающую большие результаты, попытку Фейджа и Тауненда применить для изучения структуры турбулентного потока ультрамикроскопию.

Авторы наблюдали через ультрамикроскоп за движением мельчайших коллоидных примесей, имеющих в обычной воде (размеры частичек менее одного микрона). Вода прогонялась при помощи особого насоса, весьма плавного действия, через трубы квадратного и круглого сечения. При помощи простой оптической схемы в разных местах потока можно было фокусировать пучок лучей и создавать таким образом ярко светящуюся точку; в эту точку и направлялся ультрамикроскоп (увеличение было от 105 до 200). Фотографирование было невозможно, поэтому авторам приходилось зарисовывать наблюдаемое, применяя для большей точности некоторые дополнительные приспособления, о которых мы еще скажем далее. Взаимное расположение микроскопа и освещающего луча было следующее. Направим ось  $OX$  по оси трубы, ось  $OY$  — горизонтально, перпендикулярно к стенке трубы, ось  $OZ$  — вертикально. Освещающий луч был направлен по оси  $OY$ , т. е. в горизонтальной плоскости, микроскоп стоял вертикально, ось его была параллельна оси  $OZ$ .

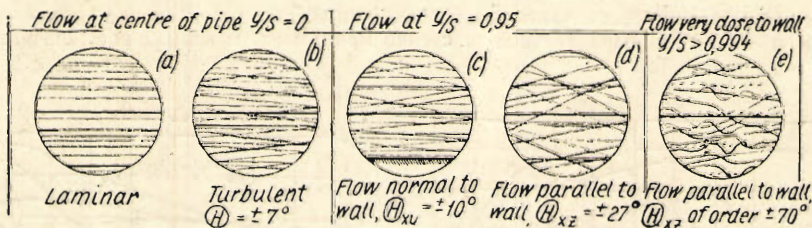


Рис. 1.

Обозначим среднюю скорость потока в данном месте через  $U$  (она направлена по оси  $OX$ ), а компоненты пульсаций через  $u, v, w$ , тогда угол наклона проекции скорости частицы на плоскость  $XOY$  к оси трубы будет равен

$$\theta_{xy} = \text{arctg} \frac{v}{U + u},$$

точно так же в плоскости  $XOZ$  будем иметь

$$\theta_{xz} = \text{arctg} \frac{w}{U + u}$$

Непосредственным фиксированием следа движения частиц можно было определять максимальные углы  $\theta_{xy}$  и  $\theta_{xz}$ . На рис. 1 даны примеры картин, наблюдаемых через ультрамикроскоп, при различных расстояниях от оси трубы ( $y$  — расстояние от проекции данного пункта потока на плоскость  $XOY$  до оси трубы,  $s$  — расстояние от оси до стенки). На объективе имелась тонкая нить, которую можно было поворачивать для отметки максимального угла следа частицы с осью трубы.

На рис. 2 даны кривые зависимости этих максимальных углов от расстояния до оси при двух Рейнольдсовых числах, указанных на рисунке ( $U_0$  — средняя по сечению скорость,

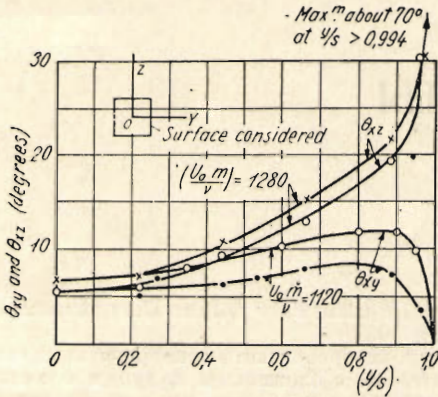


Рис. 2.

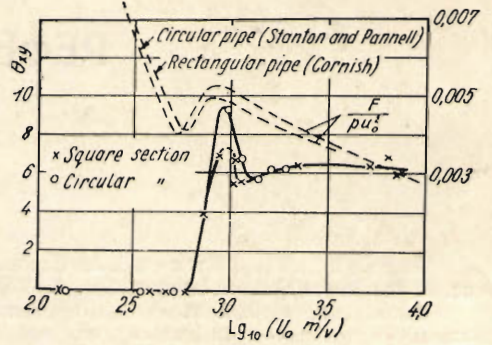


Рис. 3.

$m$  — гидравлический радиус, равный четверти диаметра круглой трубы или половине величины  $s$  в случае трубы квадратного сечения). Отметим, что при приближении к стенке угол

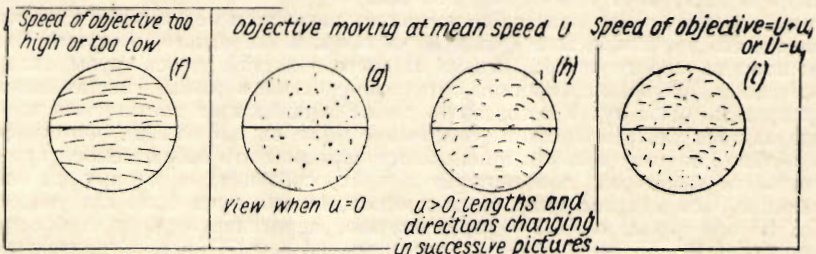


Рис. 4.

отклонения проекции скорости частицы на плоскость  $XOY$  быстро падает до нуля, наоборот отклонение в плоскости параллельной к стенке принимает максимальное значение до  $70^\circ$ , что видно и на рис. 1 (е).

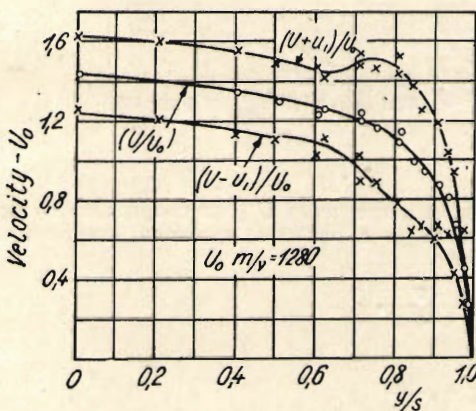


Рис. 5.

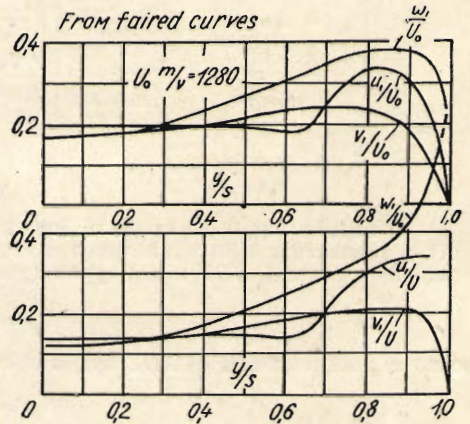


Рис. 6.

На оси трубы, как видно из рис. 2, отклонения  $\theta_{xy}$  и  $\theta_{kz}$  одинаковы и зависят только от Рейнольдсова числа. На рис. 3 показана их общая зависимость от Рейнольдсова числа  $\frac{U_0 m}{\nu}$ . При ламинарном режиме ( $\text{Log}_{10} \frac{U_0 m}{\nu} < 2,7$ ) угол отклонения равен нулю, затем при

переходе через критическое значение быстро растет и уже после этого вновь спадает до некоторого (около  $6^\circ$ ) определенного угла, в дальнейшем одинакового при различных Рейльдсовых числах.

Авторы обращают внимание на некоторую аналогию этих кривых с кривыми сопротивления, показанными пунктиром.

Следует отметить, что авторам удалось при помощи их метода наблюдать движение частиц в весьма большой близости к стенке (до  $1/40000$  дюйма), причем скорости частиц доходили до 0,006 фут/сек, при  $U_0 = 0,83$  фут/сек; таким образом был приблизительно определен градиент в пограничном слое

$$\frac{\partial \left( \frac{U}{U_0} \right)}{\partial \left( \frac{r}{s} \right)} \approx 14.$$

Очень интересный метод был применен для определения величин пульсационных составляющих скорости. Для этого при неподвижном окуляре по отношению к трубе приводился во вращение объектив, тогда при совпадении скорости объектива со скоростью частичек в некотором малом промежутке времени, частички должны были быть видны как неподвижные точки (рис. 4). Таким образом была определена величина  $U + u_1$  где  $u_1$  обозначает максимальное значение  $u$ ; что касается величин  $v_1$  и  $w_1$  (максимумы других компонентов пульсаций), то их уже можно было определить по предыдущим формулам через максимальные отклонения  $\Theta_{xy}$  и  $\Theta_{xz}$ .

Соответствующие кривые распределения скоростей по сечению даны на рис. 5 и 6. Особенный интерес представляет, конечно, рис. 6. Как видно из верхних кривых на оси трубы пульсации имеют величину около 20% от средней по сечению скорости  $U_0$ , затем примерно

при  $\frac{y}{s} = 0,8$   $u_1$  и  $w_1$  доходят до 35% и 40%, а  $v_1$  до 25% от  $U_0$ . На стенке все пульсации спадают до нуля.

Несколько иначе ведут себя отношения пульсаций к средней скорости в данном месте. Здесь мы имеем большое сходство с кривыми на рис. 2.

На ряду с этими интересными количественными результатами важно отметить еще следующие. Прежде всего в отличие от обычных наших представлений ламинарное движение на стенке оказывается не прямолинейным, а волнистым, причем плоскость волн параллельна стенке. Интересен также факт, что на оси трубы все пульсации по величине одинаковы. Переход от ламинарного режима к турбулентному происходил совершенно внезапно. Пользование методом ультрамикроскопии сулит большие результаты в дальнейшем. Здесь особенно важно, что мы производим все измерения не вводя никакого инструмента в жидкость, как бы он ни был мал. Можно конечно оспаривать совпадение скоростей частичек со скоростями частиц жидкости, но вряд ли при такой малой величине (они участвуют в Броуновском движении, заметном при покое жидкости) этому сомнению можно дать место.

*Л. Лойцянский.*