



ТЕЧЕНИЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

**Лекции для
студентов
специальности
«Техническая
физика»**

**Лектор: PhD,
Максимов В.Ю.**

ЛИТЕРАТУРА

- Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя . М.: Наука, 1969. - 847 с.
- Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. - 847 с.
- Вулис Л.А., Кашкаров В.П. Теория струй вязкой жидкости. М.: Наука, 1965.- 428с.
- Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. "Наука ", ФМЛ, 1984. – 716 с.
- Бай-Ши-И Теория струй. М.: ИЛ, 1960.- 326с.
- Исатаев С.И., Акылбаев Ж.С., Турмухамбетов А.Ж. Аэродинамика и теплообмен криволинейных тел. –Алматы, Ғылым, 1996. – 437с.
- Аскарлова А.С. Конвективный тепломассоперенос в капельных и нелинейновязких жидкостях. Алматы, 2000. 123с.
- Аскарлова А.С. Конвективный перенос вязкой жидкости, Алматы, 2007- 140 с.

РЕСУРСЫ ИНТЕРНЕТ

- ✓ Белевич М.Ю. «Гидромеханика. Основы классической теории»
<http://pages.rshu.ru/hydra/hydra.html>
- ✓ Fluid Mechanics <http://scienceworld.wolfram.com/physics/topics/FluidMechanics.html>
- ✓ Механика сплошных сред. Лекции. В.А.Алешкевич, Л.Г.Деденко, В.А.Караваяев
<http://phys.web.ru/db/msg/1164708/>
- ✓ Гидродинамика <http://about-hydrodynamics.com/>
- ✓ Гидродинамика. Теория и практика <http://gidrodinamika.net>
- ✓ Гидродинамика <http://www.nsu.ru/materials/ssl/text/encyclopedia/fluid-dynamics.html>
- ✓ Aerodynamics for student <http://www.ae.su.oz.au/aero>
- ✓ Белоцерковский С. М. Турбулентность и вихревая аэродинамика
<http://www.elibrary.ru/books/janus/belots.htm>

Введение

Идеальная и вязкая жидкость

Вязкость

Ламинарное и турбулентное течение

Число Рейнольдса, Re

Сплошность среды

Число Кнудсена, K

Сжимаемость среды

Число Маха, M

❖ Жидкость

- агрегатное состояние вещества, промежуточное между твёрдым и газообразным состояниями.
- это тело, обладающее свойством текучести, легкой подвижностью, способное изменять свою форму под воздействием внешних сил и температурных изменений.

Идеальные

невязкие (совершенные) жидкости обладают: абсолютной подвижностью, абсолютной неизменностью в объеме под воздействием внешних сил.

Реальные

вязкие жидкости обладают: сжимаемостью, сопротивлением, растягивающим и сдвигающим усилиями, вязкостью



Идеальной жидкости в природе не существует, она является моделью реальной жидкости.

СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЖИДКОСТЬ, НАХОДЯЩУЮСЯ В СОСТОЯНИИ РАВНОВЕСИЯ ИЛИ ДВИЖЕНИЯ

Массовые или объемные силы

пропорциональны массе, а при однородной жидкости и объему. К этим силам относятся: собственная масса жидкости, силы инерции и центробежные силы.

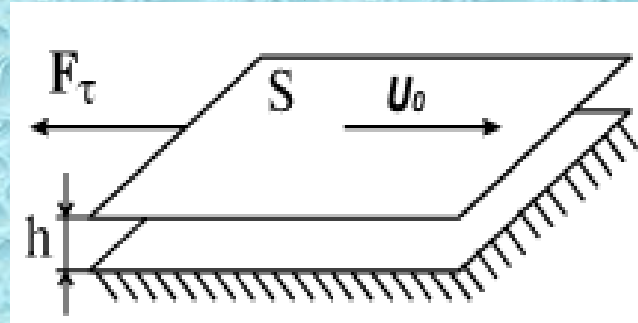
Поверхностные силы

пропорциональны площади той поверхности, на которую они действуют. К этим силам относятся: а) силы нормальные к поверхности жидкости (сжатия, давления, растяжения); б) касательные (силы трения, возникающие только при движении жидкости).

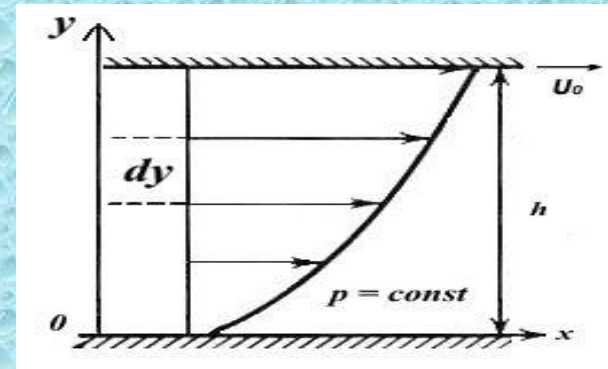
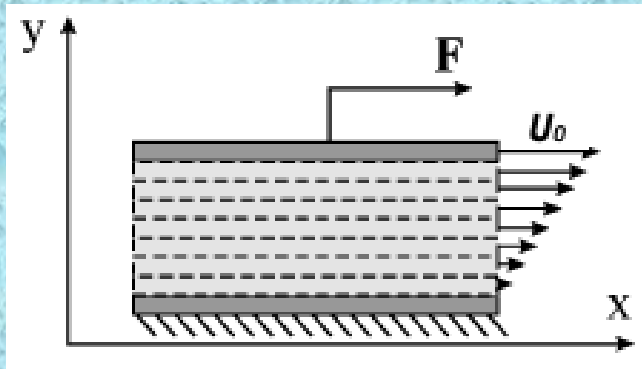
ВЯЗКОСТЬ

это свойство жидкости или газа оказывать сопротивление передвижению ее частиц и характеризующее степень ее текучести и подвижности.

При скольжении друг относительно друга двух параллельных плоскостей, пространство между которыми заполнено жидкостью, силы вязкого трения препятствуют скольжению



Пусть нижняя пластина неподвижна, а верхняя движется со скоростью U_0 .



Расстояние между пластинами h .

Давление – постоянное: $p=const$.

Опыт показывает, что жидкость прилипает к пластинам

→ скорость жидкости на нижней пластине равна $u=0$,

→ скорость жидкости на на верхней равна – $u=U_0$.

В пространстве между пластинами имеет место линейное распределение скорости т.е. скорость течения пропорциональна расстоянию y от нижней пластины.

$$u(y) = \frac{y}{h} U_0 \quad (1)$$

Со стороны верхней пластины к жидкости должна быть приложена касательная сила в направлении движения, которая уравнивает силу трения жидкости. Опыт показывает, что эта сила пропорциональна скорости движения верхней пластины U_0 и обратно пропорциональна расстоянию h между пластинами:

$$\tau \sim \frac{U_0}{h}$$

Из (1) следует: $\frac{U_0}{h} = \frac{u(y)}{y}$ или $\frac{u(y)}{y} \sim \frac{du}{dy}$ Тогда $\tau \sim \frac{du}{dy}$

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \text{ - закон трения Ньютона.}$$

Динамический коэффициент вязкости – μ . $[\mu] = [\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2]$ или $[\text{Па} \cdot \text{с}]$.

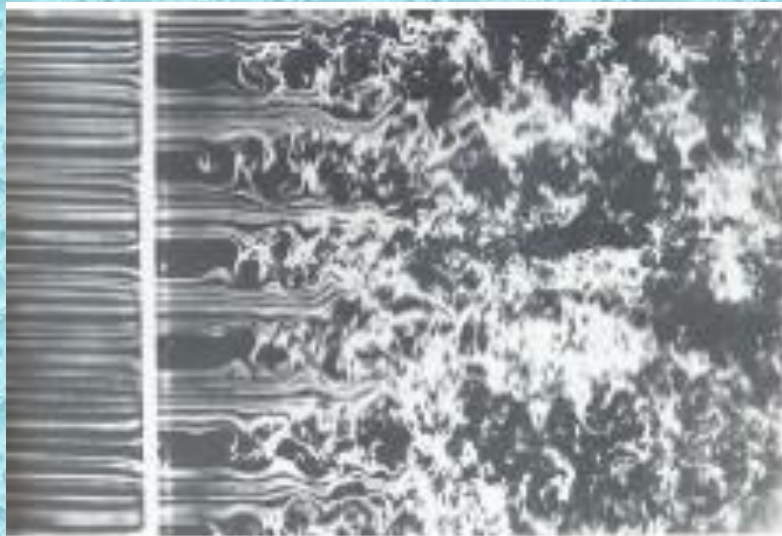
Кинематический коэффициент вязкости $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ $[\nu] = [\text{м}^2 / \text{с}]$.

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ

Ламинарное течение -

лат. *Lamina* - полоска

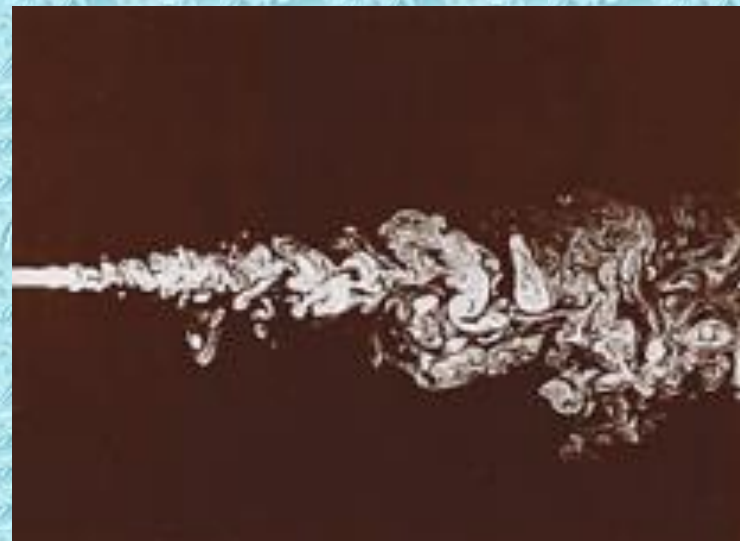
упорядоченное течение вязкой жидкости или газа, характеризующееся отсутствием перемешивания между соседними слоями. Существование ламинарного течения возможно только до определенного, критического значения числа Рейнольдса, после чего течение переходит в турбулентное течение.



Турбулентное течение -

лат. *Turbulentus* – беспорядочный

течение жидкости или газа, при котором частицы совершают неупорядоченные, хаотические движения по сложным траекториям, а скорость, температура, давление и плотность среды испытывают хаотические изменения.





 Wake Vortex Study at Wallops Island
NASA Langley Research Center 5/4/1990 Image # EL-1996-00130

Переход ламинарного течения в турбулентное происходит при определенном значении Числа Рейнольдса Re .

Число Рейнольдса, Re - это
 безразмерная комбинация величин, характеризующих движение тела в вязкой среде или течение вязких жидкостей (газов):

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad \text{- Число Рейнольдса}$$

Физический смысл числа Рейнольдса:

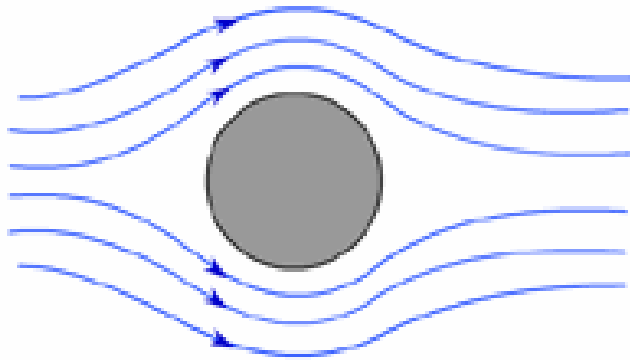
$$Re = \frac{\text{сила инерции}}{\text{сила трения}} = \frac{\rho \frac{du}{dt}}{\frac{\partial \tau}{\partial y}} = \left| \begin{array}{l} \text{это силы, отнесенные} \\ \text{к единице объема } m = \rho V \end{array} \right| = \frac{\rho \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t}}{\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}} = \frac{\rho u \frac{\partial u}{\partial x}}{\mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}} =$$

$$= \left| \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} \sim \frac{v}{d} \\ \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \sim \frac{v}{d^2} \end{array} \right| ; \begin{array}{l} v - \text{ скорость набегающего потока} \\ d - \text{ характерный линейный размер} \end{array} \left| = \frac{\rho \frac{v^2}{d}}{\mu \frac{v}{d^2}} = \frac{\rho v d}{\mu}$$

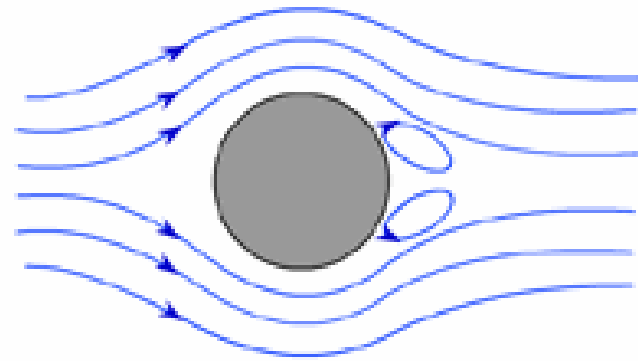
❖ ламинарное течение $Re \ll Re_{кр}$

❖ турбулентное течение $Re \gg Re_{кр}$.
 Для течения вязкой несжимаемой жидкости по круглой цилиндрической трубе $Re_{кр} = 2300$.

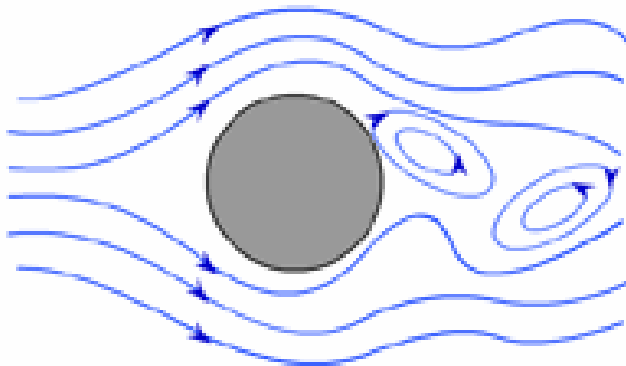
a


 $Re = 10^{-2}$

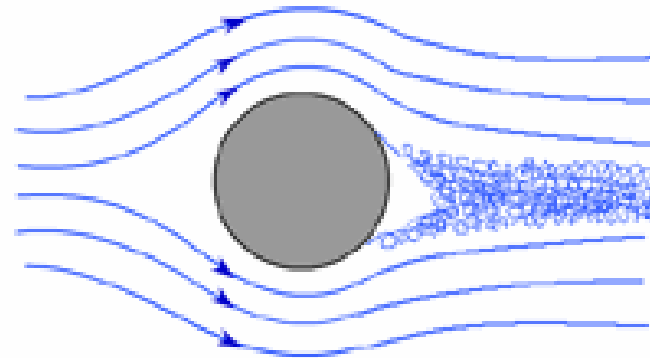
b


 $Re = 20$

c


 $Re = 200$

d


 $Re = 1000$

- a) ламинарный режим, $Re < 1$;
 b) первая стадия неустойчивости, $1 < Re < 40$;
 c) вторая стадия неустойчивости (вихревая дорожка), $Re > 40$;
 d) развитая турбулентность, $Re > 10^3$.

СПЛОШНОСТЬ СРЕДЫ:

Сплошная изменяемая среда – это понятие применимо, когда при изучении движения изменяемой среды можно пренебречь молекулярной структурой среды.

Число Кнудсена – критерий сплошности среды

$$K = \frac{\lambda}{L}$$

$\lambda \sim \frac{1}{\rho}$ - длина свободного пробега молекул в рассматриваемом веществе

L - пространственный масштаб исследуемого явления

При малых значениях числа Кнудсена ($0,01 < K < 0,1$) – среда сплошная (технические течения в лабораторных условиях на Земле). Уравнения механики сплошной среды.

При больших значениях числа Кнудсена ($K > 3$) – среда не сплошная (движение баллистических ракет, спутников). Наступает режим «свободно - молекулярного течения газа». Необходимо учитывать молекулярную структуру. Уравнения молекулярно-кинетическую теорию вещества.

СЖИМАЕМОСТЬ СРЕДЫ

Сжимаемость

способность жидкости уменьшать свой объем под действием сил внешнего давления.

Жидкость может быть

сжимаемой $\rho \neq const$

несжимаемой $\rho = const$

Критерий сжимаемости:

$$M = \frac{u}{a} \quad \text{- число Маха}$$

Мера сжимаемости среды - относительное изменения плотности среды под действием всех сторонних сил давления p .

Из законов термодинамики: $\frac{\Delta \rho}{\rho} \sim \frac{\Delta p}{p}$

Из уравнения Бернулли

$$\Delta p \sim \rho \frac{v^2}{2}$$

Тогда: $\frac{\Delta \rho}{\rho} \sim \frac{\Delta p}{p} \sim \frac{\rho v^2}{2p}$ Скорость распространения звука $a = \sqrt{\frac{p}{\rho}}$; $\frac{\Delta \rho}{\rho} \sim \frac{1}{2} \frac{v^2}{a^2} = \frac{1}{2} M^2$

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ ГАЗА:

при $M \rightarrow 0$ газ можно считать несжимаемым,

при $M < 1$ течения называются дозвуковыми, при $M \approx 1$ – околосзвуковыми,

при $M > 1$ - сверхзвуковыми и при $M > 5$ – гиперзвуковыми (Авиация, космонавтика и др.).

Для воздуха: при $u=100$ м/с, $a = 300$ м/с $\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{1}{2} M^2 = 0.05$