



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ

КОНСТРУКЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ АЭС

Оборудование АЭС

Слюсарский К.В.

Томск, 2022

ОСОБЕННОСТИ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

- В нагревателях поверхностного типа среда с более высоким давлением движется внутри трубок, в то время как вещество с меньшим давлением протекает в межтрубном пространстве.
 - Конструкция: кожухотрубная камерная с трубными досками.
 - Ориентация: вертикальная.
 - Паровые и дренажные охладители расположены вне подогревателя.
 - Водонакопительные камеры расположены внизу.
 - Используется коррозионностойкая сталь.
 - Часто используется двухстенный корпус.
- Для нагревателей смешивающего типа применяется как вертикальная, так и горизонтальная ориентация.
 - Конструкция: смешивающая камера и распределительный лист.
 - Нет необходимости в охладителях пара и конденсата.
 - Водонакопительная часть расположена на дне.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СМЕШИВАЮЩИХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Маркировка подогревателя:

П – подогреватель
Н – низкого давления
С – смешивающий
В – вертикальный

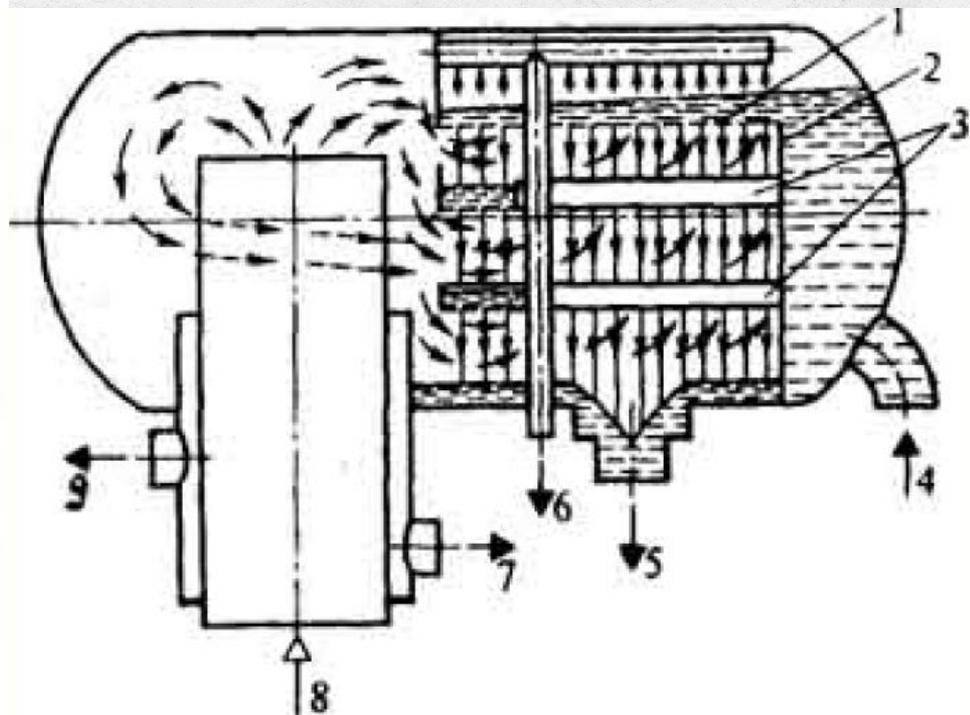
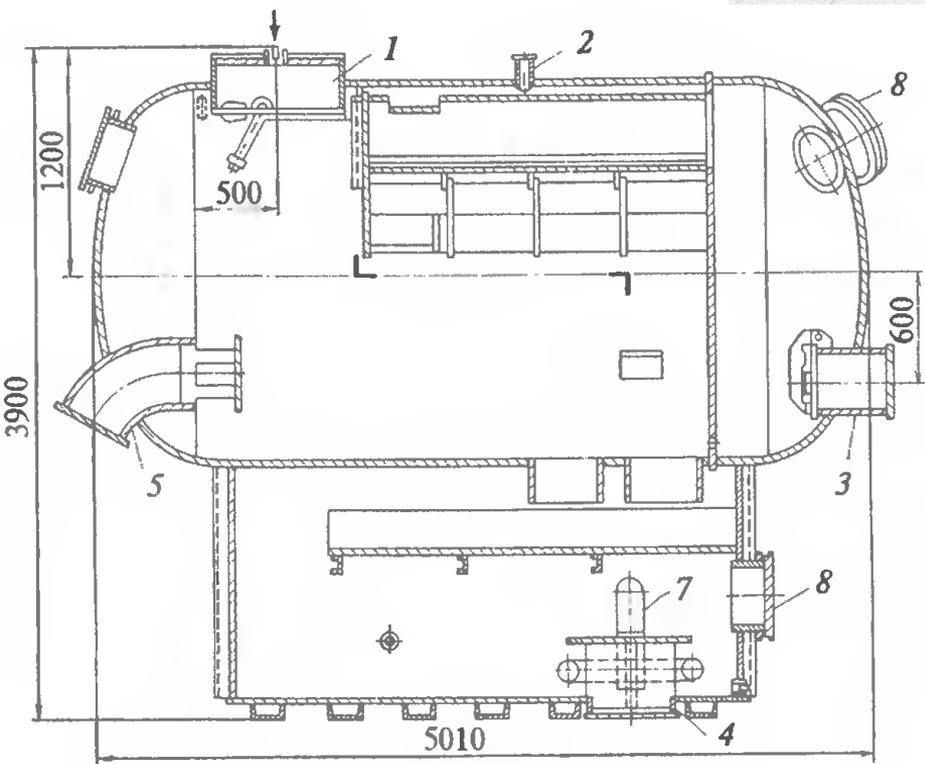
ПНСВ-800-2

Расход конденсата, т/ч

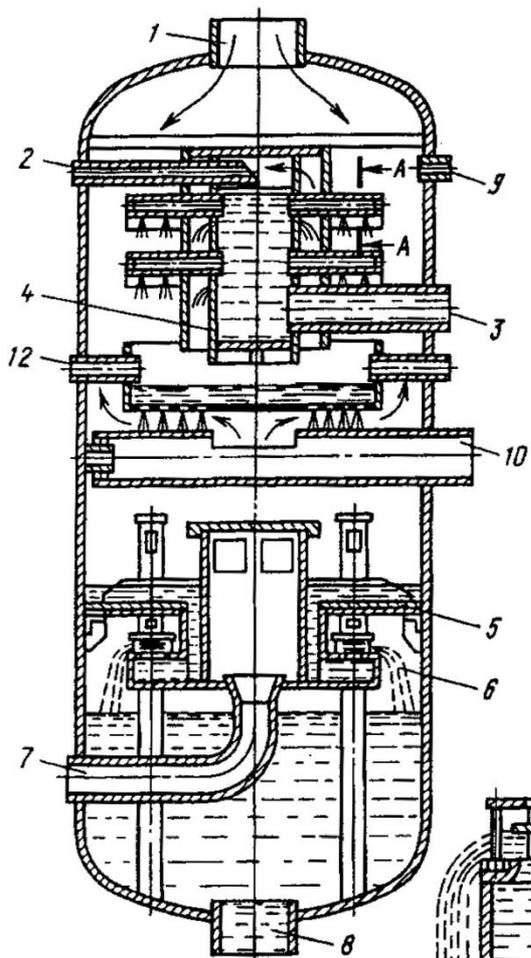
Номер подогревателя
по схеме (считая от
конденсатора)

- Расход конденсата, кг/с;
- Расход пара, кг/с;
- Температура пара на входе, °С;
- Рабочее давление, МПа;
- Габаритные размеры и масса.

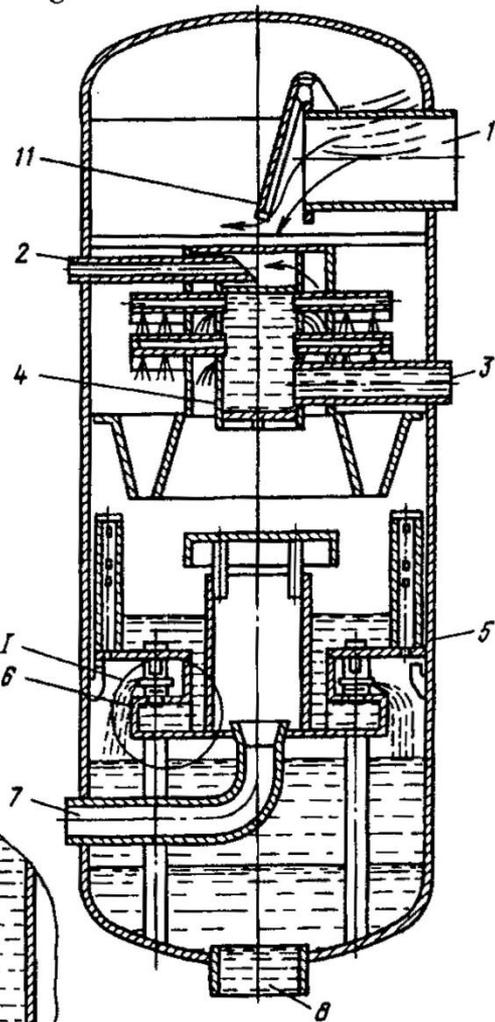
КОНСТРУКЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ СМЕШИВАЮЩЕГО ТИПА



а



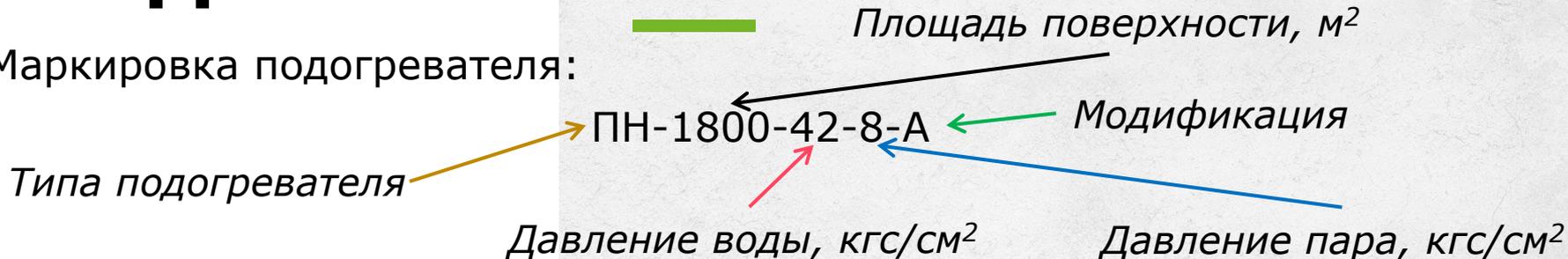
б

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ

КОНСТРУКЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЯ СМЕШИВАЮЩЕГО ТИПА

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Маркировка подогревателя:



- Площадь поверхности теплообмена, м^2 ;
- Расчетный тепловой поток (тепловая мощность), МВт;
- Максимальная температура пара, $^{\circ}\text{C}$;
- Номинальный расход воды, кг/с ;
- Гидравлическое сопротивление при номинальном расходе воды, МПа;
- Число ходов;
- Габаритные размеры и масса.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ АЭС

Нагреватели поверхностного типа являются наиболее распространенным типом регенеративных подогревателей АЭС

- Поверхность теплопередачи расположена внутри корпуса. Положение обогревателя выбрано таким образом, что корпус может быть легко демонтирован.
- Вещество с более высоким давлением: питательная вода или конденсат - протекает через трубки, а вещество с более низким давлением - греющий пар - в пространстве между трубками.
- Греющий пар течет сверху вниз, что упрощает удаление воздуха и неконденсирующихся газов из обогревателя (сверху) и удаления конденсата (внизу).
- Патрубки для удаления газов изготовлены из коррозионно-стойких сплавов.
- Отсутствие кипения воды и гидравлических ударов обеспечивается более высоким давлением питательной воды.
- Обычно подогреватели поверхностного типа выполняются в вертикальном исполнении.

ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЬ ПН-1800

Особенности:

- Прямые трубки диаметром 16 мм и толщиной стенки 1 мм.
- Подвижная/плавающая водяная камера.
- Число ходов – 4.
- Сборка корпуса осуществляется с помощью сварки.
- Направляющие стенки выполнены в форме кольца.

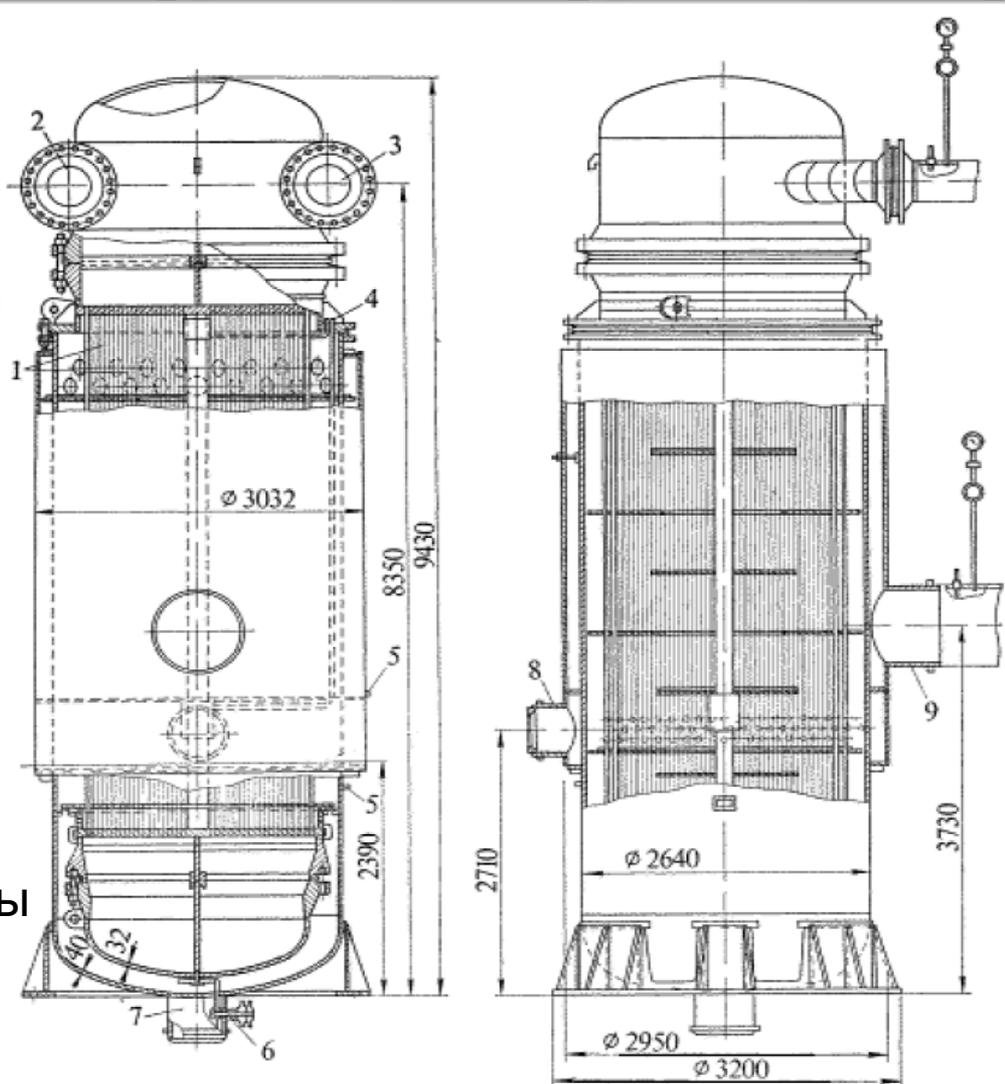


СХЕМА ДВУХ-ХОДОВОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

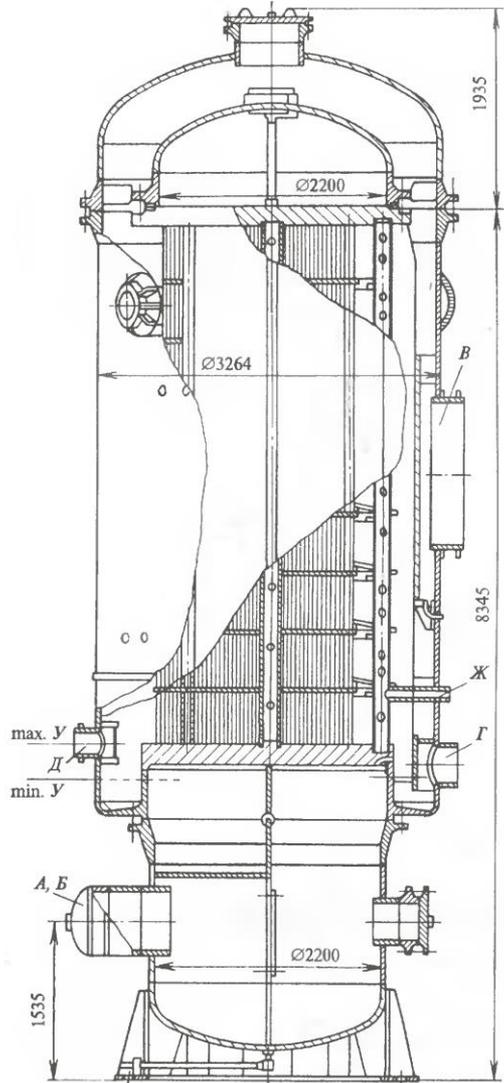


Схема движения пара и воды

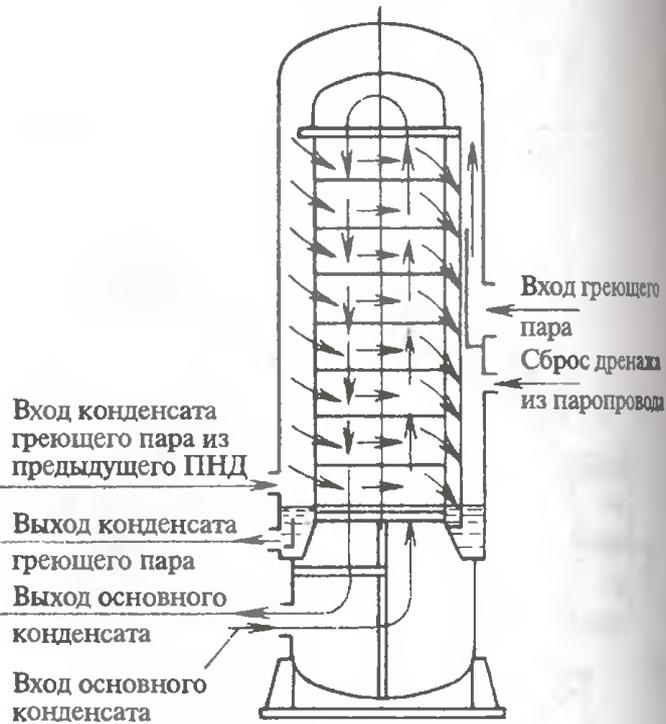
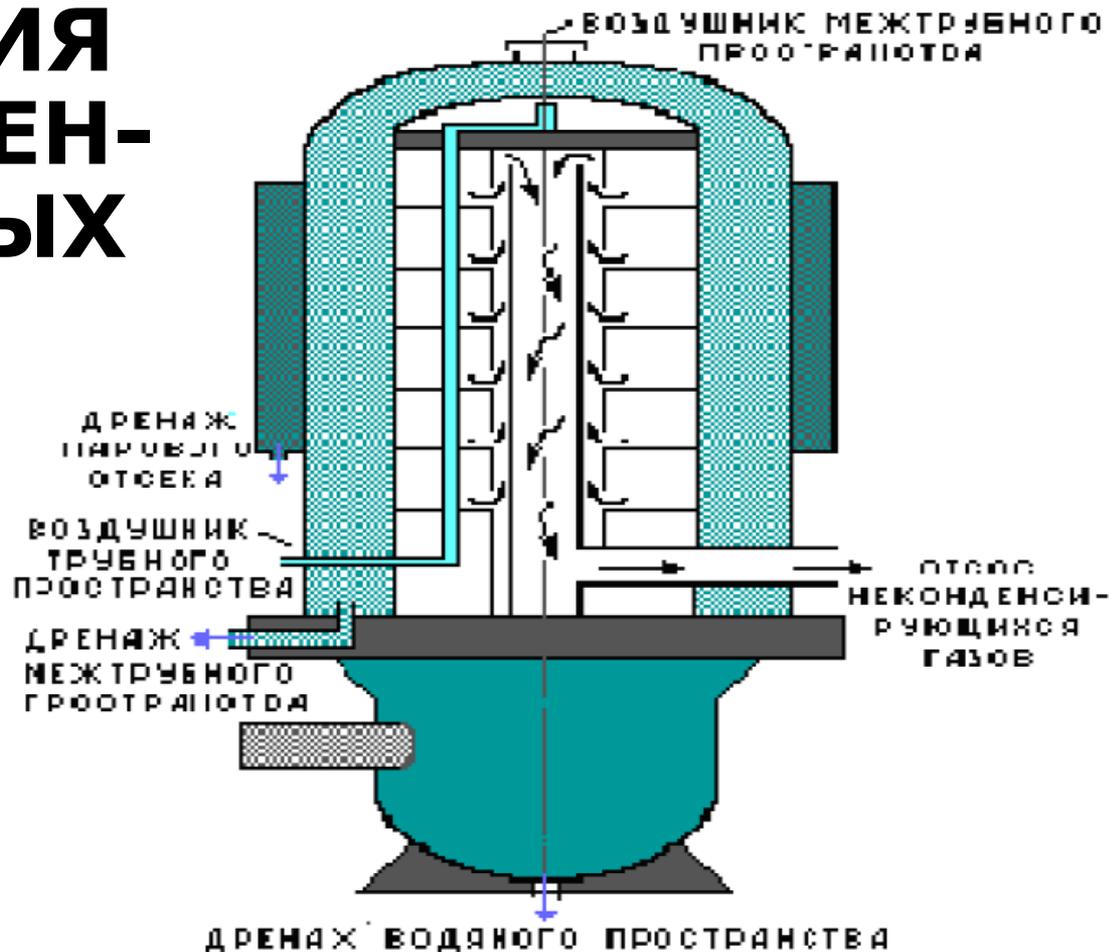


СХЕМА УДАЛЕНИЯ НЕКОНДЕН- СИРУЕМЫХ ГАЗОВ

СХЕМА ОТСОСА НЕКОНДЕНСИРУЮЩИХСЯ ГАЗОВ
И ДРЕНИРОВАНИЯ ПАРОВОГО И ВОДЯНОГО
ПРОСТРАНСТВА



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ



ПОДОГРЕВАТЕЛЬ С U-ОБРАЗНЫМИ ТРУБКАМИ И ОХЛАДИТЕЛЯМИ ДРЕНАЖА

- Охладитель пара расположен в отдельном корпусе, а охладитель дренажа - в нижней части корпуса обогревателя.
- Перегретый пар от турбины подается в нижнюю часть обогревателя.
- Конденсируемый пар перемещается в охладитель дренажа, где он охлаждается частью потока питательной воды. Позже он удаляется через клапан в нижней части корпуса.
- Основной конденсат (питательная вода) течет через сам нагреватель и пароохладитель.
- Небольшая часть питательной воды направляется в охладитель дренажа.

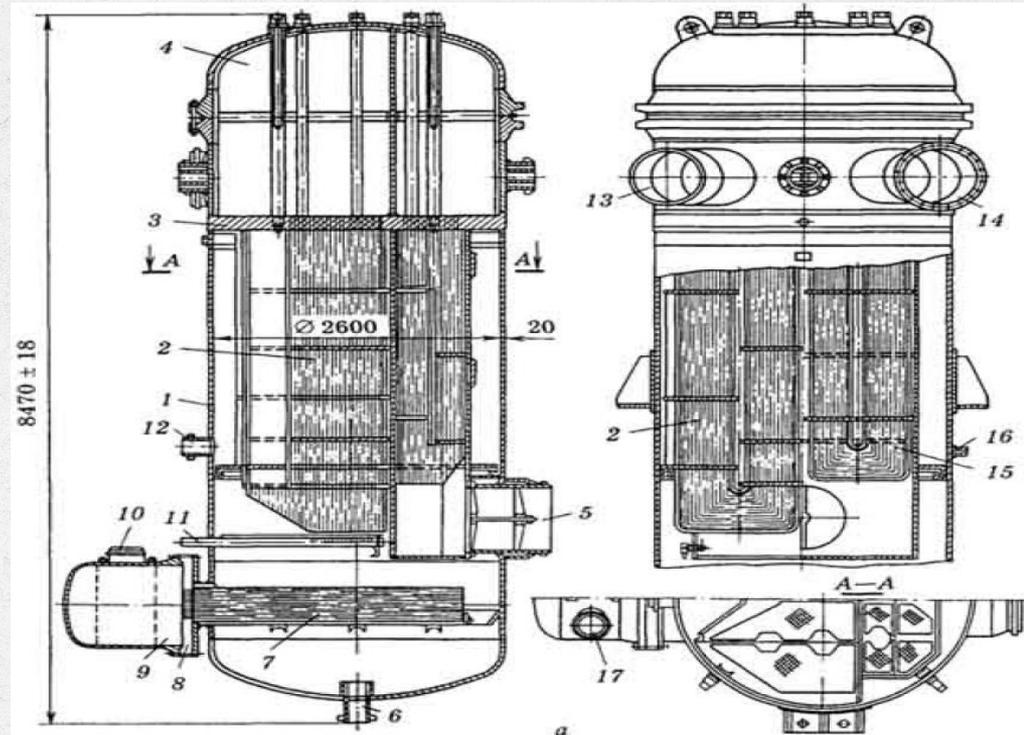
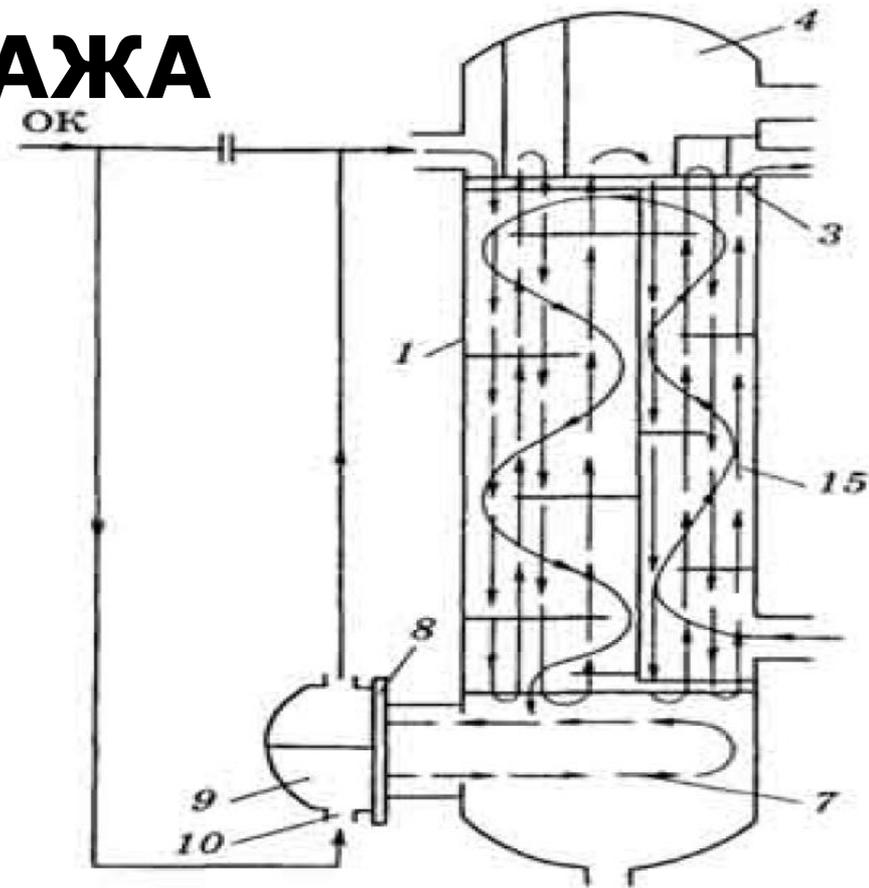
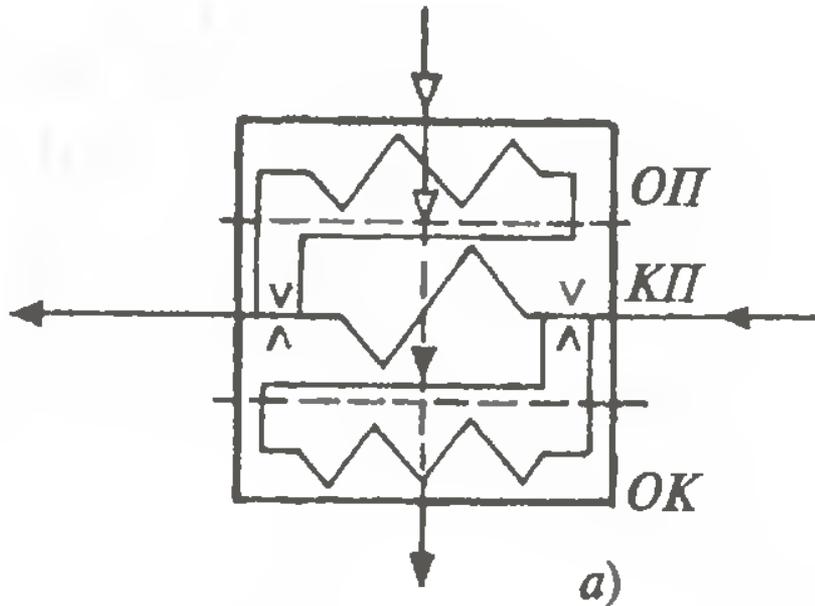


СХЕМА ДВИЖЕНИЯ ПАРА В ПОДОГРЕВАТЕЛЕ И ОХЛАДИТЕЛЕ ДРЕНАЖА



ОСОБЕННОСТИ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ



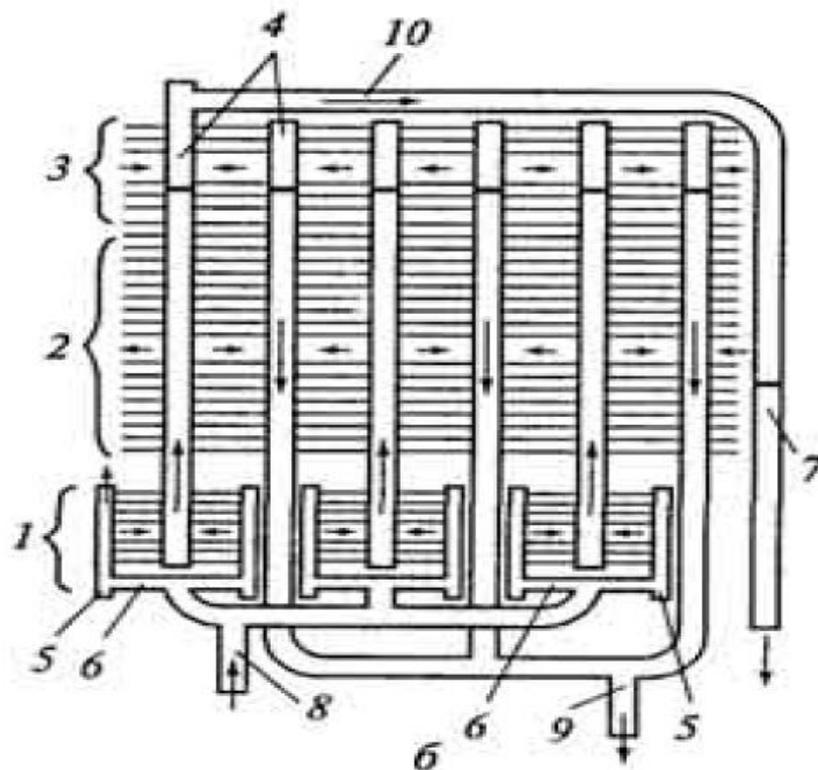
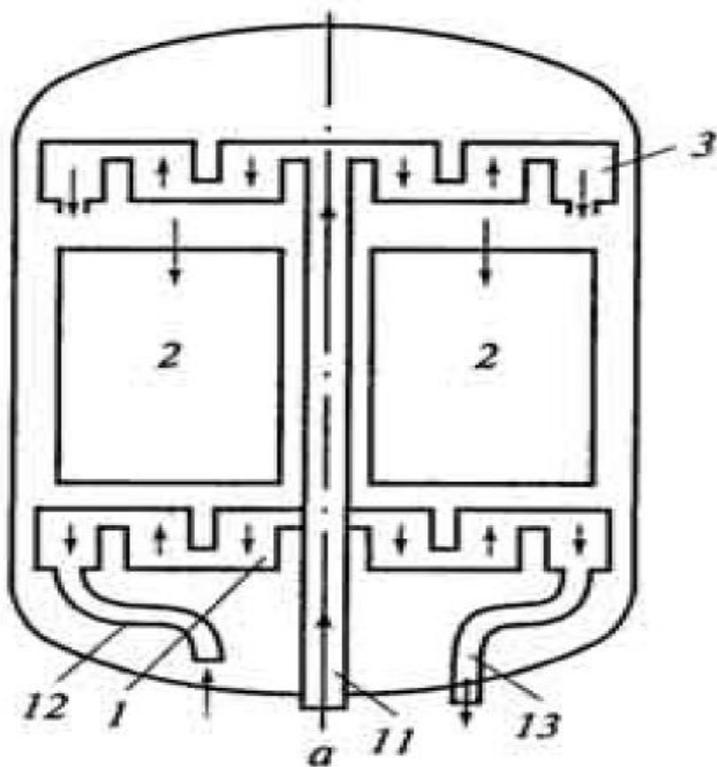
ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ

- Конструкция: кожухотрубная.
- Конструкция коллекторов:
 - Камерная с трубной доской;
 - Коллекторная со спиральными трубками;
- По ориентации:
 - Горизонтальная;
 - Вертикальная;
- Интегрированный охладитель дренажа;
- Охладители пара отсутствуют.

СХЕМА ПОДОГРЕВАТЕЛЯ СО СПИРАЛЬНЫМИ ТРУБКАМИ



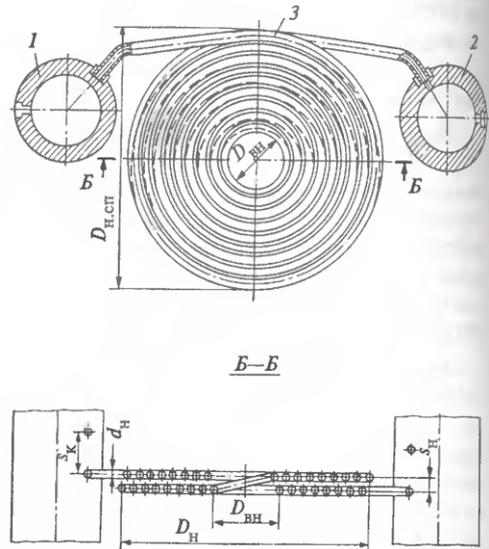
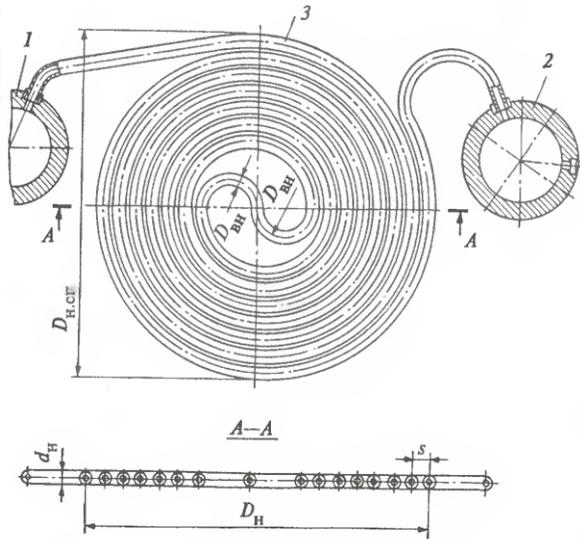
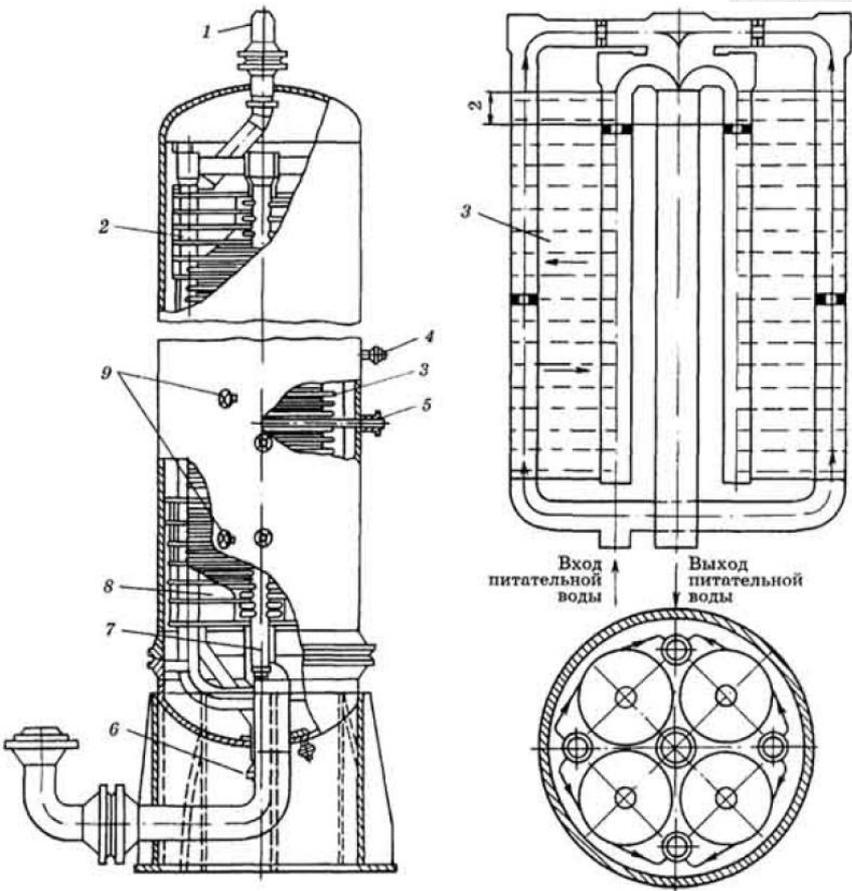
ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ





ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХ

КОНСТРУКЦИЯ СПИРАЛЬНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ



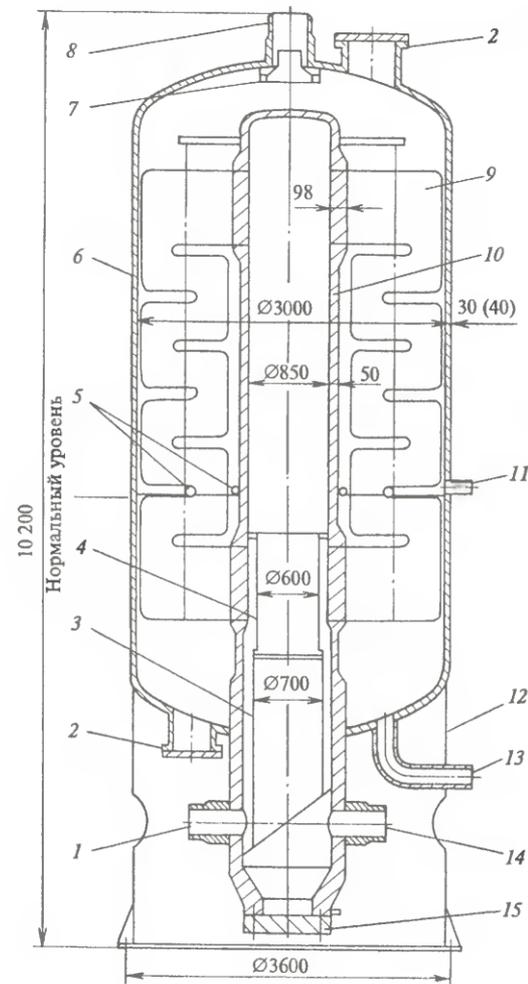
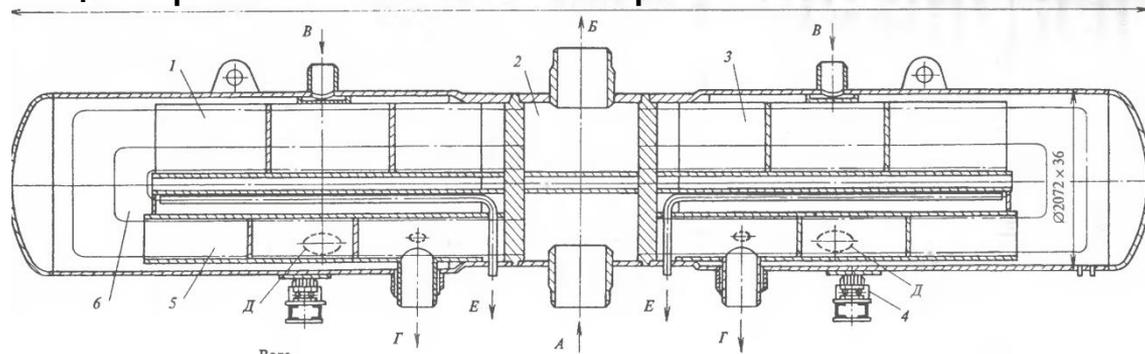
КАМЕРНЫЕ ПОДОГРЕВАТЕЛИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Горизонтальные:

- Состоят из двух U-образных трубок;
- Водяная камера расположена в центре.

Вертикальные:

- Состоят из ширмовых пучков труб;
- Имеют центральный коллектор.



ДОСТОИНСТВА СПИРАЛЬНЫХ И КАМЕРНЫХ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ



Достоинства спиральных трубок:

- Возможность точечной замены;
- Осуществление противоточной схемы движения воды и пара.

Достоинства спиральных

1. Простота конструкции.
2. Ремонтопригодность.
3. Высокая надежность.

Достоинства камерных

1. Малое гидравлическое сопротивление.
2. Компактность.
3. Низкая металлоемкость и стоимность.

ОСНОВНЫЕ ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

- Снижение диаметров теплообменных труб;
- Применение змеевиков с уклоном;
- Совершенствование методов монтажа и применение новых материалов;
- Замена спиральных подогревателей на камерные;
- Применение различных методов модернизации теплообмена (преимущественно со стороны конденсирующегося пара);
- Применение новых материалов.

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ АЭС

- Тепловая мощность подогревателя:

$$Q = G \cdot c_p \cdot (t_{вх}^{вод} - t_{вых}^{вод}) = D \cdot (h_{вх}^{нар} - h') \cdot \eta = k \cdot F \cdot \overline{\Delta t}$$

- КПД подогревателя:

$$\eta = \frac{G \cdot c_p \cdot (t_{вх}^{вод} - t_{вых}^{вод})}{D \cdot (h_{вх}^{нар} - h')}$$

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ АЭС

- Исходные данные:
 - Расход, давление и температура входящих потоков G/D , $p_{1/2}$, $t_{1/2}$;
 - Площадь теплопередающей поверхности k ;
 - Коэффициент теплопередачи F .

$$\cancel{Q} = G \cdot c_p \cdot \left(t_{вх}^{вод} - \cancel{t_{вых}^{вод}} \right)$$

$$\cancel{Q} = \cancel{D} \cdot \left(h_{вх}^{нар} - h' \right) \cdot \eta$$

$$\cancel{Q} = k \cdot F \cdot \frac{t_{вх}^{вод} - t_{вых}^{вод}}{\ln \frac{t_{вх}^{вод} - t_s^{нар}}{t_{вых}^{вод} - t_s^{нар}}}$$

МЕТОД ЧИСЛА ТЕПЛООБМЕННЫХ ЕДИНИЦ

- Расчет числа теплообменных единиц:

- Для двух однофазных потоков:

$$NTU = \frac{k \cdot F}{\min(G_1 \cdot c_{p1}; G_2 \cdot c_{p2})}$$

- При конденсации/кипении одного потока:

$$NTU = \frac{k \cdot F}{\min(G_1 \cdot c_{p1})}$$

- Расчет отношение потоков теплоемкости:

$$C_r = \frac{\max(G_1 \cdot c_{p1}; G_2 \cdot c_{p2})}{\min(G_1 \cdot c_{p1}; G_2 \cdot c_{p2})}$$

- Формула коэффициента эффективности:

$$\varepsilon = \frac{t_{ex}^{\min} - t_{вх}^{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}$$

При конденсации/кипении	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$
Один ход в межтрубном пространстве	$\varepsilon = \frac{2}{1 + C_r + \sqrt{1 + C_r^2} \frac{(1 + e^{-\Gamma})}{(1 - e^{-\Gamma})}}$
Два хода в межтрубном пространстве	$\varepsilon = \frac{[(1 - \varepsilon_1 \cdot C_r) / (1 - C_r)]^2 - 1}{[(1 - \varepsilon_1 \cdot C_r) / (1 - C_r)]^2 - C_r}$
Поперечный ток <ul style="list-style-type: none"> при C_{\max} в трубках при C_{\max} в межтрубном пр-ве 	$\varepsilon = \frac{1}{C_r} \left[1 - \exp(-C_r \cdot [1 - e^{-NTU}]) \right]$ $\varepsilon = \frac{1}{C_r} \left\{ 1 - \exp(-C_r \cdot [1 - e^{-C_r \cdot NTU}]) \right\}$

ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Определение массовой теплоемкости потоков $C = G \cdot c_p$
 - Для кипящей/конденсирующейся среды не определяется
2. Определение минимальной и максимальной массовой теплоемкости C_{\min} и C_{\max} .
3. Определение отношений массовых теплоемкостей $C_r = C_{\min} / C_{\max}$.
 - Для кипящей/конденсирующейся среды не определяется
4. Определение числа теплообменных единиц $NTU = kF / C_{\min}$.
5. Расчет коэффициента эффективности ε с учетом характера течения сред.
6. Расчет температуры среды с минимальной массовой теплоемкостью на выходе.
7. Расчет тепловой мощности теплообменник

**СПАСИБО ЗА
ВНИМАНИЕ!**

