

**1 Понятие субстанциальной и локальной производных.**

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v}\nabla) - \text{субстанциальная}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} - \text{локальная}$$

**2 Уравнение неразрывности для сжимаемой и несжимаемой жидкости.**

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div}(\vec{v}) = 0,$$

$$\frac{d\rho}{dt} = 0 - \text{для несжимаемой } (\operatorname{div}(\vec{v}) = 0)$$

**3 Уравнение Эйлера в векторной форме и в проекциях на оси в декартовой системе координат.**

Уравнение Эйлера описывает движение идеальной жидкости

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \vec{f}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i$$

**4 Закон сохранения энергии идеальной жидкости. Поток энергии.**

$$\int_V \left[ \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon \right) + \operatorname{div} \left( \frac{\rho v^2}{2} + W \right) \vec{v} \right] dV = 0, \text{ где}$$

$$W = \rho \varepsilon + p = \int \frac{dp}{\rho} - \text{энтальпия, } \varepsilon - \text{плотность энергии на единицу массы}$$

или в дифференциальной форме

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{N} = 0, \text{ где}$$

$$E = \frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon - \text{плотность энергии}$$

$$\vec{N} = \left[ \frac{\rho v^2}{2} + \rho \varepsilon + p \right] \vec{v} - \text{вектор плотности потока энергии}$$

**5 Закон сохранения импульса идеальной жидкости. Тензор плотности потока импульса и его представление в декартовой системе координат.**

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{v} dV = - \oint_S [p\vec{n} + \rho \vec{v}(\vec{v}\vec{n})] d\sigma = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v_i) = - \sum_{k=1}^3 \frac{\partial \Pi_{ik}}{\partial x_k} + f_i$$

$\Pi_{ik} = p\delta_{ik} + \rho v_i v_k$  - тензор ППИ

**6 Уравнение гидростатики.**

$$\operatorname{grad} p = \rho \vec{f}, \quad p = p(\rho)$$

**7 Частота Брента-Вяйсяля.**

$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}$$

Если  $N^2 < 0$ , то неустойчивость жидкости (тело всплывает или тонет). Если  $N^2 > 0$ , то жидкость устойчива (тело не двигается).

**8 Теорема Бернулли для потенциальных и не потенциальных, стационарных и нестационарных течений.**

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} - gz = \text{const} - \text{стационарное безвихревое } (\text{const во всём объёме})$$

$$\frac{v^2}{2} + W - gz = \text{const} - \text{стационарное вихревое } (\text{const на линии тока})$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} - gz = \text{const} - \text{нестационарное безвихревое}$$

**9 Теорема Томсона.**

Циркуляция скорости (Г) вдоль замкнутого контура, перемещающегося в идеальной жидкости, остается постоянной.

$$\Gamma = \oint_L \vec{v} d\vec{r} = \text{const}$$

**10 Потенциальные течения идеальной несжимаемой жидкости. Основные уравнения, граничные условия.**

$$\Delta \varphi = 0, \quad \vec{v} = \operatorname{grad}(\varphi)$$

Граничное условие не протекания:

Нормальная компонента скорости на границе с телом равна нулю.

$$\vec{v}\vec{n}|_s = \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \vec{v}_0 \vec{n}$$

Граничное условие на бесконечности:

используют значение потенциала на бесконечности.

**11 Парадокс Д'Аламбера-Эйлера.**

**Ф1.** При обтекании тела с гладкой поверхностью идеальной несжимаемой жидкостью сила лобового сопротивления, действующая на тело со стороны потока, равна нулю.

**Ф2.** Для тела, движущегося равномерно в идеальной несжимаемой жидкости постоянной плотности без границ, сила сопротивления равна нулю.

$$\vec{F} = - \oint_s p_s \vec{n} dS = 0$$

**12 Понятие присоединенной массы. Присоединенная масса сферы и единицы длины бесконечного кругового цилиндра.**

Присоединенная масса - это масса, которая добавляется к массе тела, движущегося неравномерно в жидкой среде для учета воздействия среды на это тело.

$$(M = F_{\text{сопр}}/a = \frac{\rho}{v_0^2} \int_V \int v^2 dV)$$

$$M_{\text{сферы}} = \frac{2}{3} \rho \pi R^3 \text{ (равна половине массы вытесненной жидкости)}$$

$$M_{\text{цилиндра}} = \rho(\pi R^2 * 1) \text{ (равна массе вытесненной жидкости)}$$

**13 Функция тока и ее свойства.**

Для плоского потенциального течения несжимаемой идеальной жидкости:

$$\psi = \psi(x, y, t); \quad v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$d\psi = \frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = -v_y dx + v_x dy$$

На линии тока  $\psi = \text{const}$ . Линии тока ортогональны линиям уровня  $((\nabla \psi, \nabla \varphi) = 0)$ . Функция тока - является гармонической функцией, удовлетворяющей уравнению Лапласа  $\Delta \psi = 0$ .

**14 Комплексный потенциал.**

$F(z) = \phi + i\psi$  (действительная часть - потенциал, мнимая - функция тока)

Любую аналитическую функцию комплексного переменного можно поставить в соответствие с неким плоским потенциальным течением идеальной несжимаемой жидкости.

**15 Линии тока и эквипотенциальные линии.**

**Линия тока** - это линия, касательные к которой в данный момент времени и в каждой точке совпадают с вектором скорости  $\vec{v}$

$\Psi = \text{const}$  - линии тока (постоянная функция тока)

$\varphi = \text{const}$  - эквипотенциальные линии (постоянный потенциал)

**16 Формула Жуковского.**

$$F_y = - \int p n_y dl = \rho \Gamma v_0$$

Сила пропорциональна плотности, скорости и параметру, характеризующему вихрь.

**17 Точечные вихри и их взаимодействия.**

Устремляем сечение нашей вихревой трубки к нулю, а частоту к бесконечности - получаем точечный вихрь. Скорость точечного i-ого вихря равна скорости жидкости в данной точке, создаваемой всеми остальными вихрями.

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \sum_{k \neq i} v_k^{\vec{r}_i}(\vec{r}_i)$$

## 18 Поверхностные гравитационные волны (длинные, короткие, гравитационно-капиллярные) и их основные свойства (траектории движения частиц, дисперсионные уравнения, фазовые и групповые скорости).

Траектории описываются уравнением эллипса:

$$\frac{\xi^2}{a_\xi^2} + \frac{\eta^2}{a_\eta^2} = 1, \quad a_\xi = \frac{a \operatorname{sh} k(z+H)}{\operatorname{sh} kH}, \quad a_\eta = \frac{a \operatorname{ch} k(z+H)}{\operatorname{sh} kH}$$

$\xi$  и  $\eta$  - смещения частицы по вертикали и горизонтали соответственно

$$\xi = \frac{a}{\operatorname{sh} kH} \operatorname{sh} k(z+H) \cos(kx - \omega t)$$

$$\eta = -\frac{a}{\operatorname{sh} kH} \operatorname{ch} k(z+H) \sin(kx - \omega t)$$

Дисперсионное уравнение:

$$\omega^2 = gk \operatorname{th} kH = gk \frac{e^{kH} - e^{-kH}}{e^{kH} + e^{-kH}} = gk \frac{\operatorname{sh} kH}{\operatorname{ch} kH}$$

В случае волн на мелкой воде:

$$\omega^2 = gk^2 H, \quad \omega = \pm k\sqrt{gH}, \quad v_\Phi = \frac{\omega}{k}, \quad v_{\text{гp}} = \frac{d\omega}{dk}$$

В случае волн на глубокой воде:

$$\omega = \pm\sqrt{gk}, \quad v_\Phi = \sqrt{\frac{g}{k}}, \quad v_{\text{гp}} = \frac{g}{2\sqrt{gk}} = \frac{1}{2} v_\Phi$$

В случае гравитационно-капиллярных волн:

$$\omega^2 = (gk + \gamma k^3) \operatorname{th} kH, \quad \gamma = \frac{\alpha}{\rho}$$

$$v_\Phi^2 = \omega^2 k^2 = gk + \gamma k$$

$$k_* = \sqrt{gk} - \text{минимум } v_\Phi$$

$$v_{\text{гp}} = \frac{d\omega}{dk} \Rightarrow v_{\text{гp}} = \frac{v_\Phi}{2} \frac{k_*^2 + 3k^2}{k_*^2 + k^2}$$

Если  $k \gg k_*$ , это капиллярные волны. Если  $H \ll k \ll k_*$ , то это гравитационные короткие волны (дно ещё не чувствуется). Если же  $k \ll H$ , то это длинные гравитационные волны.

## 19 Уравнение Навье-Стокса для несжимаемой вязкой жидкости в векторной форме и в проекциях на оси в декартовой системе координат.

Запись через кинематическую вязкость  $\nu = \eta/\rho$ :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \nabla) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} + \vec{f}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \sum_{k=1}^3 \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_k^2} + f_i$$

## 20 Тензор вязких напряжений, физический смысл, представление в декартовой системе координат.

Общий вид тензора вязких напряжений (при относительном смещении слоёв жидкости, зависимость  $\sim \eta$  линейна, жидкость будем считать изотропной):

$$\sigma_{ik} = a \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) + c \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right) + b \sum_l \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{ik}$$

Переобозначим константы  $a = \eta$ ,  $b = \xi$ . Тогда тензор вязких напряжений перепишется как

$$\sigma_{ik} = \eta \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) + \xi \sum_l \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{ik}$$

Тензор вязких напряжений - это тензор, используемый для моделирования части напряжения в точке внутри некоторого материала, которая может быть отнесена к скорости деформации, т.е. скорости, с которой материал деформируется вокруг этой точки.

## 21 Граничные условия для несжимаемой вязкой жидкости на поверхности твердого тела и свободной поверхности.

В случае вязкой жидкости скорость жидкости на границе с телом равна скорости тела:

$$v_{\text{жидк}}|_s = v_{\text{тела}}$$

При рассмотрении гидродинамики слоя жидкости на верхней границе:

$$f_i = \sigma_{ik} n_k = \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0$$

## 22 Формула Пуазейля для расхода жидкости.

$$Q = 2\pi \int_0^R v(r) r dr = \frac{\pi}{8\eta} \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) R^4$$

## 23 Скин-слой.

Поскольку среда вязкая, возмущения передаются вверх, но затухают на характерном масштабе толщины скин-слоя

$$\delta = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}$$

## 24 Числа Рейнольдса, Фруда, Струхалы и их физический смысл.

$$Re = \frac{v_0 l}{\nu} = \frac{2v_0 R}{\nu} = \frac{V_{\text{ср}} H}{\nu}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} - \text{кинематический коэффициент вязкости}$$

Число Рейнольдса показывает относительное влияние нелинейных эффектов. Если  $Re$  мало, то можно пренебречь в уравнении движения вязкой жидкости всем, кроме давления.

$$Fr = \frac{v_0^2}{gl}$$

Число Фруда описывает отношение кинетической энергии жидкости к потенциальной (энергии гравитационных сил).

$$Sh = \frac{v_0 T}{l}$$

Число Струхалы характеризует стационарность. Если  $Sh \gg 1$  можно пренебречь нестационарностью.

## 25 Формула Стокса.

Сила сопротивления, действующая на маленькое тело, движущееся в жидкости.

$$F = 6\pi\eta R v_0, \quad Re \ll 1$$

$$F = 6\pi\eta R v_0 \left( 1 + \frac{3}{16} Re \right)$$

## 26 Зависимость ширины пограничного слоя от параметров.

Пограничный слой - слой, где скорость меняется от нуля до скорости, соответствующей скорости обтекания тела идеальной жидкостью.

Во-первых, чем больше вязкость, тем толще пограничный слой. Кроме того, чем дальше по  $x$ , тем слой толще. И, наконец, чем больше скорость, тем больше пограничный слой должен быть прижат к пластине.

## 27 Уравнения линейной акустики. Волновое уравнение.

Уравнение Эйлера, уравнение непрерывности и последнее уравнение - состояния:

$$\frac{\partial \vec{v}'}{\partial t} = -\frac{\nabla p'}{\rho_0}, \quad \frac{\partial \rho'}{\partial t} + \rho_0 c^2 \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad p' = c^2 \rho'$$

$$\text{Здесь } p = p_0 + p', \quad v = v_0 + v', \quad \rho = \rho_0 + \rho'$$

$$p_0 \gg p', \quad v_0 \gg v', \quad \rho_0 \gg \rho'$$

Величины с индексом 0 равновесная среда, штрихами обозначены добавки, возникающие при распространении звука.

$$M = \frac{v}{c} = \frac{p'}{p_0} = \frac{\rho'}{\rho_0} - \text{число Маха, } M \ll 1$$

$$\text{Волновое уравнение: } \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2 \Delta \varphi = 0$$

## 28 Монохроматические волны, уравнение Гельмгольца

$$\text{Уравнение Гельмгольца: } \Delta \Phi_0 + k_0^2 \Phi_0 = 0, \quad k_0 = \frac{\omega}{c}$$

$$\text{Простейшее решение - плоские волны: } \Phi_0 = e^{i(\vec{k}, \vec{r})}$$

В случае  $\vec{k} = \vec{k}_1 + i\vec{k}_2$  (неоднородная плоская волна):

$$\Phi_0 = e^{i(\vec{k}_1, \vec{r})} e^{-(\vec{k}_2, \vec{r})}. \text{ Всякую волну можно представить в виде суперпозиции плоских монохроматических волн с различными волновыми векторами и частотами.}$$

## 29 Закон сохранения энергии (звуковой волны)

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{J} = 0$$

$$\vec{J} = \rho \vec{v} - \text{вектор Умова-Пойнтинга - интенсивность звуковой волны, сила звука.}$$

$$E = \rho \frac{v^2}{2} + \frac{p^2}{2\rho_0 c^2} - \text{полная энергия звуковой волны.}$$