

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Институт энергетики и автоматизации

Теплообменное оборудование промпредприятий

к.т.н. Белоусов Владимир Николаевич
кафедра Промышленной теплоэнергетики

Классификация теплообменников

- по назначению,
- по способу передачи теплоты,
- по роду применяемых теплоносителей,
- по направлению и характеру движения рабочих сред,
- по характеру температурного режима,
- по температурному уровню,
- по типу поверхности нагрева,
- по применяемым материалам и т.д.

По назначению

- подогреватели,
- испарители,
- конденсаторы,
- ХОЛОДИЛЬНИКИ,
- радиаторы,
- калориферы и т. д.

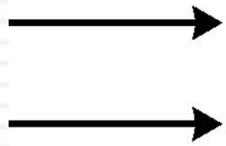
По способу передачи теплоты

- **Рекуперативные ТО** - передача теплоты происходит непрерывно во времени через разделяющую твёрдую стенку.
- **Регенеративные ТО** - греющая среда приводится в соприкосновение с твёрдым телом (насадкой) и отдаёт ему теплоту, которое аккумулируется и в последующий период времени передаётся нагреваемой среде, т.е. процесс передачи теплоты осуществляется периодически (циклично).
- **Смесительные ТО** - передача теплоты происходит при непосредственном соприкосновении (перемешивании) греющей и нагреваемой рабочих сред.

По роду применяемых теплоносителей
рекуперативные ТО различают:

- парожидкостные,
- жидкостно–жидкостные,
- газожидкостные,
- газо–газовые.

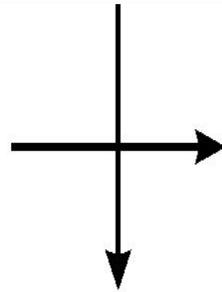
Схемы движения теплоносителей



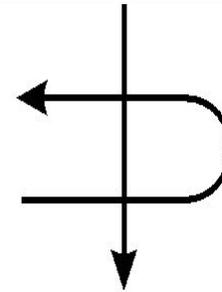
а



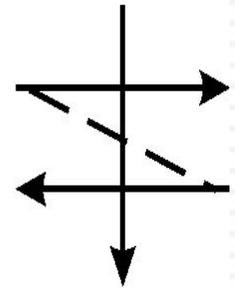
б



в



г



д

а – прямоток; б – противоток; в – однократный перекрёстный ток;
г – С – перекрест; д – Z – перекрест

По характеру температурного режима

- с **установившимся** (стационарным) тепловым режимом
- с **неустановившимся** (нестационарным) тепловым режимом

По температурному уровню

- **высокотемпературные**
- **среднетемпературные**
- **низкотемпературные**
- **криогенные**

- К **высокотемпературным** относят огнетехнические процессы и установки (например, промышленные печи), которым соответствуют рабочие температуры в пределах **400–2000 °С**.
- Рабочий диапазон **среднетемпературных** процессов и установок (например, выпарки, ректификации, сушки) находится, как правило, в пределах **150–700 °С**;
- **Низкотемпературные** системы (отопительные, вентиляционные, кондиционеры, теплоносные и холодильные установки) – **от -150 до +150 °С**.
- Процессы, протекающие при более низких температурах, называются **криогенными**.

По форме поверхности нагрева

□ Трубчатые:

труба в трубе

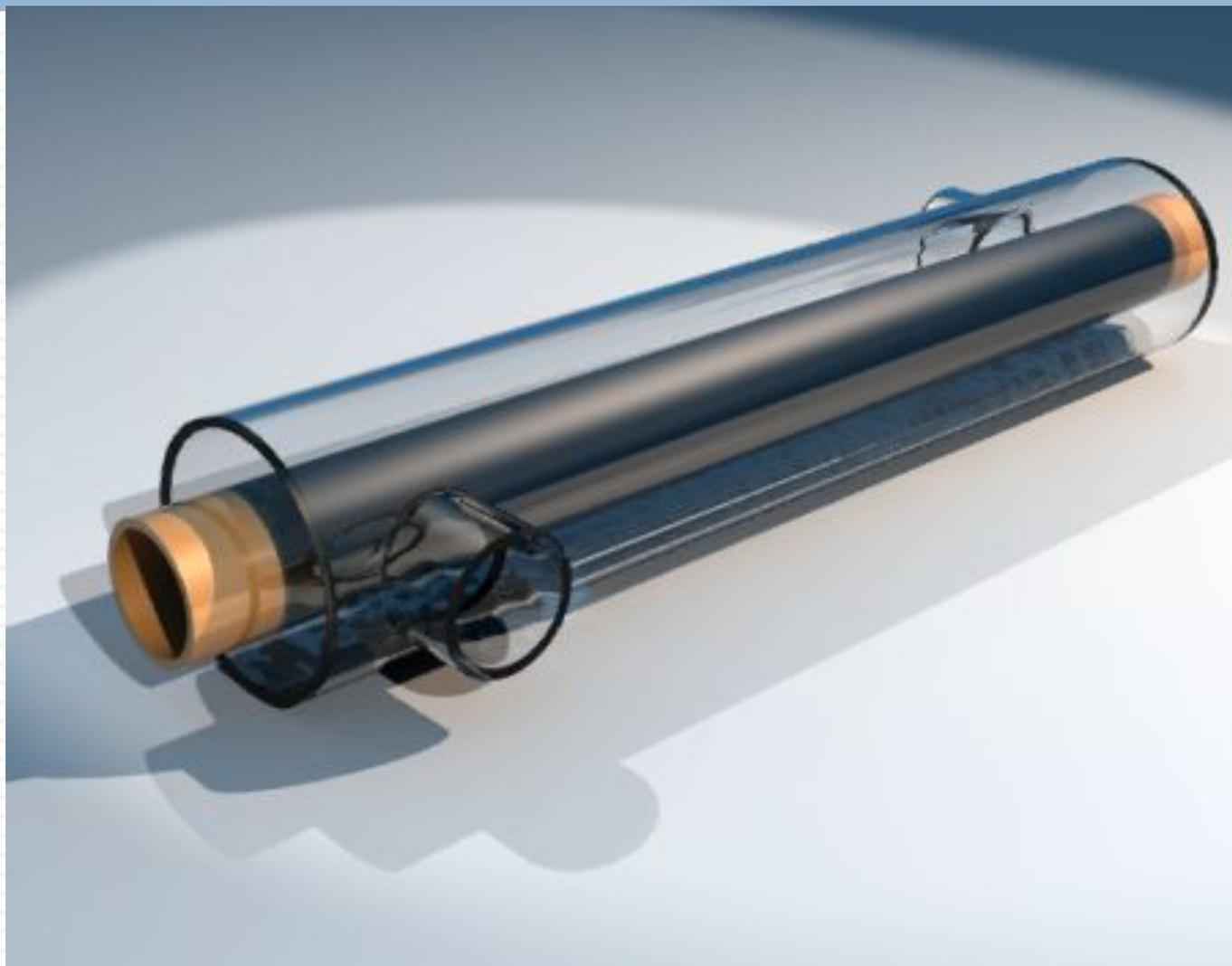
кожухотрубные (из оребрѐнных труб,
с U-образными и спиральными трубками)

□ Пластинчатые

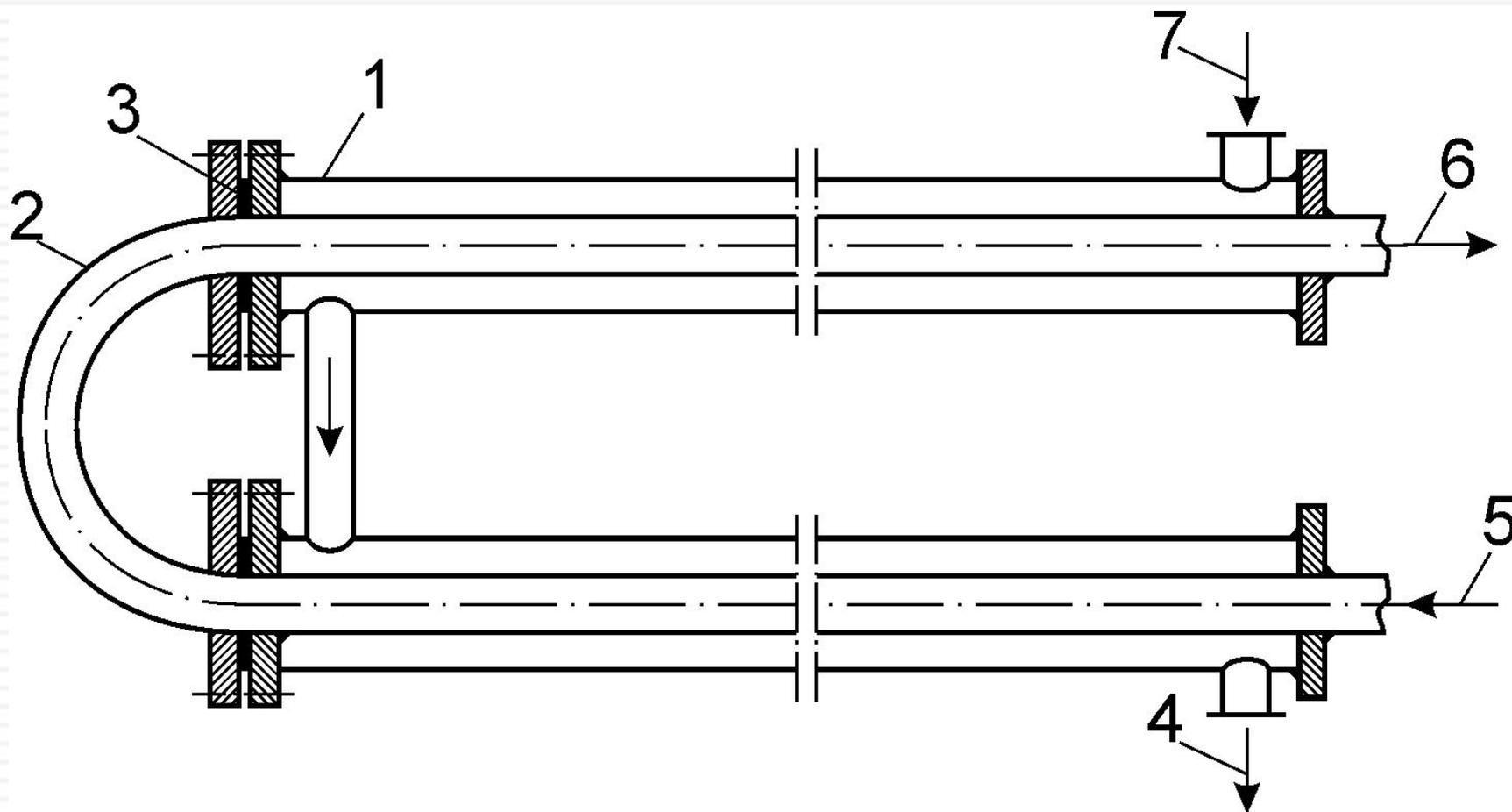
ТО типа «труба в трубе»



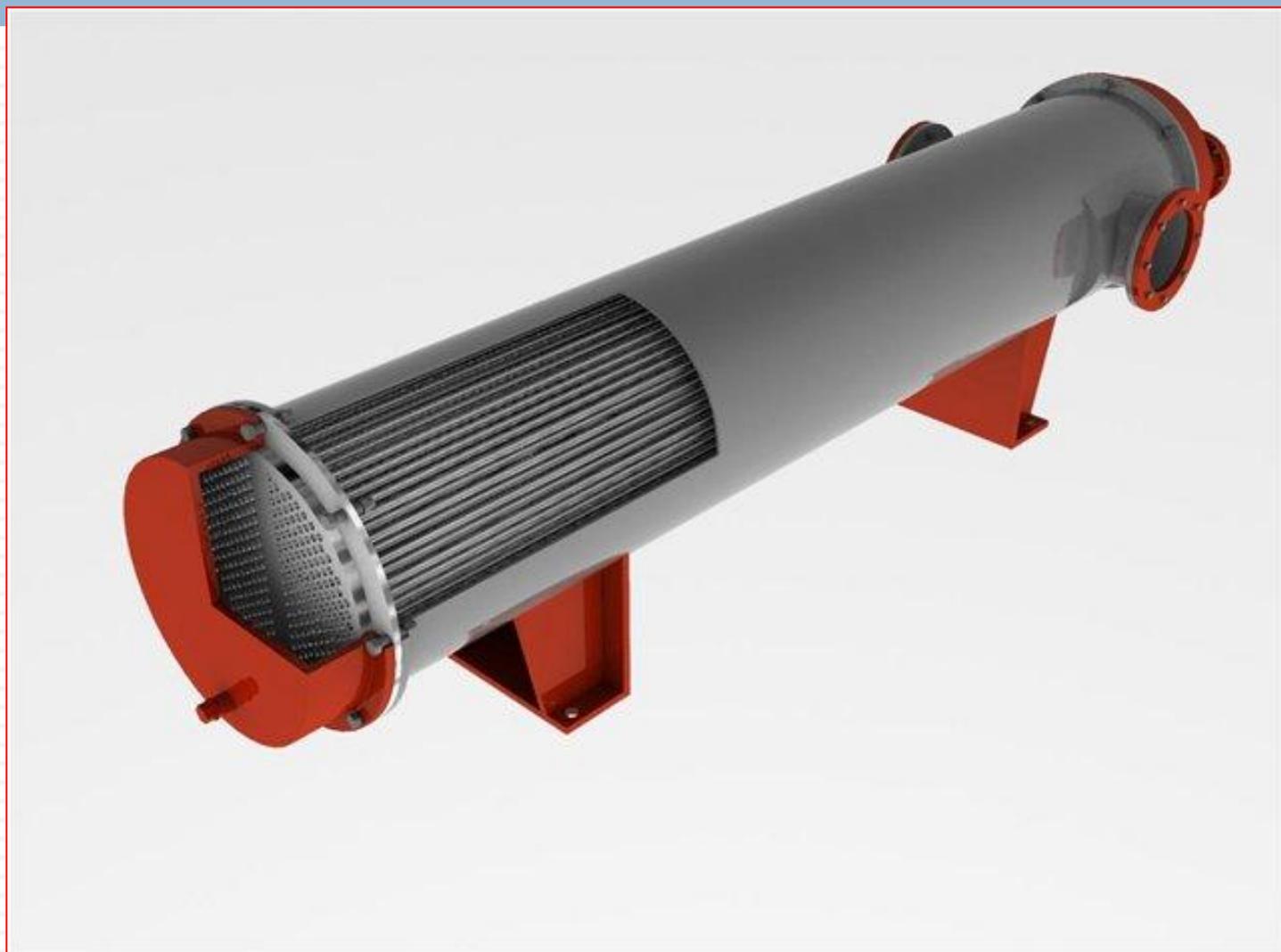
ТО типа «труба в трубе»



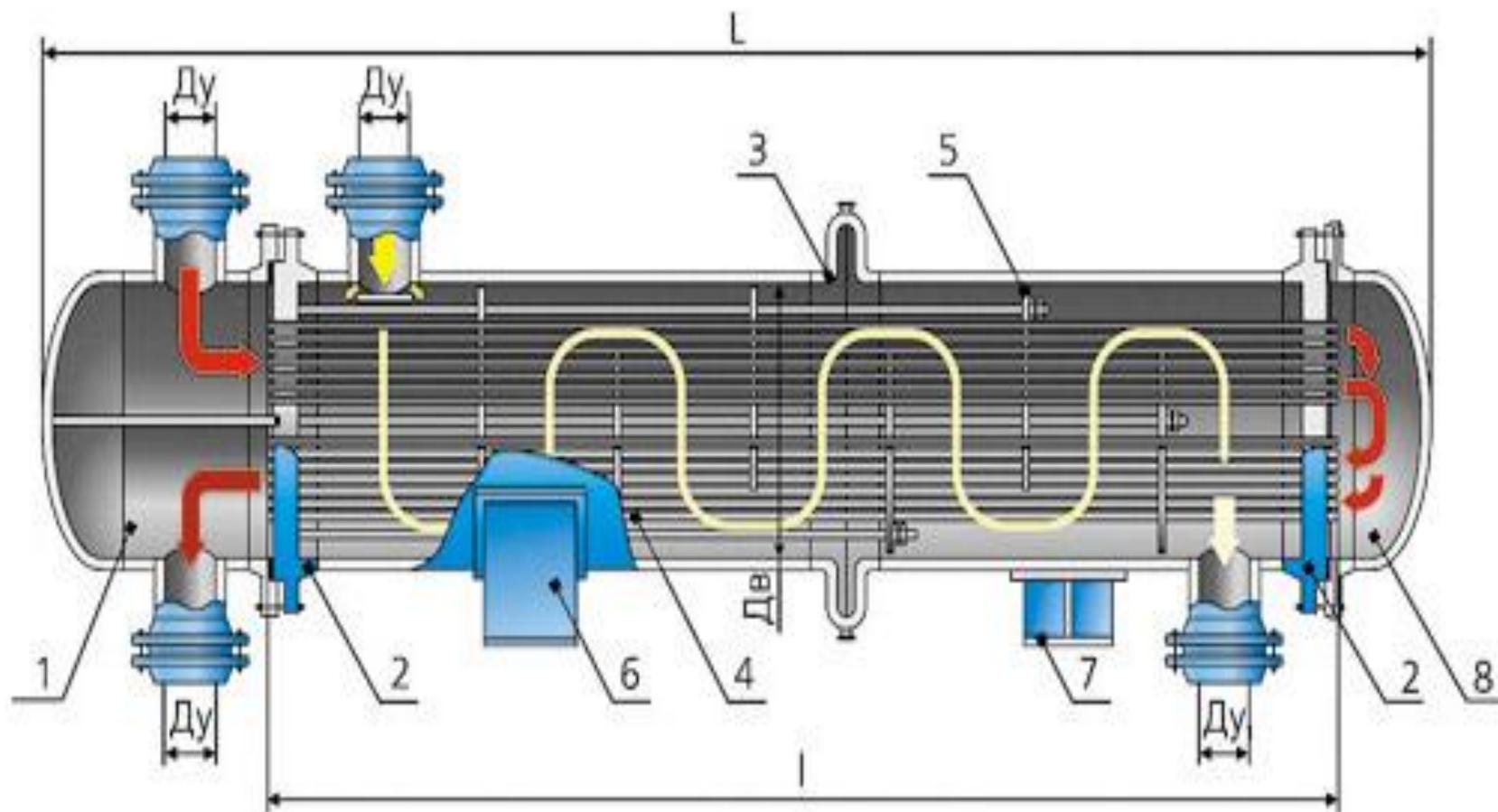
Водоводяной подогреватель типа «труба в трубе»



Кожухотрубный водоводяной ТО



Кожухотрубный ТО



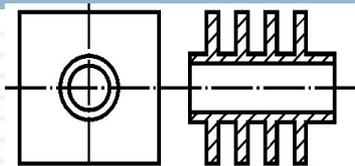


ТО из оребренных труб



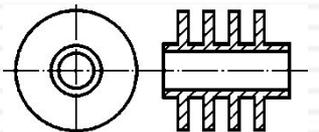
ООО "УралКотлоМашЗавод"

Типы оребренных поверхностей нагрева



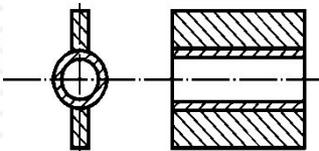
- Чугунные трубы с квадратными ребрами

$$\varphi_p = 5, \quad \Pi = 57,5$$



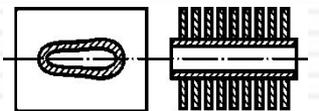
- Чугунные трубы с круглыми ребрами

$$\varphi_p = 5, \quad \Pi = 57,5$$



- Плавниковые трубы

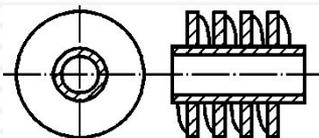
$$\varphi_p = 2,3, \quad \Pi = 125$$



- Каплеобразные трубы с прямоугольными ребрами

$$\varphi_p = 12,8, \quad \Pi =$$

606



- Круглая труба с навивным ленточным оребрением

$$\varphi_p = 8,7, \quad \Pi =$$

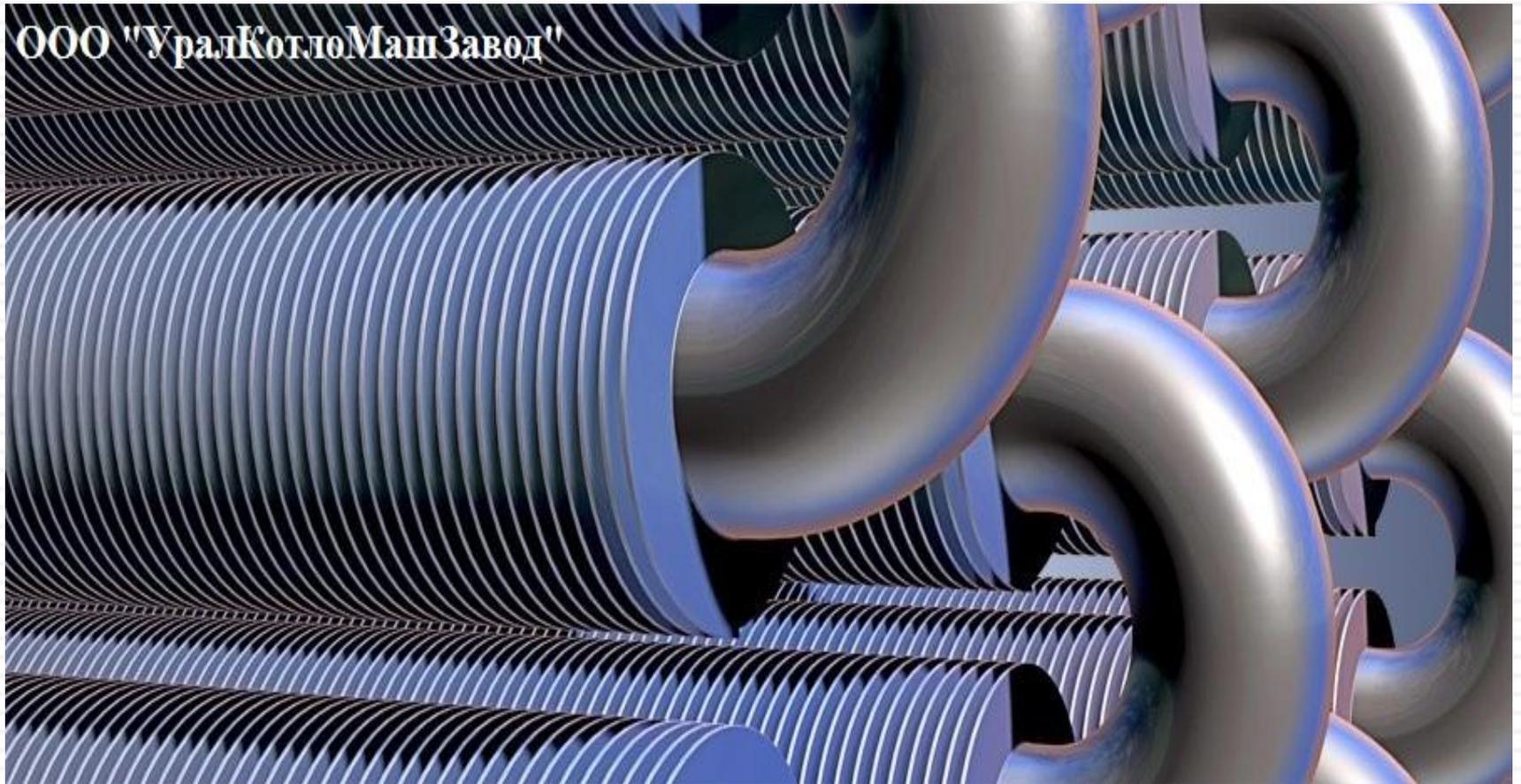
350

Степень оребрения и коэффициент компактности

- Увеличение поверхности теплообмена по стороне газов за счёт оребрения вызвано особенностью процесса передачи теплоты: с газовой стороны коэффициенты теплоотдачи значительно меньше, чем со стороны жидкости.
- **Степень оребрения** поверхности теплообмена характеризуется коэффициентом оребрения Φ_p , который представляет собой отношение полной поверхности оребренной трубы к поверхности гладкой (несущей) трубы.
- **Коэффициент компактности** таких поверхностей нагрева, определяемый величиной поверхности теплообмена, размещенной в единице объема, достигает $\Pi = 600 \text{ м}^2/\text{м}^3$, что позволяет создавать малогабаритные установки.

Оребрѐнные трубы

ООО "УралКотлоМашЗавод"

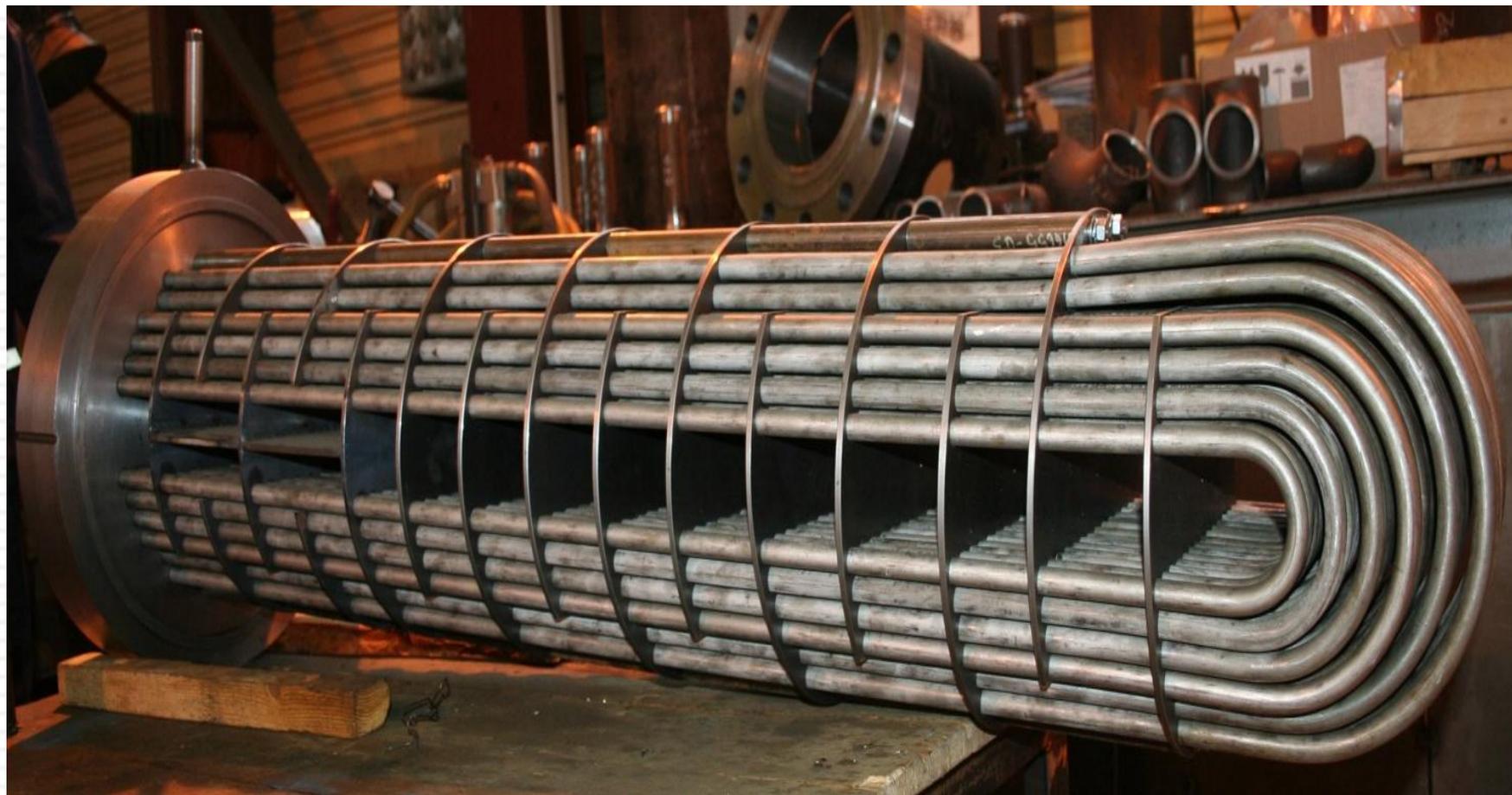


Спиральное ребрение

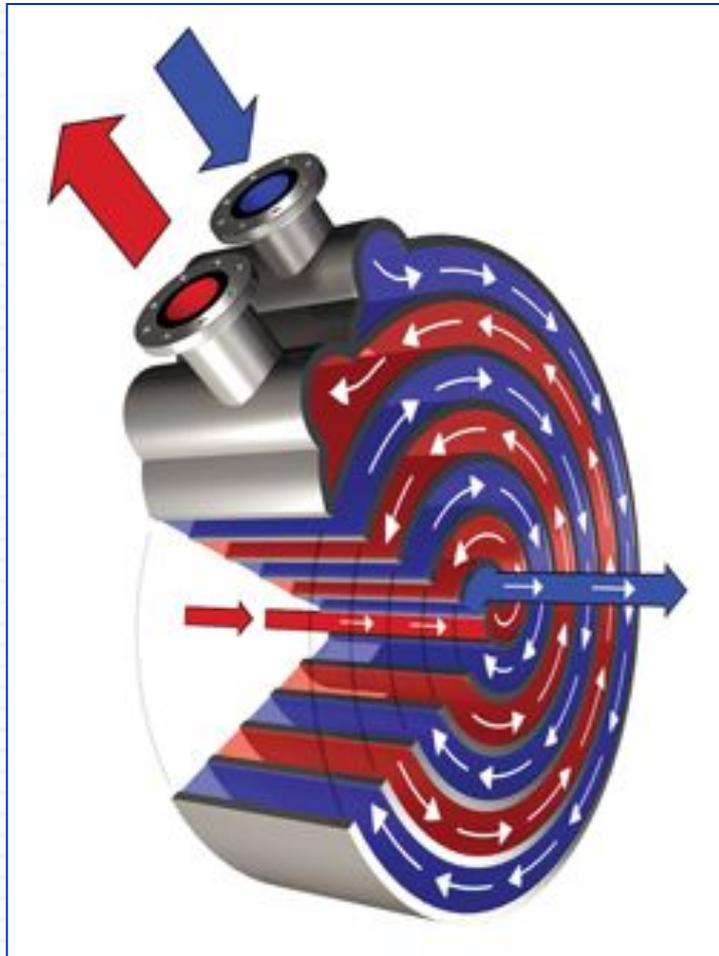
ООО "УралКотлоМашЗавод"



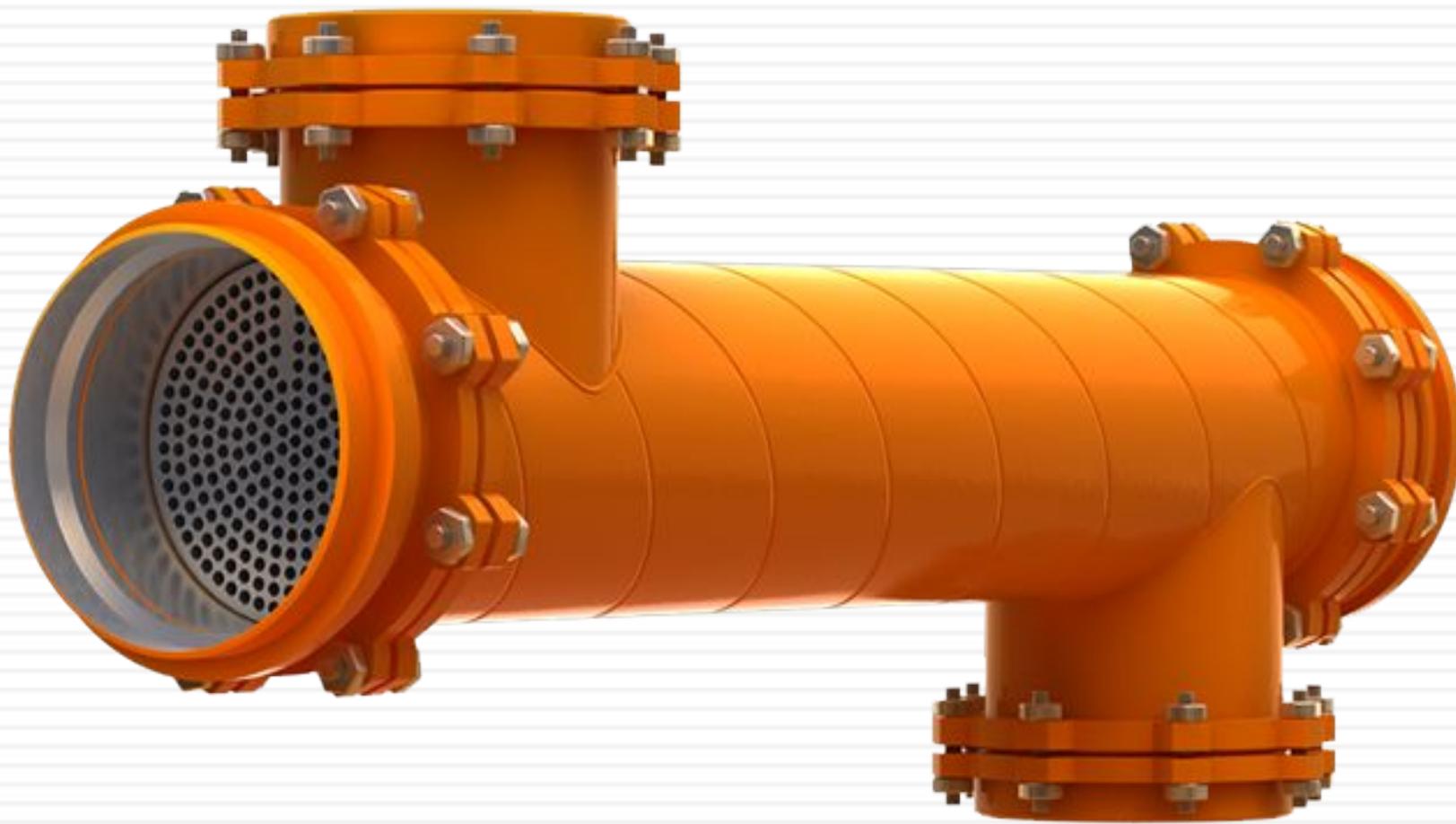
ТО с U-образными трубками



Спиральный ТО для пищевой промышленности

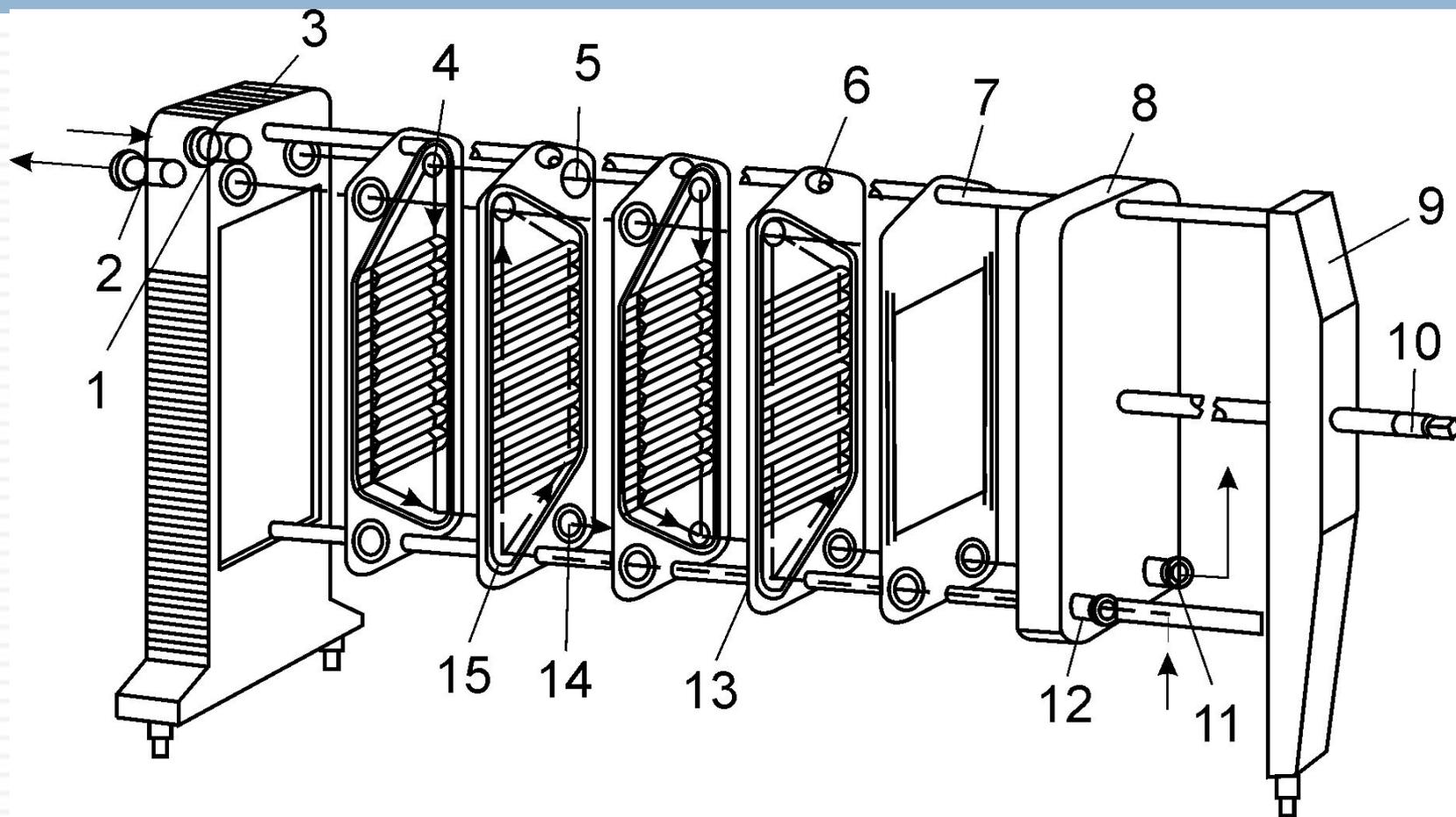


Геликоидные теплообменники



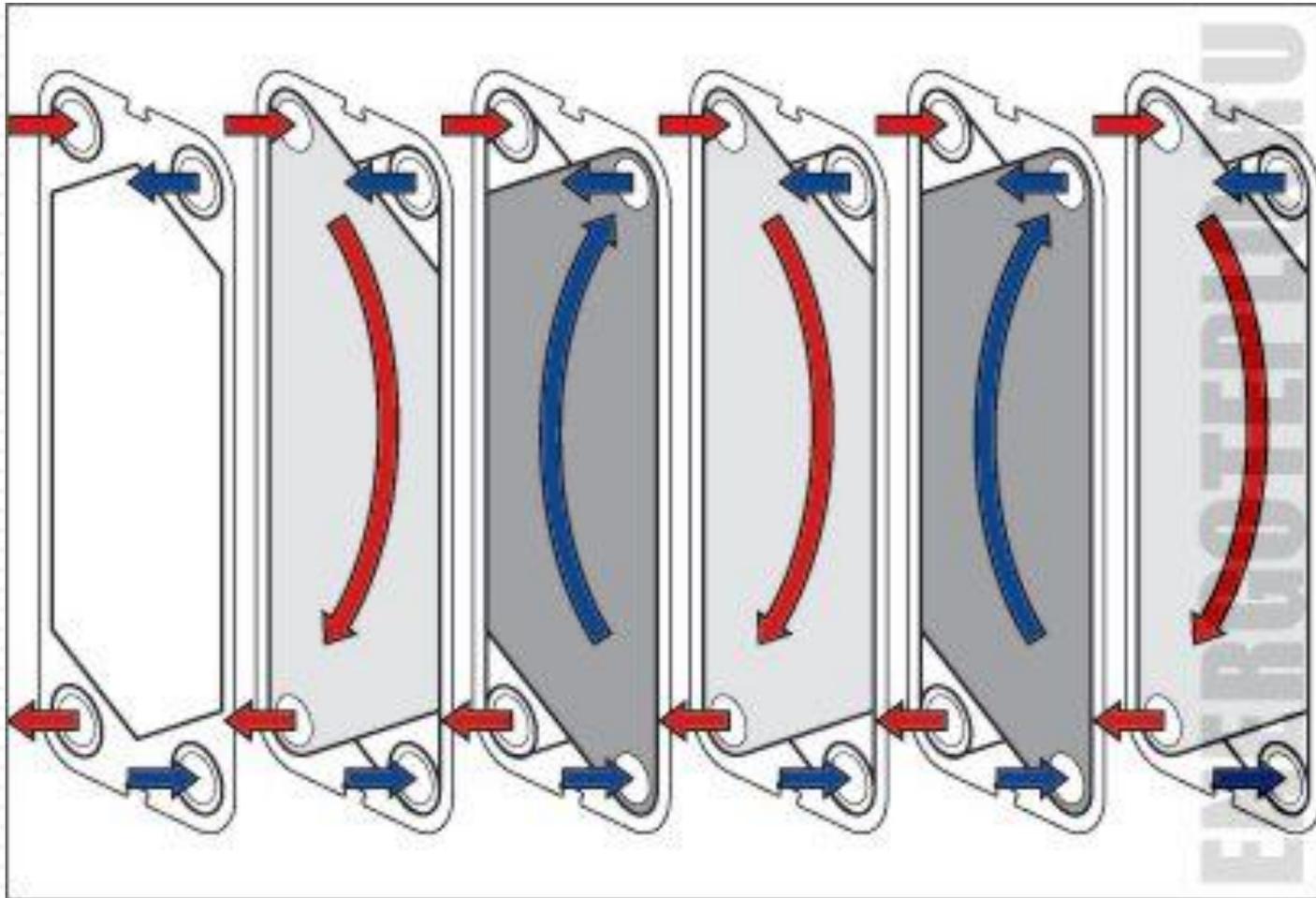


Пластинчатый ТО



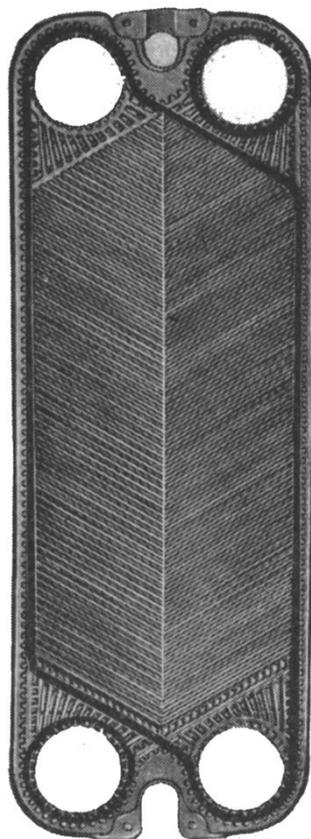


Пластинчатый теплообменник

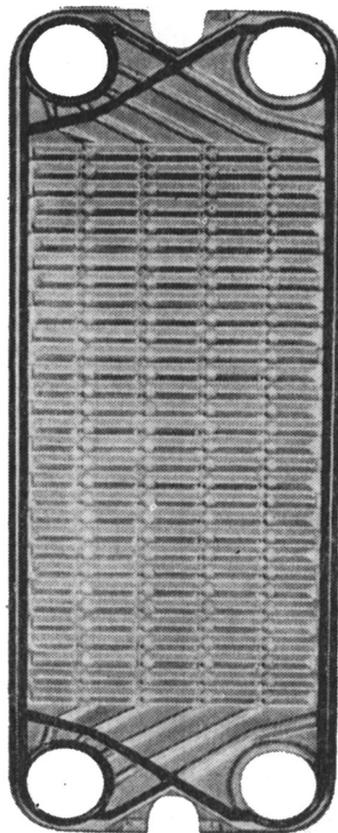


Пластины с гофрами

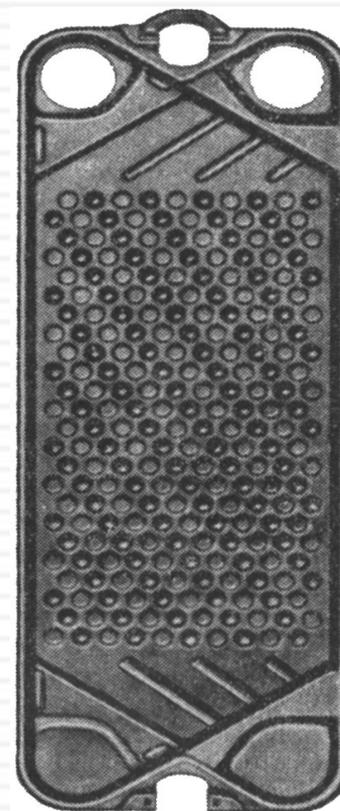
«Уралхиммаш»,
«Розенблад»



«Альфа-Лаваль»



«Хисака»



Теплоносители

- **Теплоносители** – это рабочие среды, протекающие в ТООА
- По агрегатному состоянию: газообразные, жидкие
- Основные теплоносители: вода, воздух, пар, дымовые газы, масла, глицерин, антифризные жидкости, и пр.

Критерии выбора теплоносителей

- **дешевизна**
- **экологичность**
- **безопасность**
использования
- **доступность**
- **тепловая эффективность**

Теплофизические свойства

- **теплоёмкость** C , $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$ – количество теплоты, необходимое для нагревания единичной массы вещества на 1°C
- **теплопроводность** λ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$ – характеризует по закону Фурье способность вещества проводить теплоту – количество теплоты, проходящее через единицу поверхности за единицу времени при разности температур в 1°C на единицу длины

Теплофизические свойства

- **ВЯЗКОСТЬ**: кинематическая ν , $\text{м}^2/\text{с}$,
динамическая $\mu = \nu \cdot \rho$, $\text{Па} \cdot \text{с}$ — характеризует по закону Ньютона силы внутреннего трения
- **ПЛОТНОСТЬ** ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$ — масса единицы объёма
- **скрытая теплота парообразования (конденсации*)** r , $\text{кДж}/\text{кг}$, количество теплоты для преобразования 1 кг воды в пар

Идеальный теплоноситель

- **Теплоёмкость** - максимальная
- **Теплопроводность** – максимальная
- **Плотность** - максимальная
- **Вязкость** – минимальная
- **Скрытая теплота парообразования*** – в зависимости от назначения ТОВА

- Самые распространённые теплоносители: **вода** и **воздух**
- Характеризуются не очень высокой тепловой эффективностью (**воздух**), однако максимально удовлетворяют нас по критериям: **дешевизна, экологичность и доступность**

Рекомендуемые скорости теплоносителей в каналах теплообменников

Теплоноситель	Скорость, м/с
Маловязкие жидкости (вода, бензин, керосин)	1–3
Вязкие жидкости (масла, растворы солей и пр.)	0,2–1
Запылённые газы при атмосферном давлении	6–12
Незаполненное газы при атмосферном давлении	12–16
Газы под давлением	15–30
Водяной пар: насыщенный	30–50
перегретый	50–75
разреженный	100–200

Процессы, протекающие в ТОА

- Процессы тепло- и массообмена
- Три вида переноса теплоты:
 - теплопроводность;
 - конвекция;
 - излучение.
- На практике почти всегда мы имеем дело со сложным видом теплообмена – процессом **теплопередачи**, включающим в себя простые виды в разных комбинациях

Основные законы теплообмена

- Теплопроводность – закон Фурье

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t$$

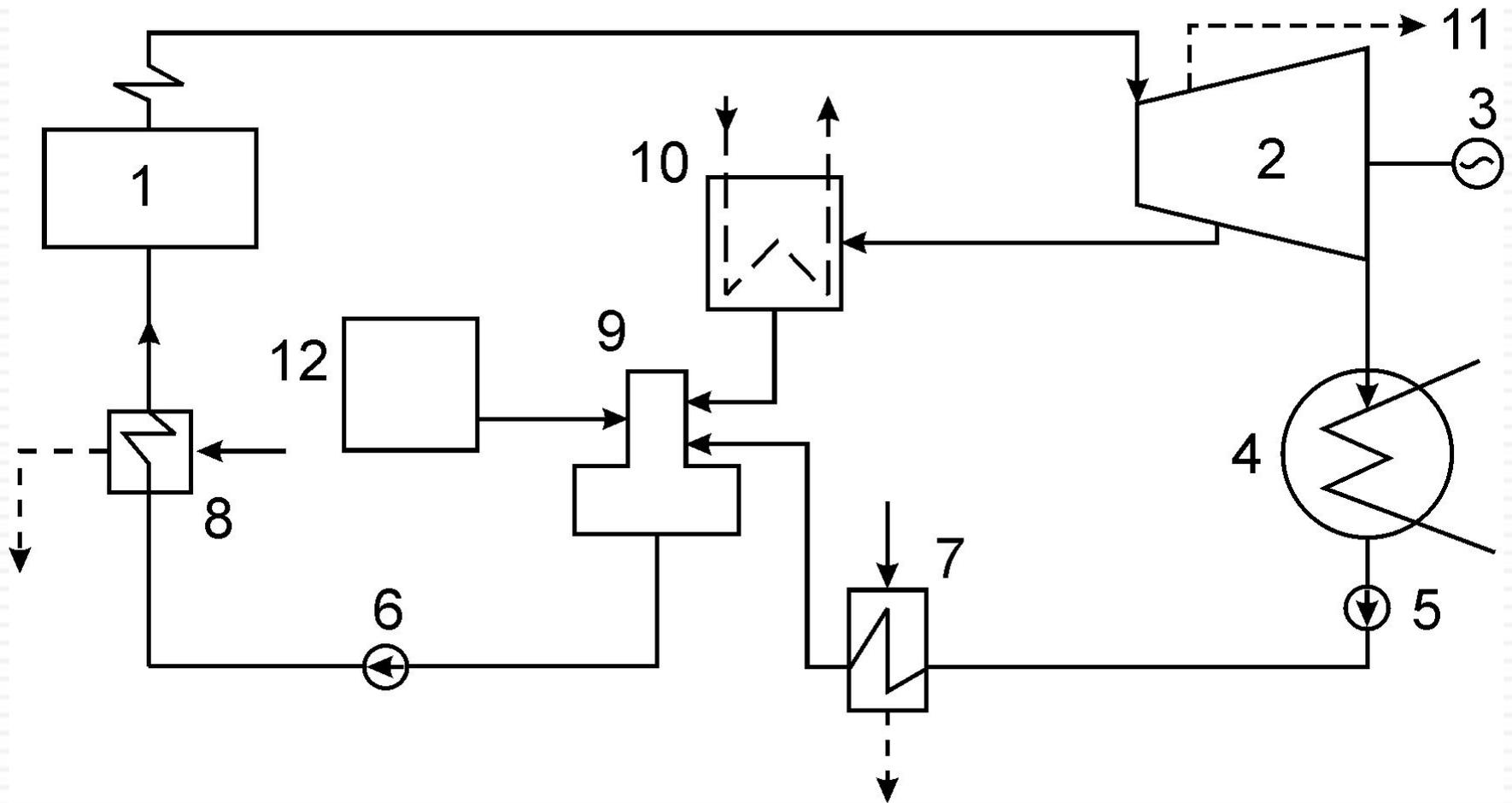
- Конвекция – закон Ньютона-Рихмана

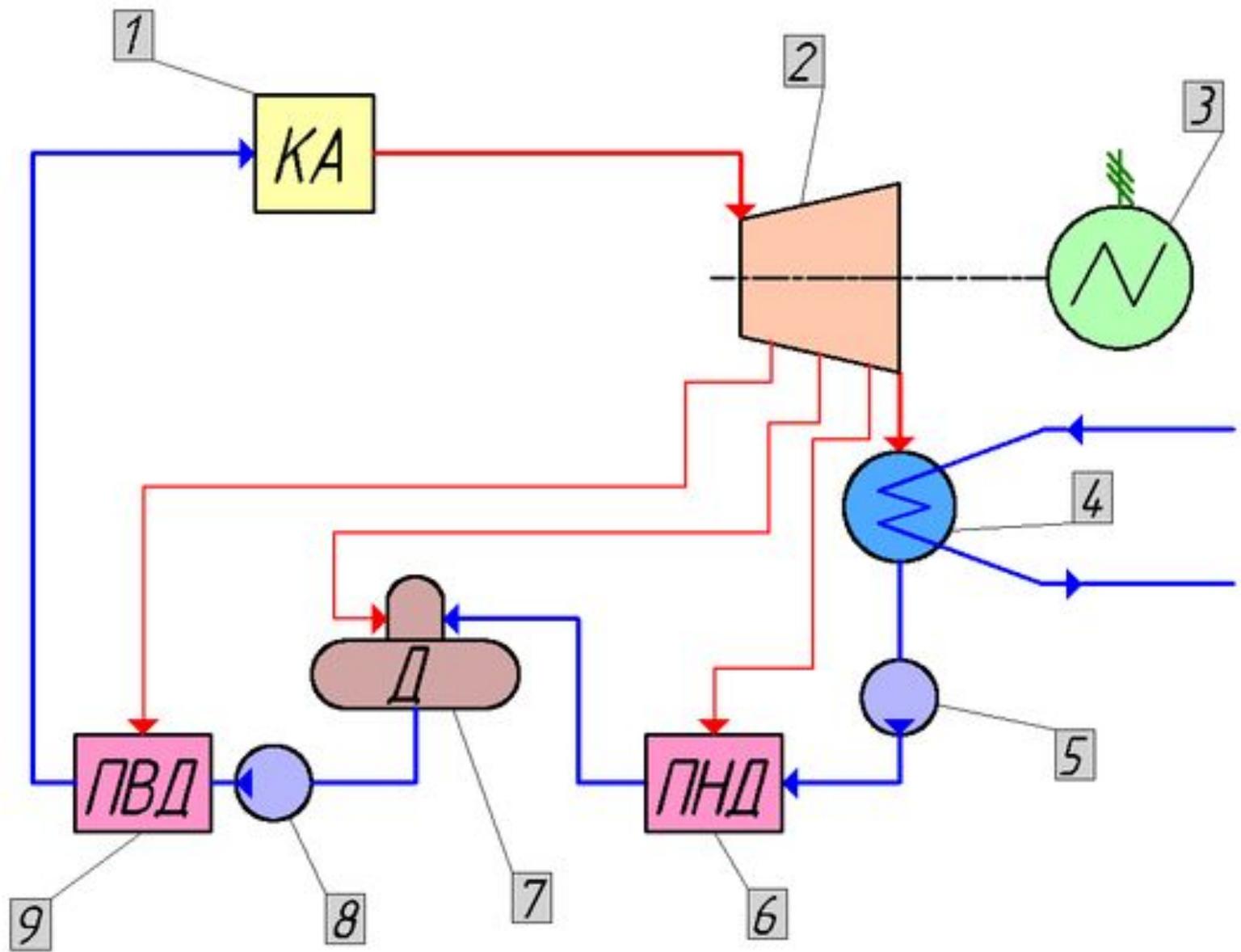
$$q = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{ст}})$$

- Излучение – закон Стефана-Больцмана

$$E = \sigma \cdot T^4$$

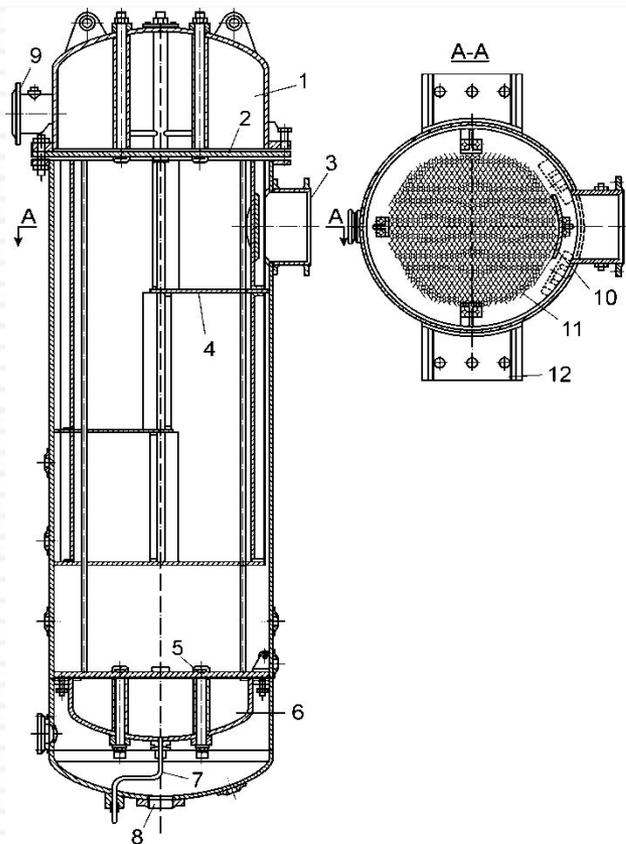
Принципиальная схема ТЭЦ



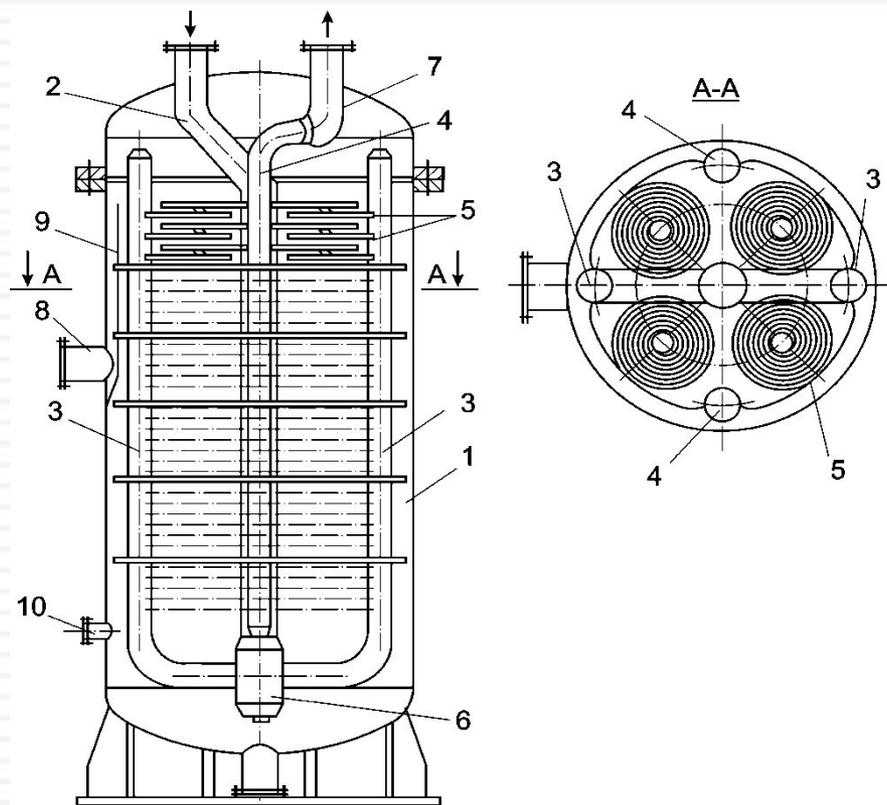


Парожидкостные ТО

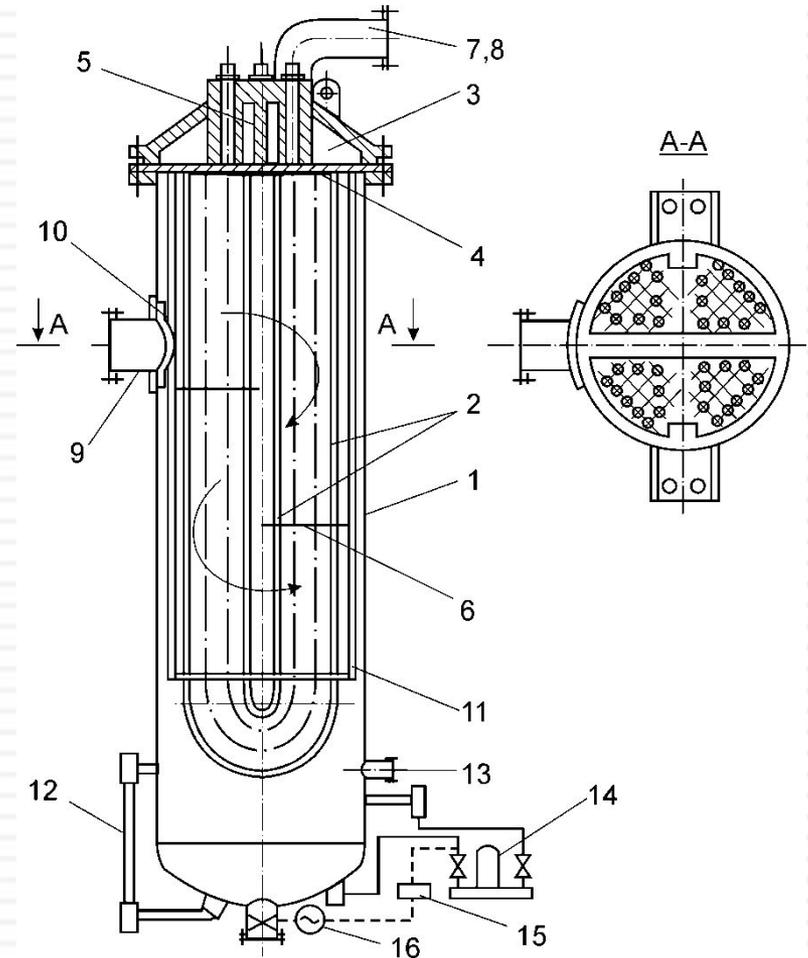
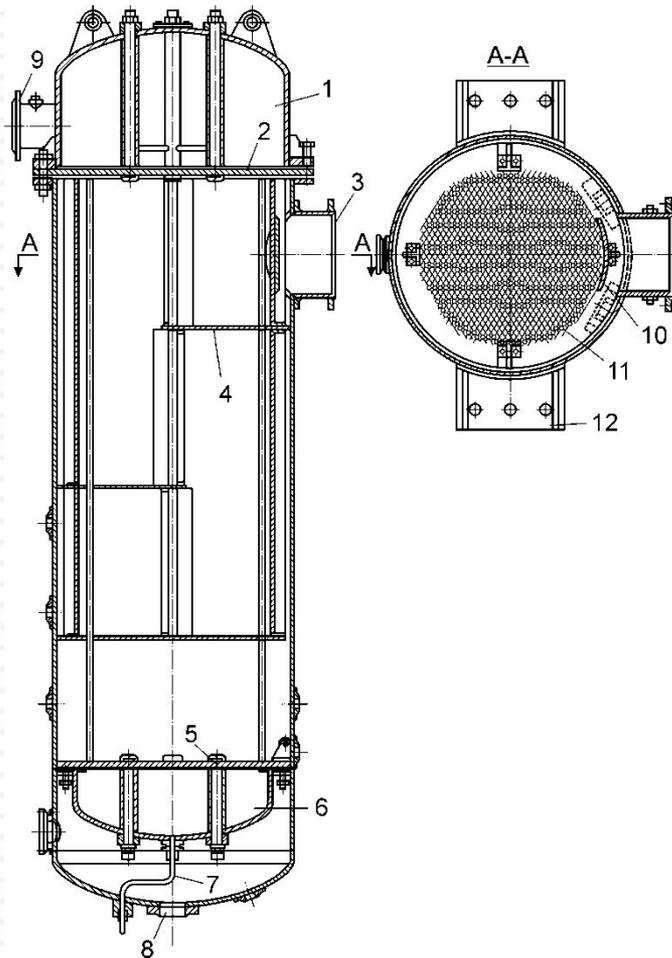
ПНД



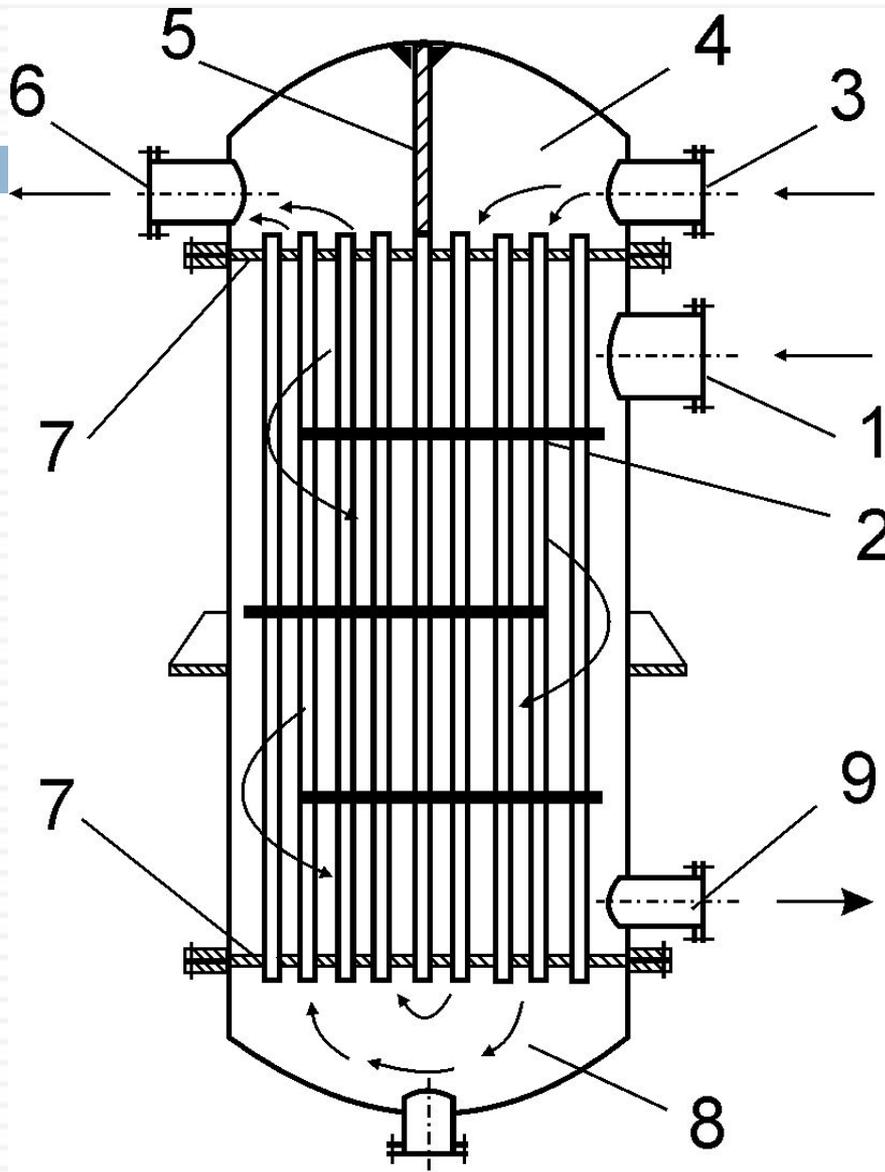
ПВД



Подогреватель низкого давления



ПНД



1 – патрубок для входа пара;

2 – направляющие перегородки;

3, 6 – патрубки для входа и выхода воды;

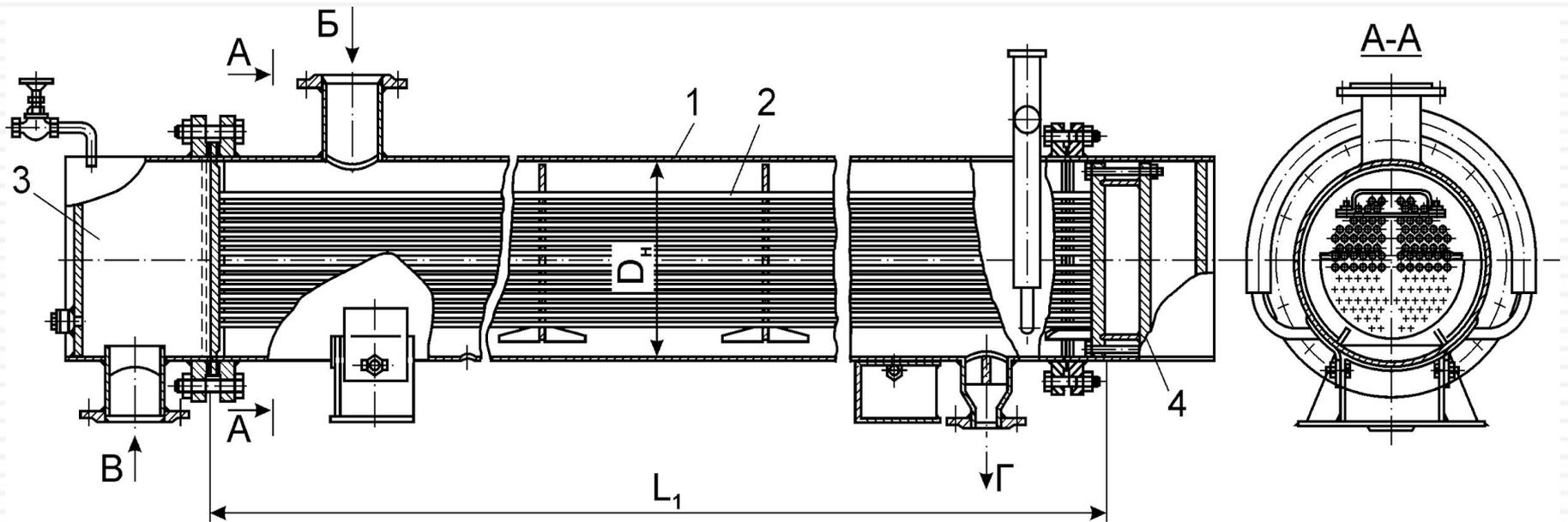
4, 8 – верхняя и нижняя водяные камеры;

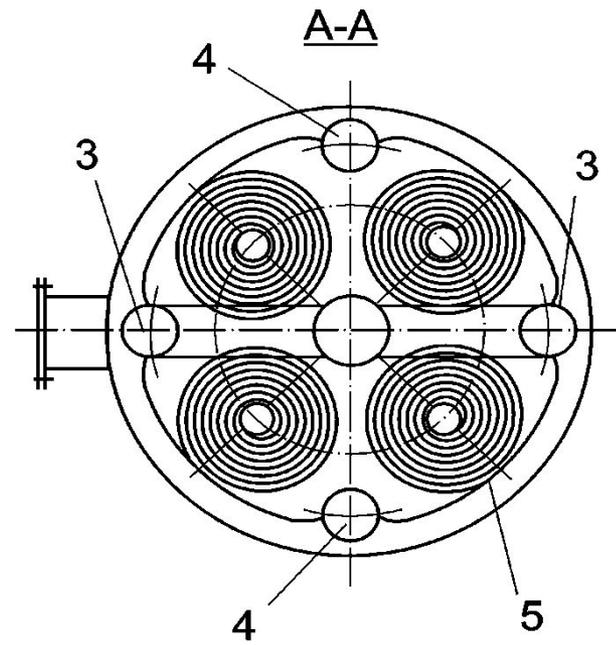
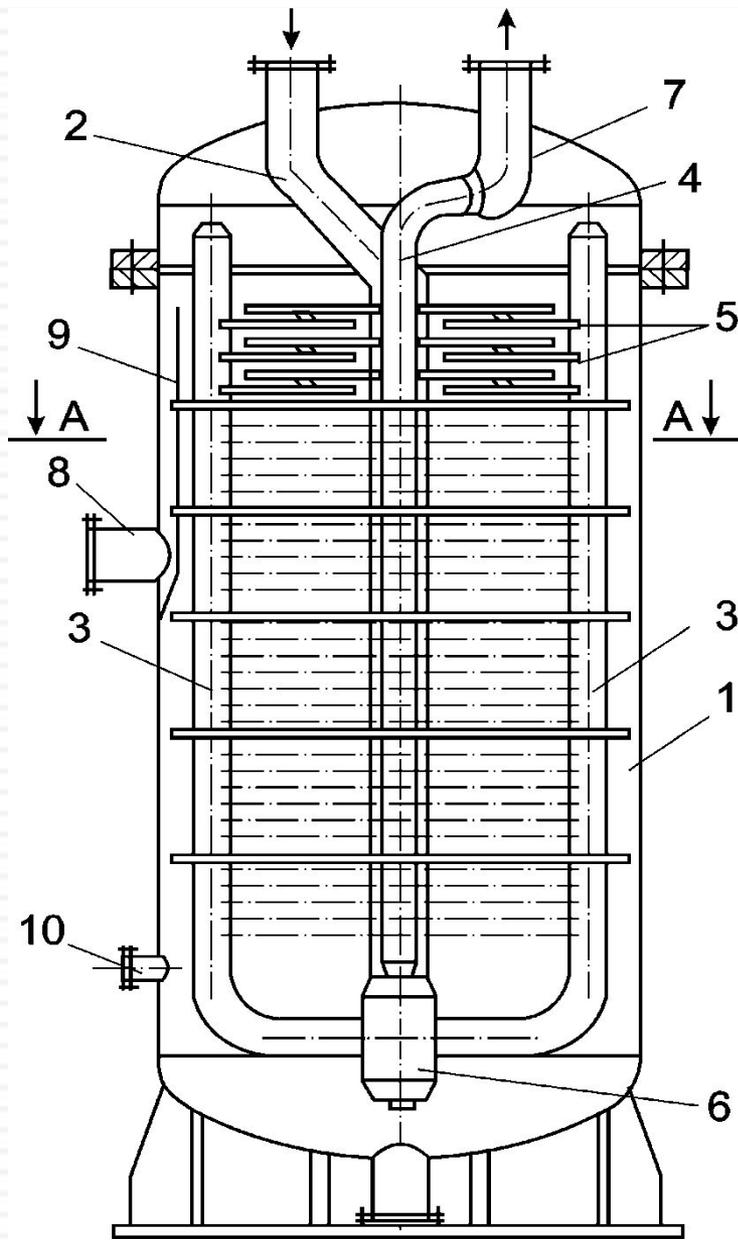
5 – разделительная перегородка;

7 – трубные доски;

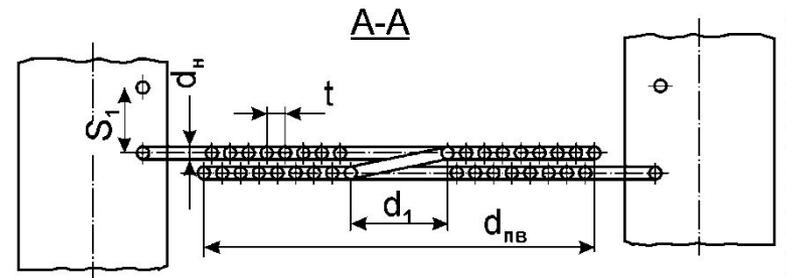
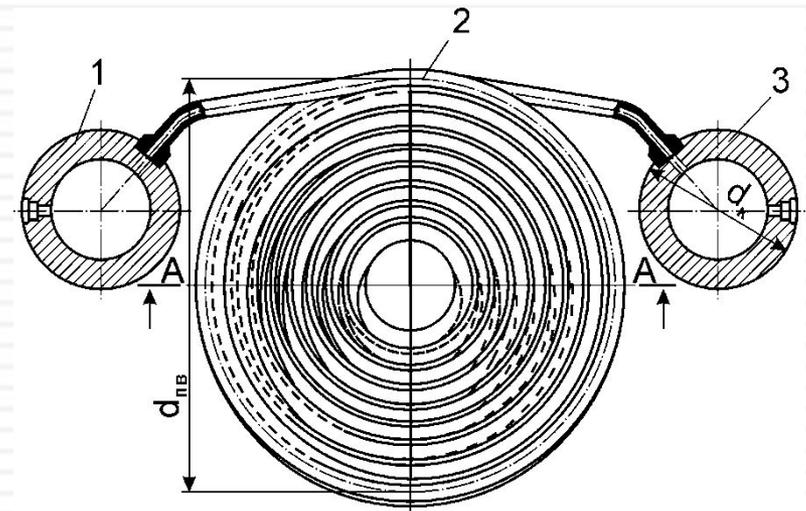
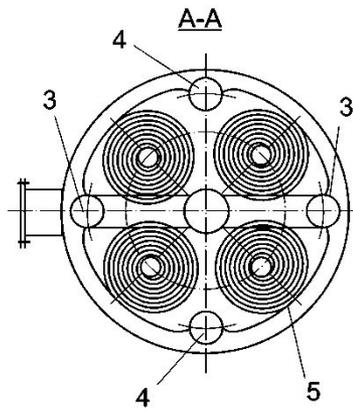
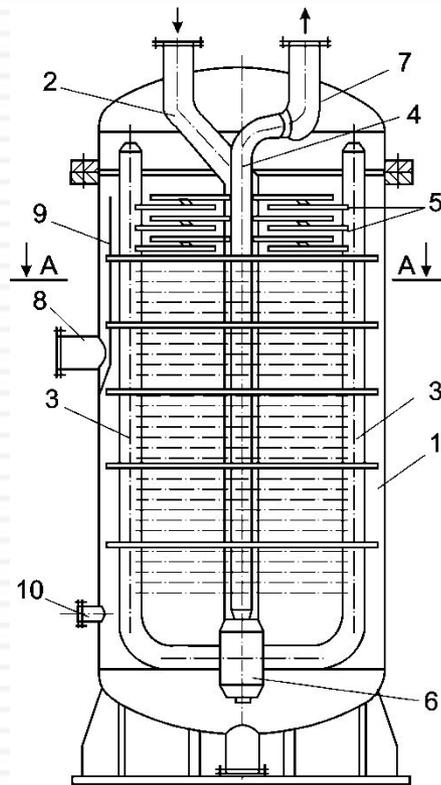
9 – патрубок для отвода конденсата

Горизонтальный ПНД

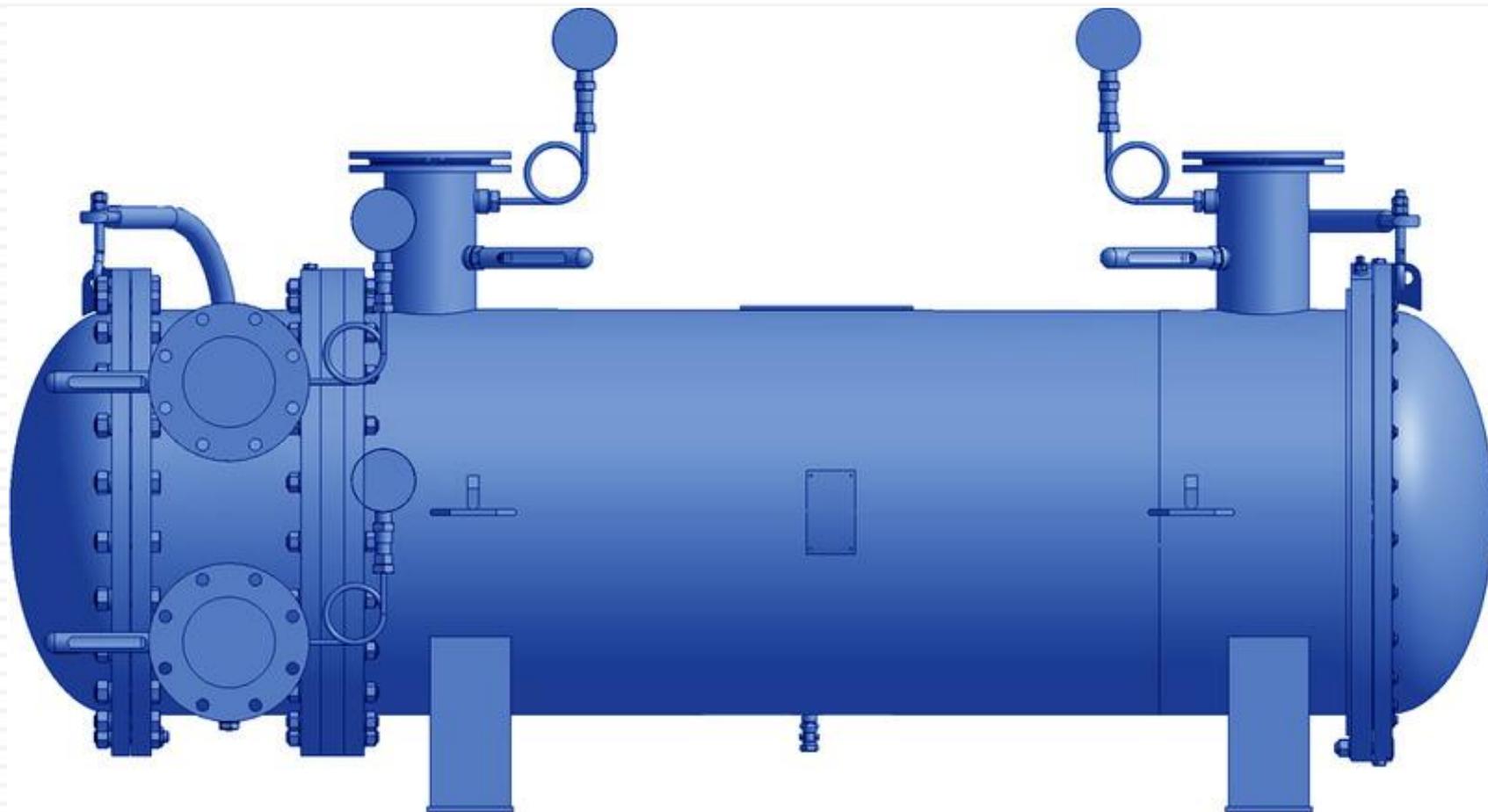




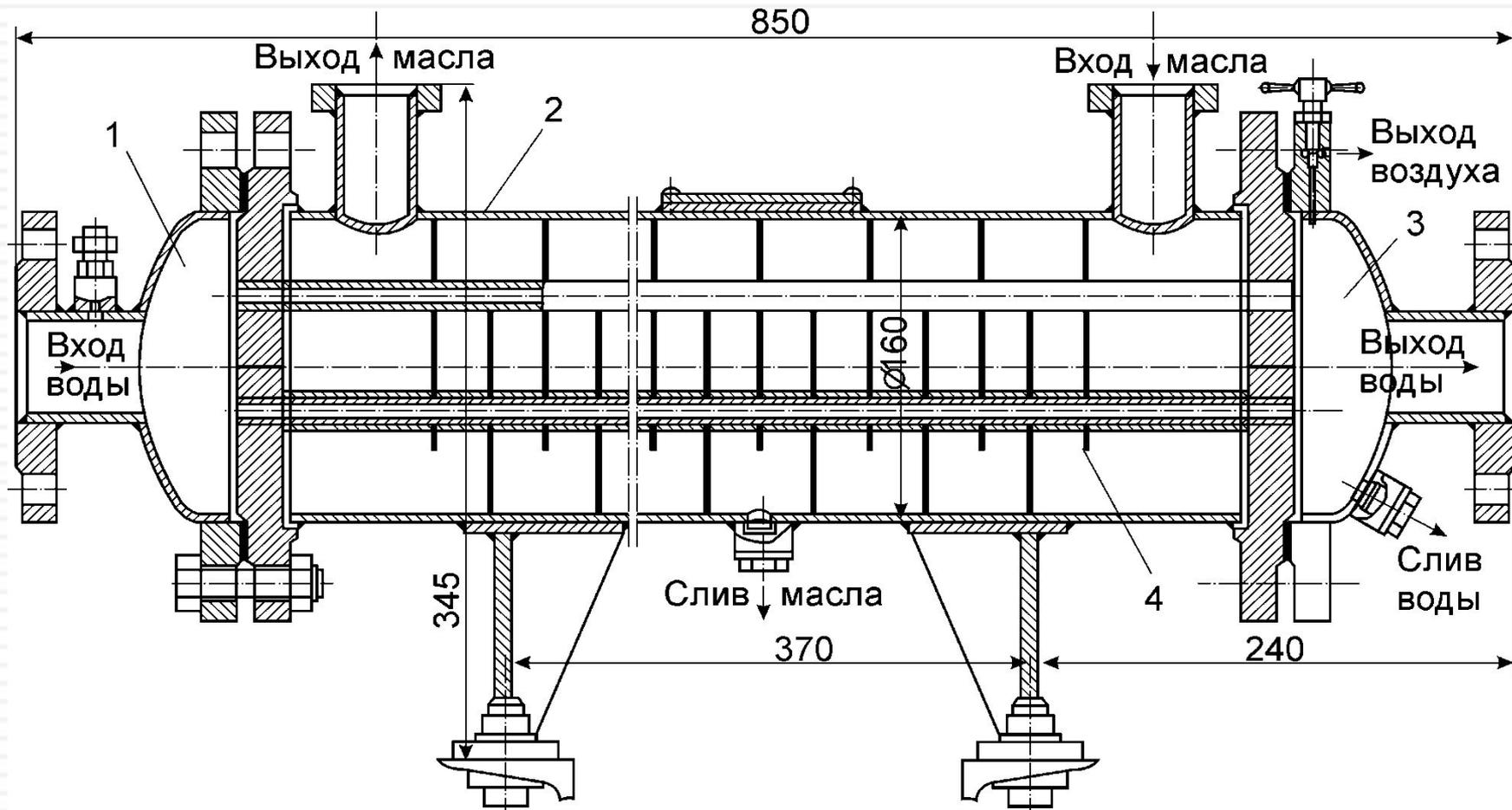
Подогреватель высокого давления



Маслоохладитель



Горизонтальный МО с сегментными перегородками



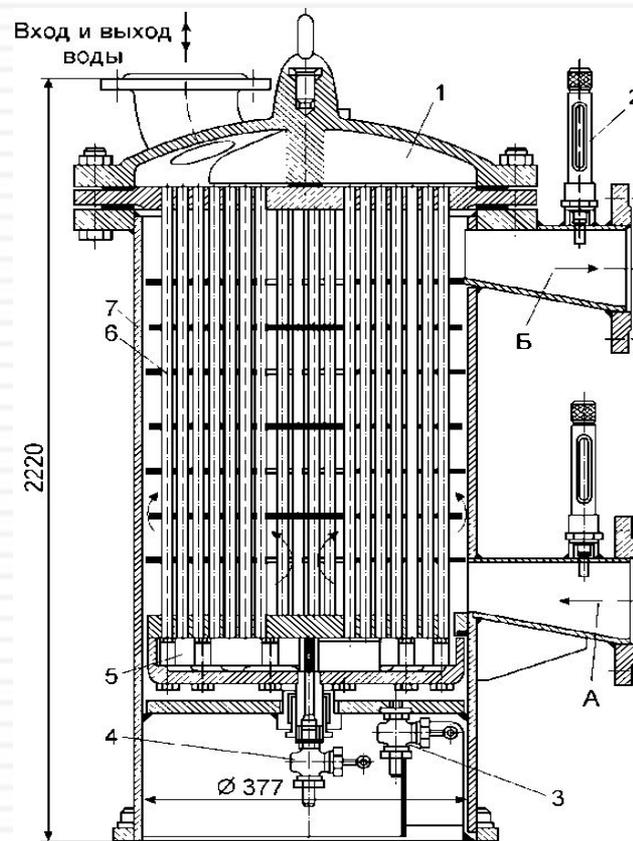
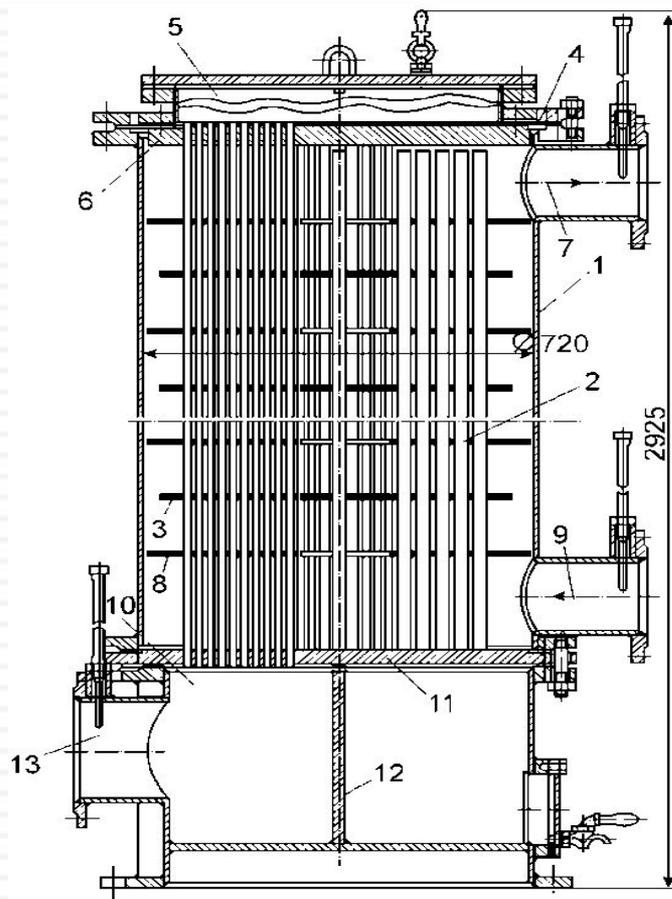


 **PromPortal.su**

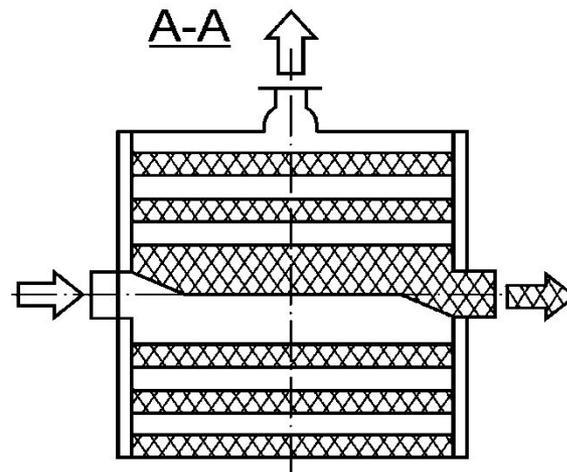
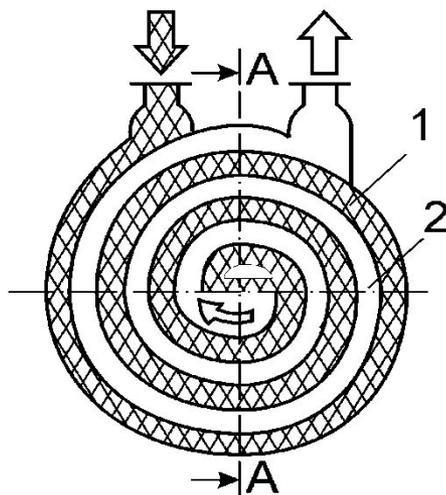
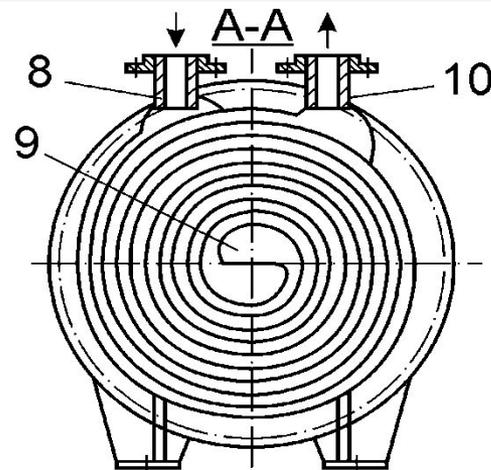
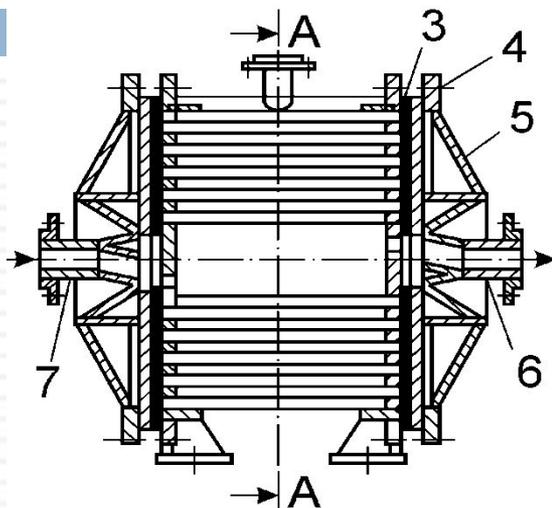
Жидкостно-жидкостные ТО

МО с перегородкой
«ДИСК-КОЛЬЦО»

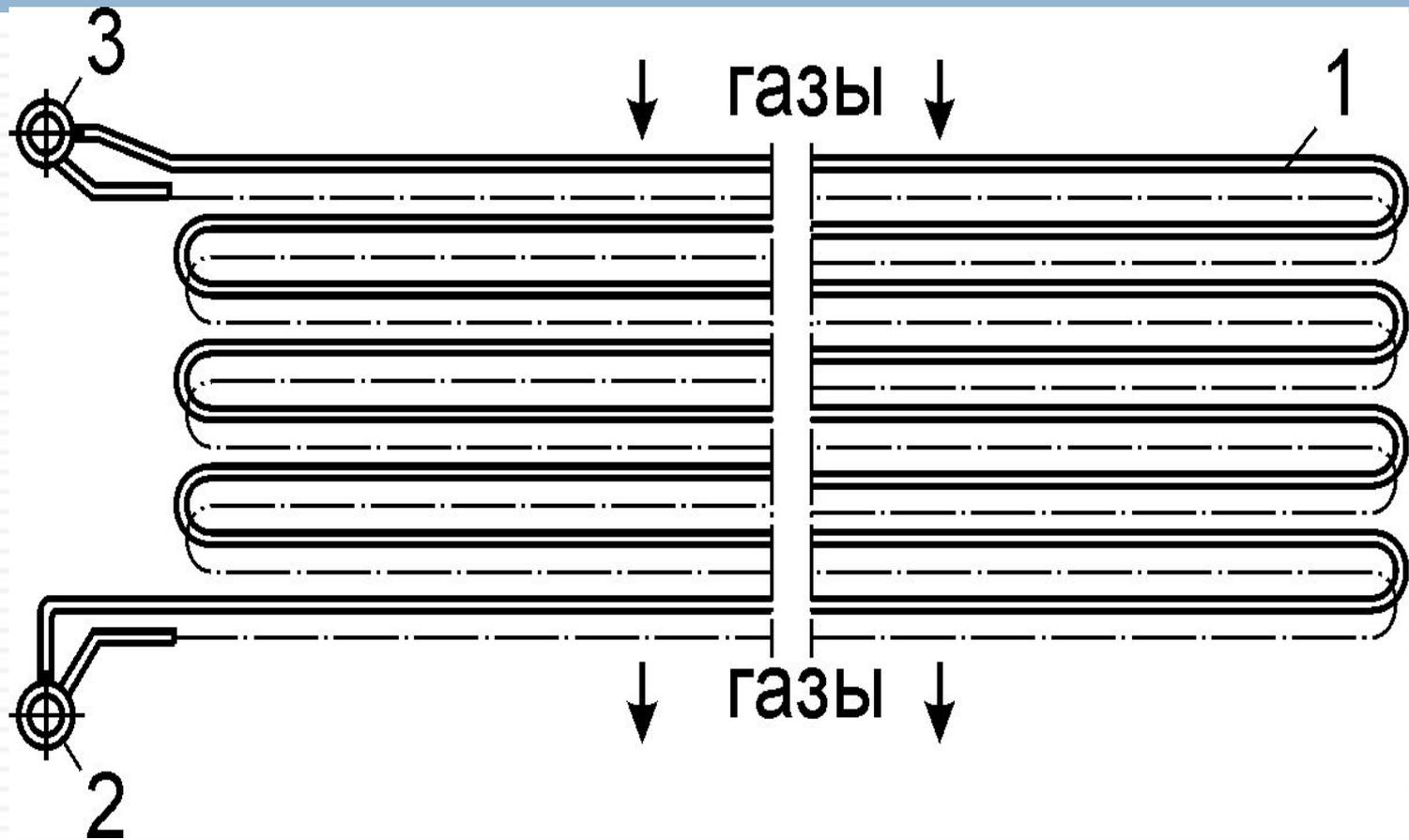
МО с подвижной нижней
водяной камерой



Спиральный ТО

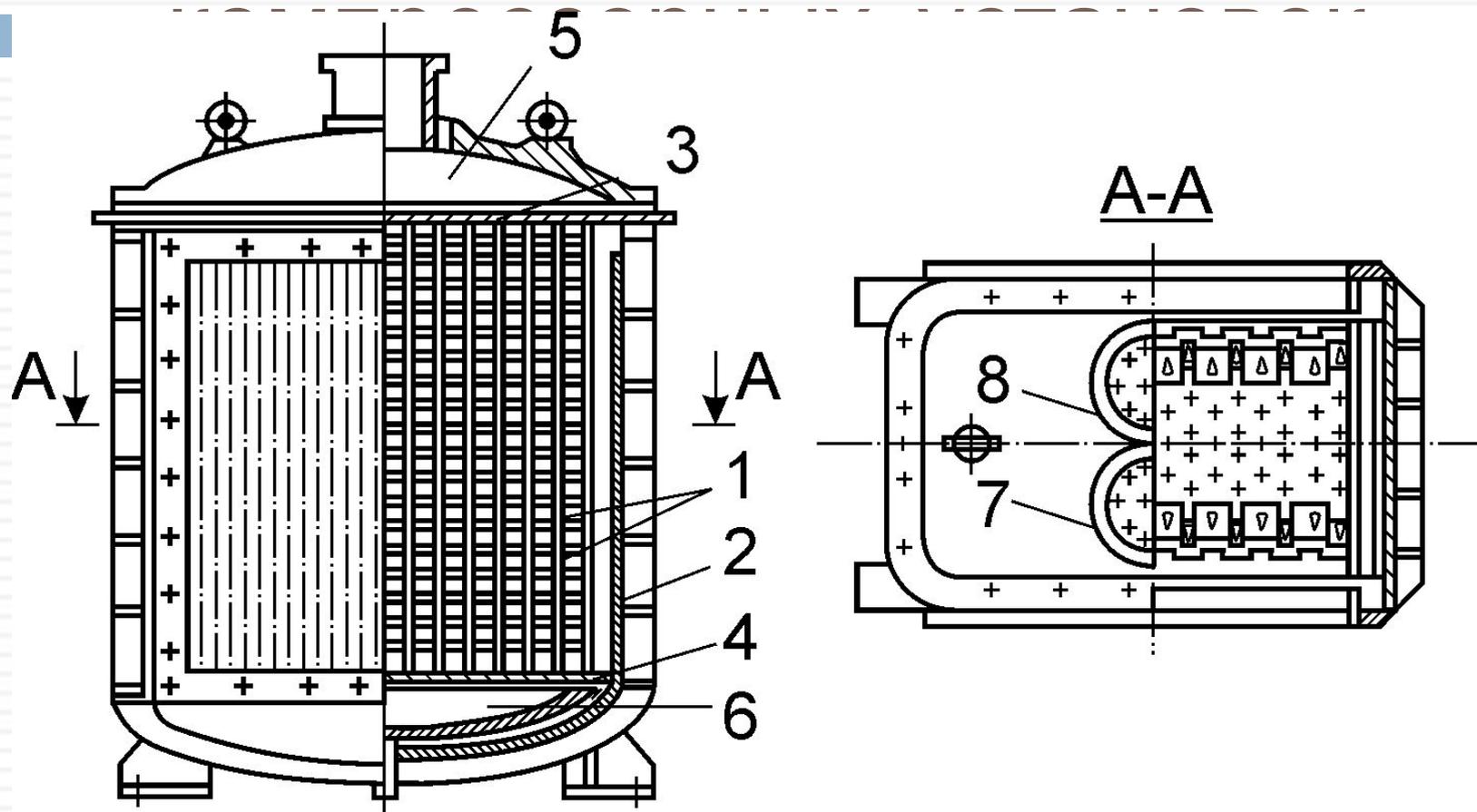


Газожидкостные ТО



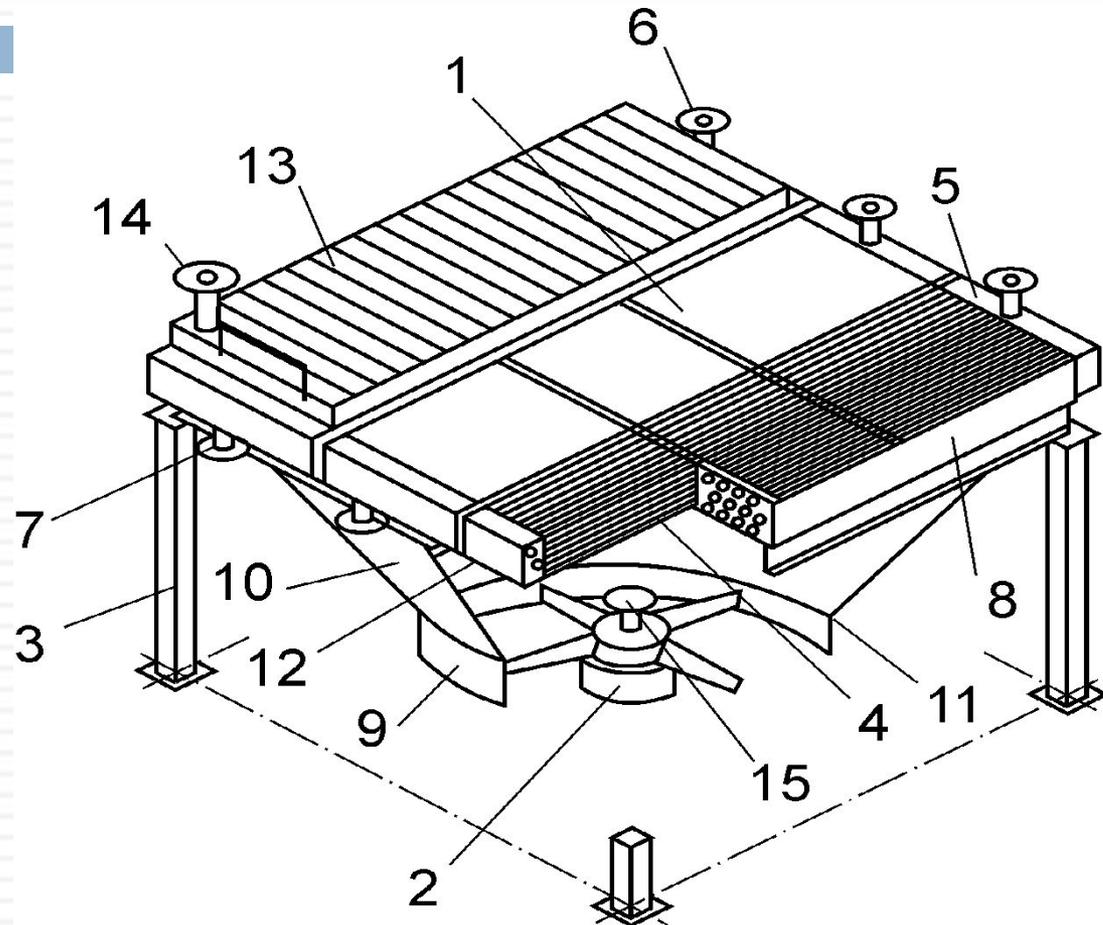
Ступень экономайзера из гладких труб

Промежуточный воздухоохладитель



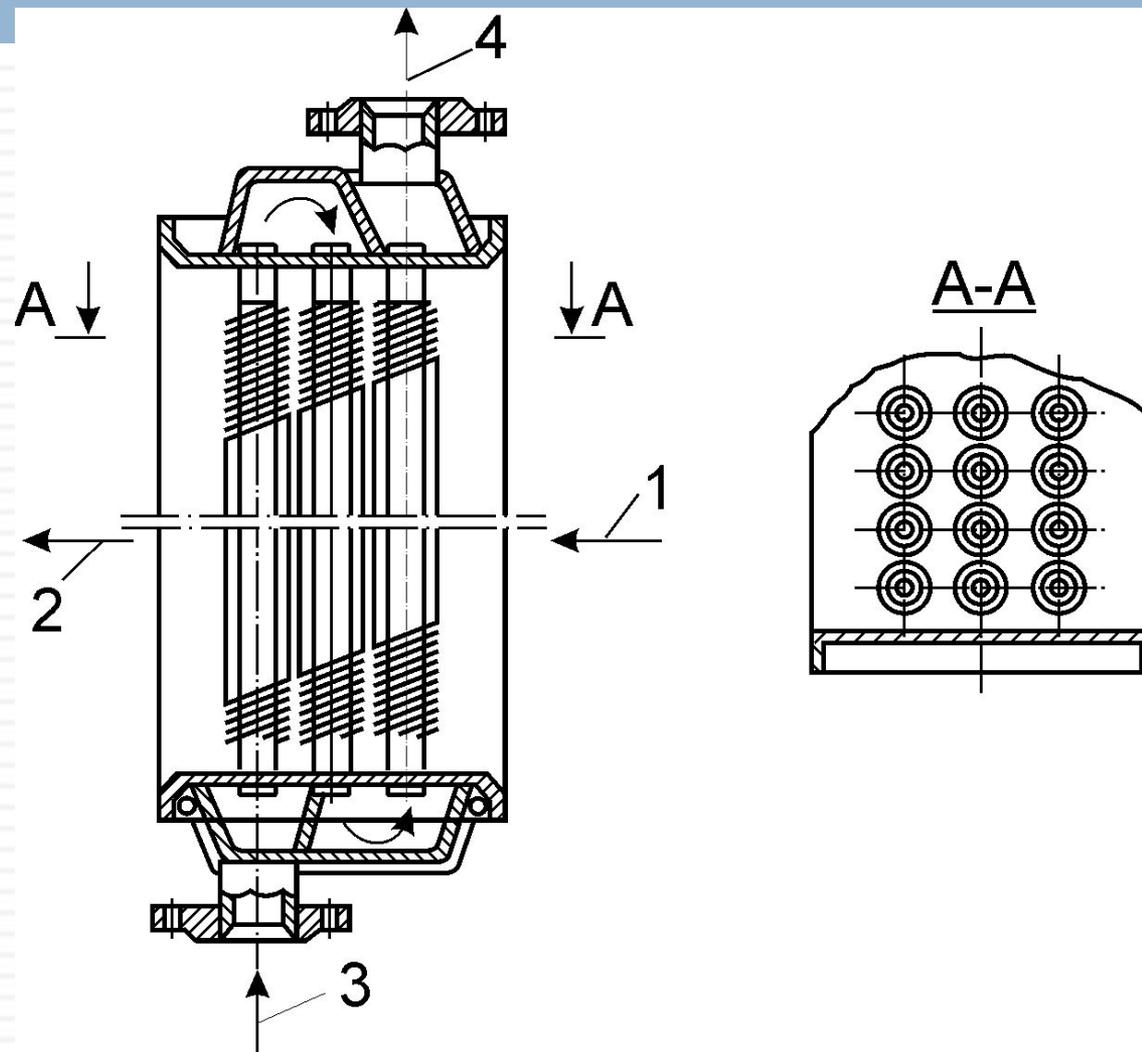
1 – трубный пучок; 2 – корпус; 3,4 – верхняя и нижняя трубные доски;
5,6 – верхняя и нижняя водяные камеры; 7,8 – патрубки для входа и
выхода охлаждающей воды

Теплообменник воздушного охлаждения

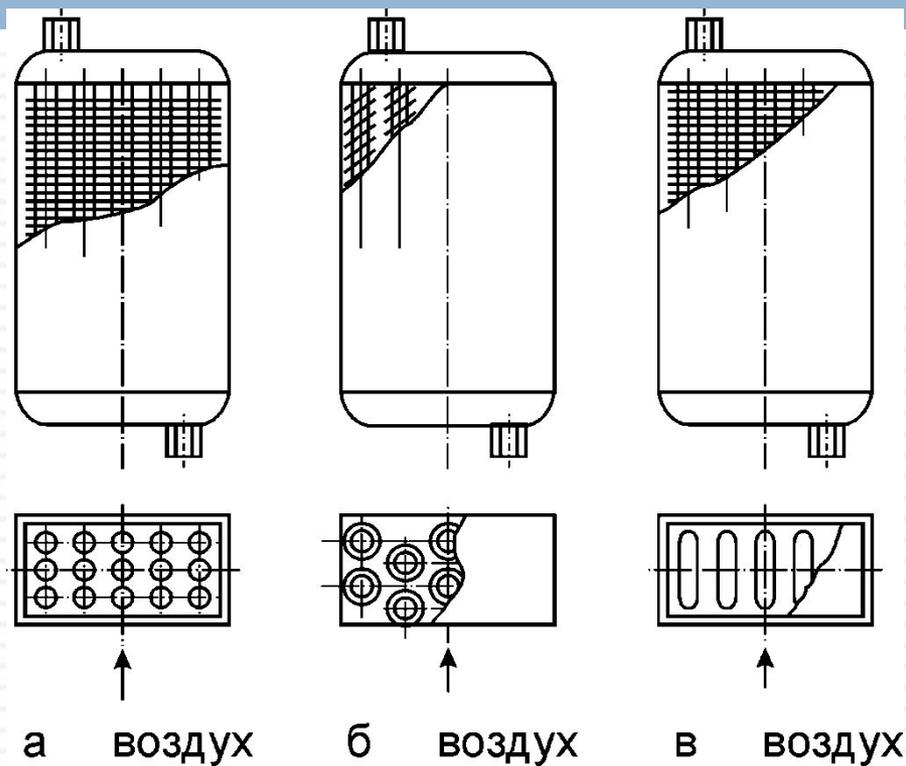


1 – теплообменная секция; 2 – вентилятор с приводом; 3 – опорная металлоконструкция; 4 – пучок из оребренных труб; 5 – камеры; 6,7 – штуцера для входа и выхода технологического продукта; 8 – рама; 9 – коллектор; 10 – диффузор; 11 – увлажнитель воздуха; 12 – подогреватель воздуха; 13 – жалюзийное устройство; 14,15 – приводы для изменения угла наклона лопаток жалюзи и лопастей вентилятора

Воздухоохладитель системы кондиционирования воздуха

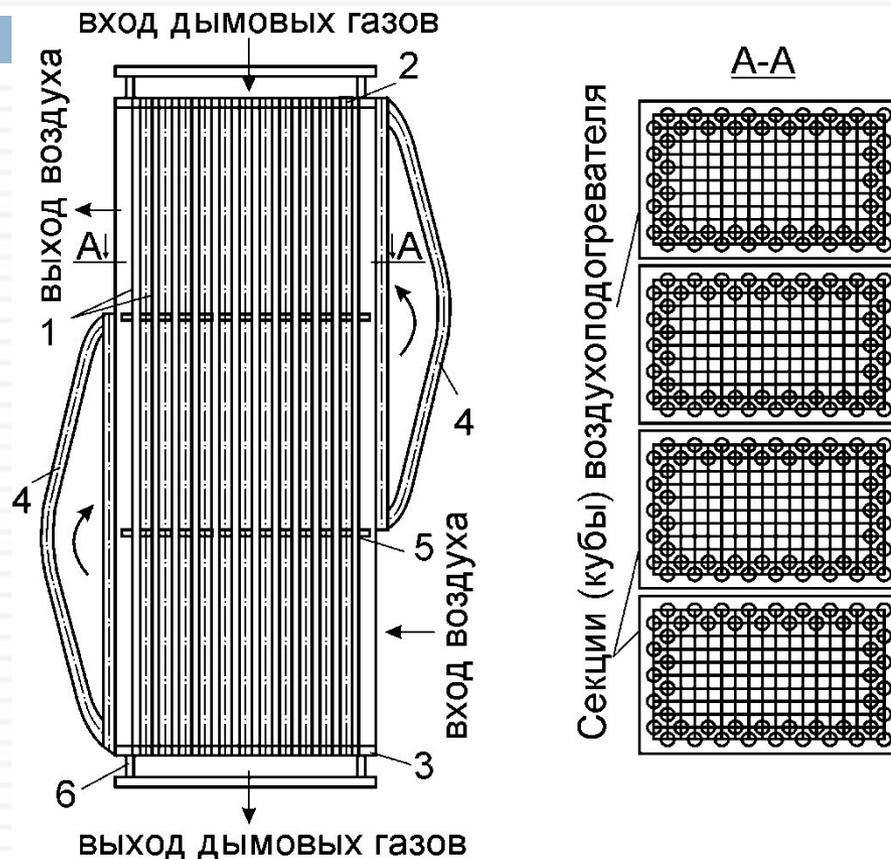


Конструкции калориферов



а – оребрѐнные сплошными пластинами на круглых трубках;
б – оребрѐнные навивной лентой; в – оребрѐнные сплошными пластинами на плоских трубках.

Газо-газовые ТО

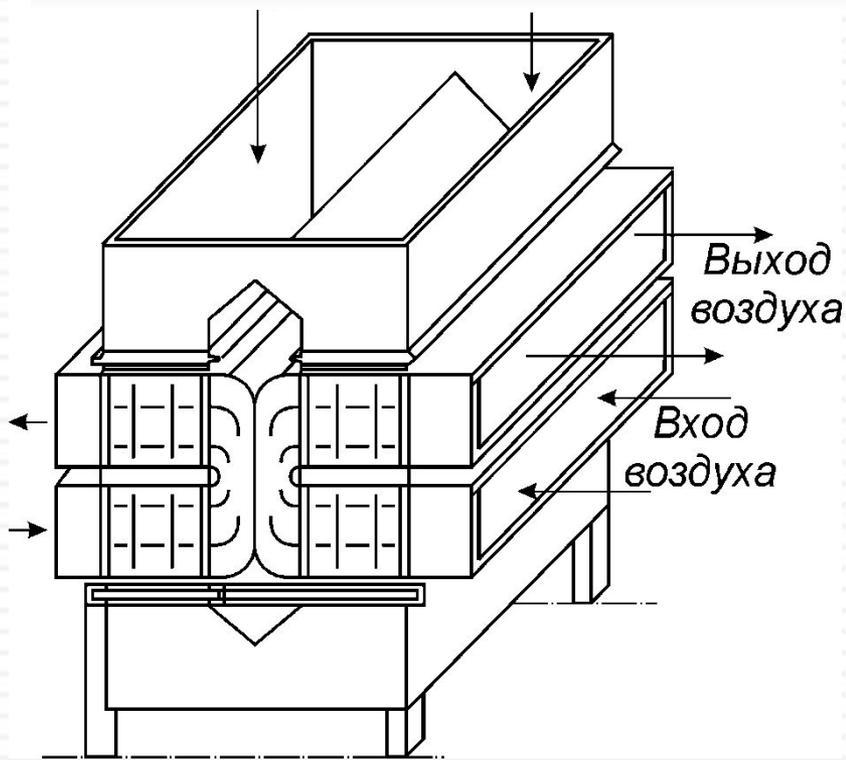


Трубчатый котельный воздухоподогреватель:

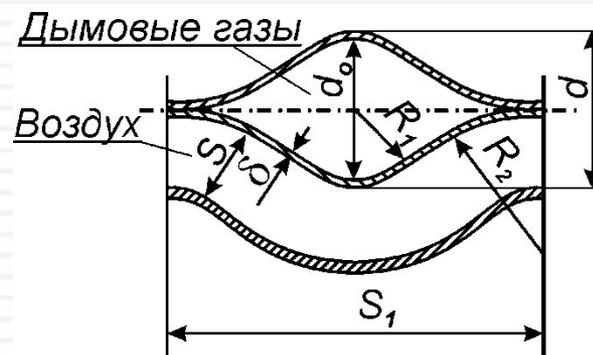
1 – трубный пучок; 2, 3 – верхняя и нижняя трубные доски;
4 – перепускные короба; 5 – промежуточные трубные доски; 6 – каркас

Пластинчатый воздухоподогреватель

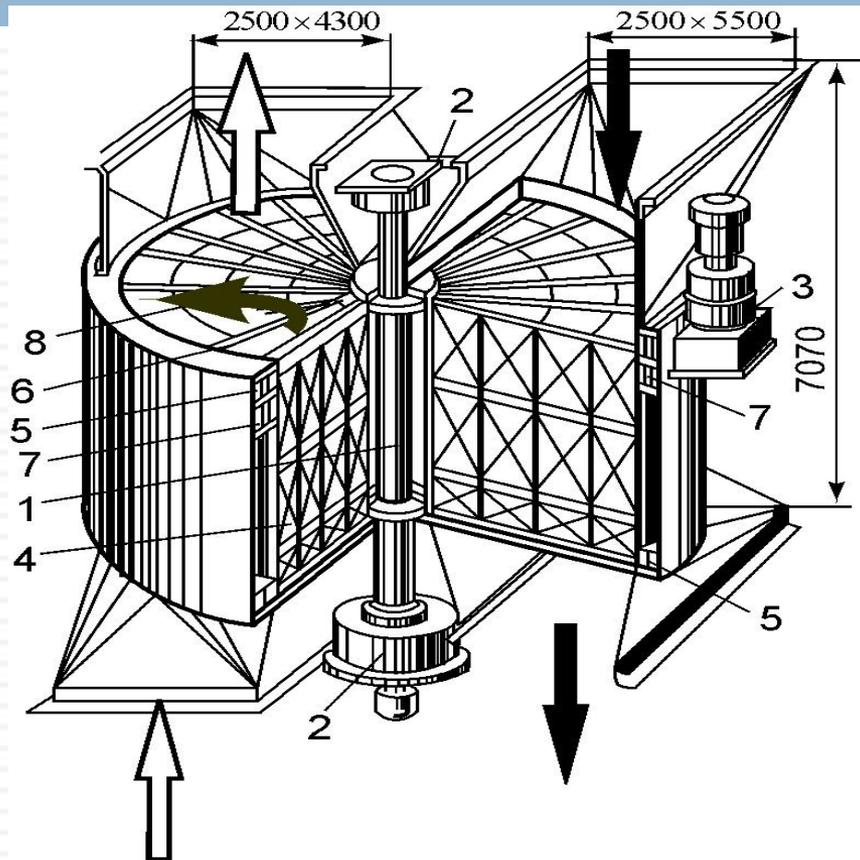
Компоновка ПВП



Форма каналов

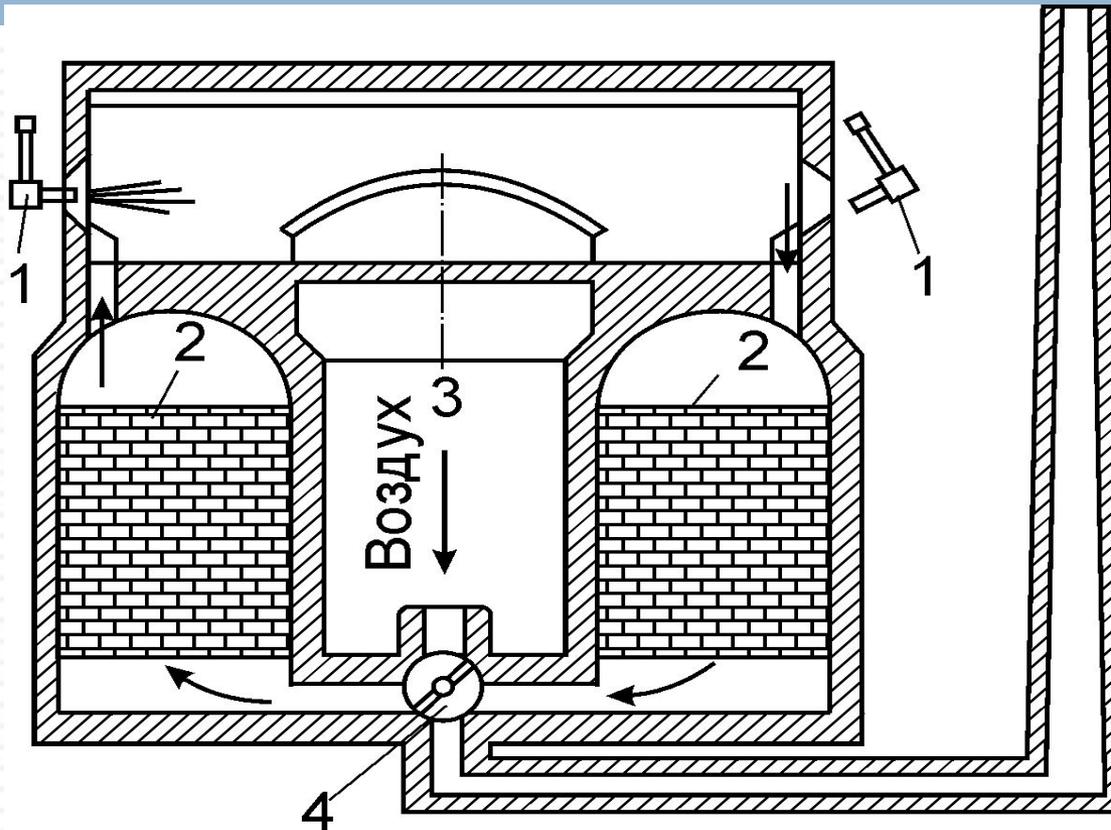


Регенеративный воздухоподогреватель



- 1 – вал ротора; 2 – подшипники; 3 – электродвигатель; 4 – набивки;
5 – наружный кожух; 6, 7 – радиальное и периферийное уплотнения;
8 – утечка воздуха через уплотнения

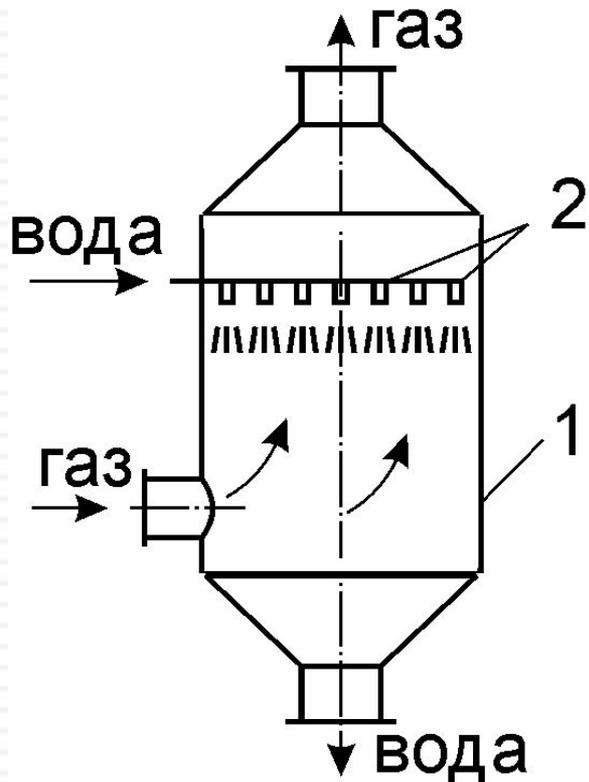
Регенеративные ТО



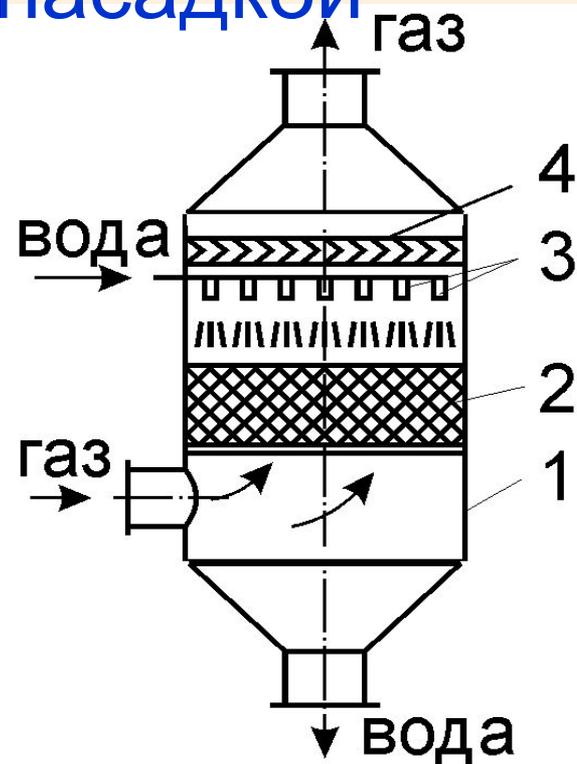
Регенеративный воздухоподогреватель с кирпичной насадкой типа “Каупер” для мартеновских и стеклоплавильных печей

Смесительные ТО

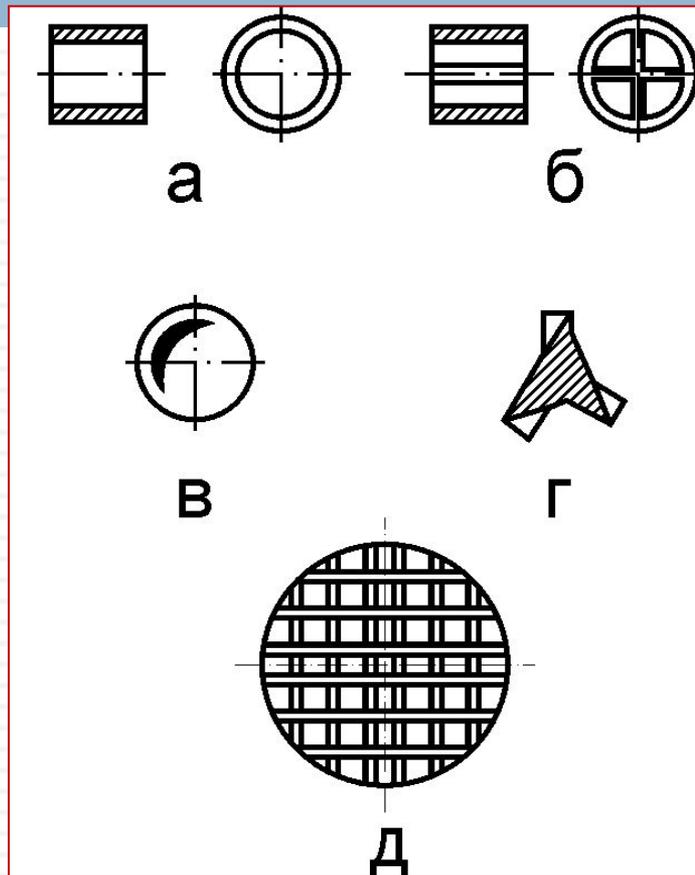
Полый скруббер



Скруббер с насадкой

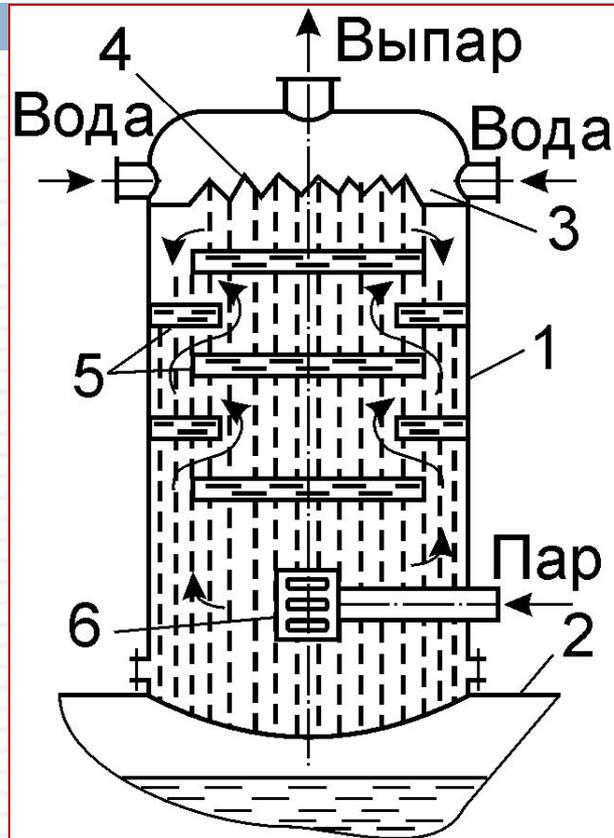


Типы насадок



**а – кольца Рашига; б – кольца с перегородками; в – шары;
г – пропеллерная насадка; д – хордовая (деревянная) насадка**

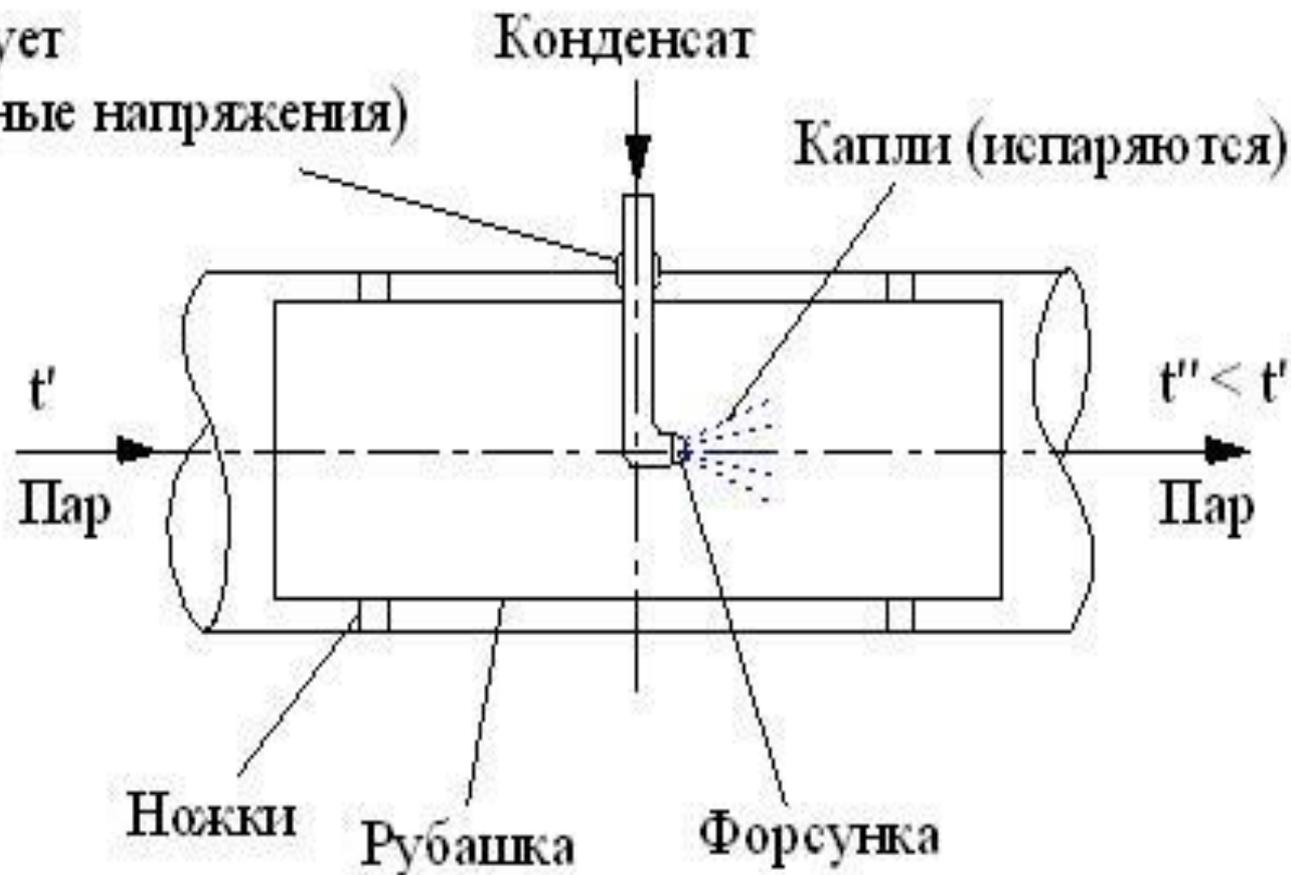
Струйный деаэратор



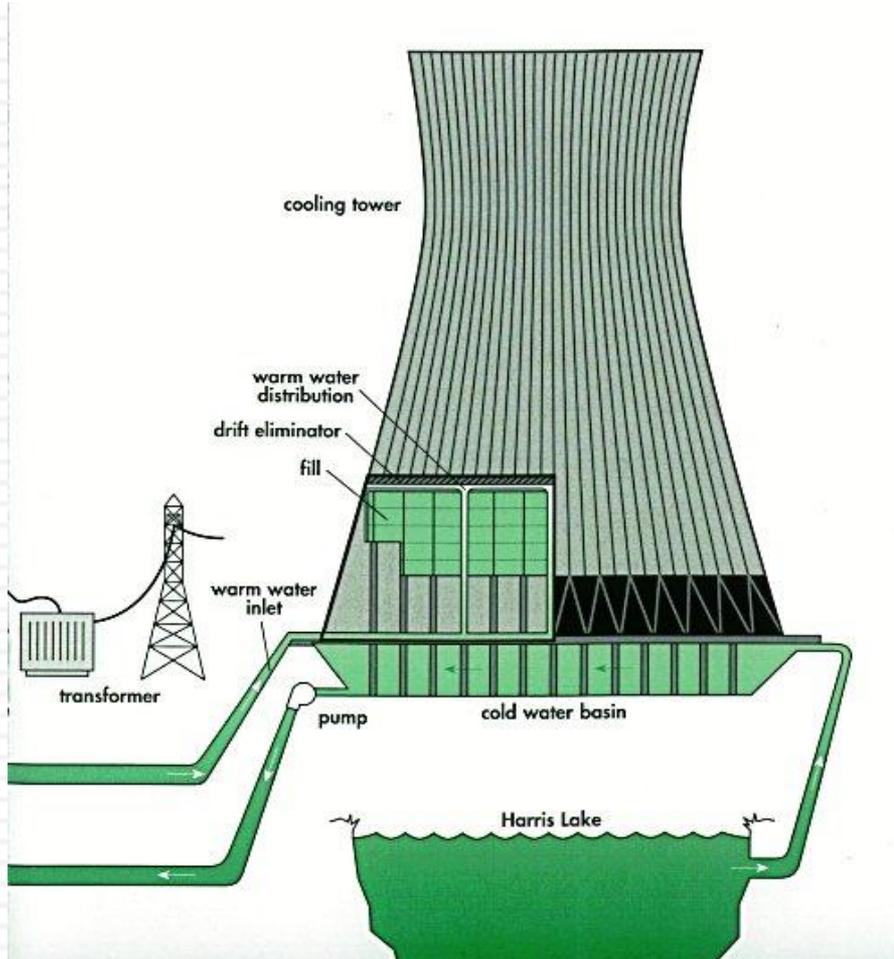
- 1 – деаэраторная колонка; 2 – бак-аккумулятор; 3 – распределительный желоб;
4 – струйчатый водослив с зубчатыми кромками; 5 – дырчатые тарелки;
6 – парораспределитель

Впрыскивающий пароохладитель

Компенсационный стакан
(компенсирует температурные напряжения)



Градирня



Этапы расчёта теплообменных аппаратов

- Тепловой расчёт
- Конструктивный расчёт
- Гидравлический расчёт
- Расчёт на прочность

Цель теплового расчёта

- Цель – определить **поверхность нагрева теплообменника** (из уравнения теплопередачи)
- Основной закон теплопередачи

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t,$$

- **Q** – теплопроизводительность, Вт,
- **k** – коэффициент теплопередачи, Вт/(м·К),
- **F** – поверхность нагрева (теплообмена), м²,
- **Δt** – температурный напор.

Тепловая нагрузка (МОЩНОСТЬ)

Тепловая нагрузка Q определяется, как правило, по стороне нагреваемой среды и представляет собой правую часть уравнения теплового баланса:

$$G_1 \cdot C_{p1} \cdot (t_1^{вх} - t_1^{вых}) \cdot \eta = G_2 \cdot C_{p2} \cdot (t_2^{вых} - t_2^{вх})$$

G – массовый расход, кг/с,

C_p – теплоёмкость, Дж/(кг·К),

$t_{вх}$, $t_{вых}$ – температура на входе и на выходе, °С,

η – коэффициент сохранения тепла (КПД).

Индекс «1» – греющая среда, «2» – нагреваемая среда.

Тепловая мощность ПЖТО

Для процессов, протекающих с изменением агрегатного состояния одного из теплоносителей (например, пара – *парожидкостный теплообменник*):

$$D \cdot r \cdot \eta = G_2 \cdot C_{p2} \cdot \left(t_2^{\text{вых}} - t_2^{\text{вх}} \right)$$

D – расход пара, кг/с,

r – скрытая теплота парообразования (конденсации), Дж/кг – определяется по давлению (температуре) насыщенного пара.

Коэффициент теплопередачи

Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, от греющей среды к стенке и от стенки к нагреваемой среде, Вт/(м²·К),

δ – толщина стенки, м,

λ_c – теплопроводность материала стенки, Вт/(м·К).

Коэффициент теплоотдачи

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются через критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l_{опр}}{\lambda},$$

который в свою очередь определяется из критериальных уравнений, представляющих в общем виде некоторую функцию:

$$Nu_f = C \cdot Gr_f^{n_1} \cdot Re_f^{n_2} \cdot Pr_f^{n_3} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}$$

Re, **Pr**, **Gr** – критерии подобия Рейнольдса, Прантля и Грасгофа, определяющиеся из заданных условий.

Для **парожидкостных** теплообменников коэффициент теплоотдачи от пара к стенке определяется по формуле Нуссельта (с поправкой Михеева):

$$\alpha = C \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho^2 \cdot \lambda^3 \cdot g}{\mu}} \cdot \frac{\sqrt[4]{r}}{\sqrt[4]{l_{опр} \cdot (t_n - t_c)}}$$

C – эмпирический коэффициент, который зависит от расположения труб;

ρ, λ, ν – плотность, теплопроводность и кинематическая вязкость пленки конденсата $t_{пл}$;

t_n, t_c – соответственно температура насыщенного пара и стенки;

$l_{опр}$ – определяющий размер (высота или наружный диаметр трубок – в зависимости от их расположения).

Для **газо-газовых** теплообменников формула для определения **коэффициента теплопередача** упрощается в связи с тем, что можно пренебречь термическим сопротивлением стенки:

$$k = \frac{\alpha_1 \cdot \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

У **газо-жидкостных** теплообменников **коэффициент теплопередачи** равен **коэффициенту теплоотдачи с газовой стороны**, поскольку можно пренебречь термическим сопротивлением и стенки, и теплоотдачи со стороны жидкости: $k = \alpha_2$.

Температурный напор

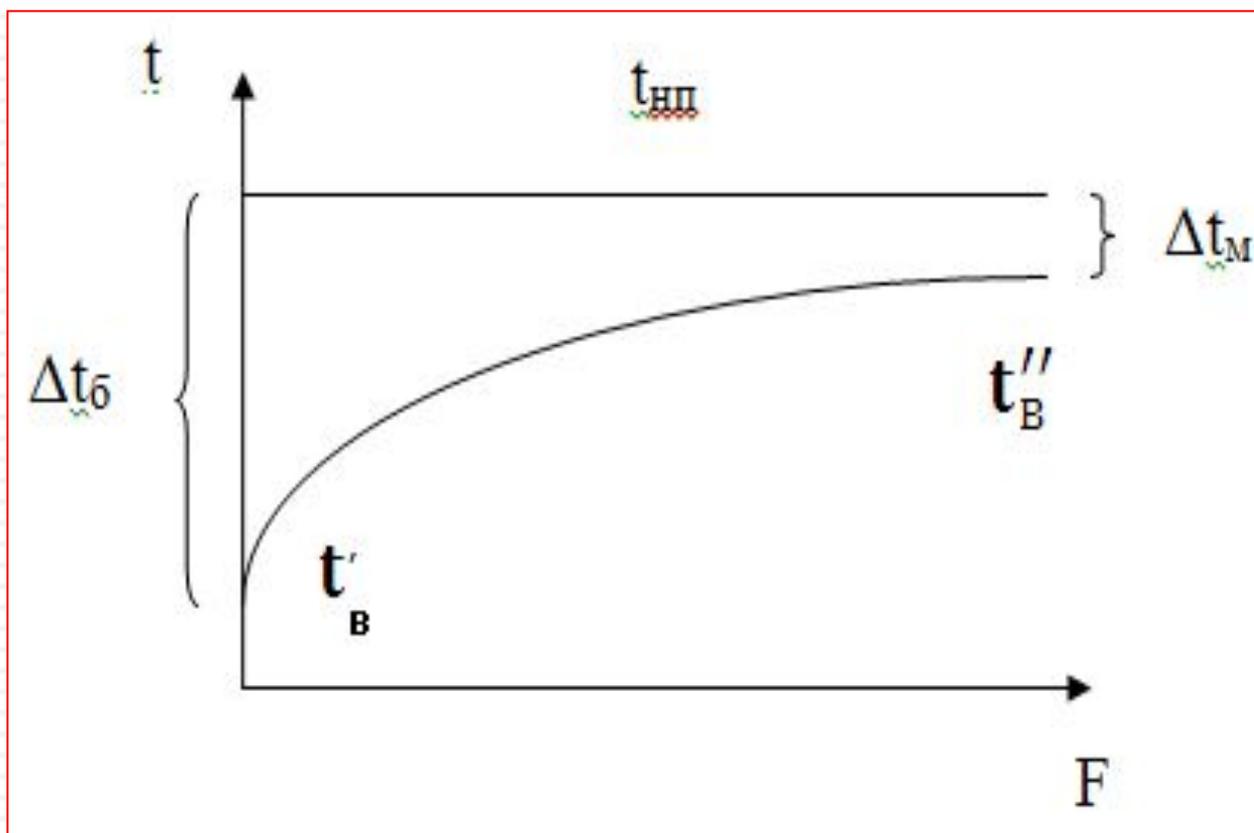
Среднелогарифмический температурный напор определяется как

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{\delta}} - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_{\bar{\delta}}}{\Delta t_m}}$$

$\Delta t_{\bar{\delta}}, \Delta t_m$ – определяются из температурного графика (в зависимости от схемы движения теплоносителей)

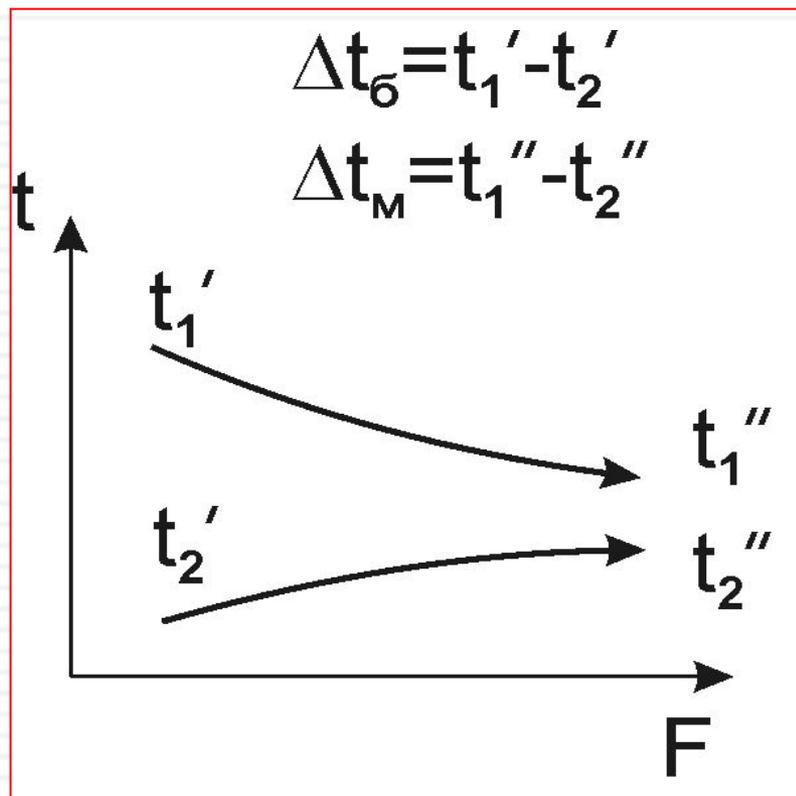
Среднеарифметический ТН $\Delta t = \frac{\Delta t_{\bar{\delta}} + \Delta t_m}{2}$

В **парожидкостных** теплообменниках температура греющей среды (насыщенного пара) постоянна, и график температурного напора выглядит следующим образом:

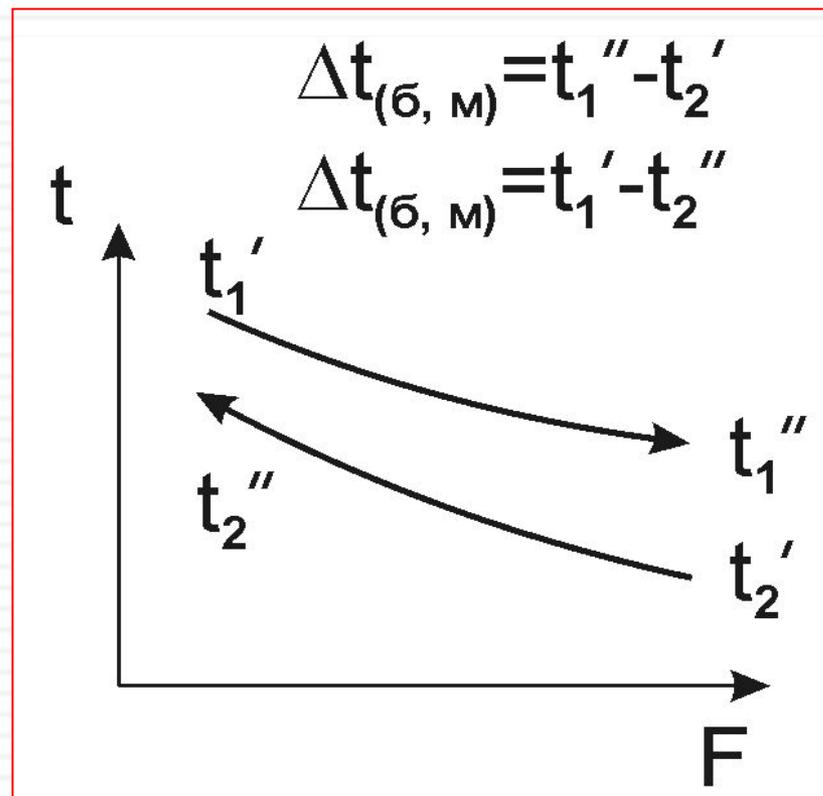


В общем случае, температурный напор определяется схемой движения теплоносителей

Прямоток



Противоток

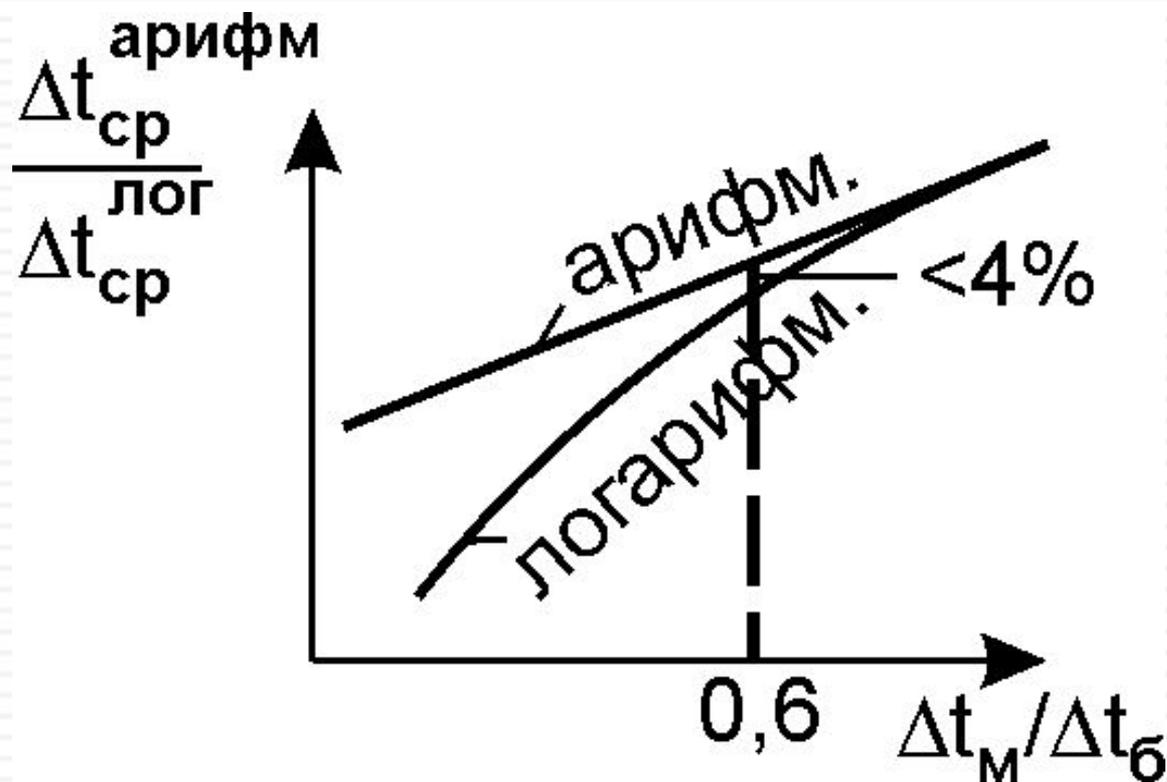


Два преимущества противотока

$$\Delta t_{\text{прот}} > \Delta t_{\text{прям}} \rightarrow F_{\text{прот}} < F_{\text{прям}} \rightarrow \downarrow \$$$

$$\text{при } G_1 \cdot C_{p1} > G_2 \cdot C_{p2} \rightarrow t_2^{\text{вых}} > t_1^{\text{вых}}$$

Границы применения формул



$\Delta t_M / \Delta t_6 \geq 0,6 \rightarrow$ логарифмический

Поверхность нагрева

После определения тепловой нагрузки, коэффициента теплопередачи и температурного напора из уравнения теплопередачи определяется **поверхность нагрева**

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t}$$

Цель конструктивного расчёта

Определение геометрических характеристик:

- длина труб
- количество труб
- ЧИСЛО ХОДОВ
- диаметр корпуса аппарата
- диаметр патрубков

$$G = f_{\text{пр.с.}} \cdot W \cdot \rho$$

$$f_{\text{пр.с.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{вн}}^2}{4}$$

→

$$d_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot W \cdot \rho}}$$

Цель гидравлического расчёта

Определение:

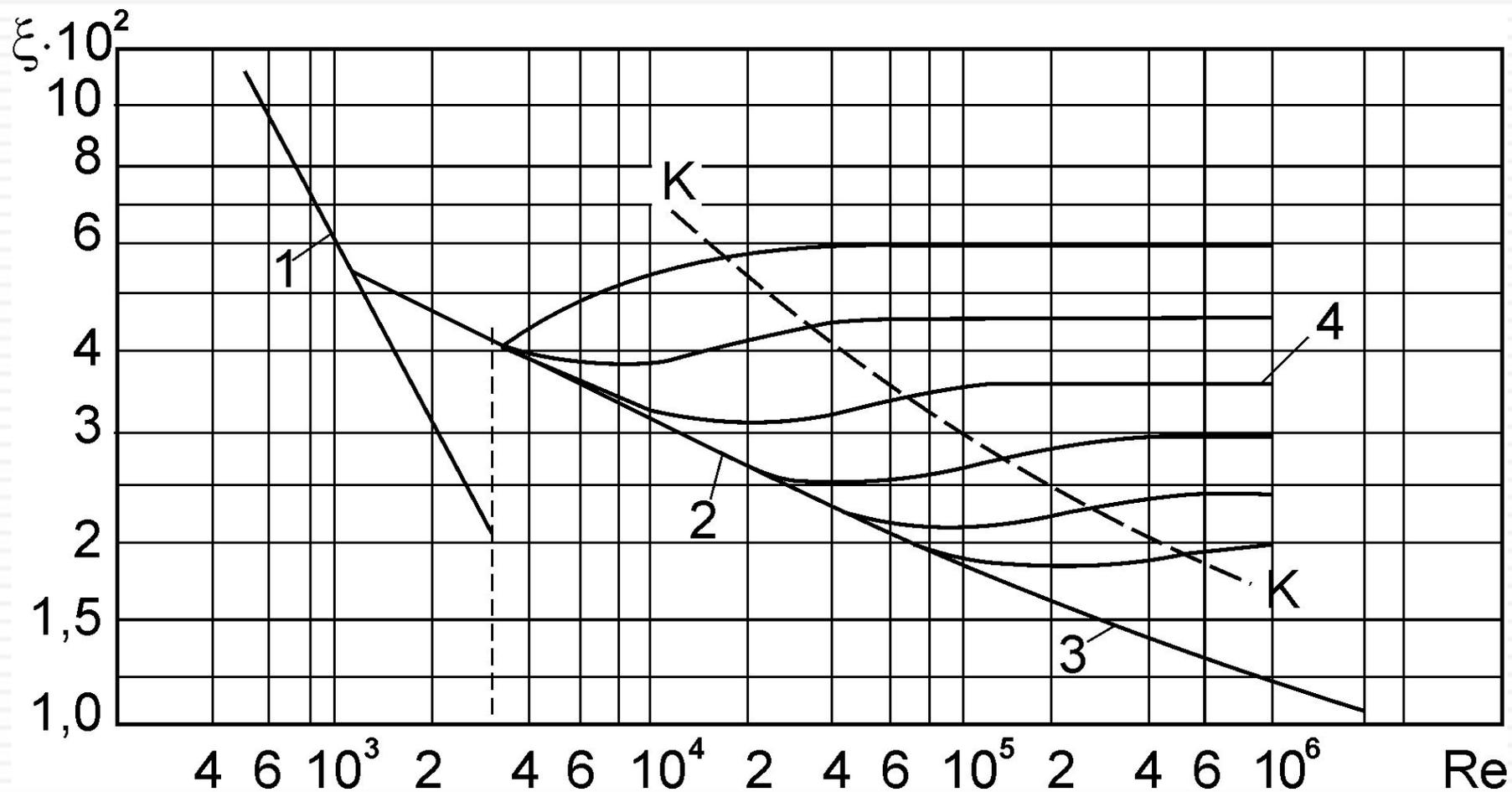
- **потерь напора на трение** $\Delta P_{\text{тр}} = \xi \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}$
- **потерь напора на местные сопротивления**

$$\Delta P_{\text{м}} = \sum \psi_i \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}$$

- **мощности нагнетателя**

$$N = \frac{G \cdot \Delta P_o}{\rho \cdot \eta}$$

График Никурадзе



Формулы для расчёта коэффициента сопротивления трению

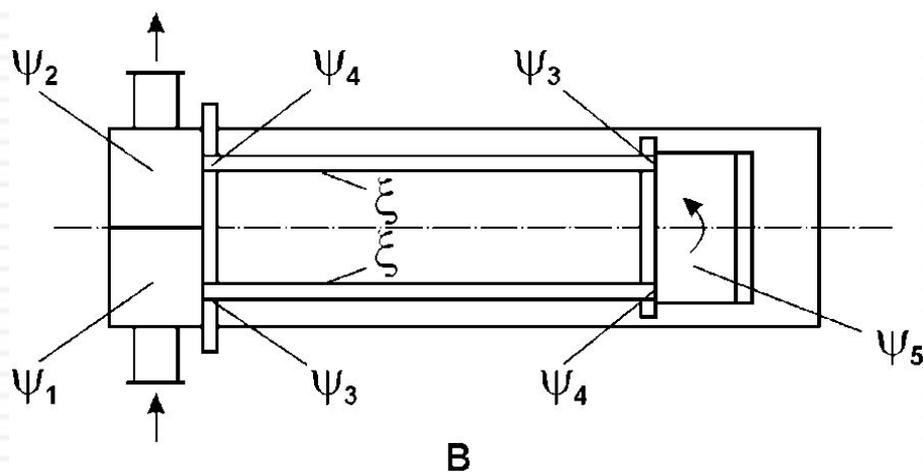
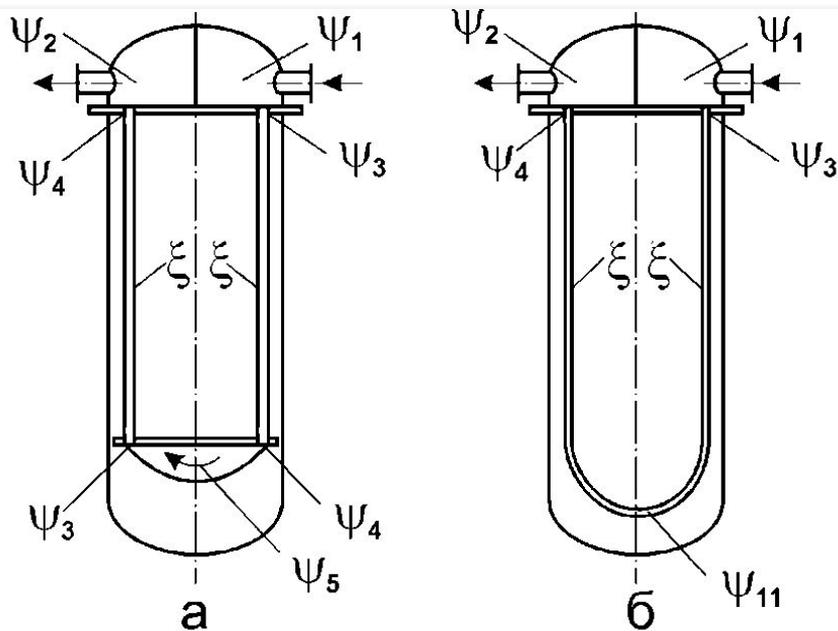
	Интервал чисел Re	Закон	Формула
1	до 10^3	Пуазейля	$\frac{\Lambda^*}{Re}$
2	от 3×10^3 до 10^5	Блазиуса	$\frac{0,3164}{Re^{0,25}}$
3	выше 10^5	Никурадзе	$0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}$
4	граница к-к $Re_{крит} = 100 \cdot \frac{r}{\delta}$	квадратичный	$\frac{0,1}{(r/\delta)^{0,25}}$

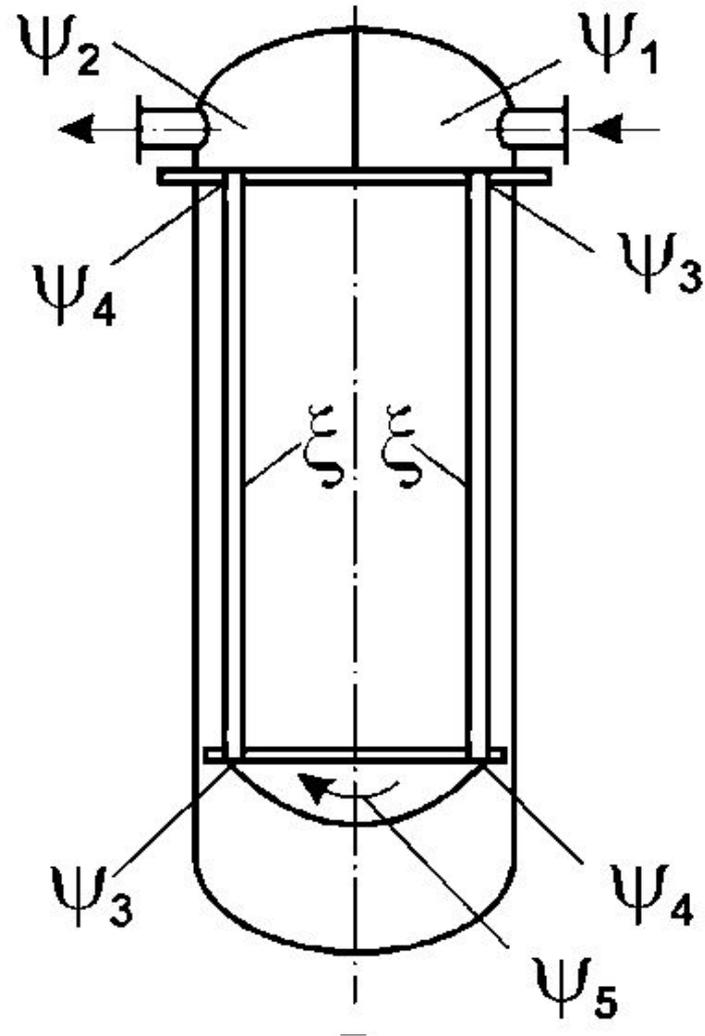
Коэффициенты местных сопротивлений для отдельных элементов теплообменных аппаратов

№ п/п	Элемент	ψ
1,2	Входная или выходная камера (удар и поворот)	1,5
3,4	Вход в трубное пространство или выход из него	1,0
5	Поворот на 180° между ходами через промежуточную камеру	2,5
6	То же через колено в секционных подогревателях	2,0
7	Вход в межтрубное пространство под углом 90° к рабочему пространству	1,5
8	Переход из одной секции в другую (межтрубный поток)	2,5
9	Поворот на 180° через перегородку в межтрубном пространстве	1,5
10	Огибание перегородок, поддерживающих трубы	0,5
11	Поворот на 180° в U-образной трубке	0,5
12	Поворот на 90° в коллекторе	0,5
13	Круглые змеевики (спирали) при числе змеевиков (спиралей) n	0,5 · n

Схема для гидравлического расчёта

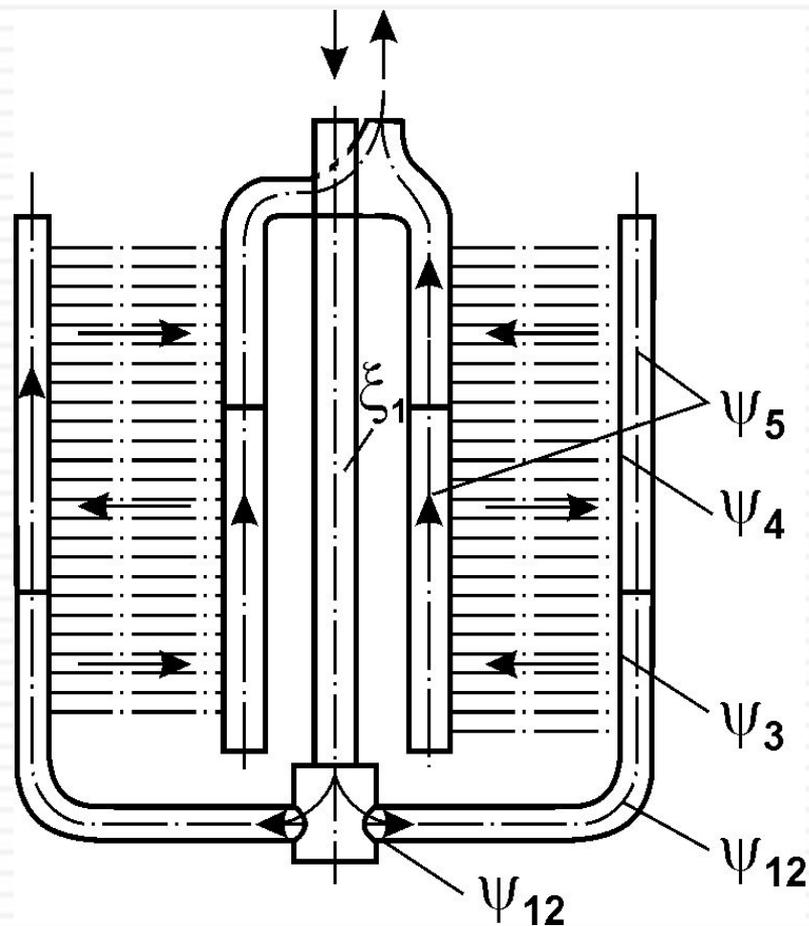
ПНД





$$\sum \psi_i = \psi_1 + z \cdot (\psi_3 + \psi_4) + (z - 1) \cdot \psi_5 + \psi_2$$

Схема для гидравлического расчёта ПВД



Расчёт на прочность

Порядок расчёта на примере парожидкостного теплообменника жёсткой конструкции:

- расчёт толщины цилиндрической обечайки
- расчёт толщины водяной камеры
- расчёт фланца
- расчёт толщины верхней трубной доски

Спасибо за
внимание!

