

# Кавитация и высота всасывания насосов

Дисциплина: “Нагнетатели и тепловые двигатели. Часть 2. Энергетические насосы”

## Вопросы:

1. Кавитация насосов
2. Высота всасывания насосов

## Основная литература

1. П.И. Сыромаха, В.Л. Плешанов, Н.Н. Гладышев, В.Д. Иванов, Т.Ю. Короткова. Насосы конденсатных систем: учеб. пособие/ СПбГТУРП.- СПб., 2002
2. Н.Н. Гладышев, В.В. Филатов, Т.Ю. Короткова, В.Д. Иванов. Технологические энергоносители предприятий (Воздухоснабжение предприятий): учеб. пособие/ СПбГТУРП.- СПб., 2008

## 1. Кавитация насосов

Кавитация – вскипание жидкости при падении давления в потоке  $p_{min}$  до давления насыщения  $p_{II}$

$$p_{min} = p_{II}$$



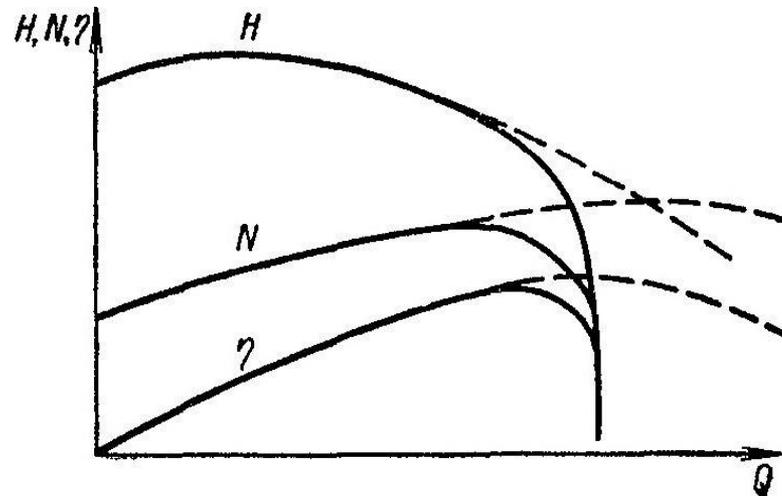
Кавитационный след  
гребного винта



Повреждения рабочего  
колеса



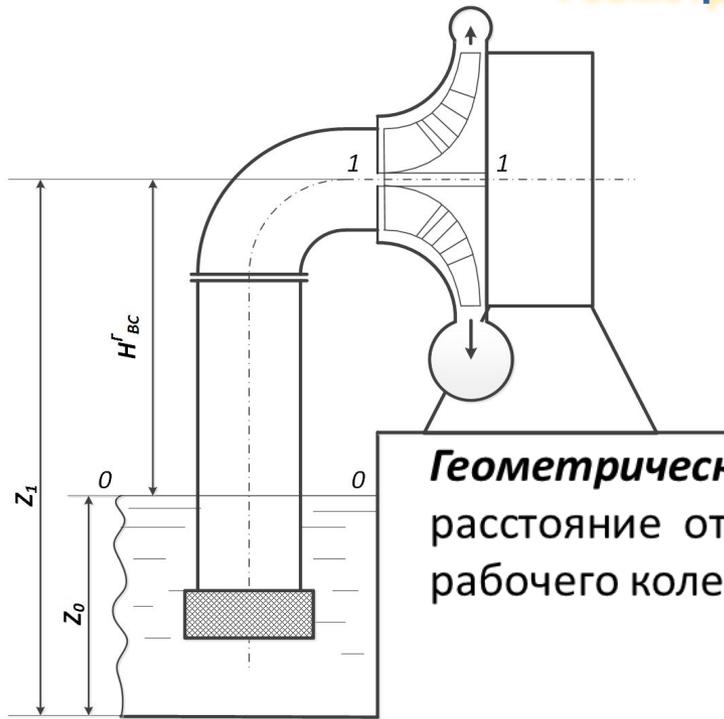
Кавитационная эрозия  
поверхности улитки  
насоса



Влияние кавитации на характеристики насоса

## 2. Высота всасывания насосов

### Геометрическая высота всасывания



Определение высоты всасывания

$$z_0 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_{BC}^{\Pi} \quad (1)$$

где  $h_{BC}^{\Pi}$  – потери во всасывающем трубопроводе, м;

$p_0$  – давление в резервуаре, Па;

$p_1$  – давление на входе в насос, Па;

$v_1$  – скорость жидкости на входе в насос, м/с.

**Геометрическая высота всасывания  $H_{BC}^{\Gamma}$**  – вертикальное расстояние от уровня жидкости в приемном резервуаре до центра рабочего колеса насоса

$$H_{BC}^{\Gamma} = z_1 - z_0 \quad (2)$$

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} - H_{BC}^{\Gamma} - \frac{v_1^2}{2g} - h_{BC}^{\Pi} \quad (3)$$

## 2. Высота всасывания насосов

### Кавитационный запас

**Кавитационным запасом** называется превышение полного напора жидкости во входном патрубке насоса над давлением ее насыщенного пара

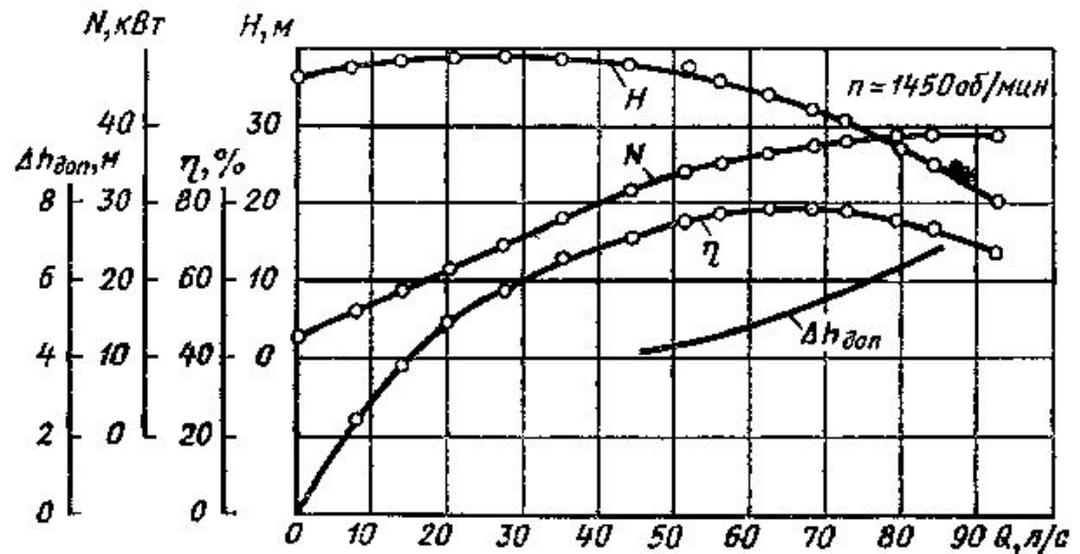
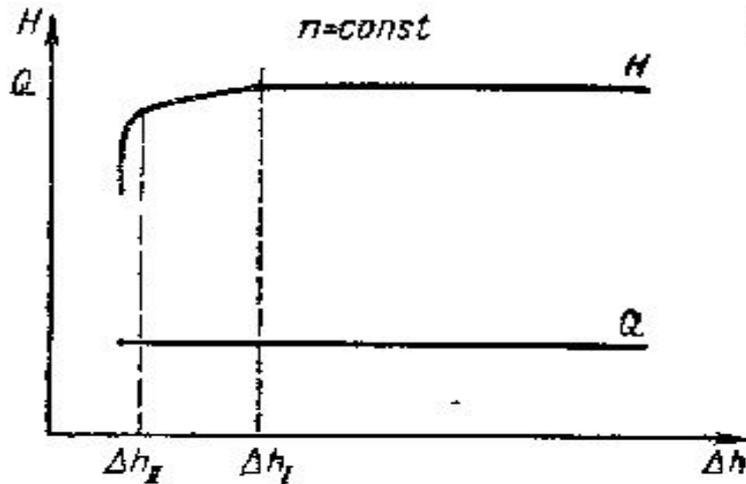
$$\Delta h = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_{\text{П}}}{\rho g} \quad (4)$$

Кавитационный запас, при котором происходит кавитация, называется **критическим**

$$\Delta h_{\text{КР}} = \frac{p_{1\text{КР}}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_{\text{П}}}{\rho g} \quad (5)$$

**допустимый** кавитационный запас

$$\Delta h_{\text{ДОП}} = (0,1 \div 0,3) \Delta h_{\text{КР}} \quad (6)$$



Характеристика центробежного насоса, полученная экспериментально

Кавитационная характеристика насоса

## 2. Высота всасывания насосов

### Максимально допустимая высота всасывания

Из уравнения (3) высота всасывания

$$H_{\text{ВС}}^{\Gamma} = \frac{p_0}{\rho g} - \left( \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - h_{\text{ВС}}^{\Pi} \quad (7)$$

Из уравнения (4)

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \Delta h + \frac{p_{\Pi}}{\rho g} \quad (8)$$

Подставив (8) в (7), получим

$$H_{\text{ВС}}^{\Gamma} = \frac{p_0}{\rho g} - \Delta h - \frac{p_{\Pi}}{\rho g} - h_{\text{ВС}}^{\Pi} \quad (9)$$

**Максимальная геометрическая высота всасывания –  $p_0/\rho g$**

**допустимый вакуум на входе в насос – вакуумметрическая высота всасывания**

$$H_{\text{ВС}}^{\text{ВАК}} = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} \quad (10)$$

Из уравнения (4)

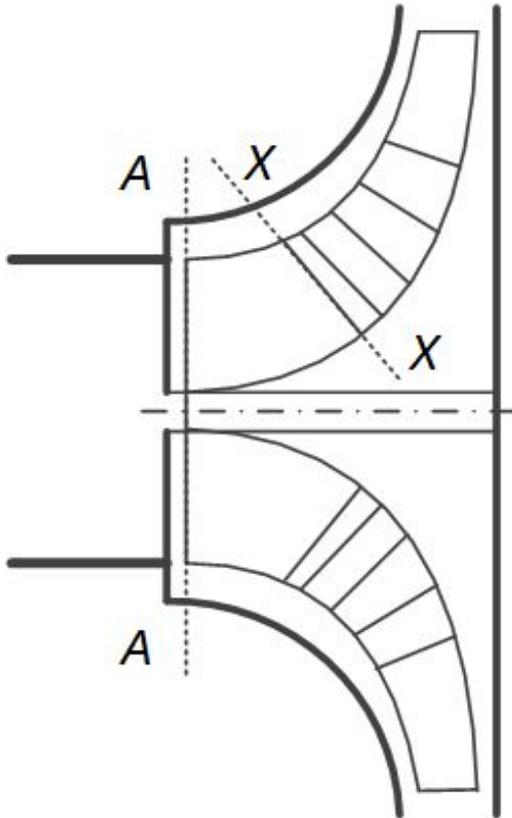
$$\frac{p_1}{\rho g} = \Delta h - \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_{\Pi}}{\rho g} \quad (11)$$

Подставив (11) в (10), получим

$$H_{\text{ВС}}^{\text{ВАК}} = \frac{p_0}{\rho g} - \frac{p_{\Pi}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \Delta h \quad (12)$$

## 2. Высота всасывания насосов

### Критическое число кавитации



$$\frac{p_A}{\rho g} + \frac{w_A^2}{2g} = \frac{p_{min}}{\rho g} + \frac{w_X^2}{2g} \quad (9)$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{p_{min}}{\rho g} &= \frac{p_A}{\rho g} + \frac{w_A^2}{2g} - \frac{w_X^2}{2g} = \frac{p_A}{\rho g} + \frac{w_A^2 w_X^2}{2g w_X^2} - \frac{w_X^2 w_A^2}{2g w_A^2} = \\ &= \frac{p_A}{\rho g} + \frac{w_A^2}{2g} \left( 1 - \frac{w_X^2}{w_A^2} \right) = \frac{p_A}{\rho g} - \frac{w_A^2}{2g} \left( \frac{w_X^2}{w_A^2} - 1 \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Кавитация начинается при  $p_{min} = p_{\Pi}$

При этом

$$\left( \frac{w_X}{w_A} \right)^2 - 1 = \frac{p_A - p_{\Pi}}{\rho w_A^2 / 2} = \lambda \quad (11)$$

**критическое число  
кавитации**

## 2. Высота всасывания насосов

### Критическое число кавитации

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_A}{\rho g} + \frac{v_A^2}{2g} \quad (12)$$

Из уравнений (9) и (10) получим

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_{min}}{\rho g} = \frac{v_A^2}{2g} + \lambda \frac{w_A^2}{2g} \quad (13)$$

Для кавитационных режимов  $p_{min} = p_{\Pi}$

$$\frac{p_{1КР}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_{\Pi}}{\rho g} = \frac{v_A^2}{2g} + \lambda \frac{w_A^2}{2g} \quad (14)$$

Или, согласно уравнению (5)

$$\Delta h_{КР} = \frac{v_A^2}{2g} + \lambda \frac{w_A^2}{2g} \quad (15)$$

***основное расчетное уравнение кавитации***

## 2. Высота всасывания насосов

### Кавитационный коэффициент быстроходности

$$v_{\text{ВХ}} \sim u$$

где  $n$  – скорость вращения рабочего колеса;

$D_{\text{ВХ}}$  – диаметр рабочего колеса;

$L$  – характерный линейный размер насоса.

Подача насоса

$$Q = v_{\text{ВХ}} \frac{\pi D_{\text{ВХ}}^2}{4} \sim nL^3 \quad (17)$$

Для двух насосов 1 и 2

$$\frac{Q_1}{Q_2} \sim \frac{n_1}{n_2} \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^3 \quad (18)$$

Критический кавитационный запас рассчитывается по выражению (5)

$$\Delta h_{\text{КР}} = \frac{p_{1\text{КР}}}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_{\text{П}}}{\rho g}$$

Правая часть – разница пьезометрических напоров

$$\frac{p_{1\text{КР}}}{\rho g} - \frac{p_{\text{П}}}{\rho g} = \frac{\Delta p_{\text{КР}}}{\rho g} \quad (19)$$

$$\frac{\Delta p_{\text{КР}}}{\rho g} \approx \Delta H_{\text{СТ}} \sim v_{\text{ВХ}}^2 \quad (20)$$

Поэтому

$$\Delta h_{\text{КР}} \sim (nL)^2 \quad (21)$$

Для двух насосов

$$\frac{\Delta h_{\text{КР}1}}{\Delta h_{\text{КР}2}} = \left( \frac{n_1 L_1}{n_2 L_2} \right)^2 \quad (22)$$

## 2. Высота всасывания насосов

### Кавитационный коэффициент быстроходности

Выразим в (18) и (22) линейный размер  $L$ .

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt[3]{\frac{Q_1 n_2}{Q_2 n_1}} = \left( \frac{Q_1 n_2}{Q_2 n_1} \right)^{1/3} \quad (23)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{n_2^2}{n_1^2} \sqrt{\frac{\Delta h_{\text{кр}1}}{\Delta h_{\text{кр}2}}} = \left( \frac{\Delta h_{\text{кр}1} n_2^2}{\Delta h_{\text{кр}2} n_1^2} \right)^{1/2} \quad (24)$$

Приравняем правые части

$$\left( \frac{Q_1 n_2}{Q_2 n_1} \right)^{1/3} = \left( \frac{\Delta h_{\text{кр}1} n_2^2}{\Delta h_{\text{кр}2} n_1^2} \right)^{1/2} \quad (25)$$

Возведем обе части в степень  $3/2$

$$\left( \frac{Q_1 n_2}{Q_2 n_1} \right)^{1/2} = \left( \frac{\Delta h_{\text{кр}1} n_2^2}{\Delta h_{\text{кр}2} n_1^2} \right)^{3/4} \quad (26)$$

## 2. Высота всасывания насосов

### Кавитационный коэффициент быстроходности

Соберем  $n$  в левой части уравнения и преобразуем ее

$$\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{1/2} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{1/2} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{3/2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^{1/2} \frac{n_1^{3/2-1/2}}{n_2^{3/2-1/2}} = \frac{n_1\sqrt{Q_1}}{n_2\sqrt{Q_2}} \quad (27)$$

Получилось уравнение

$$\frac{n_1\sqrt{Q_1}}{n_2\sqrt{Q_2}} = \left(\frac{\Delta h_{\text{кр}1}}{\Delta h_{\text{кр}2}}\right)^{3/4} \quad (28)$$

Разделим левую часть на правую и умножим обе части на  $10^{3/4}$

$$\frac{n_1\sqrt{Q_1}}{(\Delta h_{\text{кр}1}/10)^{3/4}} = \frac{n_2\sqrt{Q_2}}{(\Delta h_{\text{кр}2}/10)^{3/4}} \quad (29)$$

Следовательно, величина

$$C = \frac{n\sqrt{Q}}{(\Delta h_{\text{кр}}/10)^{3/4}} \quad (30)$$

***кавитационный коэффициент быстроходности*** (С.С. Руднева)