Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

Основы теории центробежных насосов

Дисциплина: “Нагнетатели и тепловые двигатели. Часть 2”

Вопросы:

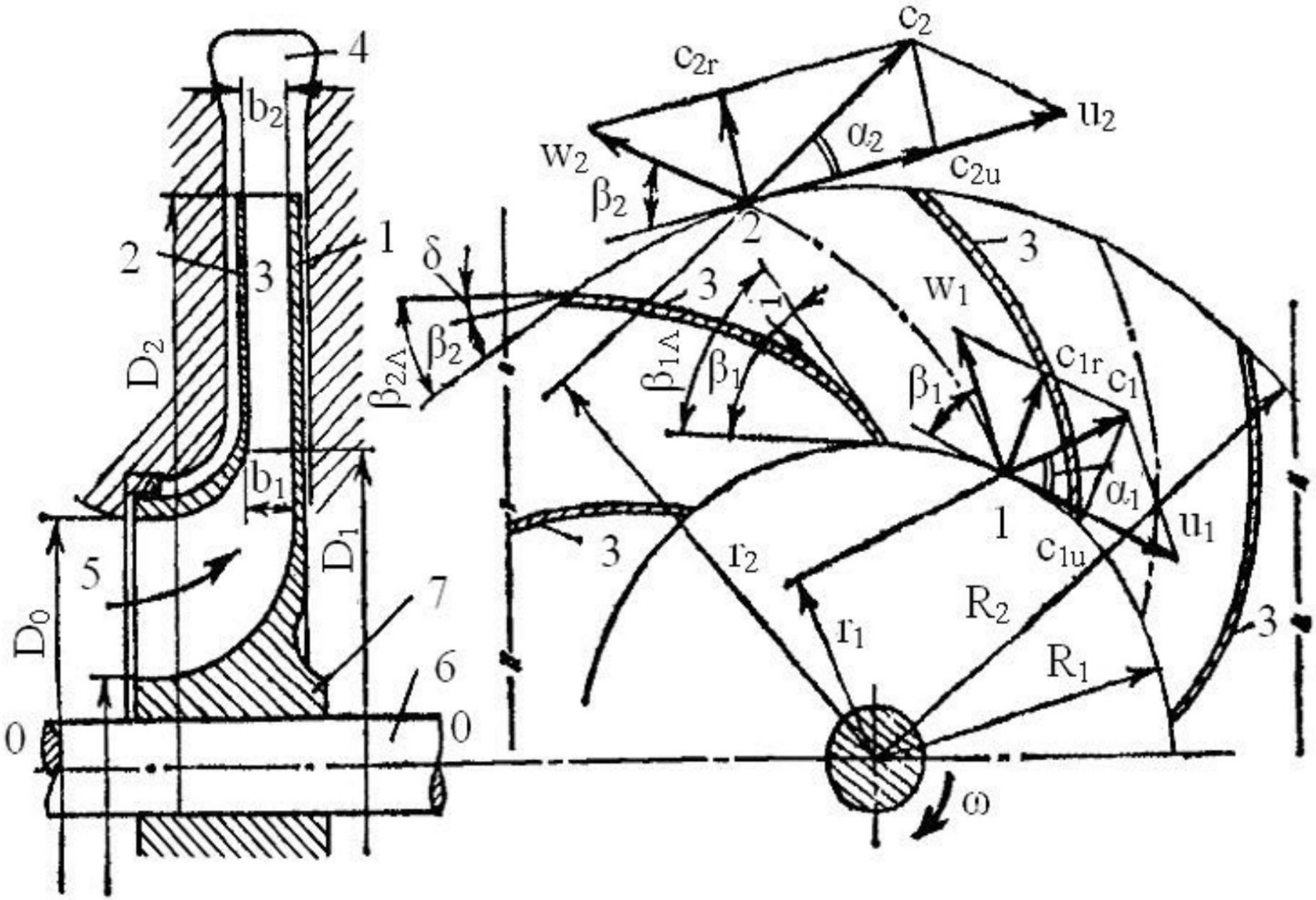
1. Конструктивная схема
2. Параллелограмм скоростей
3. Уравнение Эйлера
4. Характеристики центробежных насосов
5. Подобие центробежных насосов

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

Исполнитель: доцент, к.т.н., Ю.Волков

1. Конструктивная схема



2. Параллелограмм скоростей

относительная скорость - ***w***
окружная скорость - ***u***
абсолютная скорость - ***c***
на входе в межлопастной канал – индекс "1", на выходе - "2"
угол между векторами окружной и абсолютной скоростей - ***α***
угол между вектором относительной скорости и отрицательным направлением окружной скорости - ***β***.
угол атаки - ***i***
угол отставания - ***δ***
c_u - скорость закручивания потока
c_r - радиальная составляющая абсолютной скорости

3. Уравнение Эйлера

Момент количества движения для секундной массы (ρ·Q)

- на входе в колесо

$$M_1 = \rho \cdot Q \cdot c_1 \cdot r_1, \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \text{м} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж}\right],$$

где c_1 – абсолютная скорость на входе, м/с;

r_1 – радиус вектора скорости c_1 (плечо), м.

- на выходе из рабочего колеса

$$M_2 = \rho \cdot Q \cdot c_2 \cdot r_2$$

Приращение момента количества движения в колесе

$$M_{T\infty} = M_2 - M_1 = \rho \cdot Q \cdot (c_2 \cdot r_2 - c_1 \cdot r_1)$$

Из рисунка (параллелограмм)

$$r_1 = R_1 \cdot cos\alpha_1, \qquad r_2 = R_2 \cdot cos\alpha_2, \qquad c_1 \cdot cos\alpha_1 = c_{1u}, \qquad c_2 \cdot cos\alpha_2 = c_{2u},$$

$$c_1 \cdot r_1 = R_1 \cdot cos\alpha_1 \cdot c_1 = R_1 \cdot c_{1u}$$

$$\downarrow$$

$$M_{T\infty} = \rho \cdot Q \cdot (c_{2u} \cdot R_2 - c_{1u} \cdot R_1)$$

$$\downarrow$$

гидравлическая мощность

$$N_{ГТ} = M_{T\infty} \cdot \omega = \rho \cdot Q \cdot (c_{2u} \cdot R_2 \cdot \omega - c_{1u} \cdot R_1 \cdot \omega)$$

$R_2 \cdot \omega = u$ – окружная скорость

$$N_{ГT\infty} = \rho \cdot Q \cdot (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1)$$

мощность $N = p \cdot Q \rightarrow$ давление $p = N/Q$ $\rightarrow$ теоретическое давление

$$p_{T\infty} = \rho \cdot (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1) \qquad (1)$$

$\rightarrow$ теоретический напор

$$H_{T\infty} = \frac{c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1}{g} \qquad (2)$$

3. Уравнение Эйлера

Уравнения Эйлера – основные теоретические уравнения центробежного нагнетателя при бесконечном числе лопастей для несжимаемых жидкостей:

- **приращение момента количества движения**

$$M_{T\infty} = \rho \cdot Q \cdot (c_{2u} \cdot R_2 - c_{1u} \cdot R_1), \text{Дж}$$

- **мощность**

$$N_{\text{ГТ}\infty} = \rho \cdot Q \cdot (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1), \text{Дж/с (Вт)}$$

- **удельная работа**

$$L_{T\infty} = c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1, \text{Дж/кг}$$

- **полный напор**

$$H_{T\infty} = \frac{c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1}{g}, \text{м}$$

- **полное давление**

$$p_{T\infty} = \rho \cdot (c_{2u} \cdot u_2 - c_{1u} \cdot u_1)$$

3. Уравнение Эйлера

Теоретический напор

$$H_{\text{Т}} = \mu \cdot H_{\text{Т}\infty},$$

где $\mu < 1$ – поправочный коэффициент, учитывающий количество лопастей.

Фформула Стодолы:

$$\mu = 1 - \frac{u_2}{c_{2u}} \cdot \frac{p}{z} \cdot sin\beta_2$$

где z — число лопастей.

Ориентировочно $\mu \approx 0{,}8$.

Действительный напор:

$$H = \eta_{\Gamma} \cdot H_{\text{Т}} = \eta_{\Gamma} \cdot \mu \cdot H_{\text{Т}\infty}$$

где η_{Γ} – гидравлический КПД = 0,80-0,96.

4. Характеристики центробежных насосов

$$\boldsymbol{H = f(Q)}, \qquad p = f(Q), \qquad N = f(Q), \qquad \eta = f(Q), \qquad H_{CT} = f(Q)$$

1. При α_1 = 90°

$$H_{T\infty} = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g}$$

т.к. c_{1u} = 0 (нет закручивания на входе).

2. Из параллелограмма скоростей

$$c_{2u} = u_2 - c_{2r} \cdot ctg\beta_2$$

3. Уравнение неразрывности

$$Q = c_{2r} \cdot F_2$$

где F_2 – сечение выхода потока из рабочего колеса, которое для бесконечно тонких пластин равно

$$F_2 = \pi \cdot D_2 \cdot b_2$$

$$\downarrow$$

$$c_{2r} = \frac{Q}{\pi \cdot D_2 \cdot b_2}$$

$$\downarrow$$

$$c_{2u} = u_2 - \frac{Q}{\pi \cdot D_2 b_2} \cdot ctg\beta_2$$

$$\downarrow$$

4. Теоретический напор

$$H_{T\infty} = \frac{u_2}{g} \cdot \left(u_2 - \frac{ctg\beta_2}{\pi \cdot D_2 \cdot b_2} \cdot Q \right)$$

4. Характеристики центробежных насосов

5. Окружная скорость

$$u_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60}$$

↓

6. Теоретический напор

$$H_{T\infty} = \frac{(\pi \cdot D_2 \cdot n)^2}{3600 \cdot g} - \frac{n}{60 \cdot b_2 \cdot g} \cdot Q \cdot ctg\beta_2$$

где $\frac{(\pi \cdot D_2 \cdot n)^2}{3600 \cdot g} = A = const$, и $\frac{n}{60 \cdot b_2 \cdot g} = B = const$,

↓

7. Уравнение характеристики $H_{T\infty} = f(Q)$ имеет вид

$$H_{T\infty} = A - B \cdot Q \cdot ctg\beta_2$$

↓

уравнение прямой линии, положение которой зависит от угла β_2.

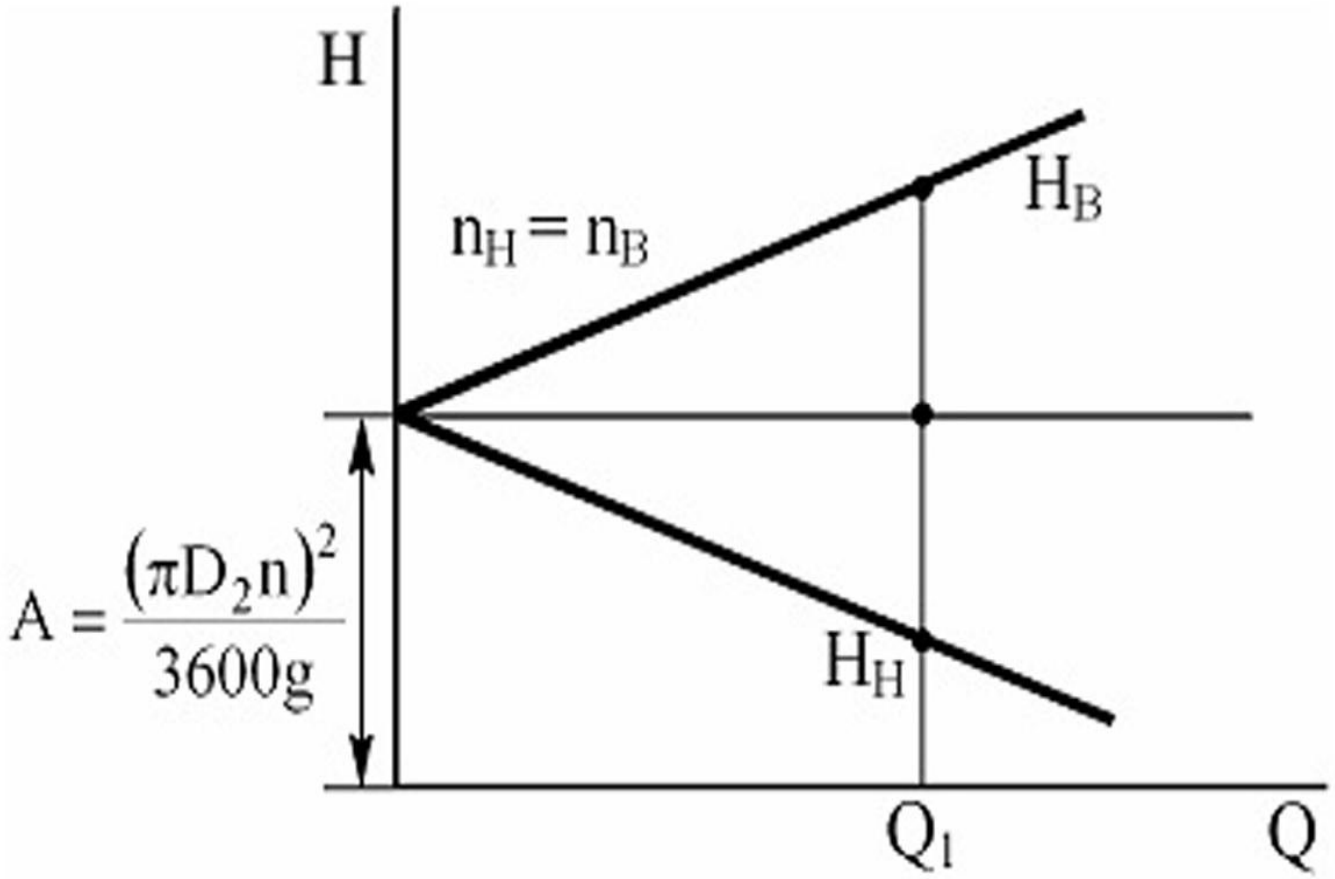
если $\beta_2 > 90$ (лопатки загнуты вперед), то $ctg\beta_2 < 0$;

если $\beta_2 = 90$, $ctg\,\beta_2 = 0$;

если $\beta_2 < 90$ (лопатки загнуты назад), то $ctg\beta_2 > 0$.

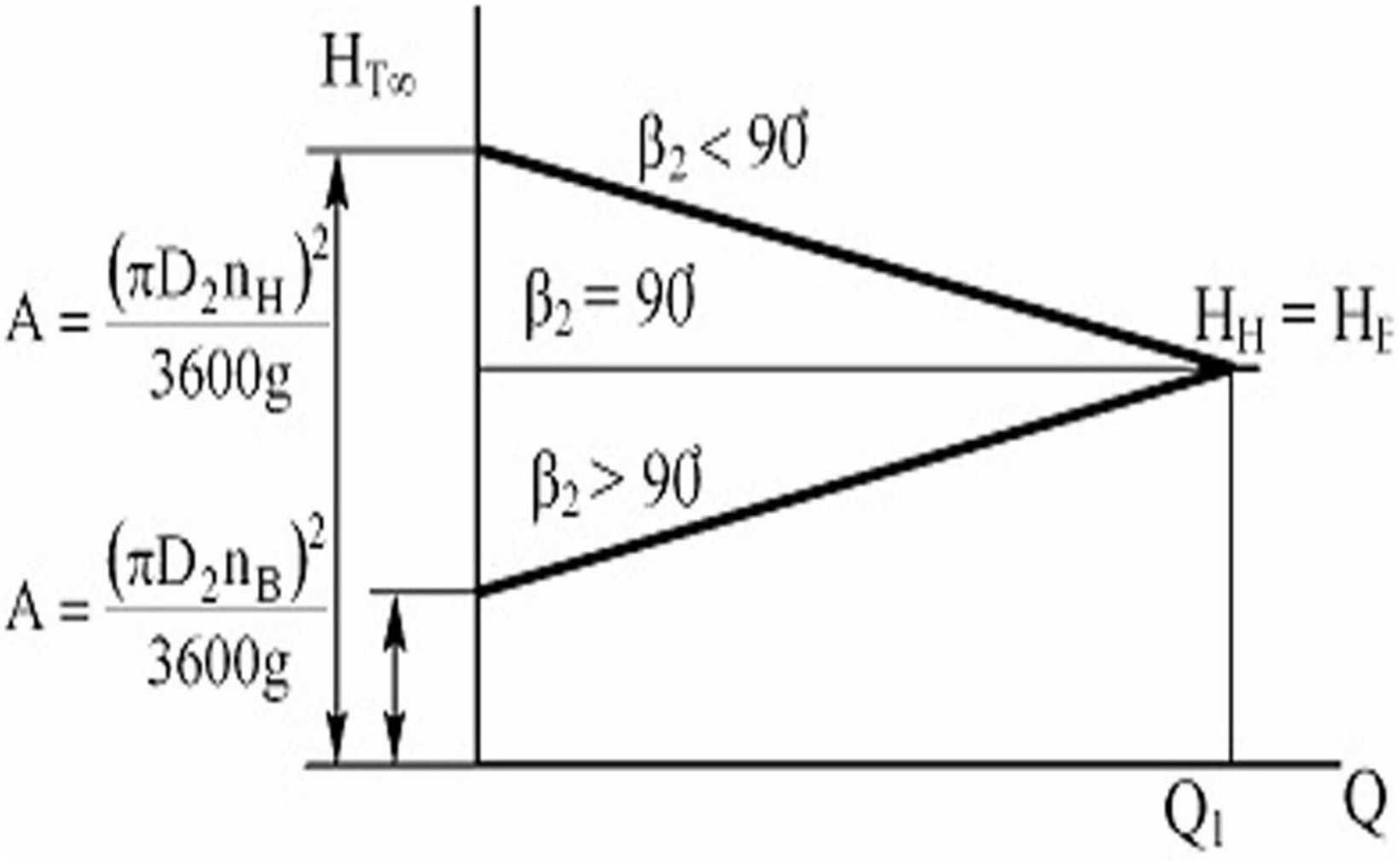
4. Характеристики центробежных насосов

Теоретические характеристики нагнетателей при одинаковом числе оборотов рабочего колеса и разном направлении лопаток



4. Характеристики центробежных насосов

Теоретические характеристики при разном числе оборотов и одинаковом напоре при заданной подаче.

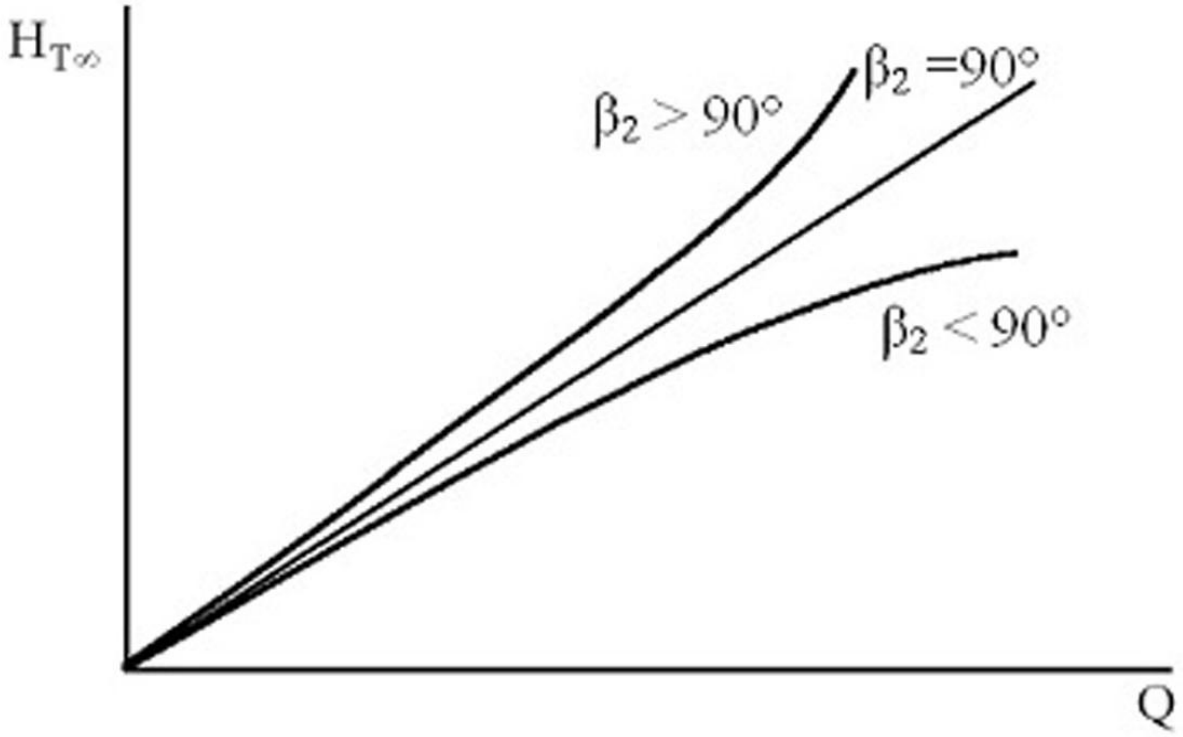


4. Характеристики центробежных насосов

Теоретически характеристики мощности:

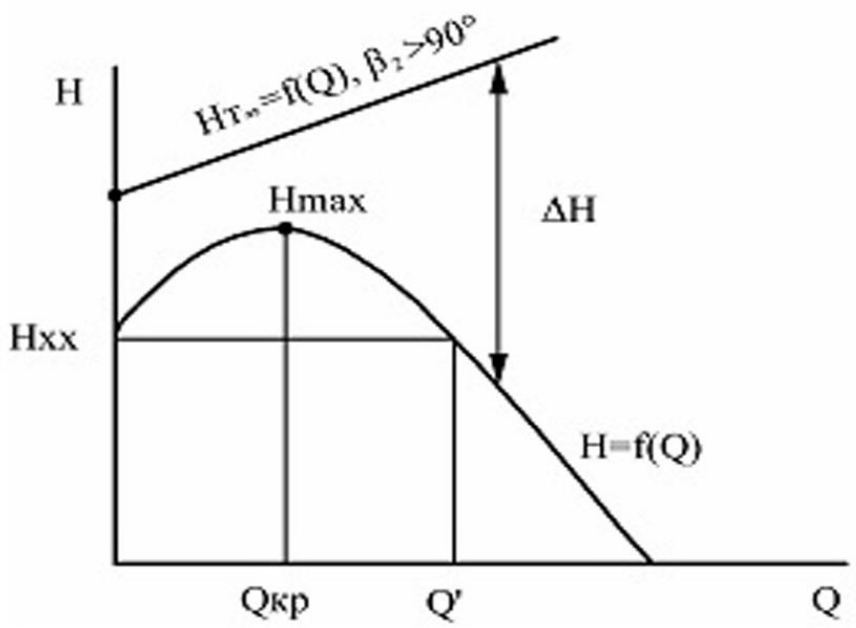
$$N_{T\infty} = \rho \cdot g \cdot H_{T\infty} \cdot Q = \rho \cdot g \cdot Q \cdot (A - B \cdot Q)$$

Теоретическая зависимость мощности от подачи при разном направлении лопаток

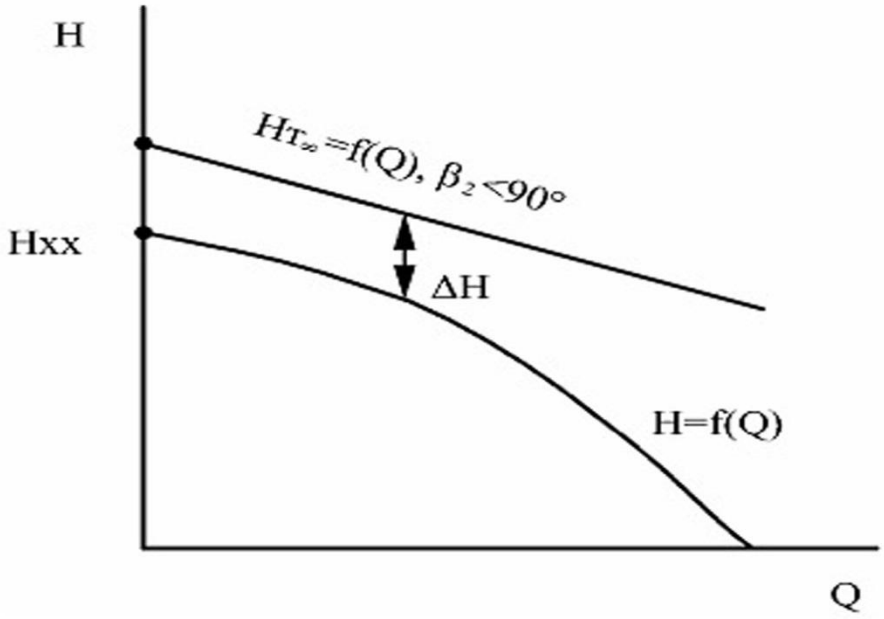


4. Характеристики центробежных насосов

Теоретическая и действительная характеристика, $\beta_2 > 90^O$

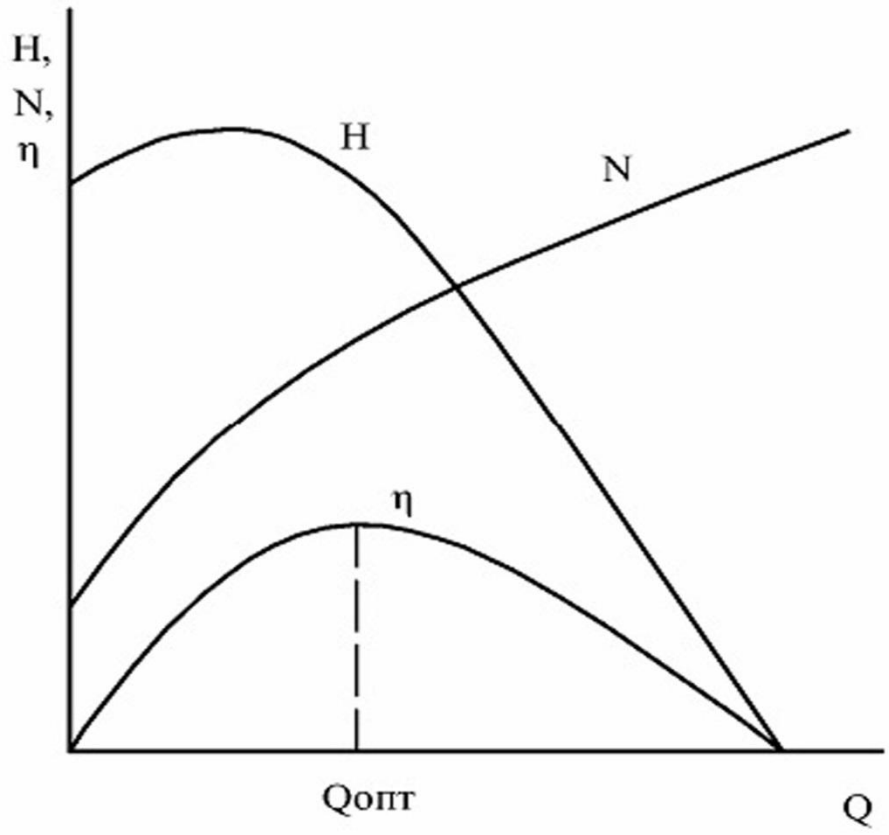


Теоретическая и действительная характеристика, $\beta_2 < 90^O$



4. Характеристики центробежных насосов

Действительные характеристики центробежного нагнетателя



КПД нагнетателя

$$\eta = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{N}$$

5. Подобие центробежных насосов

$$\frac{D_{2a}}{D_{2б}} = \frac{D_{1a}}{D_{1б}} = \frac{b_{2a}}{b_{2б}} = \cdots = \frac{l_{1a}}{l_{1б}} = \delta_1 = const,$$

$$b_{1а} = b_{1б} = b_1; \quad b_{2а} = b_{2б} = b_2,$$

δ_1 – коэффициент геометрического подобия

$$\alpha_{1а} = \alpha_{1б} = \alpha_1; \quad \beta_{2а} = \beta_{2б} = \beta_2;$$

$$\frac{u_{1а}}{u_{1б}} = \frac{u_{2а}}{u_{2б}} = \frac{c_{1а}}{c_{1б}} = \frac{c_{2а}}{c_{2б}} = \frac{w_{1а}}{w_{1б}} = \cdots = \delta_c = const,$$

δ_c – коэффициент кинематического подобия.

$$\frac{p_{1а}}{p_{1б}} = \frac{p_{2а}}{p_{2б}} = \cdots = \frac{p_{ia}}{p_{iб}} = \delta_p = const,$$

где δ_p – коэффициент динамического подобия;

$$Re_а = Re_б; \; Eu_а = Eu_б; \; Fr_а = Fr_б; \; Sh_а = Sh_б$$

$Re = \frac{c \cdot l}{v}$ – критерий Рейнольдса;

$Eu = \frac{p}{\rho \cdot c^2}$ – критерий Эйлера;

$Fr = \frac{c^2}{g \cdot l}$ – критерий Фруда;

$Sh = \frac{l \cdot n}{c}$ – критерий Струхаля;

l – линейный размер,

n – число оборотов в секунду.

5. Подобие центробежных насосов

Объемная подача

$$Q = F_2 \cdot c_{2\text{г}} \cdot \eta_0 = \pi \cdot D_2 \cdot b_2 \cdot c_{2\text{г}} \cdot \eta_0 \quad \rightarrow \quad \frac{Q_\text{а}}{Q_\text{б}} = \frac{D_{2\text{а}}}{D_{2\text{б}}} \cdot \frac{b_{2\text{а}}}{b_{2\text{б}}} \cdot \frac{c_{2\text{га}}}{c_{2\text{гб}}} \cdot \frac{\eta_{0\text{а}}}{\eta_{0\text{б}}},$$

Из кинематического подобия $\rightarrow \quad \frac{c_{2\text{га}}}{c_{2\text{гб}}} = \frac{u_{2\text{а}}}{u_{2\text{б}}} = \frac{n_\text{а} \cdot D_{2\text{а}}}{n_\text{б} \cdot D_{2\text{б}}}$

Из геометрического подобия $\rightarrow \quad \frac{b_{2\text{а}}}{b_{2\text{б}}} = \frac{D_{2\text{а}}}{D_{2\text{б}}}$

$$\downarrow$$

$$\frac{Q_\text{а}}{Q_\text{б}} = \frac{D_{2\text{а}}^3}{D_{2\text{б}}^3} \cdot \frac{n_\text{а}}{n_\text{б}} \cdot \frac{\eta_{0\text{а}}}{\eta_{0\text{б}}}$$

$$\downarrow$$

Объемные подачи центробежных машин, работающих в подобных режимах, относятся как кубы наружных диаметров рабочих колес и первые степени частоты вращения валов и объемных КПД.

Если $D_{2а} = D_{2б} \rightarrow$

$$\frac{Q_\text{а}}{Q_\text{б}} = \frac{n_\text{а}}{n_\text{б}} \cdot \frac{\eta_{0\text{а}}}{\eta_{0\text{б}}}$$

5. Подобие центробежных насосов

Отношение напоров и давлений

$$H_{T\infty} = \frac{u_2 \cdot c_{2u}}{g}, \quad p_{T\infty} = f \cdot u_2 \cdot c_{2u} = H_{T\infty} \cdot \rho \cdot g.$$

↓

Вывод с использованием кинематического подобия

$$\frac{H_а}{H_б} = \frac{D_{2а}^2}{D_{2б}^2} \cdot \frac{n_а^2}{n_б^2} \cdot \frac{\eta_{га}}{\eta_{гб}}, \qquad \frac{p_а}{p_б} = \frac{D_{2а}^2}{D_{2б}^2} \cdot \frac{n_а^2}{n_б^2} \cdot \frac{\rho_а}{\rho_б} \cdot \frac{\eta_{га}}{\eta_{гб}}$$

Давления создаваемые центробежными машинами в подобных режимах, относятся как квадраты наружных диаметров рабочих колес, квадраты частот вращения вала первые степени плотностей жидкости и первые степени гидравлических КПД.

При $D_{2а} = D_{2б}$, $\rho_а \neq \rho_b$

$$\frac{H_а}{H_б} = \frac{n_а^2}{n_б^2} \cdot \frac{\eta_{га}}{\eta_{гб}}, \qquad \frac{p_а}{p_б} = \frac{n_а^2}{n_б^2} \cdot \frac{\rho_а}{\rho_б} \cdot \frac{\eta_{га}}{\eta_{гб}}$$

5. Подобие центробежных насосов

Мощность

$$N = \frac{Q \cdot \rho \cdot g \cdot H}{\eta}$$

$$\downarrow$$

$$\frac{N_а}{N_б} = \frac{D_{2а}^5}{D_{2б}^5} \cdot \frac{n_а^3}{n_б^3} \cdot \frac{\rho_а}{\rho_б} \cdot \frac{\eta_а}{\eta_б}$$

Мощности центробежных машин, работающих в подобных режимах, относятся как пятые степени наружных диаметров рабочих колес, кубы частот вращения валов, первые степени плотностей, перемещаемых, машинами сред и обратно пропорциональны КПД.

При $D_{2а} = D_{2б}$

$$\frac{N_а}{N_б} = \frac{n_а^3}{n_б^3} \cdot \frac{\rho_а}{\rho_б} \cdot \frac{\eta_а}{\eta_б}$$

5. Подобие центробежных насосов

Коэффициент быстроходности

Подача Q_S = l м^3/с
Напор H_S = 0,102 м
Удельная работа l_S = gH = l Дж/кг

$$n_S = n \cdot \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{(g \cdot H)^{\frac{3}{4}}}$$

Безразмерная характеристика в безразмерных координатах

$$\bar{H} = f(\bar{Q}),$$

где $\bar{Q}$ и $\bar{H}$ безразмерные подачи и напор.

Безразмерные величины имеют вид:

Подача:

$$\bar{Q} = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot u_2}.$$

Напор:

$$\bar{H} = \frac{H}{\rho \cdot u_2^2}$$

Мощность:

$$\bar{N} = \frac{N}{\frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \cdot \rho \cdot u_2^3}$$

КПД

$$\bar{\eta} = \eta$$