

Турбулентность и турбулентный обмен в океане



Цель курса - изложение в доступной форме основных понятий турбулентности и описание существующих моделей ее исследования и расчета применительно к океану.

Важность изучения турбулентности для динамики атмосферы и океана обусловлена ее определяющей ролью в процессах обмена импульсом, энергией, теплом и веществом. Турбулентные вихри обеспечивают дополнительный перенос этих характеристик, который существенно превосходит молекулярный перенос. Описание важнейших геофизических процессов, таких как динамика погоды и климата, формирование первичной продуктивности в океане, транспорт примесей в океане и атмосфере, динамика течений во внешнем жидком ядре Земли просто немыслимо без учета турбулентности.

Основная литература.

1. Монин А.С., Озмидов Р.В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеиздат, 1981.- 321 с.
2. Монин А.С. Яглом А.М. Статистическая гидромеханика. Ч 1. М.: Наука, 1965. - 639 с.
3. Озмидов Р.В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М.: Наука, 1968. – 320 с.
4. Тэрнер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. – 431 с.
5. Мамаев О.И. Физическая океанография. Избранные труды. М.: ВНИРО, 2000. -364 с.

Дополнительная литература

1. Физика океана. Т. 1. Гидрофизика океана. / Отв. ред. В.М. Каменкович, А.С. Монин. – М.: Наука, 1978. – 455 с.
2. Филлипс.О.М. Динамика верхнего слоя океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 319 с.
3. Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 277 с.
4. Китайгородский С.А. Физика взаимодействия атмосферы и океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 284 с.
5. Монин А.С., Красицкий В.П. Явления на поверхности океана.- Л.:

Как показывают опыты, возможны два режима течения жидкостей и газов: **ламинарный и турбулентный**.

Ламинарным (от лат. *lamina* – лента, пластинка; *laminar* - слоистый) называется сложное течение без перемешивания частиц жидкости и без пульсаций скоростей и давлений. При ламинарном движении жидкости в прямой трубе постоянного поперечного сечения все линии тока направлены параллельно оси труб, отсутствуют поперечные перемещения жидкости. Однако, ламинарное движение нельзя считать безвихревым, так как в нем хотя и нет видимых вихрей, но одновременно с поступательным движением имеет место упорядоченное вращательное движение отдельных частиц жидкости вокруг своих мгновенных центров с некоторыми угловыми скоростями.

Турбулентным (от лат. *turbulentus* – беспорядочный) называется течение, сопровождающееся интенсивным перемешиванием жидкости и пульсациями скоростей и давлений. При турбулентном течении наряду с основным продольным перемещением жидкости происходят поперечные перемещения и вращательное движение отдельных объемов жидкости.

Турбулентным потокам свойственно явление чередования ламинарной и турбулентной форм движения, которое именуется *перемежаемостью*.

Определение турбулентности

«Турбулентностью называется явление, наблюдающееся в очень многих завихренных течениях жидкостей и газов...и заключающееся в том, что термодинамические и гидродинамические характеристики таких течений (вектор скорости, температура, давление, концентрации примесей, плотность среды, скорость звука, электропроводность, показатель преломления и т.п.) испытывают хаотические флуктуации, создаваемые наличием в этих течениях многочисленных вихрей различных размеров, и вследствие этого изменяются в пространстве и с течением времени весьма нерегулярно...» (Монин, Озмидов, 1981).

Турбулентность существует практически во всех течениях независимо от того, происходят ли они в естественных условиях или в современных технологических системах. Были затрачены огромные усилия, чтобы понять это очень сложное физическое явление и разработать эмпирические и математические модели для описания и расчета характеристик турбулентных течений. При анализе турбулентных течений методы расчета являются комбинацией аналитических, эмпирических и экспериментальных соотношений и необходимо иметь ясное представление о принятых допущениях и ограничениях методов при использовании их в физических ситуациях.

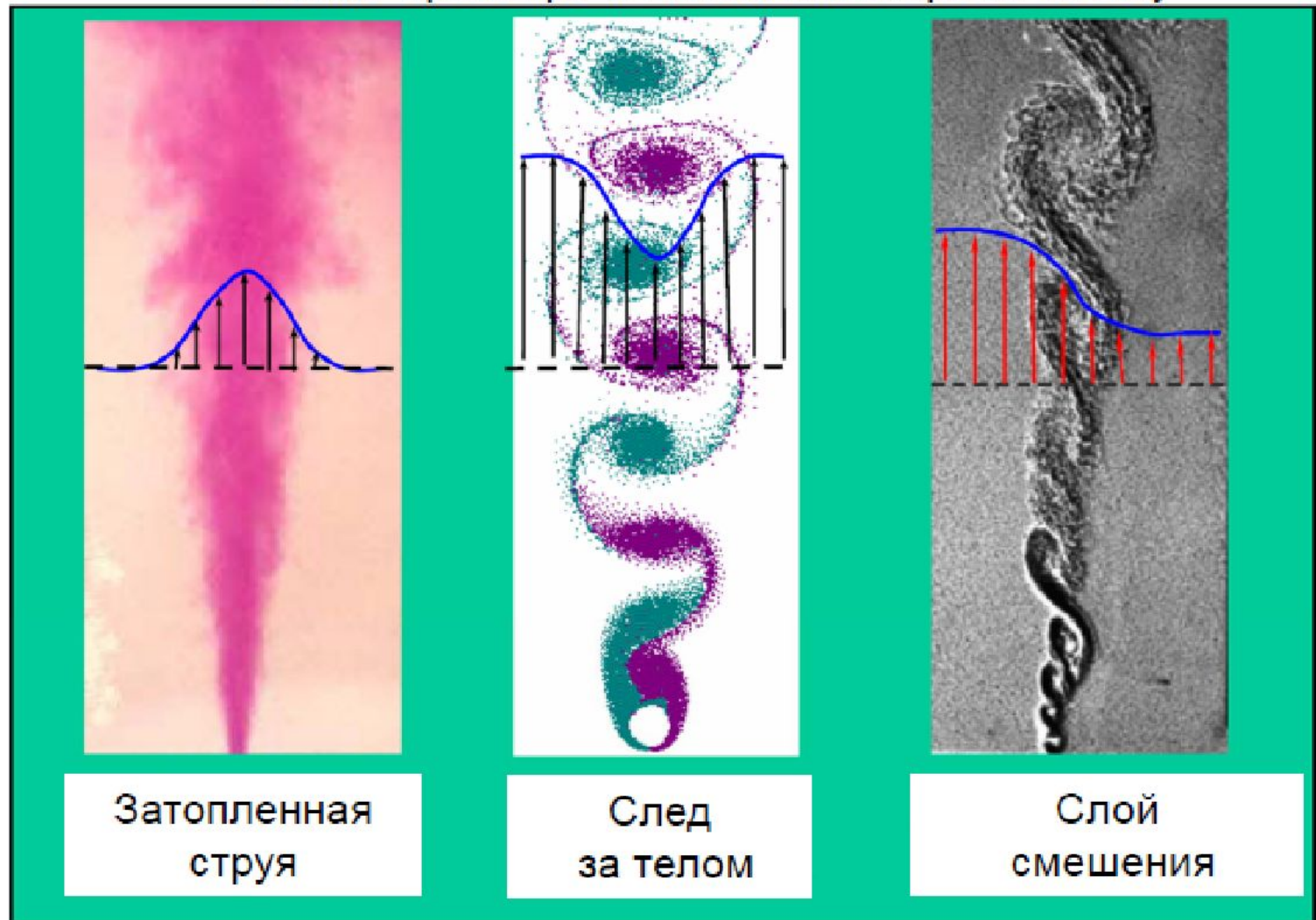
Leonardo da Vinci's illustration of the swirling flow of turbulence.
(*The Royal Collection* © 2004, Her Majesty Queen Elizabeth II)
ок. 1500 г.



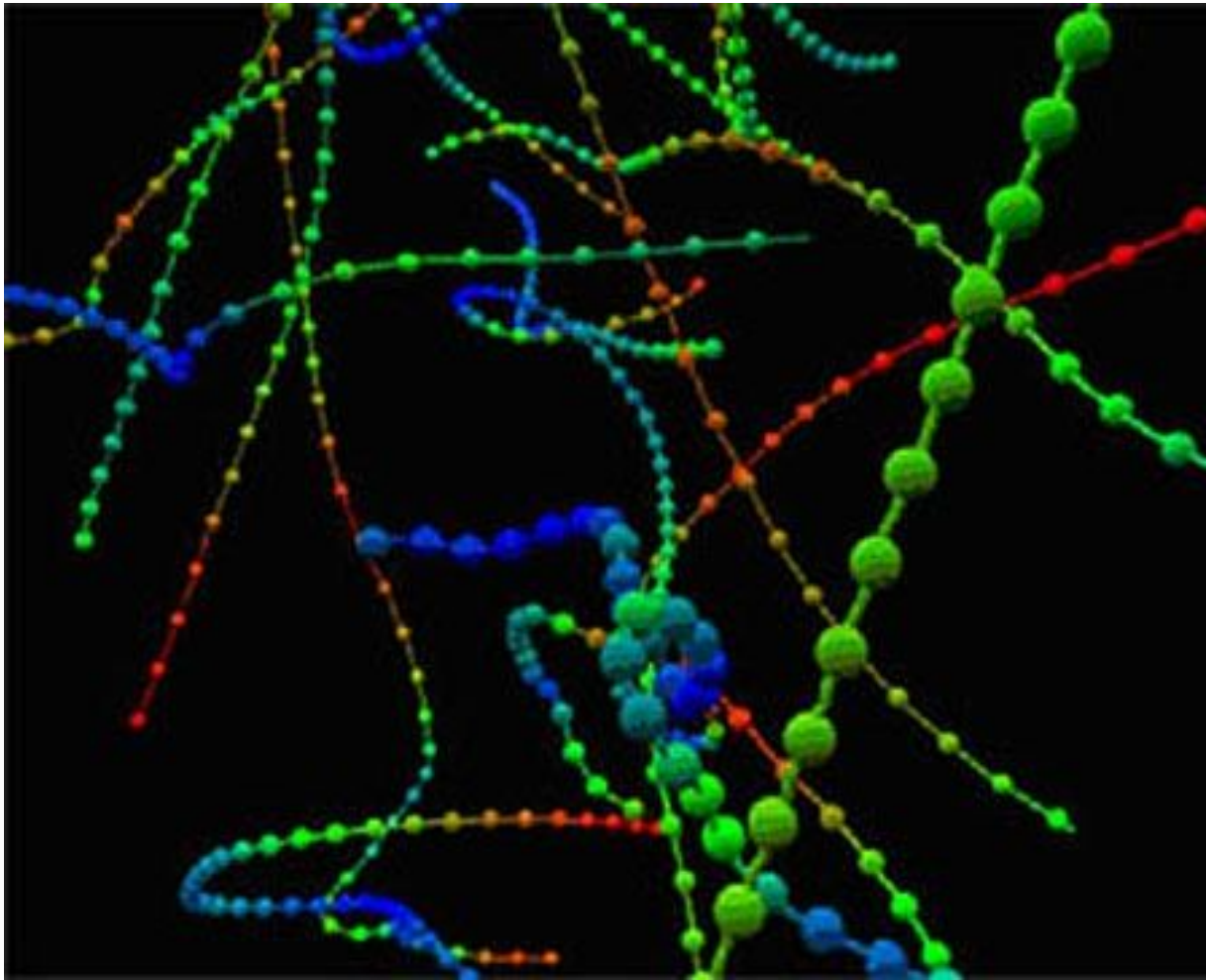
Big whorls have little whorls,
That feed of their velocity;
Little whorls have lesser whorls,
And so on to viscosity.

Lewis F. Richardson, 1920

Визуализация турбулентности

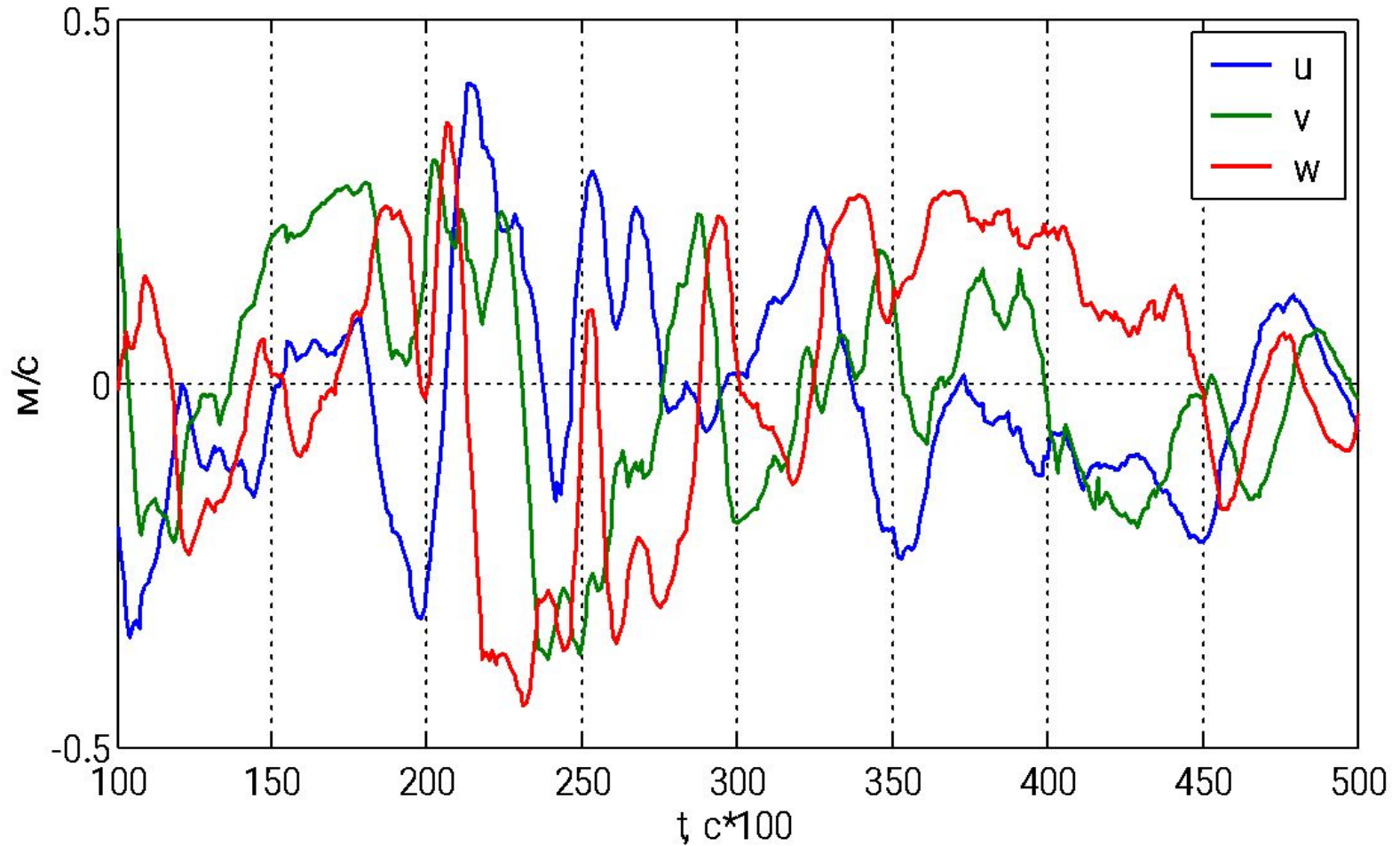


Типичные профили осредненного течения



Турбулентные движения частиц в газе. Высокоскоростная видеосъемка, цвет характеризует скорость движения

Измерения турбулентности



Временной ряд: зависимость от времени компонент скорости турбулентного течения в некоторой точке. Частота измерений 100 Гц, длительность временного отрезка на рисунке – 4 с. Измерения на глубине 3 м, измерительным комплексом «Сигма-1», 2003 г.

МОРСКАЯ
ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Динамическая турбулентность
(фрикционное перемешивание)

Гравитационная турбулентность
(конвективное перемешивание)

Вертикальная
турбулентность

Горизонтальная
турбулентность

Термохалинная
конвекция

Целлюлярная
конвекция

свободная
турбулентность

турбулентность
в пограничных
слоях

непрерывная
горизонтальная
диффузия

диффузия
дискретных
частиц (пар)

при осолонении
от льдообразо-
вания

при понижении
температуры

при осолонении
от испарения

при уплотнении
от смешения

междуслойная
турбулентность

приповерхностная
турбулентность

придонная
турбулентность

полярный
тип

арктический
тип

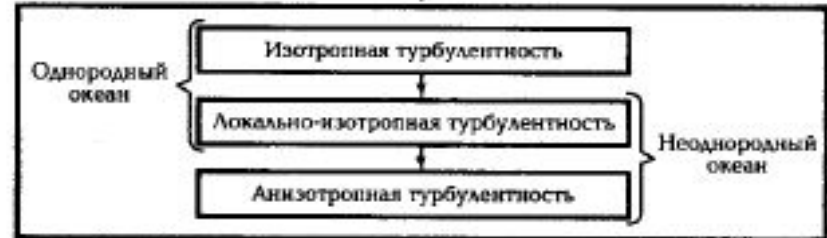
субаркти-
ческий тип

субтропи-
ческий тип

тропический
тип

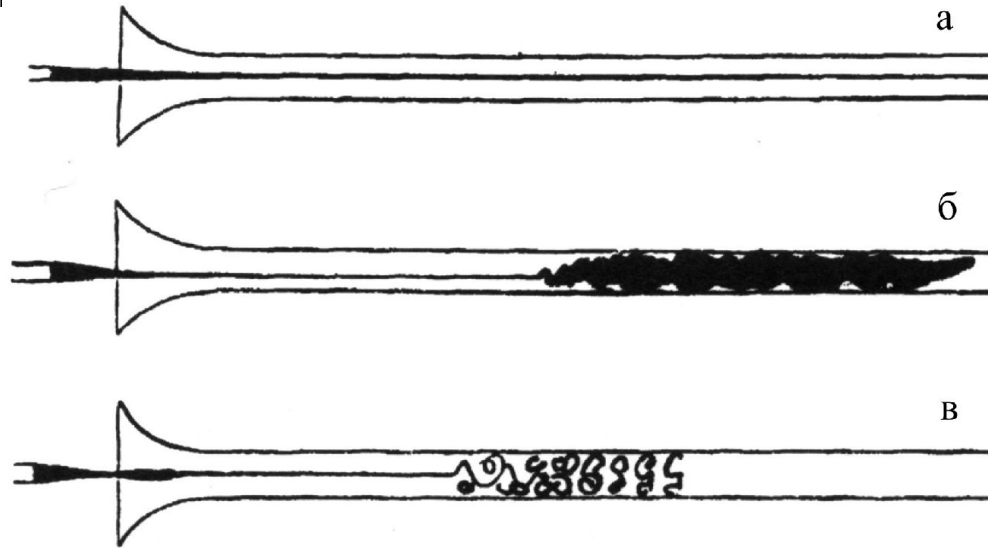
фронтальная
турбулентность

турбулентность
в промежут.
водных массах

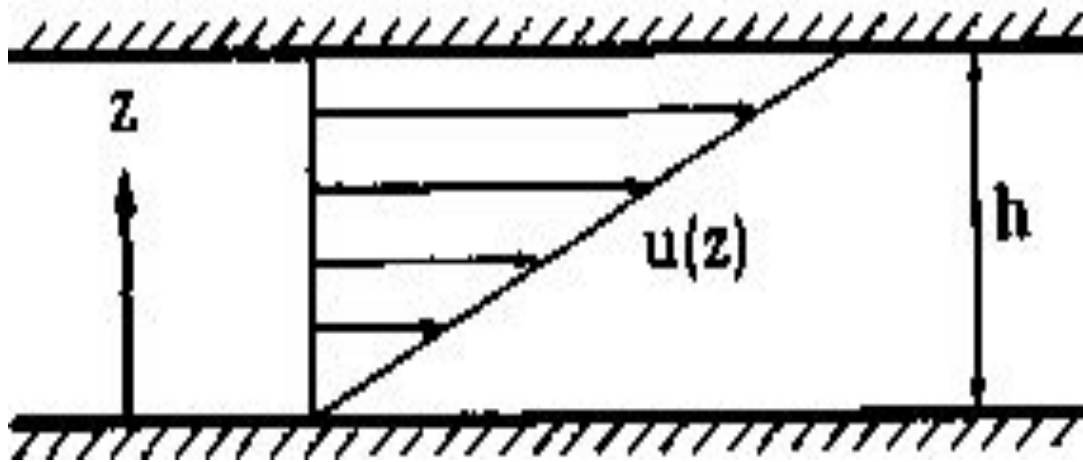


Возникновение турбулентности. Критерий Рейнольдса

Переход от ламинарного режима течения к турбулентному происходит в результате потери устойчивости. Наиболее известный в гидродинамике вид неустойчивости – сдвиговая неустойчивость (неустойчивость тангенциальных разрывов скорости или **неустойчивость Кельвина-Гельмгольца**), которая реализуется, когда один слой жидкости “скользит” по другому. Такая ситуация свойственна многим реальным природным течениям. Неустойчивости в данном случае подвержено положение границы между слоями жидкости, которые движутся с различными скоростями.



Режимы течения в экспериментах Осборна Рейнольдса: а – ламинарное течение, б – турбулентное течение, в – турбулентное течение, подсвеченное вспышкой (электрическим разрядом).



Вязкое движение жидкости между двумя плоскопараллельными пластинками (*течение Куэтта*)

$$u(z) = \frac{z}{h} u$$

Закон трения Ньютона

$$\tau = \mu \frac{du}{dz},$$

Вязкость

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{\left[\frac{du}{dz} \right]} = ML^{-1}T^{-1}$$

Вязкость морской воды при атмосферном давлении

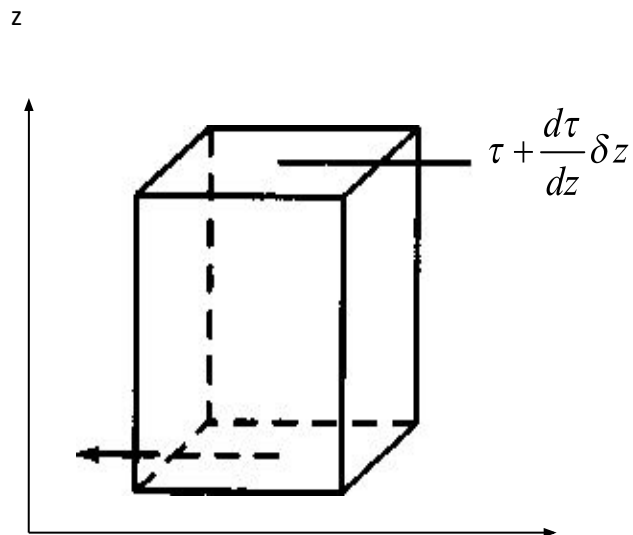
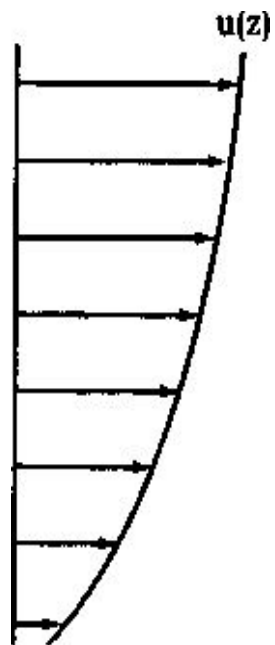
$$\mu \cdot 10^3 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$$

Соленост ь ‰	Температура, °C						
	0	5	10	15	20	25	30
0	17,9	15,2	13,1	11,4	10,1	8,9	8,0
10	18,2	15,4	13,3	11,7	10,3	9,2	8,2
20	18,4	15,7	13,6	11,9	10,5	9,3	8,3
30	18,6	15,9	13,8	12,1	10,7	9,6	8,5
35	18,8	16,1	14,0	12,2	10,8	9,7	8,6

Кинематическая вязкость

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$[\nu] = L^2 T^{-1}.$$



Равнодействующая сила сдвига

$$\left(\tau + \frac{d\tau}{dz} \right) - \tau = \frac{d\tau}{dz} \delta z$$

Сила трения $= \frac{d\tau}{dz} = \mu \frac{d^2 u}{dz^2}$

Сила инерции, отнесенная к единице объема

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} = \rho u \frac{\partial u}{\partial x}$$

Сила трения, отнесенная к единице объема

$$\text{Сила трения} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

$$\frac{\text{Сила инерции}}{\text{Сила трения}} = \frac{\rho u \frac{\partial u}{\partial x}}{\mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}} = const$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \propto \frac{U}{L}, \quad \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \propto \frac{U}{L^2}$$

$$\frac{\text{Сила инерции}}{\text{Сила трения}} = \frac{\rho u \frac{U}{L}}{\mu \frac{U}{L^2}} = \frac{\rho UL}{\mu} = const$$

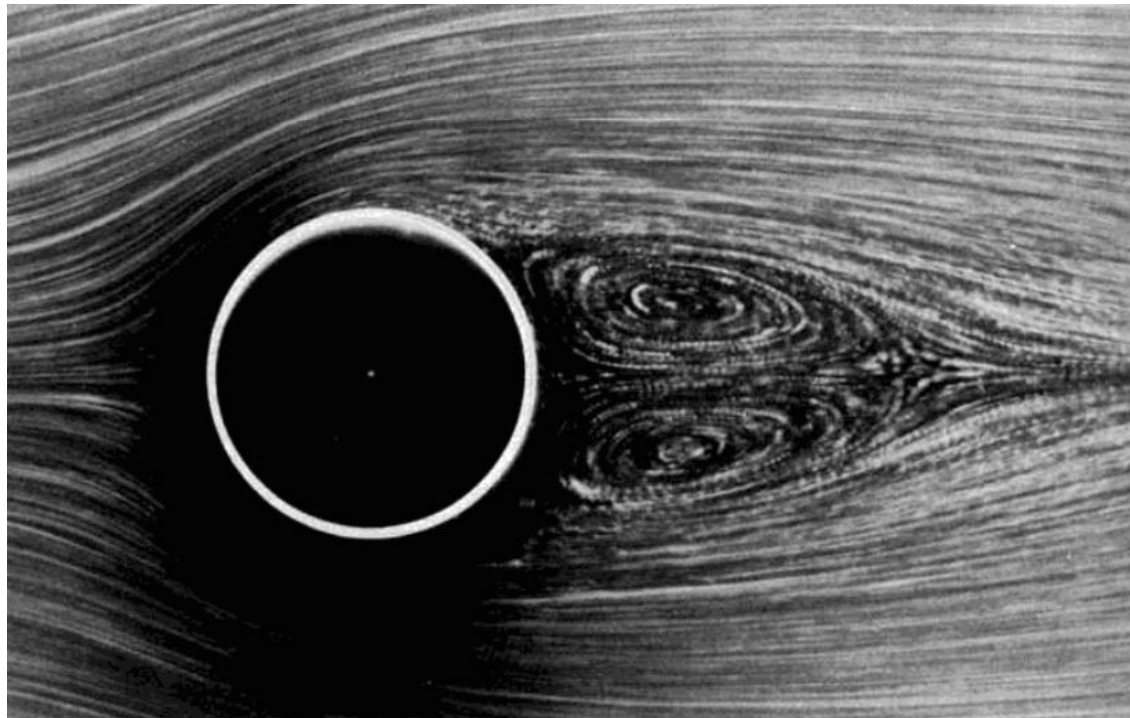
$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

Число Рейнольдса рассматривается в качестве критерия устойчивости движения

Если число Рейнольдса превышает некоторое критическое значение с $\text{Re} > \text{Re}_{\text{cr}}$, то движение неустойчиво и развивается турбулентность, в противном случае течение остается ламинарным.

Универсального для всех систем значения критического числа Re_{cr} не существует по следующим причинам:

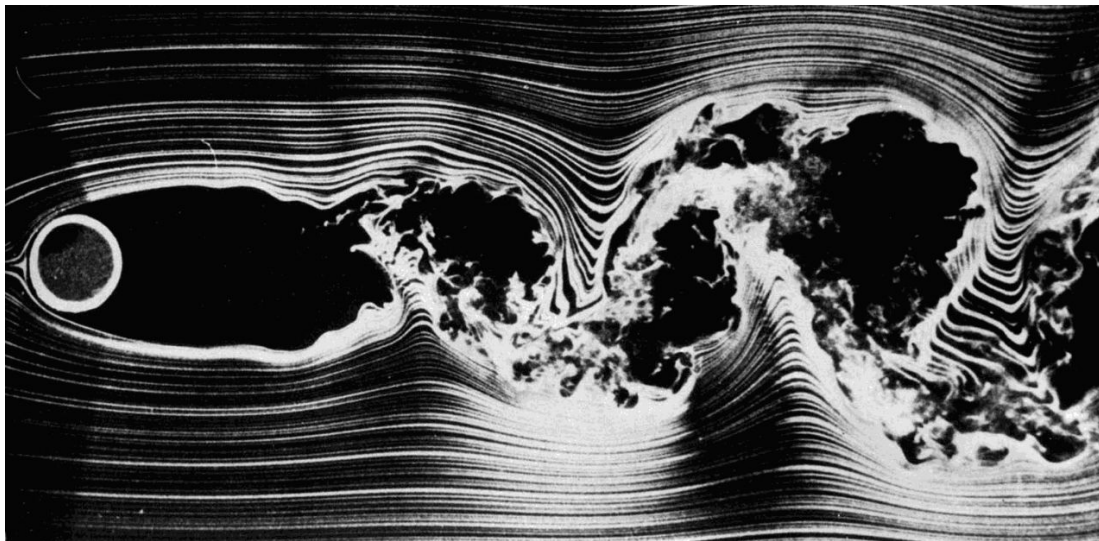
- характерные величины L и U не могут быть однозначно определены для систем с различной «геометрией»;
- значение Re_{cr} зависит от уровня фоновых возмущений.



Обтекание кругового цилиндра при $Re=26$.



Вихревая дорожка Кармана за круговым цилиндром при $Re=140$



Обтекание кругового цилиндра при $Re=10000$

Суть закона подобия, сформулированного Рейнольдсом в 1883 г. состоит в том, что течения одного типа с равным числом Рейнольдса подобны. Подобие двух течений состоит в том, что все поля могут быть получены друг из друга простым масштабным преобразованием координат и скорости.

Разделение потока на осредненную и пульсационную составляющие

$$u(t) = U + u'(t)$$

$$v(t) = V + v'(t)$$

$$w(t) = W + w'(t)$$

$$p(t) = P + p'(t),$$

Осреднение может проводиться различными способами:

- по ансамблю
- по времени
- по пространству

Осреднение по Рейнольдсу (по времени)

$$\bar{a}(t) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a(\tau) d\tau$$

Правила осреднения (по Рейнольдсу)

$$\overline{f + g} = \overline{f} + \overline{g}$$

$$\overline{af} = a \overline{f}$$

$$\overline{a} = a$$

$$\overline{\frac{\partial f}{\partial s}} = \frac{\partial \overline{f}}{\partial s}$$

$$\overline{\overline{fg}} = \overline{f} \overline{g}$$

$$\overline{\overline{f}} = \overline{f}$$

$$\overline{f'} = 0$$

$$\overline{\overline{fg}} = \overline{f} \overline{g}$$

$$\overline{\overline{fg'}} = 0$$

$$\overline{fg} = \overline{f} \overline{g} + \overline{f'g'}$$

- При рассмотрении стационарных (в среднем) течений время осреднения может быть сколь угодно большим ($T = \infty$)
- В нестационарном случае период осреднения должен быть много меньше характерных времен изменения нестационарных величин

✓ Не всегда возможно подобрать период T такой, чтобы выполнялись условия Рейнольдса

"Если T имеет величину порядка часа, тогда в член $u'(t)$ попадает маломасштабная турбулентность местного характера (например, турбулентность, вызванная действием ветрового волнения. — *O.M.*), тогда как приливные течения и сезонные изменения будут входить в член U . Если в качестве T взять неделю, тогда приливные течения попадут в член $u'(t)$. Если в качестве T взять период в десять лет, то сезонные изменения также войдут в $u'(t)$. Если T приравнять к геологической эпохе, то даже длиннопериодные вековые изменения войдут в турбулентную составляющую скорости $u'(t)$ " [Stommel, 1949].

Величины, характеризующие турбулентность

Среднее квадратичное значение пульсации

$$\overline{u'^2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'^2(t) dt$$

средняя пульсационная скорость

$$\sqrt{\frac{1}{3} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right)};$$

интенсивность пульсаций

$$\sqrt{\overline{u'^2}}; \quad \sqrt{\overline{v'^2}}; \quad \sqrt{\overline{w'^2}};$$

относительные пульсации

$$\frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U}; \quad \frac{\sqrt{\overline{v'^2}}}{V}; \quad \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{W};$$

степень турбулентности

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{3} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right)}}{U};$$

коэффициент корреляции

$$r(u, v) = \frac{\overline{u'v'}}{\sqrt{\overline{u'^2}} \cdot \sqrt{\overline{v'^2}}}$$

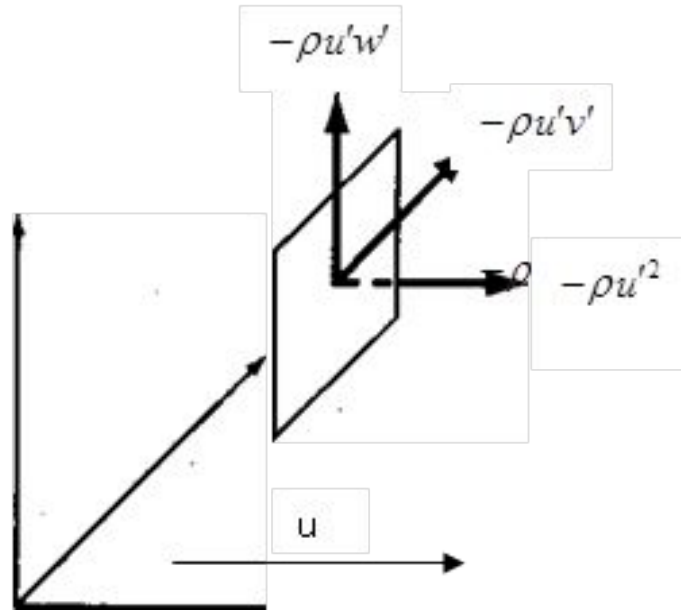
Кинетическая энергия турбулентности
на единицу объема

$$E_t = \frac{1}{2} \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$$

коэффициент автокорреляции

$$r(t) = \frac{\overline{u'(t_0) \cdot u'(t_0 + t)}}{\sqrt{[u'(t)]^2} \cdot \sqrt{[u'(t_0 + t)]^2}}$$

Турбулентные напряжения (напряжения Рейнольдса)



Средний поток импульса

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \rho u^2 dt = \overline{\rho u^2} \quad \overline{u^2} = \overline{U^2} + 2\overline{Uu'} + \overline{u'^2} \quad \longrightarrow \quad \overline{\rho u^2} = \rho U^2 + \overline{\rho u'^2}$$

$$\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \rho uv dt = \overline{\rho uv} \quad \rho uv = \rho UV + \overline{\rho u'v'} \quad \longrightarrow \quad \rho uw = \rho UW + \overline{\rho u'w'}$$

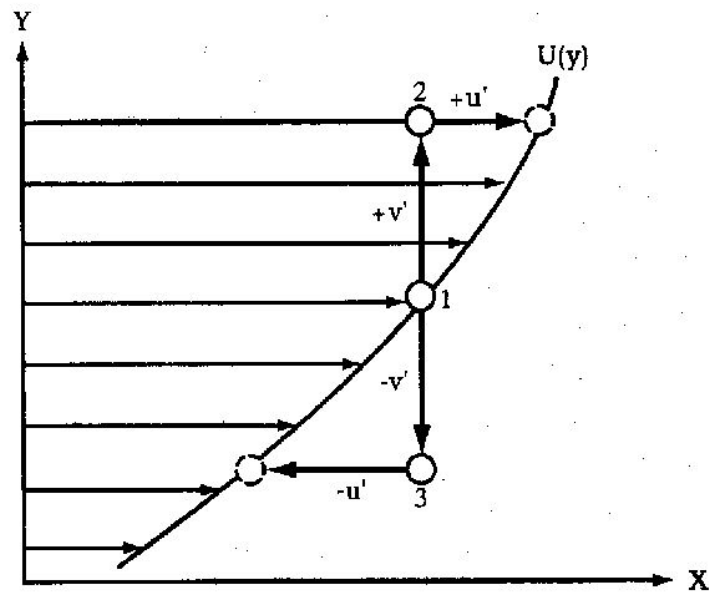
$$\sigma_x = -\rho \overline{u'^2}$$

$$\tau_{xy} = -\rho \overline{u'v'}$$

$$\tau_{xz} = -\rho \overline{u'w'}$$

Тензор напряжений Рейнольдса

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} = -\rho \begin{pmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{pmatrix}$$



Вводятся коэффициенты турбулентной вязкости

$$\overline{u'v'} = -K_y \frac{\partial U}{\partial y}$$

$$\overline{u'w'} = -K_z \frac{\partial U}{\partial z}$$

.....

Турбулентные пульсации тепла и солей

$$T(t) = \bar{T} + T',$$

$$S(t) = \bar{S} + S'.$$

Потоки тепла и солей

$$\overline{u'T'}; \quad \overline{v'T'}; \quad \overline{w'T'}$$

$$\overline{u'S'} \quad \overline{v'S'} \quad \overline{w'S'}$$

Коэффициенты турбулентной температуропроводности и диффузии

$$\overline{u'T'} = -K_{T,x} \frac{\partial T}{\partial x}; \quad \overline{v'T'} = -K_{T,y} \frac{\partial T}{\partial y}; \quad \overline{w'T'} = -K_{T,z} \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$\overline{u'S'} = -K_{S,x} \frac{\partial S}{\partial x}; \quad \overline{v'S'} = -K_{S,y} \frac{\partial S}{\partial y}; \quad \overline{w'S'} = -K_{S,z} \frac{\partial S}{\partial z}$$