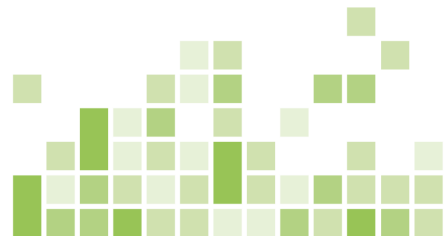




**Физико-технический
институт**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ



Лекция 3. Течение жидкостей 2

воскресенье, 21 апреля 2019 г.



Лекция 3. Течение жидкостей 2

Турбулентный поток

При увеличении скорости или поперечных размеров потока характер течения существенным образом изменяется. Возникает энергичное перемешивание жидкости. Такое течение называется турбулентным. При турбулентном течении скорость частиц в каждом данном месте все время изменяется беспорядочным образом – течение нестационарно.



Лекция 3. Течение жидкостей 2

Турбулентный поток

Турбулентность, явление, наблюдаемое во многих течениях жидкостей и газов, заключается в том, что в этих течениях образуются многочисленные вихри различных размеров, вследствие чего их гидродинамические и термодинамические характеристики (скорость, температура, давление, плотность) испытывают хаотические флуктуации и потому изменяются от точки к точке и во времени нерегулярно.



Лекция 3. Течение жидкостей 2

Турбулентный поток

Большинство течений жидкостей и газов в природе (движение воздуха в земной атмосфере, воды в реках и морях, газа в атмосферах Солнца и звёзд и в межзвёздных туманностях и т.п.) и в технических устройствах (в трубах, каналах, струях, в пограничных слоях около движущихся в жидкости или газе твёрдых тел, в следах за такими телами и т.п.) оказываются турбулентными.



Благодаря большой интенсивности турбулентного перемешивания турбулентные течения обладают повышенной способностью к передаче количества движения (и потому к повышенному силовому воздействию на обтекаемые твёрдые тела), передаче тепла, ускоренному распространению химических реакций (в частности, горения), способностью нести и передавать взвешенные частицы, рассеивать звуковые и электромагнитные волны и создавать флуктуации их амплитуд и фаз, а в случае электропроводной жидкости – генерировать флуктуирующее магнитное поле и т.д.



Возникновение турбулентности при обтекании твёрдых тел может проявляться не только в виде турбулизации пограничного слоя, но и в виде образования турбулентного следа за телом в результате отрыва пограничного слоя от его поверхности. Турбулизация пограничного слоя до точки отрыва приводит к резкому уменьшению полного коэффициента сопротивления тела.



Турбулентность может возникнуть и вдали от твёрдых стенок, как при потере устойчивости поверхности разрыва скорости (например, образующейся при отрыве пограничного слоя или являющейся границей затопленной струи или поверхностью разрыва плотности), так и при потере устойчивости распределения плотностей слоев жидкости в поле тяжести, то есть при возникновении конвекции.



Вследствие чрезвычайной нерегулярности гидродинамических полей турбулентных течений применяется статистическое описание турбулентности: гидродинамические поля трактуются как случайные функции от точек пространства и времени, и изучаются распределения вероятностей для значений этих функций на конечных наборах таких точек.



Статистические моменты гидродинамических полей турбулентного потока должны удовлетворять некоторым уравнениям (вытекающим из уравнений гидродинамики), простейшие из которых – так называемые уравнения Рейнольдса, получаются непосредственным осреднением уравнений гидродинамики. Однако точного решения их до сих пор не найдено, поэтому используются различные приближённые методы.



Лекция 3. Течение жидкостей 2

Турбулентный поток

Основной вклад в передачу через турбулентную среду количества движения и тепла вносят крупномасштабные компоненты турбулентности, масштабы которых сравнимы с масштабами течения в целом, поэтому их описание – основа расчётов сопротивления и теплообмена при обтекании твёрдых тел жидкостью или газом.



Лекция 3. Течение жидкостей 2

Турбулентный поток

Мелкомасштабные компоненты турбулентности, масштабы которых малы по сравнению с масштабами течения в целом, вносят существенный вклад в ускорения жидких частиц и в определяемую ими способность турбулентного потока нести взвешенные частицы, в относительное рассеяние частиц и дробление капель в потоке, в перемешивание турбулентных жидкостей, в генерацию магнитного поля в электропроводной жидкости, в спектр неоднородностей электронной плотности в ионосфере, в флуктуации параметров электромагнитных волн, в болтанку летательных аппаратов и т.д.



Английский ученый Рейнольдс установил, что характер течения зависит от значения безразмерной величины:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}, \quad (3.1)$$

где ρ – плотность жидкости (или газа), v – средняя по сечению трубы скорость потока, μ – коэффициент вязкости жидкости, l – характерный для поперечного сечения размер, например, сторона квадрата при квадратном сечении, радиус или диаметр при круглом сечении и т. д.



Величина (3.1) называется числом Рейнольдса. При малых значениях числа Рейнольдса наблюдается ламинарное течение. Начиная с некоторого определенного значения Re , называемого критическим, течение приобретает турбулентный характер.

Если в качестве характерного размера для круглой трубы взять ее радиус r , то критическое значение числа Рейнольдса (которое в этом случае имеет вид $Re = \frac{\rho v r}{\mu}$) оказывается равным примерно 1000.



В число Рейнольдса входят в виде отношения две величины, зависящие от свойств жидкости:

плотность ρ и коэффициент вязкости μ .

Отношение

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (3.2)$$

называется кинематической вязкостью. В отличие от μ , величина называется динамической вязкостью.



Используя понятие кинематической вязкости, числу Рейнольдса можно придать следующий вид:

$$Re = \frac{vl}{\nu}. \quad (3.3)$$

Число Рейнольдса может служить критерием подобия для течения жидкостей в трубах, каналах и т.д. Характер течения различных жидкостей (или газов) в трубах разных сечений будет совершенно одинаков, если каждому течению соответствует одно и то же значение Re .



Используя понятие кинематической вязкости, числу Рейнольдса можно придать следующий вид:

$$Re = \frac{vl}{\nu}. \quad (3.3)$$

Число Рейнольдса может служить критерием подобия для течения жидкостей в трубах, каналах и т.д. Характер течения различных жидкостей (или газов) в трубах разных сечений будет совершенно одинаков, если каждому течению соответствует одно и то же значение Re .

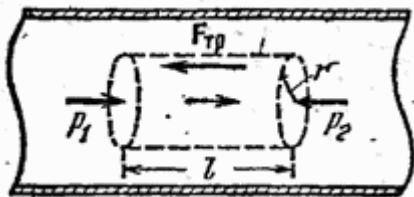


Лекция 3. Течение жидкостей 2

Течение жидкости в круглой трубе

При движении жидкости в круглой трубе скорость равна нулю у стенок трубы и максимальна на оси трубы. Полагая течение ламинарным, найдем закон изменения скорости с расстоянием r от оси трубы. Выделим воображаемый цилиндрический объем жидкости радиуса r и длины l . При стационарном течении в трубе постоянного сечения скорости всех частиц жидкости неизменны. Следовательно,

сумма внешних сил, приложенных к любому объему жидкости, равна нулю.



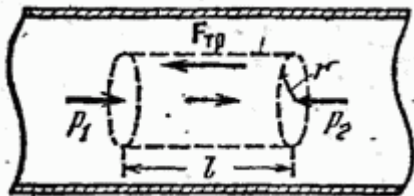


Лекция 3. Течение жидкостей 2 Течение жидкости в круглой трубе

На основании рассматриваемого цилиндрического объема действуют силы давления, сумма которых равна $(p_1 - p_2)\pi r^2$. Эта сила действует в направлении движения жидкости. Кроме того, на боковую поверхность цилиндра действует сила трения, равная $\mu \left| \frac{dv}{dr} \right| \cdot 2\pi r l$ (речь идет о значении $\frac{dv}{dr}$ на расстоянии r от оси трубы). Условие

стационарности имеет вид

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = \mu \left| \frac{dv}{dr} \right| \cdot 2\pi r l \quad (3.4)$$





Лекция 3. Течение жидкостей 2

Течение жидкости в круглой трубе

Скорость убывает с расстоянием от оси трубы.

Следовательно, $\frac{dv}{dr}$ отрицательна и $\left| \frac{dv}{dr} \right| = -\frac{dv}{dr}$.

Учтя это, преобразуем соотношение (3.4) следующим образом:

$$-\frac{dv}{dr} = \frac{(p_1 - p_2)r}{2\mu l}$$

Разделив переменные, получим уравнение:

$$dv = -\frac{(p_1 - p_2)}{2\mu l} r dr$$



Интегрирование дает

$$v = -\frac{p_1 - p_2}{4\mu l} r^2 + C. \quad (3.5)$$

Постоянную интегрирования нужно выбрать так, чтобы скорость обращалась в нуль на стенках трубы, т.е. при $r = R$ (R – радиус трубы). Из этого условия

$$C = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} R^2.$$



Подстановка значения C в (3.5) дает

$$v(r) = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} (R^2 - r^2) = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} R^2 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right). \quad (3.6)$$

Значение скорости на оси трубы равно

$$v_0 = v(0) = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} R^2. \quad (3.7)$$

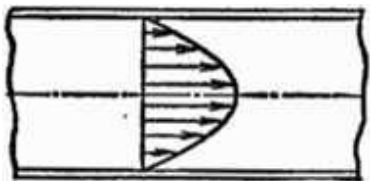
С учетом этого формуле (3.6) можно придать вид

$$v(r) = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right). \quad (3.8)$$



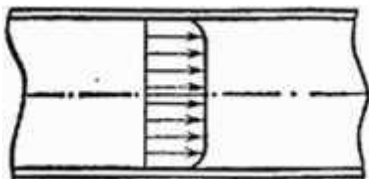
Лекция 3. Течение жидкостей 2

Течение жидкости в круглой трубе



Таким образом, при ламинарном течении скорость изменяется с расстоянием от оси трубы по параболическому закону.

При турбулентном течении скорость в каждой точке меняется беспорядочным образом. При неизменных внешних условиях постоянной оказывается средняя (по времени) скорость в каждой точке сечения трубы.

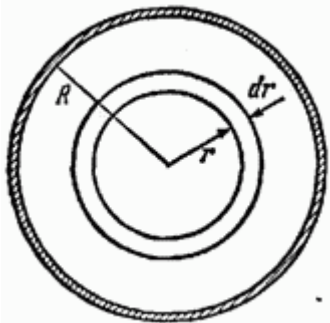


Профиль средних скоростей при турбулентном течении изображен на рисунке.



Вблизи стенок трубы скорость изменяется гораздо сильнее, чем при ламинарном течении, в остальной же части сечения скорость изменяется меньше.

Полагая течение ламинарным, вычислим поток жидкости G , т.е. объем жидкости, протекающий через поперечное сечение трубы за единицу времени. Разобьем поперечное сечение трубы на кольца ширины dr .





Через кольцо радиуса r пройдет за секунду объем жидкости, равный произведению площади кольца $2\pi r dr$ на скорость течения в точках, находящихся на расстоянии r от оси трубы. Приняв во внимание формулу (3.6), получим:

$$dG = v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) 2\pi r dr. \quad (3.9)$$

Чтобы получить поток G , нужно проинтегрировать выражение (3.9) по r в пределах от нуля до R :

$$G = \int_0^R v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) 2\pi r dr = \frac{1}{2} \pi R^2 v_0 = \frac{1}{2} S v_0 \quad (3.10)$$



Здесь S – площадь сечения трубы. Из формулы (3.10) следует, что при ламинарном течении среднее (по сечению) значение скорости равно половине значения скорости на оси трубы.

Подставив в (3.10) значение (3.7) для v_0 , получим для потока формулу

$$G = \frac{(p_1 - p_2)\pi R^4}{8\mu l}. \quad (3.11)$$

Эта формула называется формулой Пуазейля.



Согласно (3.11), поток жидкости пропорционален перепаду давления на единице длины трубы, пропорционален четвертой степени радиуса трубы и обратно пропорционален коэффициенту вязкости жидкости. Формула Пуазейля применима только при ламинарном течении.

Соотношение (3.11) используется для определения вязкости жидкостей. Пропуская жидкость через капилляр известного радиуса и измеряя перепад давления и поток G , можно найти μ .