

Парогенераторы АЭС

Тема. Гидродинамические процессы в ПГ.
Потери давления при движении **однофазного**
теплоносителя

Основные вопросы

1. Задачи гидродинамики ПГ АЭС
2. Определяющие факторы
3. Общая схема расчета потерь давления
4. Потери давления при движении однофазной среды

Задачи и вопросы гидродинамики ПГ АЭС

Эксплуатационная надежность ПГ АЭС во многом связана с гидродинамическими процессами теплоносителей и рабочих тел.

Нет таких ПГ, где не использовалось бы движение жидкостей или газов для транспортировки и передачи тепловой энергии от теплоносителя к рабочему телу.

Гидродинамические процессы определяют уровень и стабильность температурного поля в узлах и деталях ПГ. Этими же процессами обусловлено появление вибраций, эрозионных разрушений, кавитационных явлений, силовых воздействий на элементы конструкций ПГ и т.д.

Задачи и вопросы гидродинамики ПГ АЭС

Основная задача – определение потерь давления при движении среды (*при заданном расходе, с учетом параметров, при выбранных конструктивных размерах*).

Дополнительные вопросы:

- расчет распределения расходов и скоростей среды;
- обеспечение теплогидравлической устойчивости течения и др.

Главный определяющий фактор

Структура потока (режим движения):

- для **однофазной** среды - турбулентное и ламинарное течение (аналитические и эм-пирические зависимости);
- для **двухфазной** среды – режимы (не менее 5-8) течения (эмпирические зависимости)

Общая схема расчета потерь давления

Полное сопротивление по отдельным участкам каждого тракта ПГ (теплоноситель, раб. тело) определяется по схеме

$$\Delta p_{\text{тракт}} = \Delta p_{\text{вх}} + \sum \Delta p_{\text{тп},i} + \Delta p_{\text{вых}} \quad (1)$$

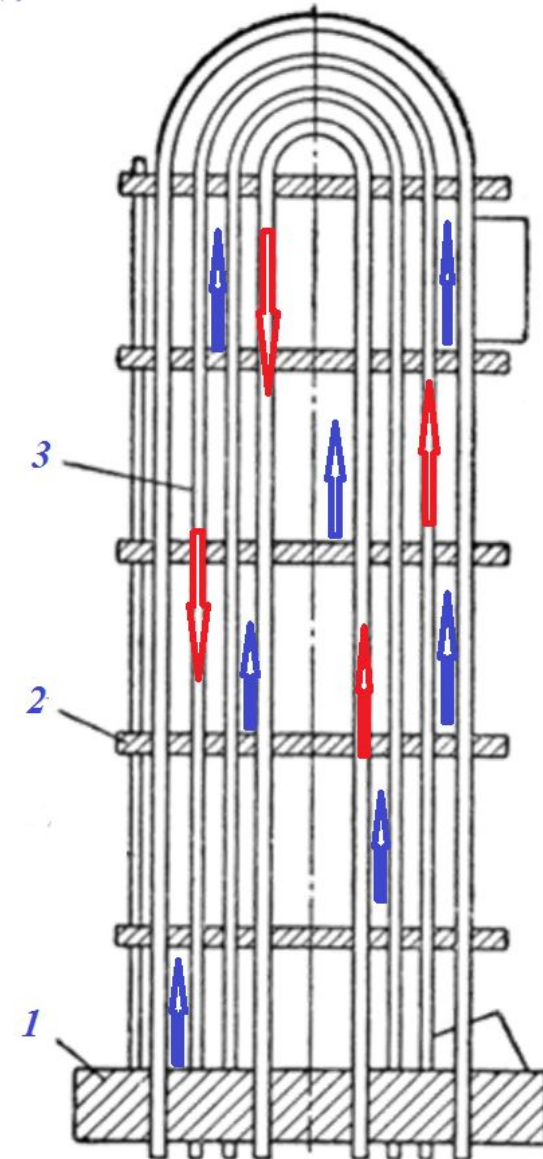
Общая схема расчета потерь давления

Любое слагаемое формулы (1) можно представить как

$$\Delta p_{\text{гидр}} = \Delta p_{\text{,нив}} + \Delta p_{\text{,уск}},$$

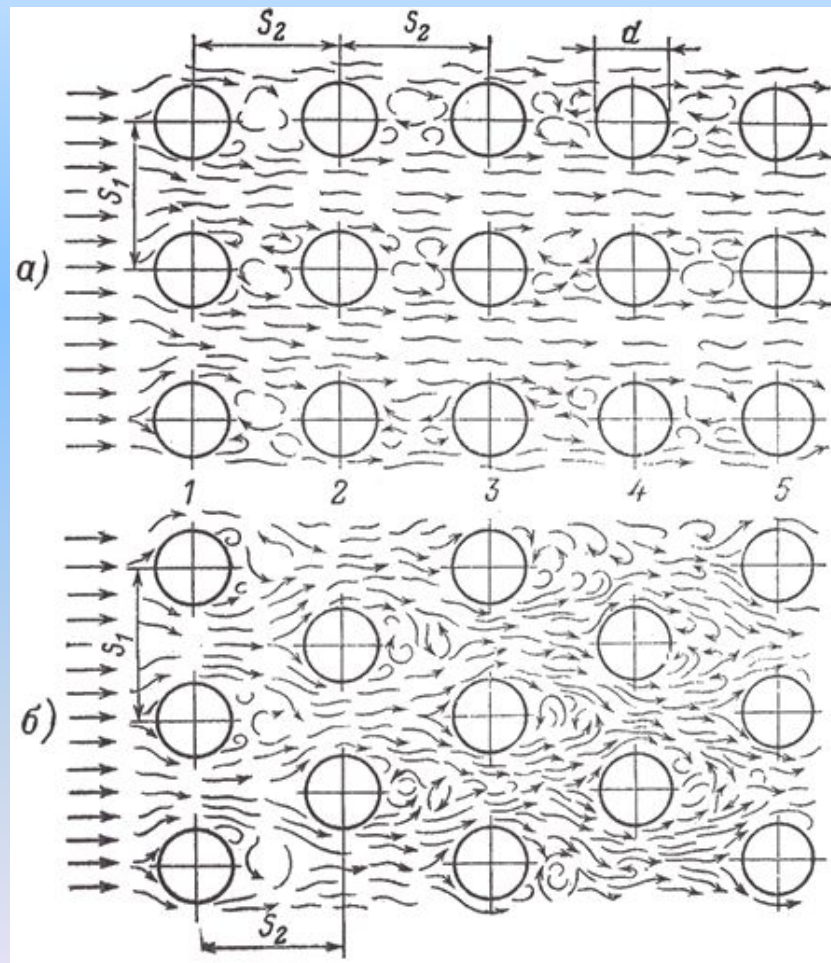
Гидравлическое
Сопротивление
поверхности теплообмена
(труб, каналов, *продольно*
омываемых пучков труб)

$$\Delta p_{гидр,i} = \Delta p_{тр,i} + \Delta p_{м,i}$$



Сопротивление поверхности теплообмена (при *поперечном* омывании пучков труб)

$$\Delta p_{\text{гидр},i} = \Delta p_{\text{ном},i}$$



Потери давления в однофазном потоке

Алгоритм выбора формулы для расчета потерь давления в однофазном потоке



Выбор оптимальной скорости

Факторы, ограничивающие **максимальную** скорость:

- увеличение гидравлических потерь (рост затрат энергии на обеспечение циркуляции);
- эрозионный износ;
- возникновения вибрации

Факторы, ограничивающие **минимальную** скорость:

- ухудшение теплоотдачи;
- опасность появления застойных зон;
- нарушение ЕЦ

Выбор оптимальной скорости

Рекомендуемая скорость **пара**:

- высокого (выше 9 МПа) давления 10...20 м/с;
- среднего (до 9 МПа) давления 20...30 м/с

Рекомендуемая скорость **теплоносителя**:

- водяного 2...5 м/с ;
- ЖМТ 1..3 м/с

Рекомендуемая скорость **рабочего тела** (воды):

- при вынужденном движении 2...5 м/с;
- при естественной циркуляции 0,5...1,2

Потери на трение

Общее выражение

$$\Delta p_{mp} = \xi \cdot \frac{L}{d_z} \cdot \frac{\rho \cdot \bar{w}^2}{2} = \xi \cdot \frac{L}{d_z} \cdot \frac{G^2}{2 \cdot F^2 \cdot \rho}$$

Коэффициенты (сопротивления) трения

Круглые трубы, турбулентный режим. Ф-ла Альтшуля

$$\xi_0 = 0,11 \cdot \left[\left(\frac{\Delta}{d_T} \right) + \left(\frac{68}{Re} \right) \right]^{0,25} ;$$

Данные о эквивалентной шероховатости Δ :

- ✓ нержавеющая сталь... $1 \cdot 10^{-5}$ м;
- ✓ углеродистая сталь.... $8 \cdot 10^{-5}$ м, (новые трубы);
- ✓ углеродистая сталь.... $2 \cdot 10^{-4}$ м, (трубы с незнач. коррозией);

Коэффициенты трения

Пучки круглых стержней

треугольная упаковка

$$\xi = \frac{0,210}{Re^{0.25}} \cdot [1 + (x-1)^{0.32}]; \quad d_r = d \cdot \left(\frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot x^2 - 1 \right) \approx d \cdot (1,103 \cdot x^2 - 1);$$

квадратная упаковка

$$\frac{\xi}{\xi_0} = 0.59 + 0.19 \cdot (x-1) + 0.52 \cdot \{1 - \exp[-10 \cdot (x-1)]\};$$

$$d_r = d \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot x^2 - 1 \right) \approx d \cdot (1,27 \cdot x^2 - 1); \quad x = S/d;$$

Потери на местных сопротивлениях

Общее выражение

$$\Delta p_M = \xi_M \cdot \frac{\rho \cdot \bar{w}^2}{2}$$

Коэффициенты местных сопротивлений

Вид сопротивления	Формула
Резкое сужение сечения	$\zeta_M = 0,5 \cdot [1 - f_M/f_B]$
Резкое расширение сечения	$\zeta_M = 1,1 \cdot [1 - (f_M/f_B)^2]$
Решетка внутри трубы	$\zeta_M = \left[\left(1 + 0,707 / \sqrt{1 - f_M / f_B} \right) \cdot (f_B / f_M - 1) \right]^2$
Поворот на угол 90°	0,2 ÷ 0,41
на угол 180°	0,26 ÷ 0,6
Вход или выход из МТП	1,5
Вход в трубы из коллектора	0,5
Выход из труб в коллектор	1,0

Потери давления в поперечно омываемых пучках труб

Общее выражение

$$\Delta p_{\text{поп}} = \xi_{\text{поп}} \cdot \frac{\rho \cdot \bar{w}^2}{2}$$

Для шахматных пучков

$$\xi_{\text{поп}} = \begin{cases} (4 + 6,6 \cdot Z_2) \cdot Re^{-0,28} & \text{при } S_1 < S_2 \\ (5,4 + 3,4 \cdot Z_2) \cdot Re^{-0,28} & \text{при } S_1 > S_2 \end{cases}$$

Для коридорных пучков

$$\xi_{\text{поп}} = (6 + 9 \cdot Z_2) \cdot Re^{-0,26} \cdot (S_1 / d_H)^{-0,23}$$

ПРИМЕЧАНИЕ. В поперечно омываемых пучках находят суммарное гидравлическое сопротивление.

Потери давления на ускорение потока

$$\Delta p_{\text{уск}} = \rho_2 \cdot \omega_2^2 - \rho \cdot \omega_1^2$$

Пример.

$$P_{\text{пв}} = 13 \text{ МПа}; t_{\text{пв}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}; \rho_{\text{пв}} = 690 \text{ кг/м}^3$$

$$P_{\text{п}} = 13 \text{ МПа}; t_{\text{п}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}; \rho_{\text{п}} = 40,8 \text{ кг/м}^3$$

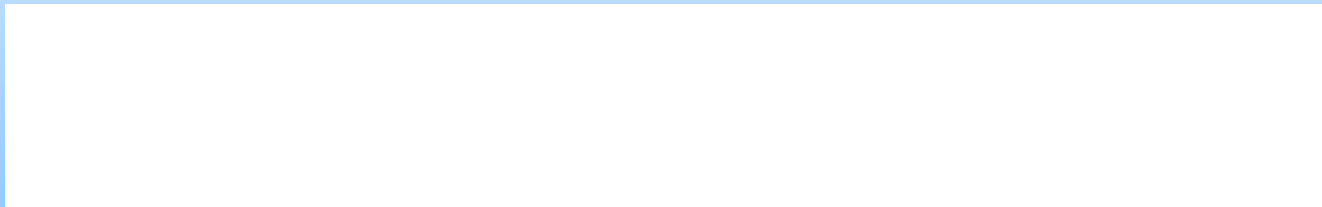
$$\Delta p_{\text{уск}} = \rho_{\text{п}} \cdot \omega_{\text{п}}^2 - \rho_{\text{пв}} \cdot \omega_{\text{пв}}^2 = 40,8 \cdot 50^2 - 690 \cdot 3^3 \approx 0,96$$

Нивелирный перепад давления

$$\Delta p_{\text{нив}} = g \cdot \sum \rho_i \cdot h_i$$

$$\Delta p_{\text{нив},j} = h_j \cdot g \cdot \rho_{\text{ср},j}$$

Мощность нагнетателя



Тип энергоблока	ВВЭР-440	ВВЭР-1000
$\eta, \%$	50-70	60-77
Тип насоса	ГЦН-317	ГЦН-195

Спасибо за внимание