

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.

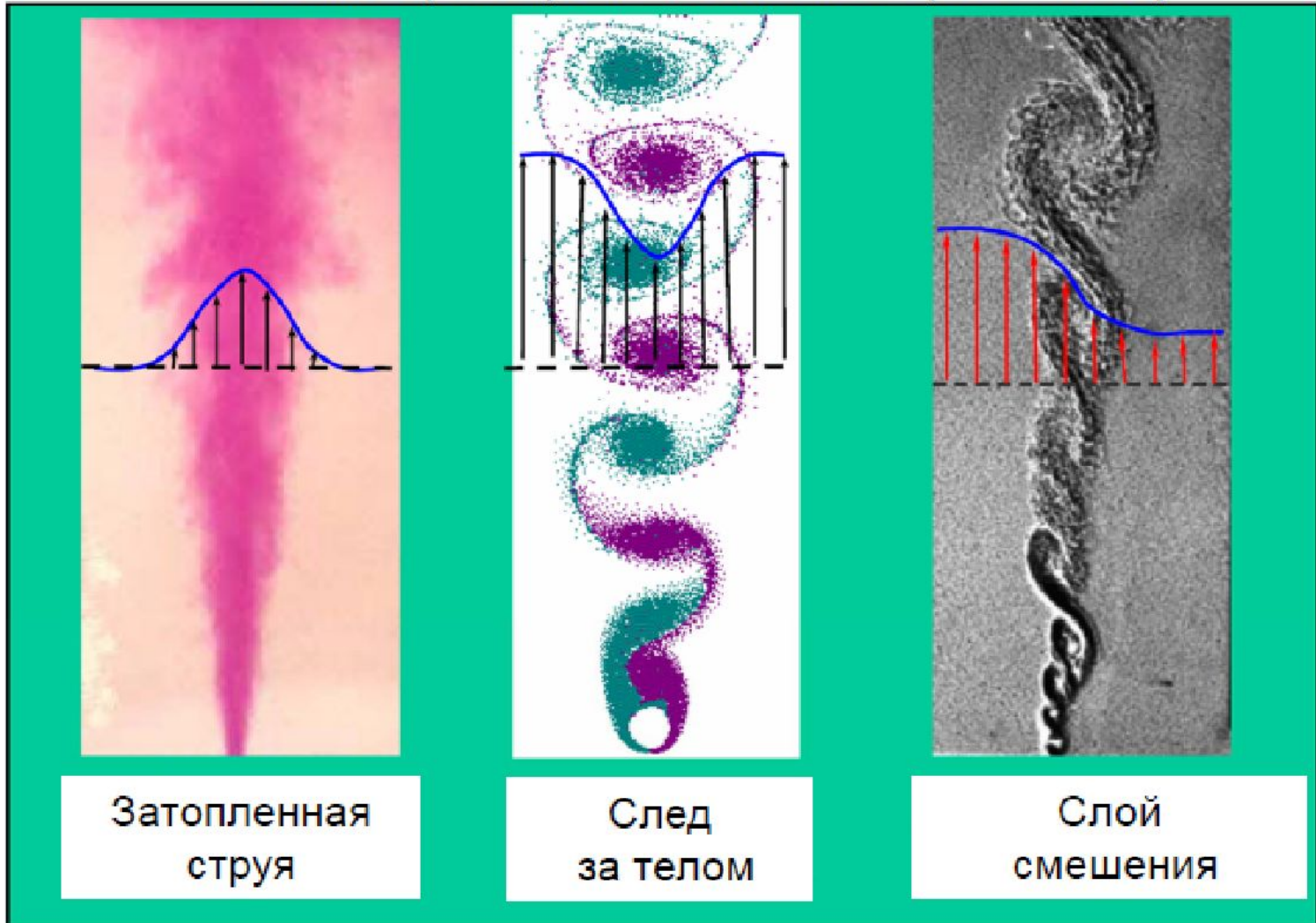
Leonardo da Vinci's illustration of the swirling flow of turbulence.
(*The Royal Collection* © 2004, Her Majesty Queen Elizabeth II)
ок. 1500 г.



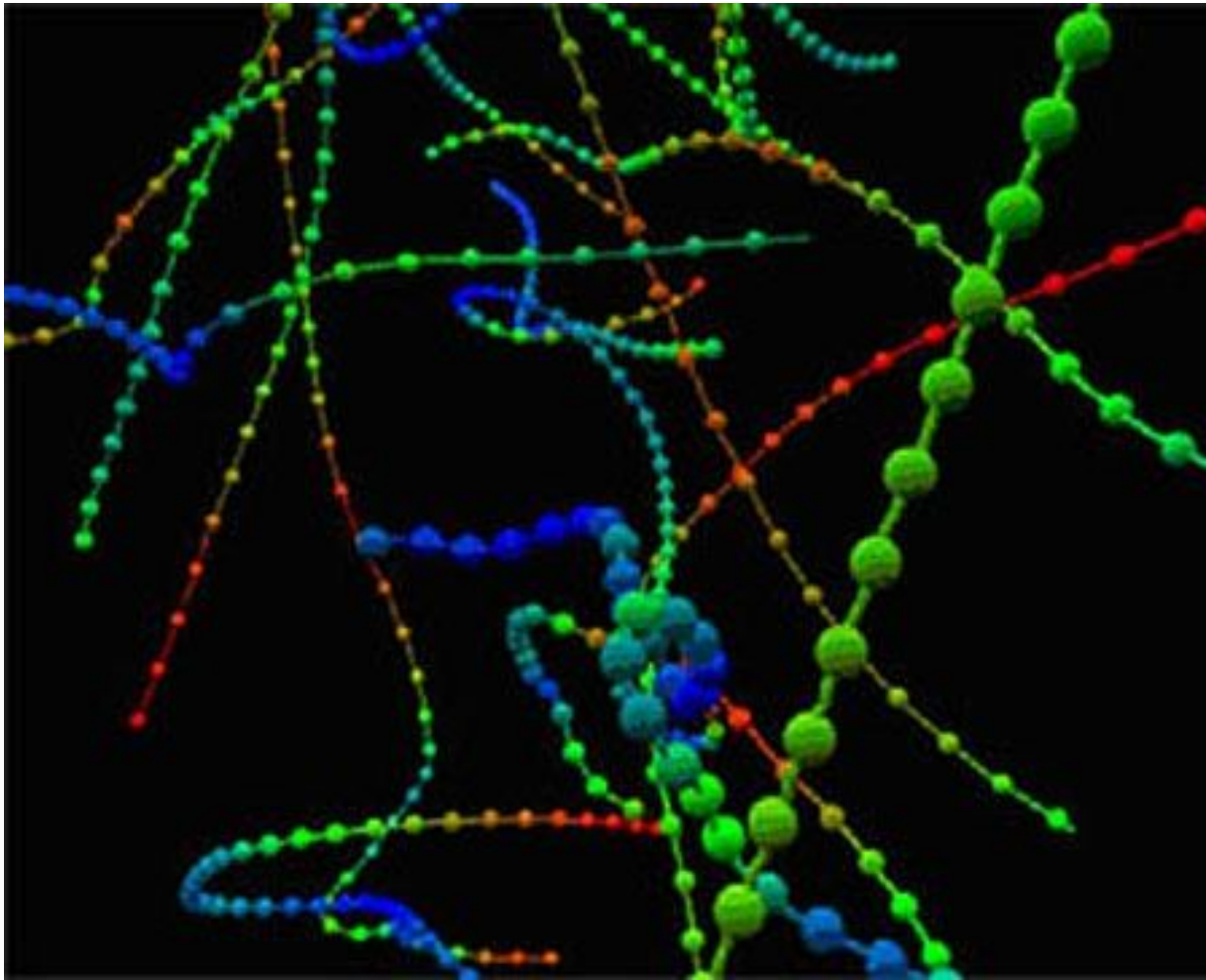
Big whorls have little whorls,
That feed of their velocity;
Little whorls have lesser whorls,
And so on to viscosity.

Lewis F. Richardson, 1920

Визуализация турбулентности

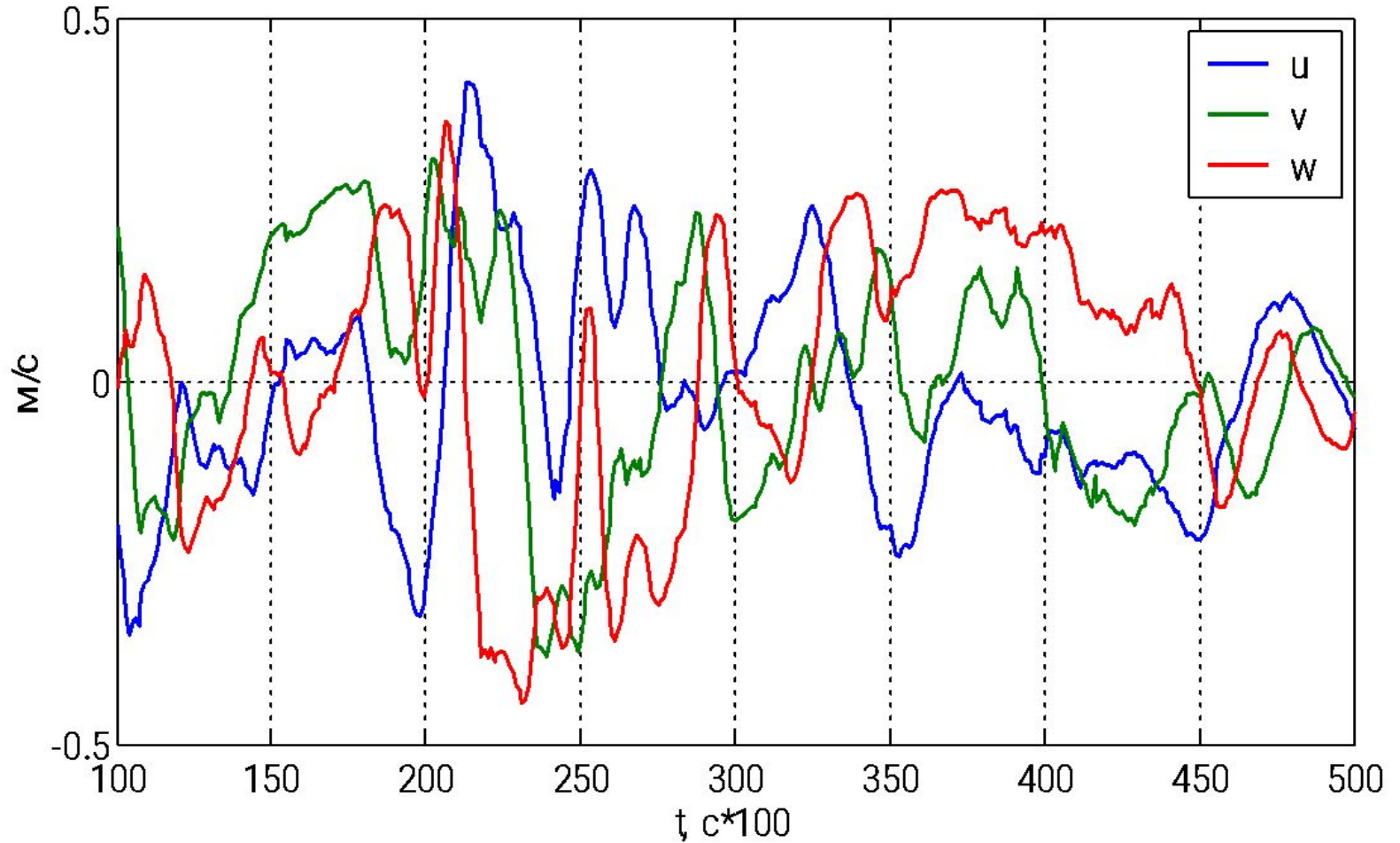


Типичные профили осредненного течения



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 льдообразования

при понижении температуры

при осолонении от испарения

при уплотнении от смешения

междуслойная турбулентность

приповерхностная турбулентность

придонная турбулентность

полярный тип

арктический тип

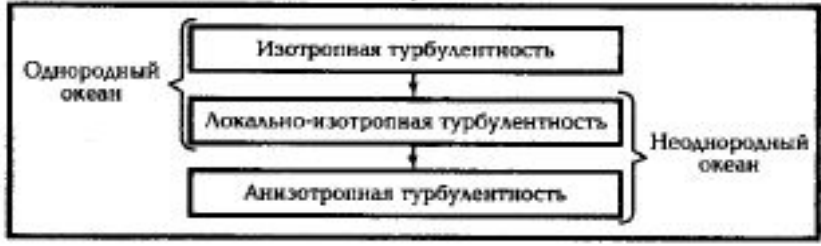
субарктический тип

субтропический тип

тропический тип

фронтальная турбулентность

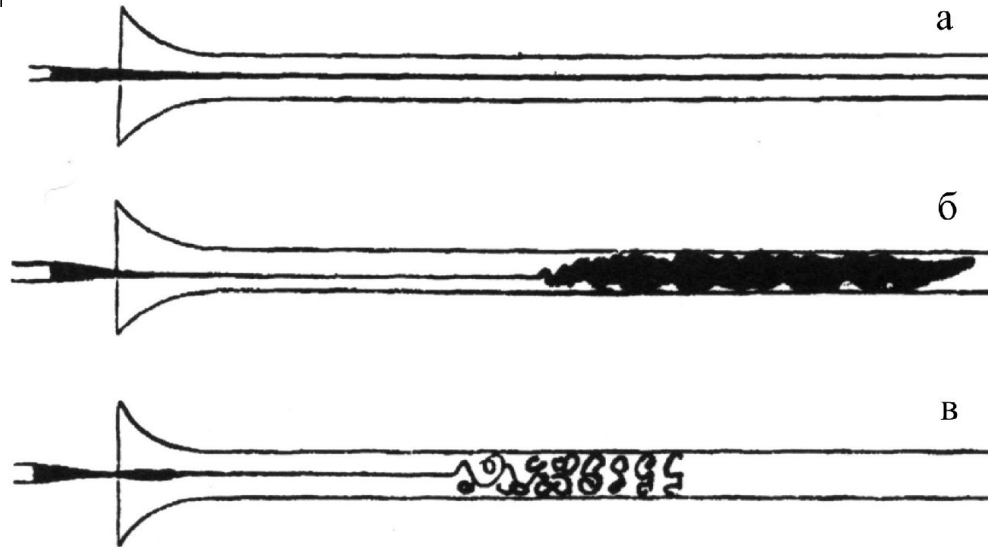
турбулентность в промежут. водных массах



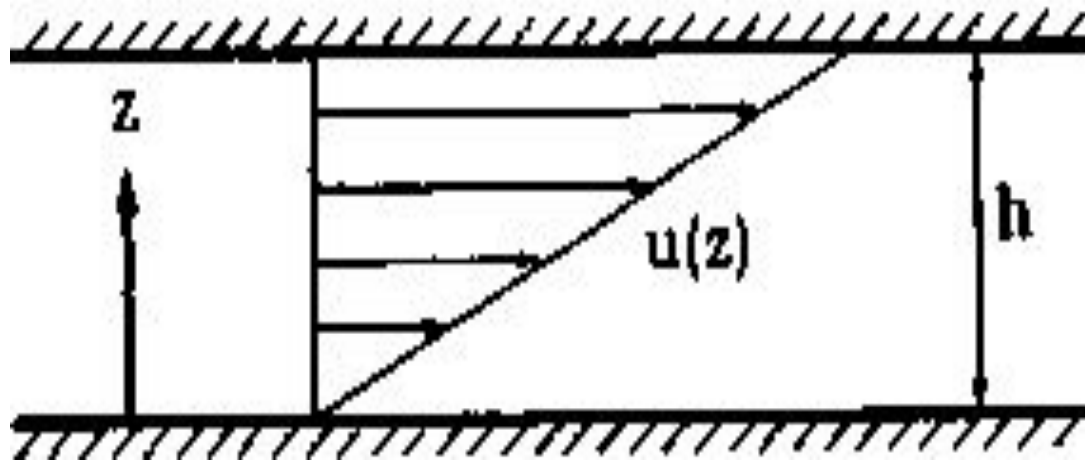
Возникновение турбулентности. Критерий

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

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

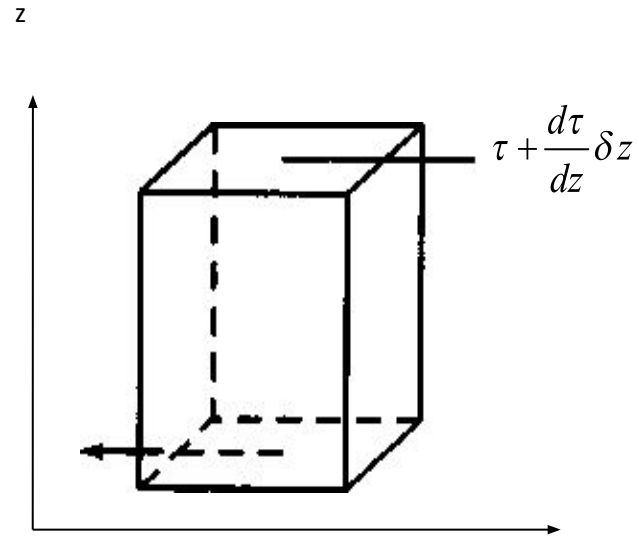
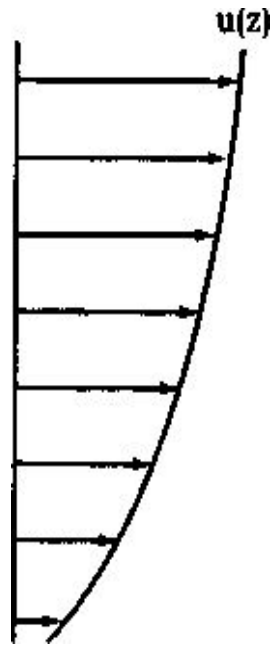
Вязкость морской воды при атмосферном давлении

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

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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [\nu] = L^2 T^{-1}.$$



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

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

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

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

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

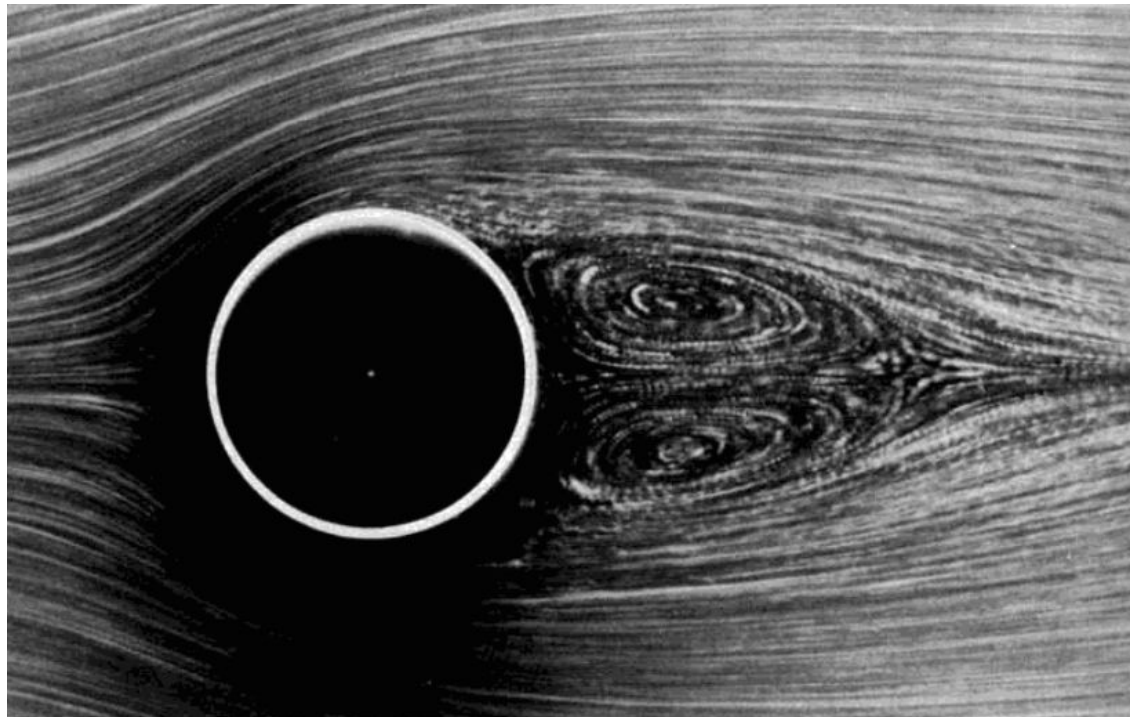
$$\text{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu}$$

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:

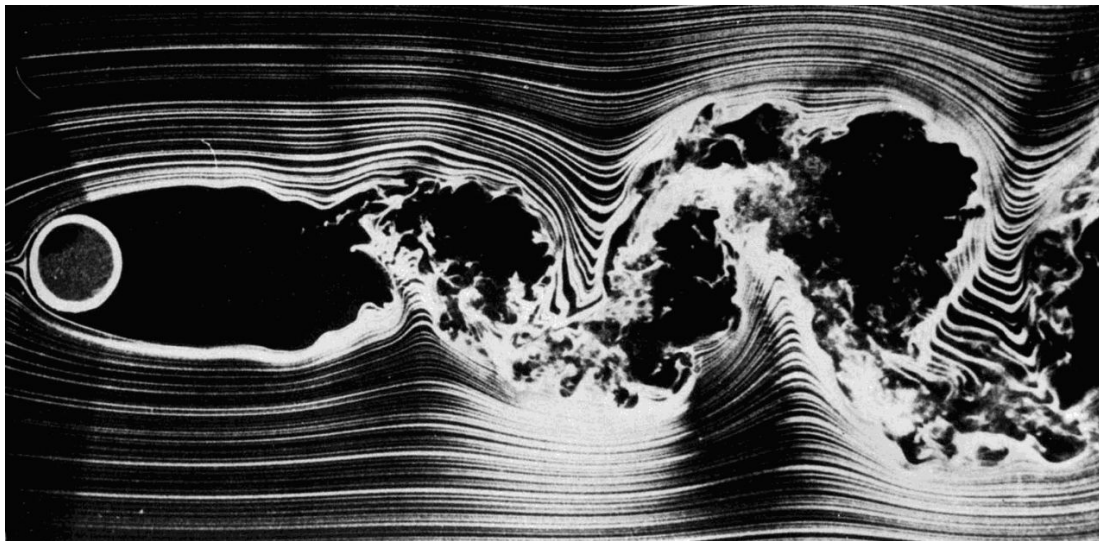
- характерные величины L и U не могут быть однозначно определены для систем с различной «геометрией»;
- значение Re_{cr} зависит от уровня фоновых возмущений.



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)

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

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

$$\overline{a} = a$$

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

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

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

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

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

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

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

- 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

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

интенсивность пульсаций

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

степень турбулентности

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

Кинетическая энергия турбулентности
на единицу объема

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

средняя пульсационная скорость

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

относительные пульсации

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

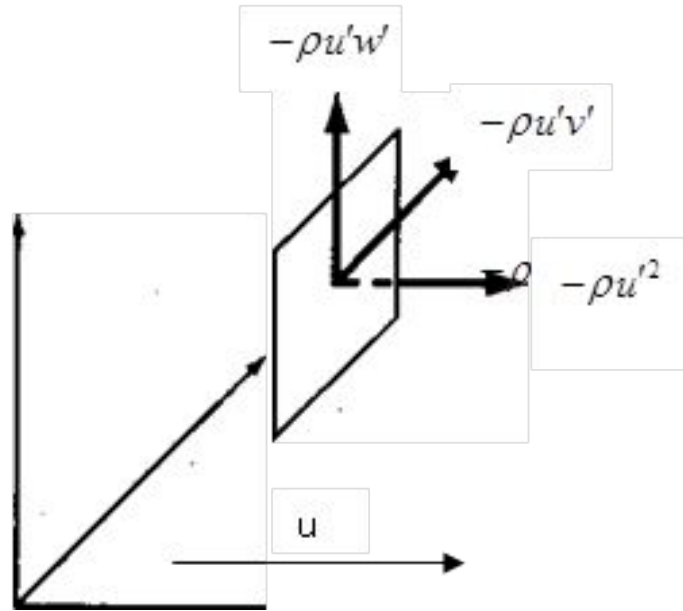
коэффициент корреляции

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

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

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

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

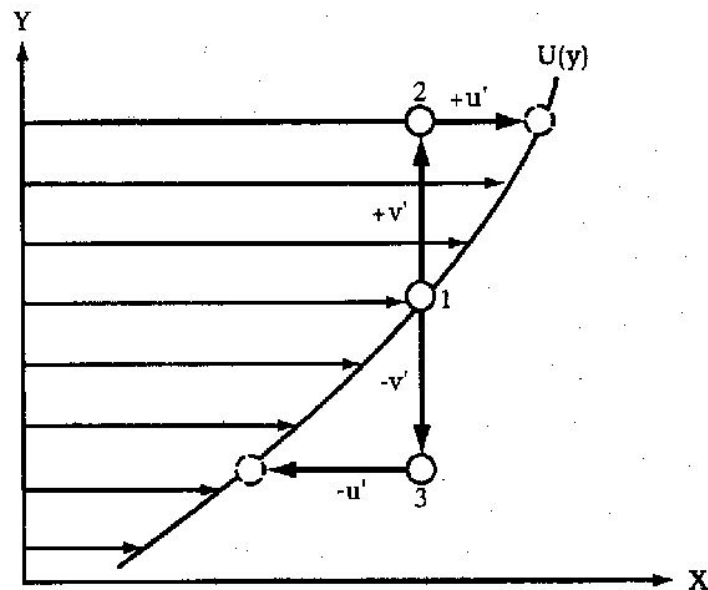
$$\sigma_x = -\rho \overline{u'^2}$$

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

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

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

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

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