

ПАРОГЕНЕРАТОРЫ АЭС

Тема. Сепарация пара в ПГ АЭС

Основные вопросы

- Обоснование необходимости сепарации.
- Требования к качеству пара.
- Понятие термина “*сепарация*”.
- Конструктивная схема сепарационного объема.
- Способы сепарации.

Обоснование необходимости сепарации

Наличие влаги в паре, образовавшемся в испарителе ПГ, способствует:

- **эрозии** паровпускных устройств и снижению КПД турбин насыщенного пара;
- **заносу** солями поверхностей лопаток турбин насыщенного пара, паропроводов и т.д.;
- **отложению** примесей на поверхности труб пароперегревателя

Обоснование необходимости сепарации



Характерный вид эрозионных повреждений лопаток паровых турбин



Характерный вид отложений на лопатках паровых турбин



Обоснование необходимости сепарации

Таблица. Шероховатость поверхности лопаток в зависимости от её состояния

| Состояние поверхности лопаток | Высота выступов шероховатостей, мм | |
|-------------------------------|------------------------------------|-------|
| | max | min |
| Шлифованная и полированная | 0.002 | 0.001 |
| Фрезерованная | 0.025 | 0.019 |
| Корродированная | 0.030 | 0.010 |
| Занесённая солями | 0.400 | 0.100 |
| Эродированная | 5...10 | 0.030 |



Обоснование необходимости сепарации

В энергоблоках ВВЭР (PWR) используют, как правило, паротурбинный цикл с насыщенным паром относительно **низкого давления** (не более 7 МПа).

При таких параметрах загрязнение насыщенного пара происходит только за счет **уноса паром капель влаги** с растворенными в них солями и нерастворимыми продуктами (растворимость солей в паре в почти нулевая).

При **высоких давлениях** (свыше 7 МПа) содержание в паре некоторых веществ (оксидов железа и кремниевой кислоты) существенно повышается и более заметная доля их начинает выноситься с паром с поверхностей нагрева

Солесодержание насыщенного пара

Основной задачей по обеспечению качества насыщенного пара при низких и средних давлениях является ограничение выноса веществ, находящихся в испаряемой воде. В общем случае солесодержание насыщенного пара

$$S_n = (y + K_p) S_{np}$$

S_{np} , $S_{пп}$ - солесодержание в паре и в воде парогенератора соответственно, мг/кг;

y - влажность пара (доля влаги в паре);

K_p - коэффициент распределения, характеризующий растворимость веществ в паре

Обоснование необходимости сепарации

При давлении пара 2,5...7,0 МПа, характерном для современных ЯЭУ, растворимость солей в паре незначительна и ею можно пренебречь.

Тогда общее солесодержание в паре зависит лишь от влажности пара

$$S_n = y S_{np}$$

Следовательно, для получения пара высокого качества необходимо:

- *ограничить вынос капель влаги паром;*
- *понижить солесодержание примесей в уносимой влаге*

Требования к качеству пара

(относительно содержания влаги)

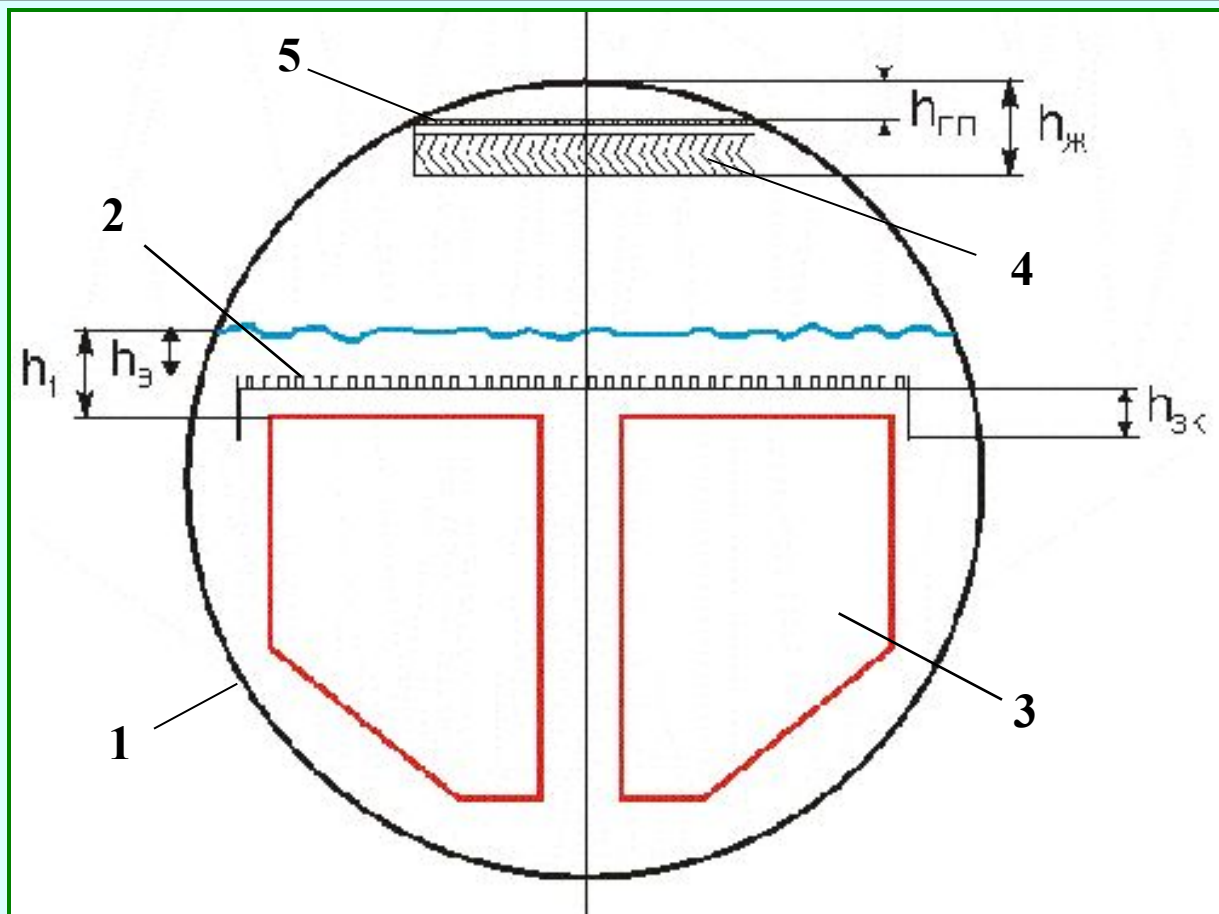
- влажность пара на входе в турбину насыщенного пара $y_{ВХ} \leq 0,2 \div 0,25 \%$;
- влажность пара на входе в пароперегреватель прямоточного ПГ $y_{ВХ} \leq 0,02 \div 0,05 \%$



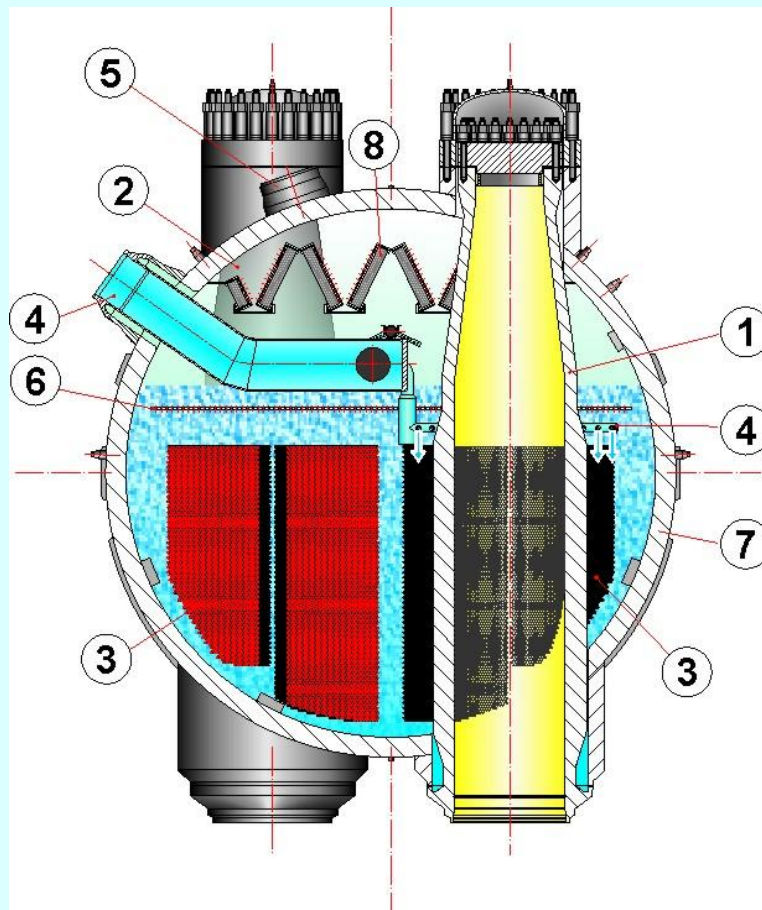
Понятие термина “*сепарация*”

Совокупность двух процессов: разделения пароводяной смеси и осушки пара называют сепарацией пара

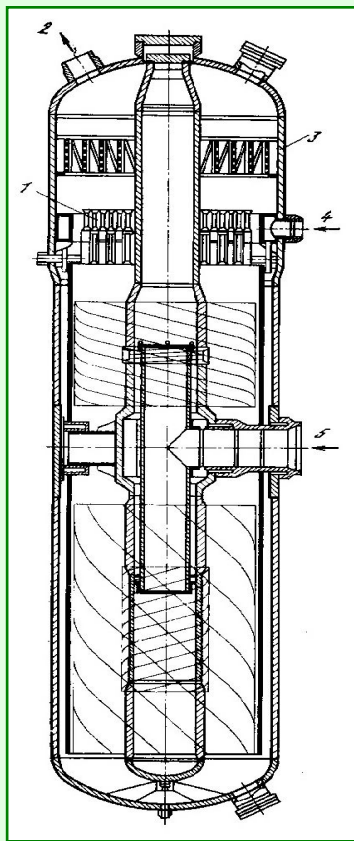
Сепарационная схема горизонтального ПГ с U-образными трубками



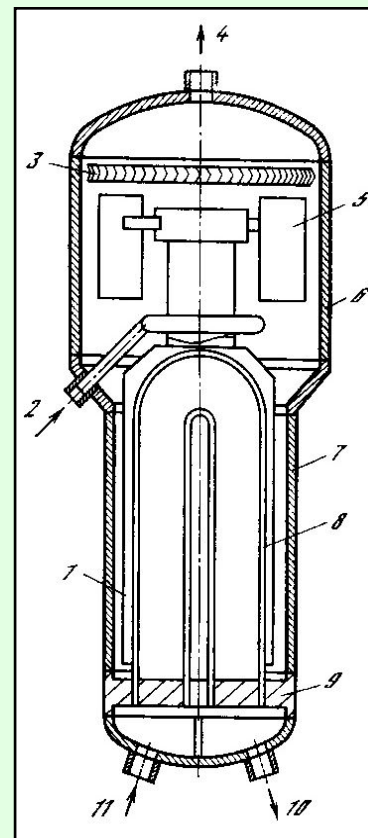
Сепарационная схема горизонтального ПГ с U-образными трубками



Сепарационные схемы вертикальных ПГ

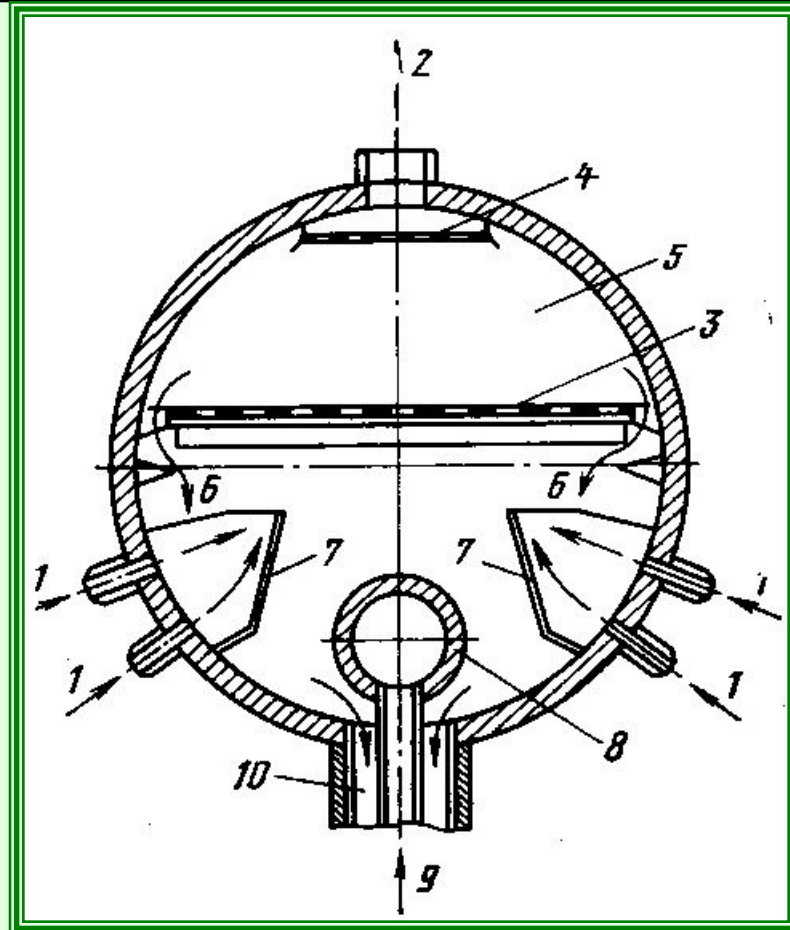


ПГ со змеевиковыми трубками



ПГ с U-образными трубками

Сепарационная схема БС реактора РБМК





Состав сепарационного барабана

- Погруженный дырчатый лист (щит).
- Сепаратор.
- Пароприемный щит (потолок).



Способы сепарации

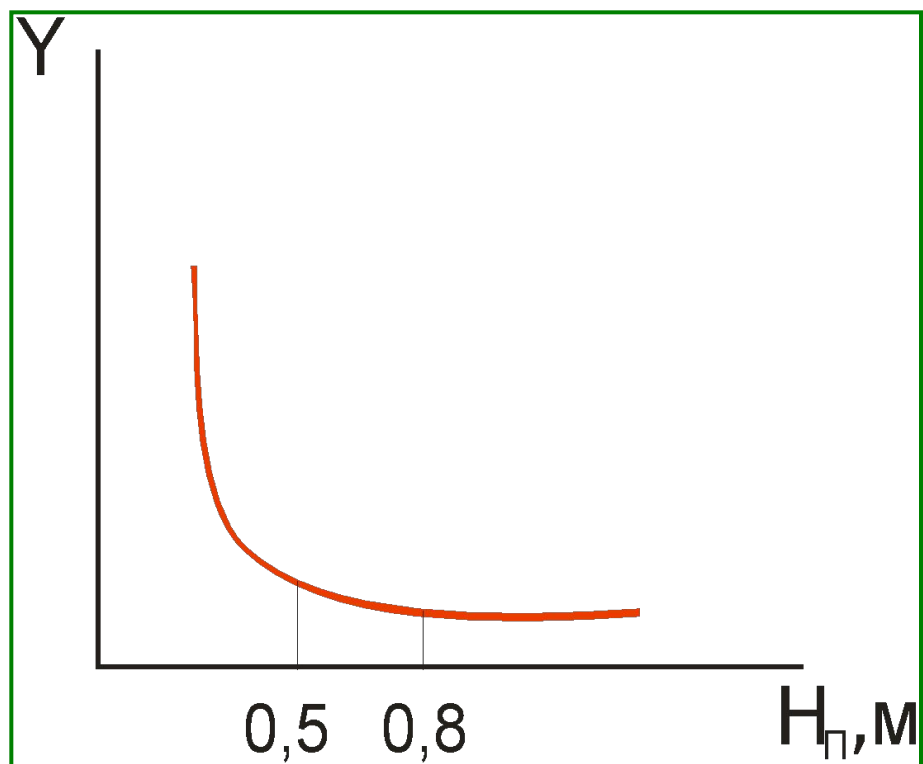
- гравитационная;
- принудительная (ЖС, циклоны)

Гравитационная сепарация

Два механизма (транспортировка и заброс).

- **Основные** определяющие факторы:
 - приведенная скорость пара w''_0 ;
 - высота парового пространства H .
- **Дополнительные** определяющие факторы:
 - равномерность нагрузки З.И.
 - состав парогенераторной воды

Зависимость влажности пара от высоты парового объема



Зависимость влажности пара от высоты парового объема

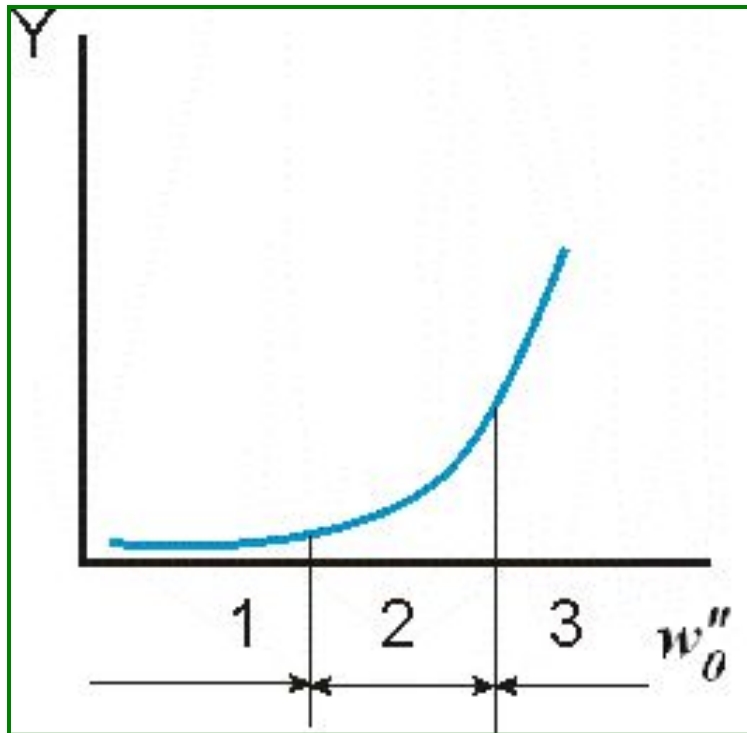
$$Y = C \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(w_0'')^{2,76}}{H^{2,3}}$$

Зависимость влажности пара от приведенной скорости пара

ТПУ-ЭНИН-АТЭС

*Зависимость влажности
пара от приведенной скорости
(нагрузки Зеркала Испарения)*

Гравитационная сепарация

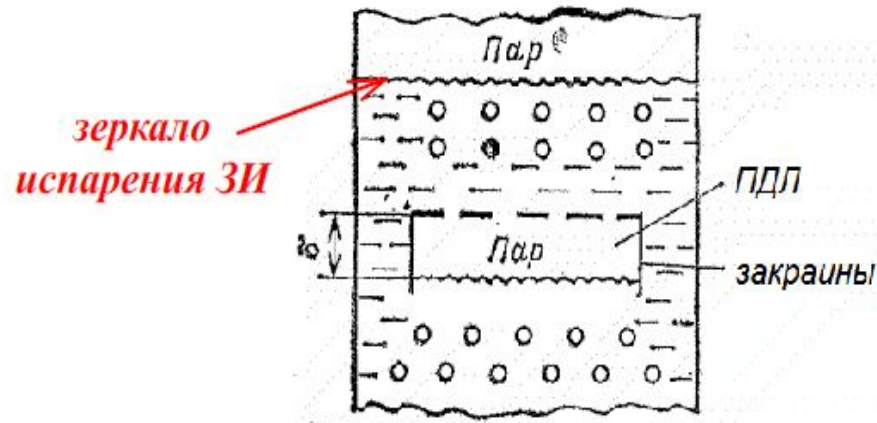


- 1 $Y = 0 \div 0,0003; m = 1 \div 2,5$
- 2 $Y = 0,0003 \div 0,002; m = 2,5 \div 4$
- 3 $Y > 0,002; m = 8 \div 10$

**Зависимость влажности пара
от приведенной скорости пара**

Рекомендуемые значения w_0 ”

Рекомендуемые значения приведенной скорости пара (нагрузки ЗИ)



ТПУ-ЭНИН-АТЭС

Погруженный дырчатый лист (щит)

Назначение - обеспечение равномерности нагрузки З.И.

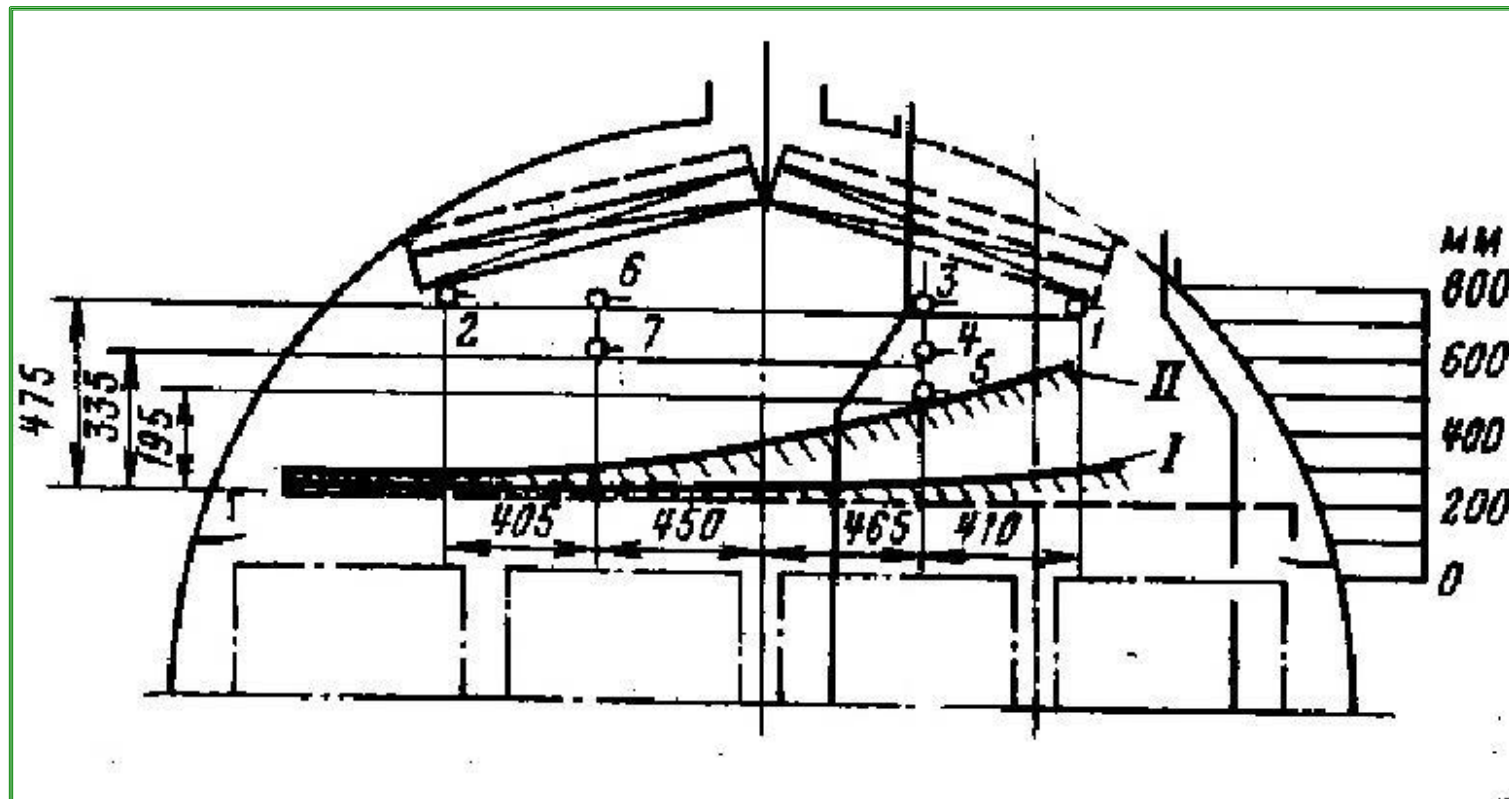
Расположение – на 50 – 75 мм ниже массового уровня.

Перфорация – отверстиями диаметром ≥ 10 мм.

Обязательные элементы – закраины.

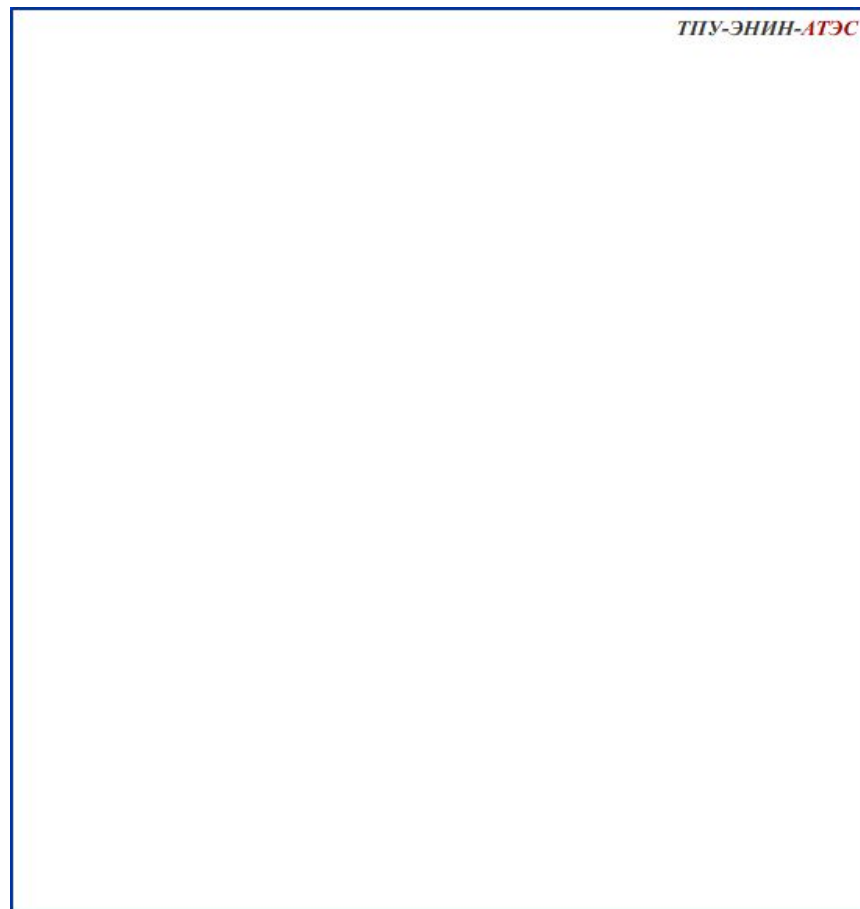
Режим работы – беспробивной.

Влияние ПДЛ на положение действительного уровня в парогенераторе

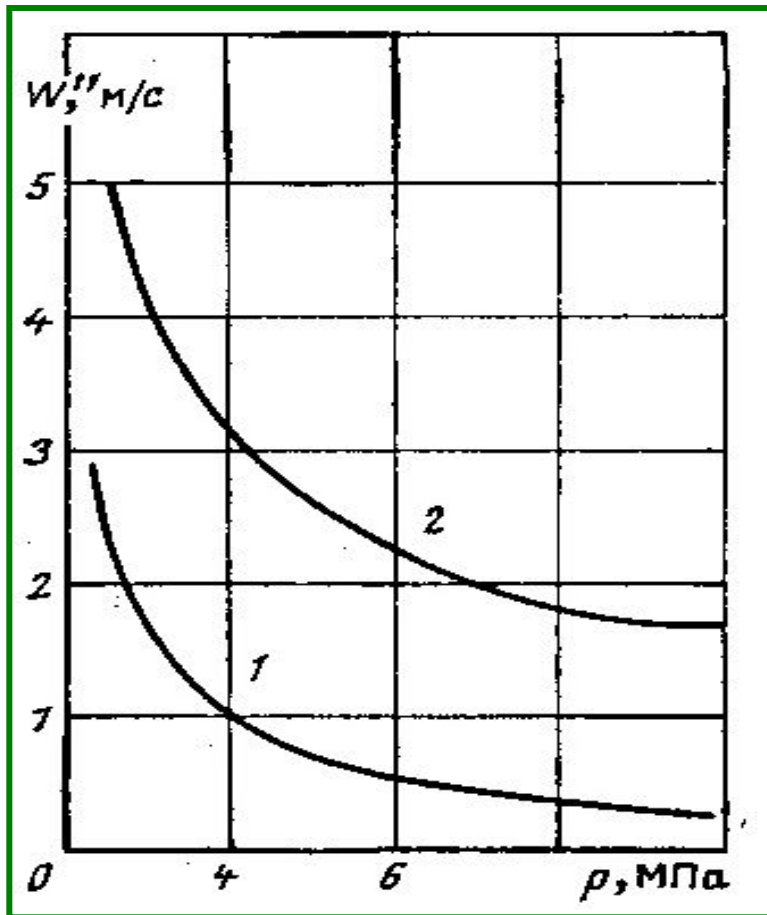


I – парогенератор с ПДЛ; II – без ПДЛ

Зависимость скорости пара в отверстиях ПДЛ от давления



Погруженный дырчатый лист



Зависимости скоростей в отверстиях
ПДЛ от давления

1- минимальная

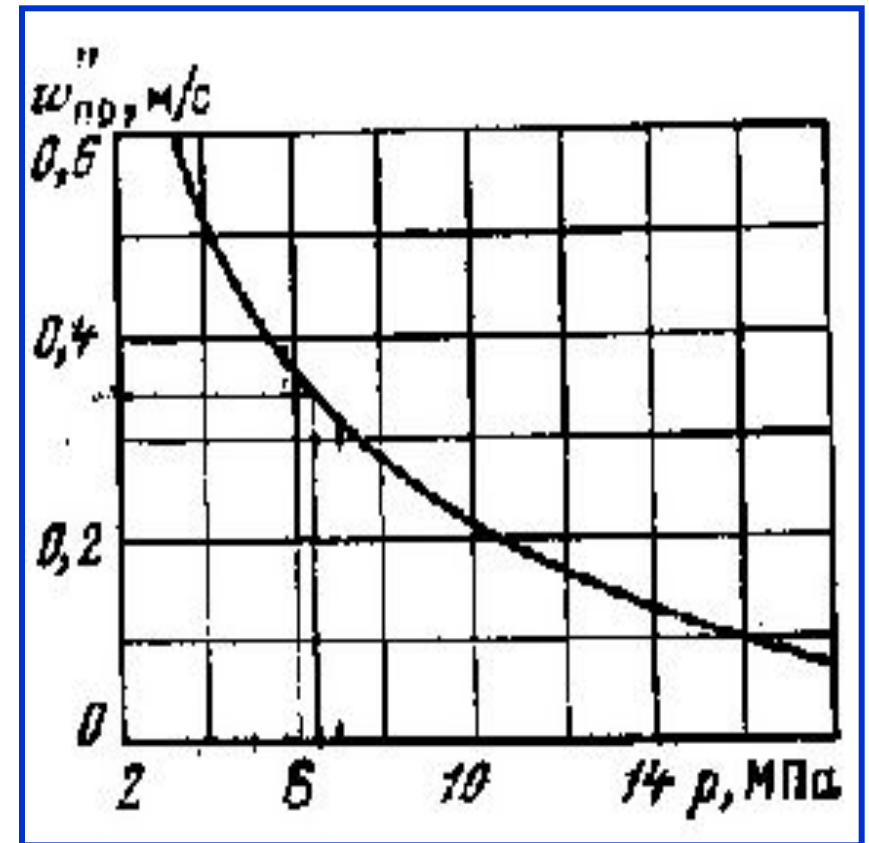
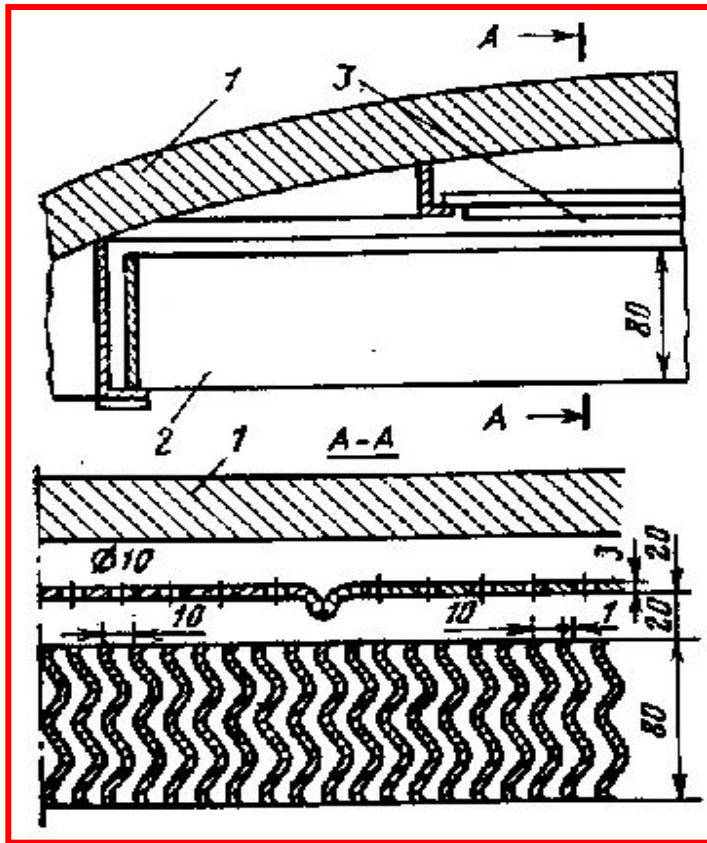
2-рекомендуемая



Жалюзийные сепараторы

- Горизонтальные ЖС.
- Наклонные ЖС.
- Вертикальные ЖС.

Горизонтальный ЖС



Установка горизонтального ЖС

Предельные скорости перед ЖС

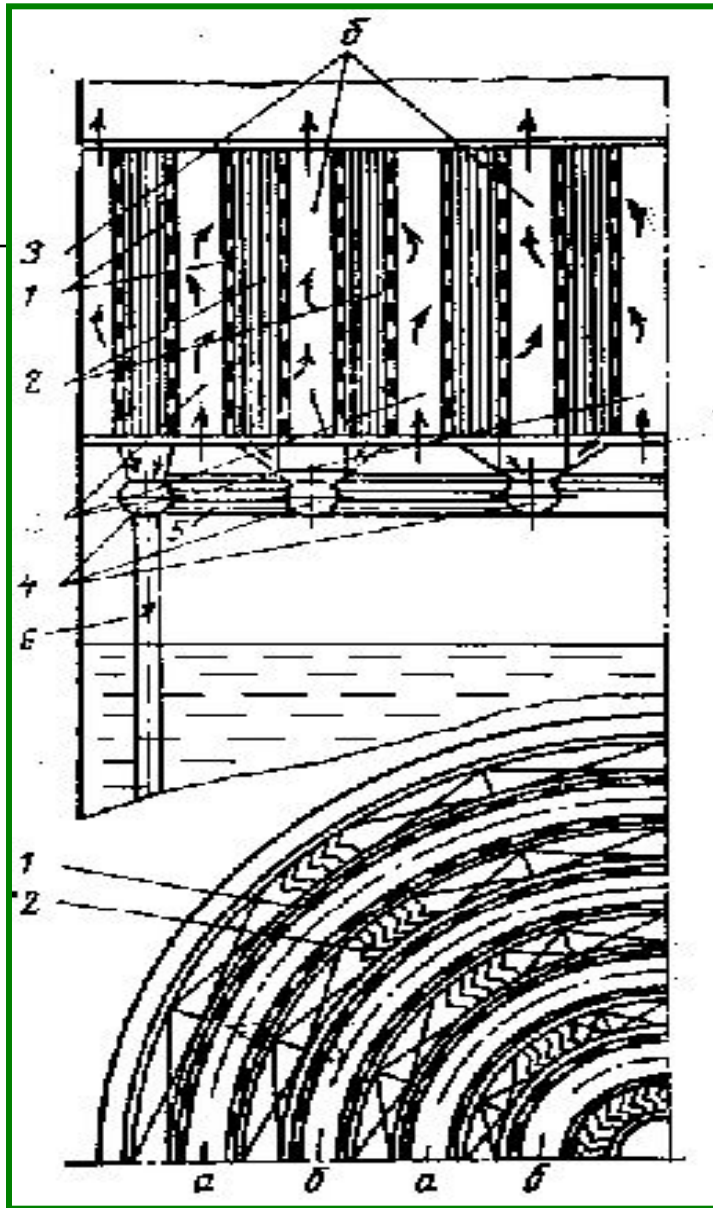
Горизонтальный ЖС

Жалюзийные сепараторы обладают многими достоинствами:

- высокая эффективность осушения пара;
- высокая надежность эксплуатации;
- малое гидравлическое сопротивление;
- простота конструкции, изготовления и монтажа.

К недостаткам ЖС относят:

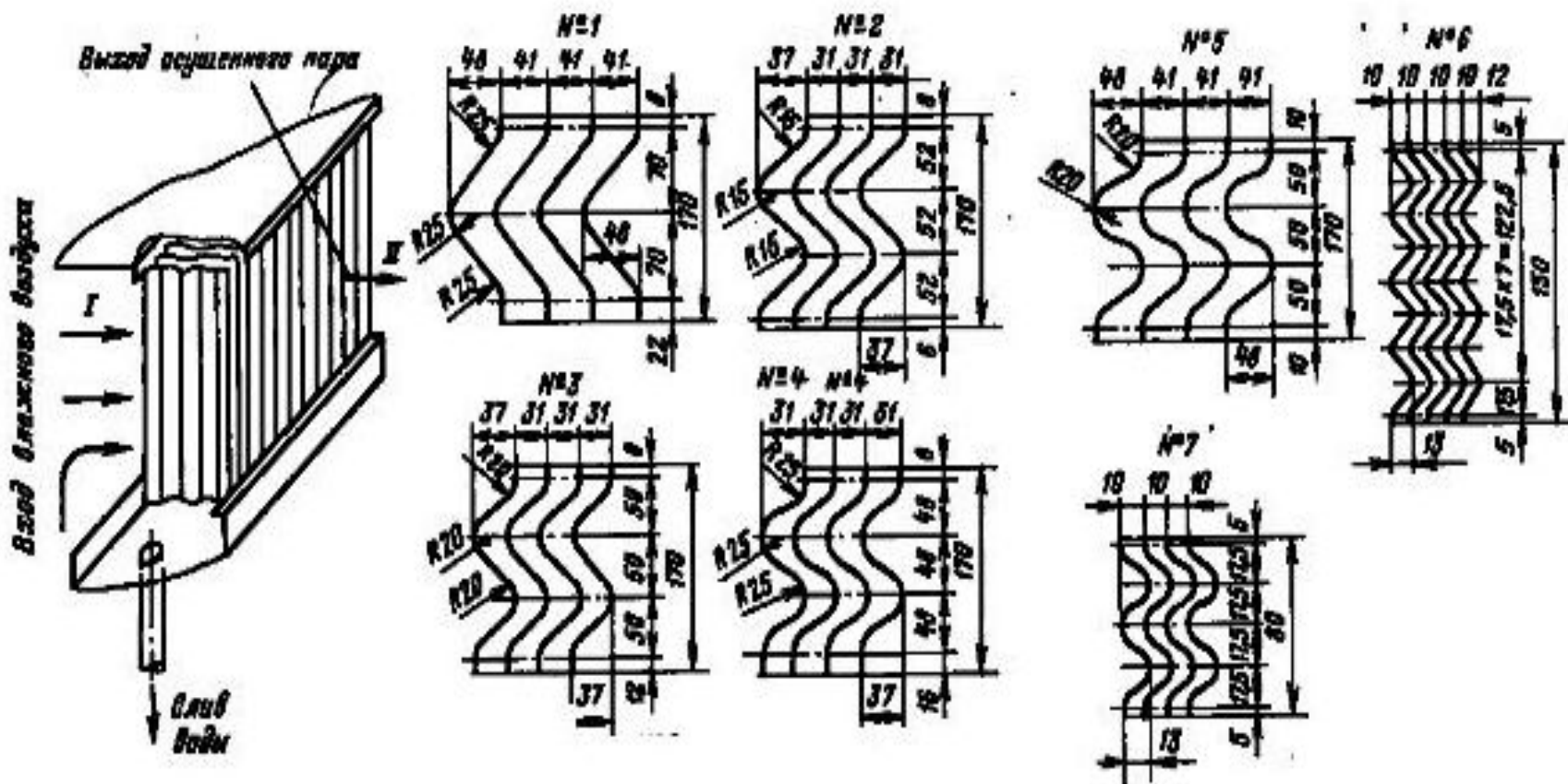
- значительную металлоемкость;
- сложность дренажа отсепарированной воды.



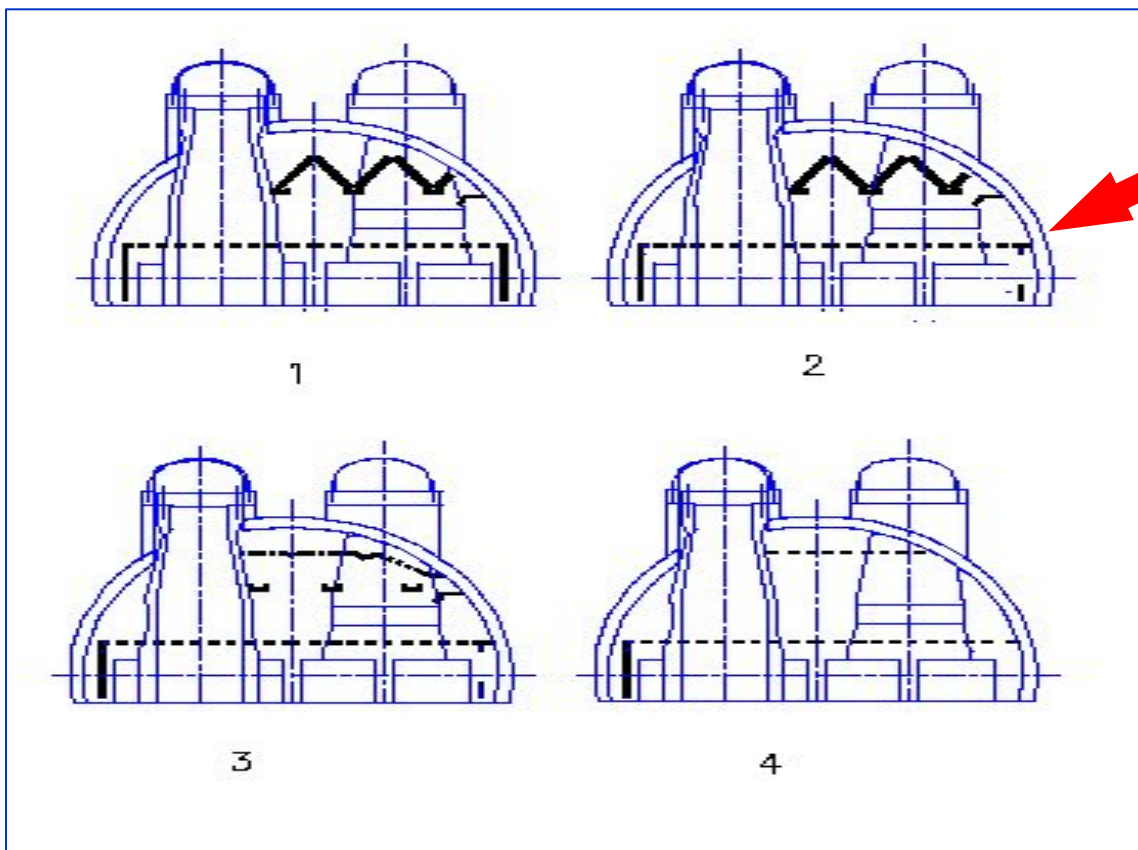
Вертикальный ЖС

- 1 – дырчатые щиты;
- 2- жалюзи;
- 3- глухая крышка;
- 4- сборники сепарата;
- 5- сепаратоотводящие трубы

Типы сепарационных элементов вертикального ЖС



Изменение сепарационной схемы ПГВ-1000



1-начальная схема с жалюзи

2-закрит канал с горячей стороны

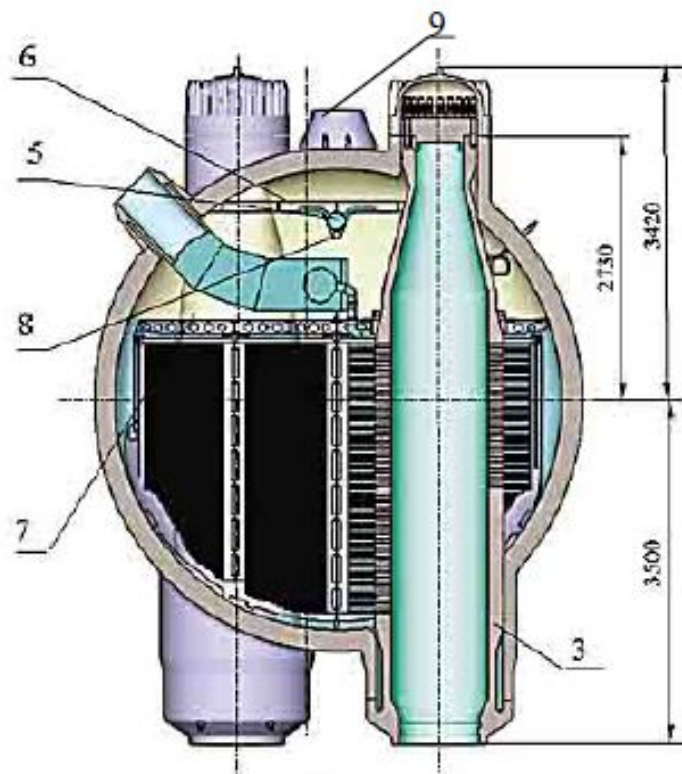
3- удалены жалюзи

4- новая схема

Изменение сепарационной схемы ПГВ-1000

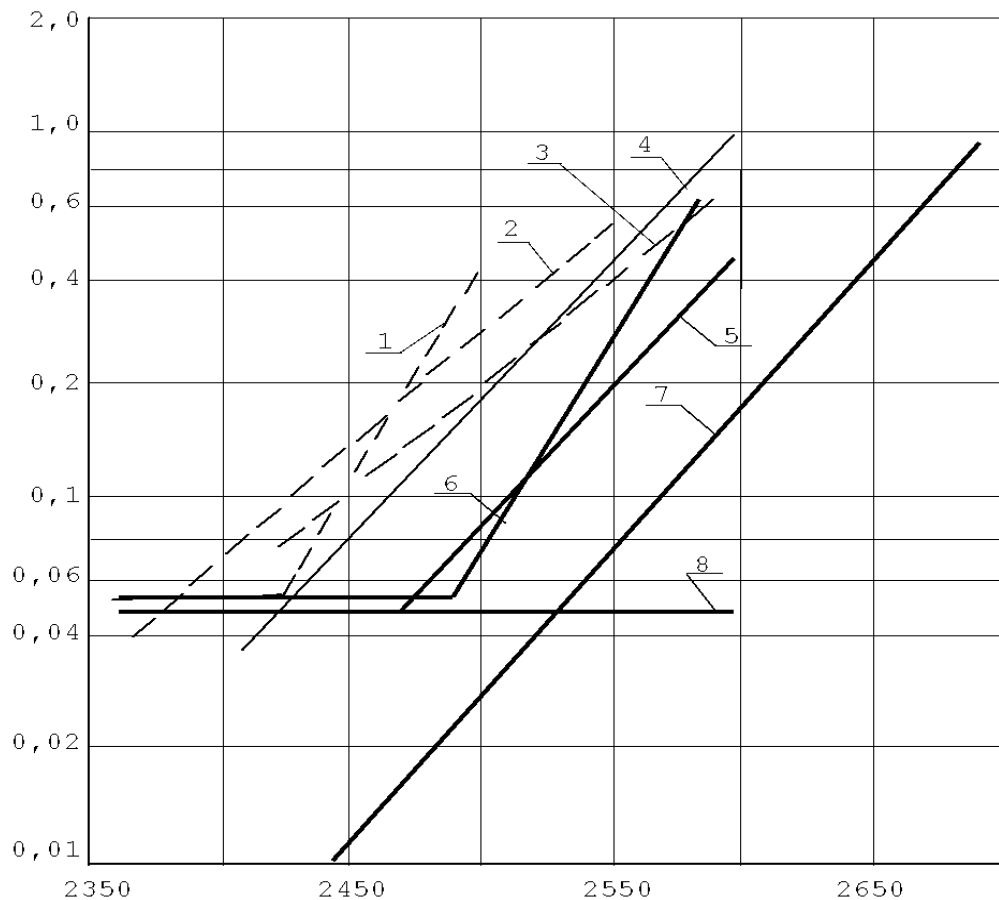
В настоящее время в новых проектах парогенераторов ПГВ-1000М (ПГВ-1000М(В) и др. используется сепарационная схема, основанная на использовании гравитационной сепарации.

Для выравнивания паровой нагрузки зеркала испарения используется погруженный дырчатый лист (ПДЛ), а вместо жалюзийного сепаратора устанавливается плоский пароприемный дырчатый лист (ППДЛ)



6 – ППДЛ; 7 - ПДЛ

Сепарационные характеристики ПГВ-1000



1,2 схемы...рис.1-6 (100%)

3 схема... рис.7 (100%)

4 схема...рис.8 (100%)

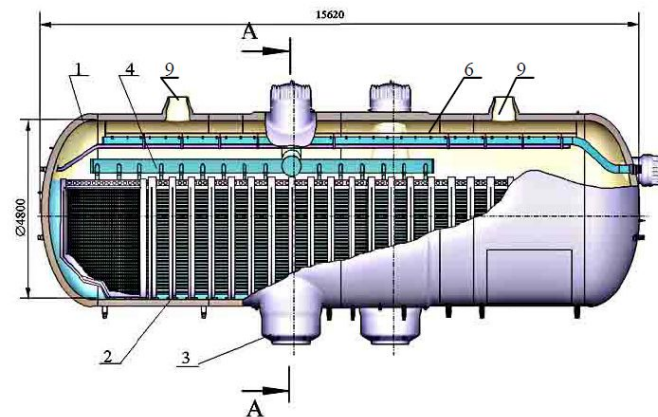
4 схема...рис. 9 (105%)

Перспективные сепарационные схемы горизонтальных ПГ ВВЭР

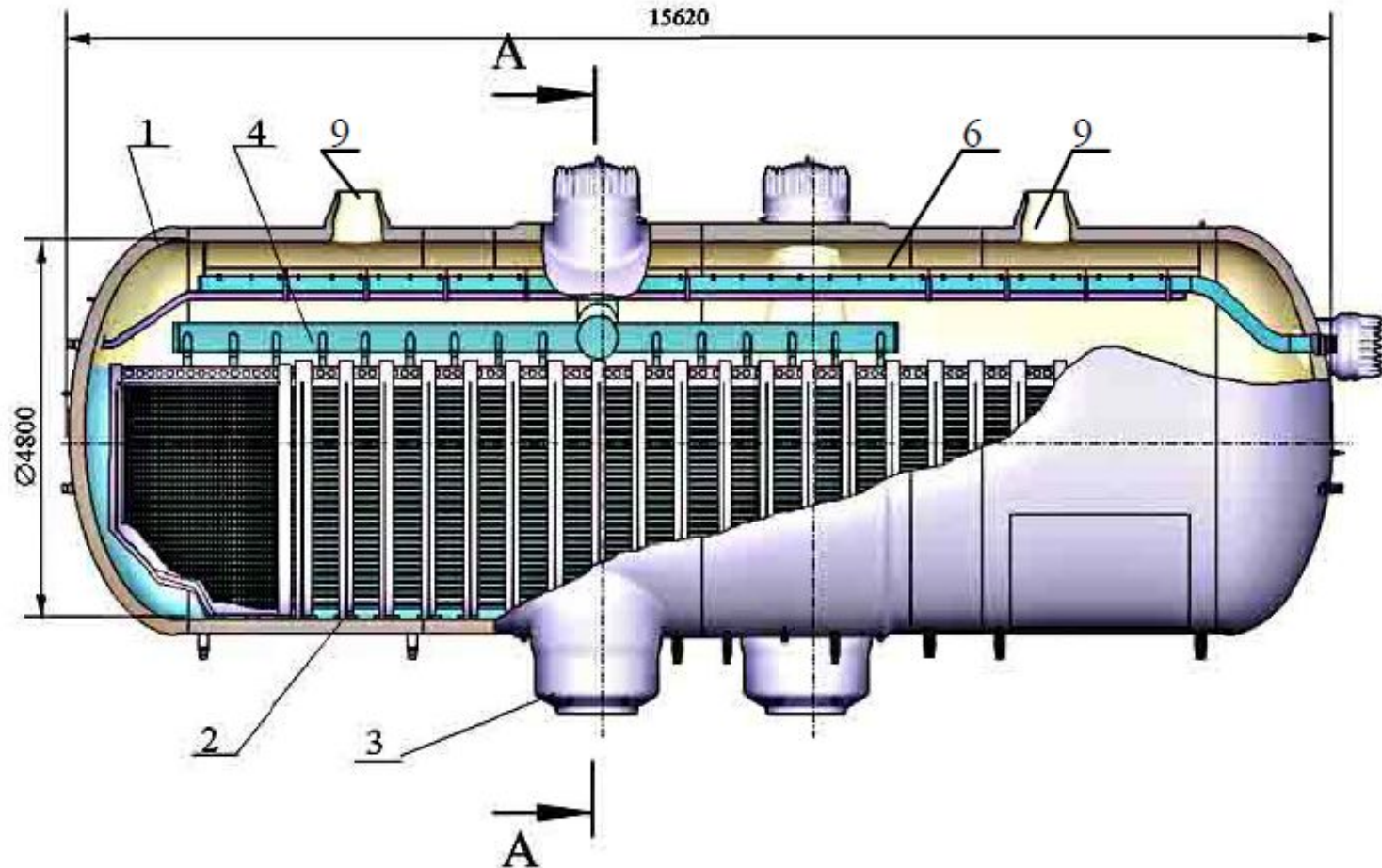
Сепарационная схема без ЖС применена на еще более мощном перспективном ПГВ-1500 реакторной установки с ВВЭР-1500.

В ПГВ-1500 существенно изменилась схема вывода пара из парогенератора.

Вместо 10 паропроводящих патрубков (ПГВ-1000, распределенных равномерно по верхней поверхности корпуса ПГ, в ПГВ-1500 устанавливается 2 патрубка



Перспективные сепарационные схемы горизонтальных ПГ ВВЭР



Перспективные сепарационные схемы горизонтальных ПГ ВВЭР

Уменьшение количества патрубков приводит к появлению неравномерности отвода пара из парогенератора (ПГ), и вследствие этого, к ухудшению сепарационных характеристик ПГ.

Для устранения этой неравномерности ППДЛ, устанавливаемый в верхней части парового пространства, должен иметь **переменную** по длине ПГ **перфорацию**.

Центробежные сепараторы

- В настоящее время в кипящих реакторах и в вертикальных парогенераторах реакторных установок с водо-водяными реакторами нашли применение центробежные сепарационные устройства с осевым или радиальным подводом пароводяной смеси.

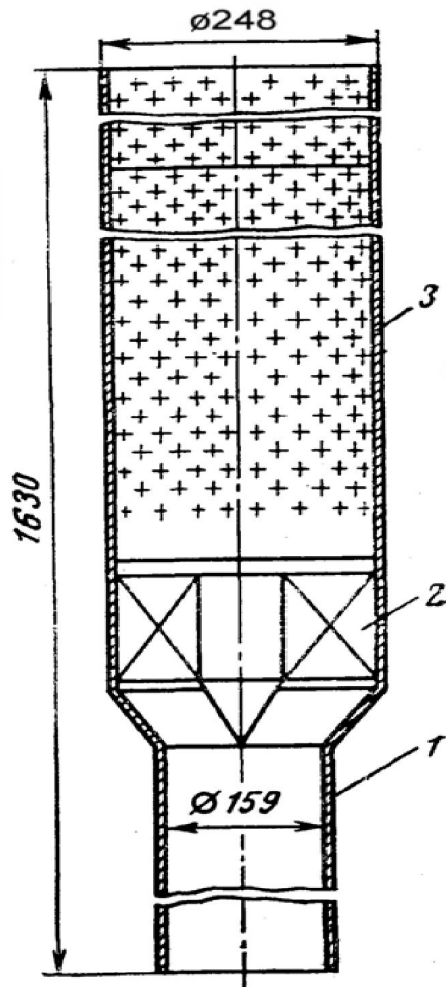
Центробежные сепараторы

- Сепарация в осевых устройствах осуществляется с использованием закручивания потока специальными завихрителями, в радиальных сепараторах - тангенциальной подачей двухфазной смеси в объем сепарационного устройства, например, циклоны

Центробежные сепараторы

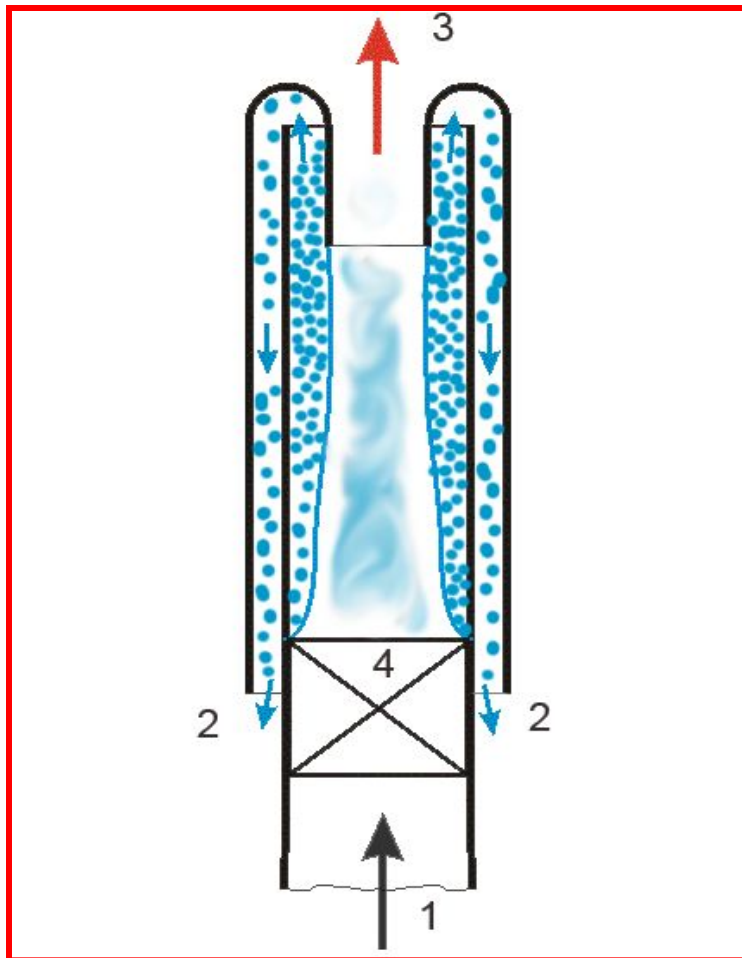
- Такие устройства компактны и достаточно эффективны, но имеют значительные гидравлические сопротивления, что, как правило, требует организации принудительной циркуляции пароводяной смеси.

Конструкция одноступенчатого осевого сепаратора для установки в вертикальных парогенераторах



- 1 – подводящий патрубок;
- 2 – завихритель;
- 3 – перфорированный корпус

Принципиальная схема центробежного сепаратора



- 1 - пароводяная смесь;
- 2 – отсепарированная вода;
- 3 – пар;
- 4 - завихритель

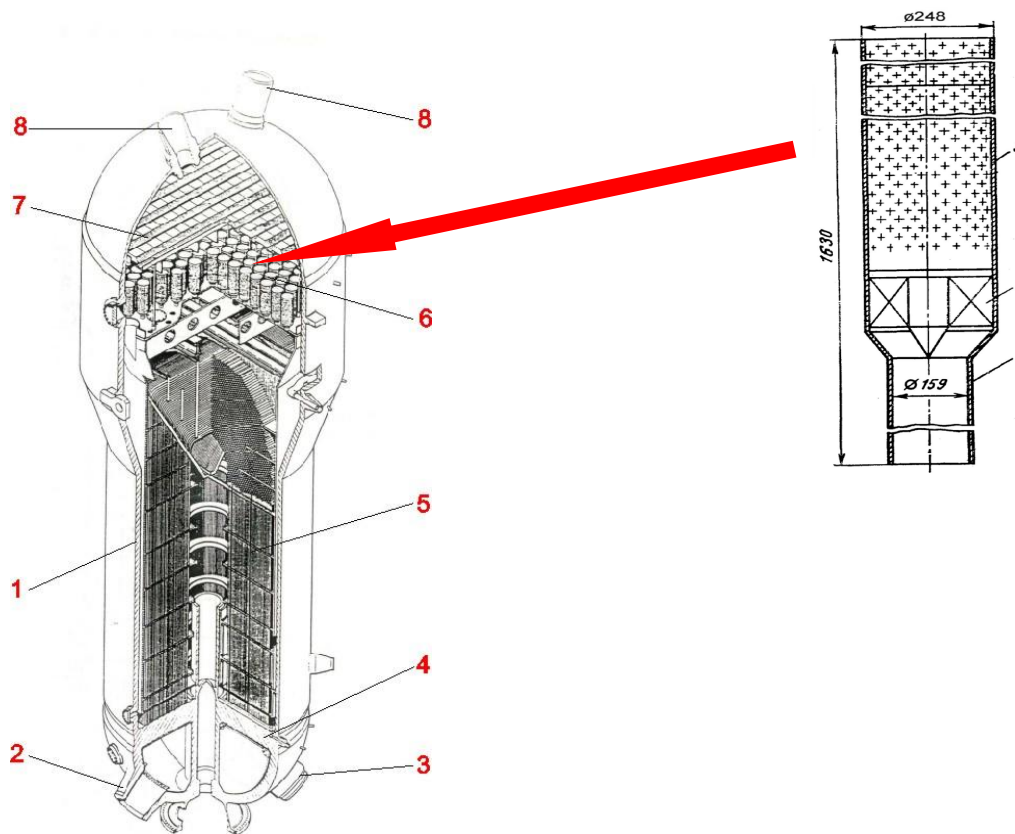
Принцип действия циклона

Пароводяная смесь поступает во входной патрубок 1 и далее, проходя через лопаточный завихритель 2, получает вращательное движение.

Вода центробежной силой отжимается к стенке корпуса 3 сепаратора и через отверстия отводится в объем между сепараторами. Пар выходит из сепаратора в паровой объем.

Сепараторы крепятся на плите над пучком трубок теплопередающей поверхности.

Продольный разрез вертикального ПГ РWR

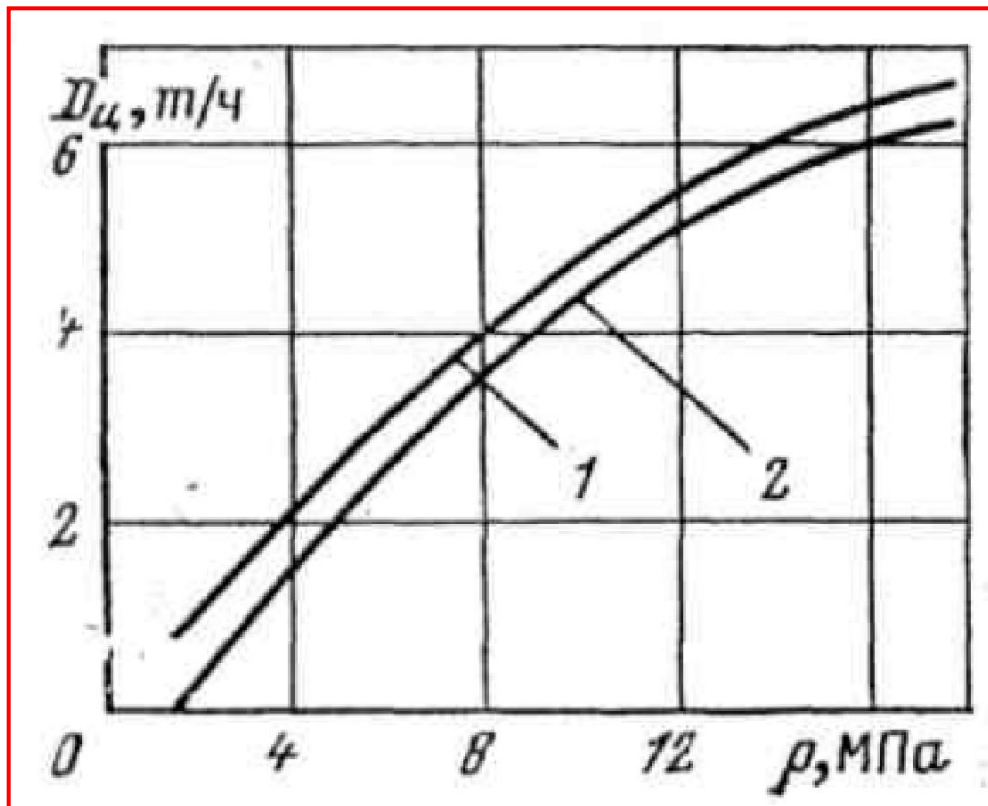




Условия эффективной работы циклона

Нормальная работа циклона обусловлена правильным выбором расхода пара, от чего зависит влажность отсепарированного пара. Расход пара через циклон стандартного размера нормируется.

Рекомендуемые нагрузки единичного циклона диаметром 290 мм



1 – нормальные; 2 – минимальные

Корпуса циклонов

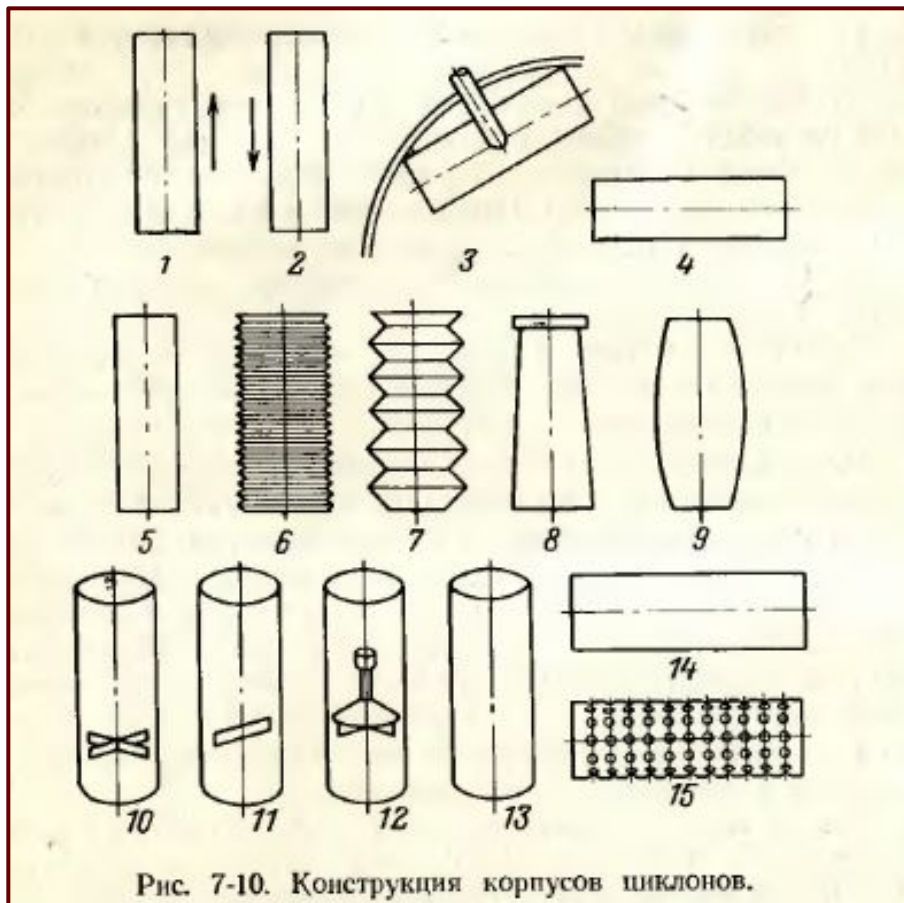
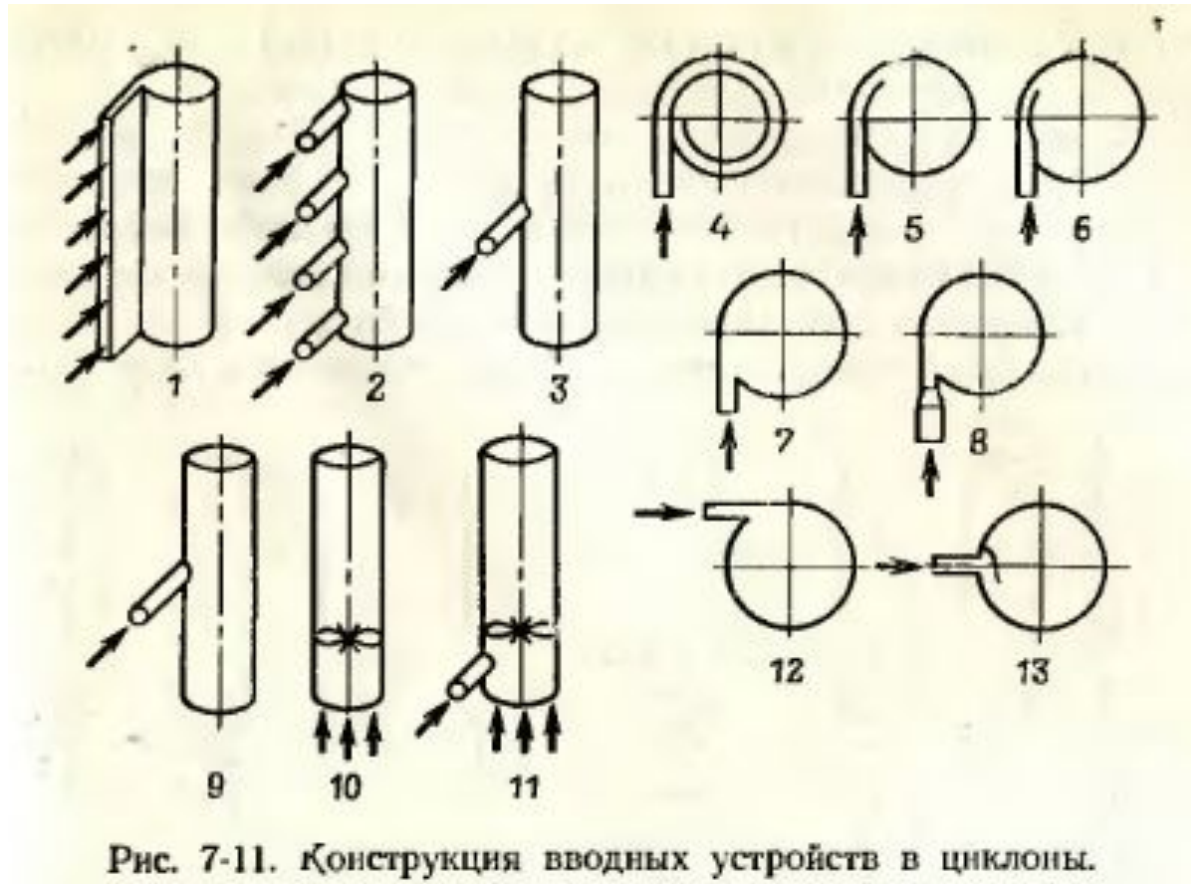
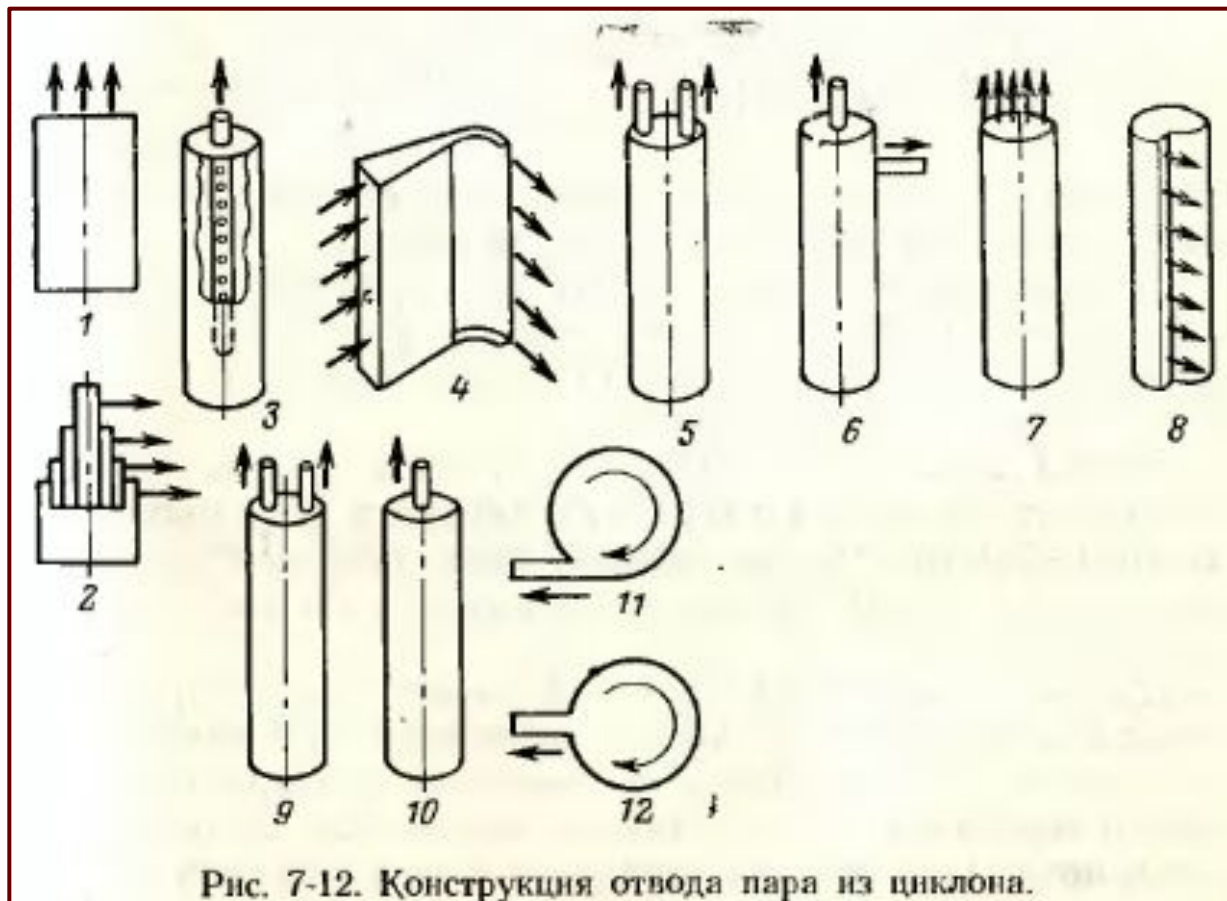


Рис. 7-10. Конструкция корпусов циклонов.

Вводные устройства циклонов



Вывод пара из циклонов



Сравнение разных способов сепарации

| Тип сепаратора | Особенности работы | Достоинства | Недостатки |
|-----------------|--|---|---|
| Объемный | Применяется на всех горизонтальных парогенераторах | Простота конструкции, небольшое сопротивление, широкая применимость | Ограниченная нагрузка объема, зависимость эффективности от солесодержания |

Сравнение разных способов сепарации

| Тип сепаратора | Особенности работы | Достоинства | Недостатки |
|-------------------|---|---|---|
| Жалюзийный | Применяется на горизонтальных и вертикальных парогенераторах ЕЦ | Высокая эффективность при капельном уносе | Большая металлоемкость, повышенная коррозия |

Сравнение разных способов сепарации

| Тип сепаратора | Особенности работы | Достоинства | Недостатки |
|----------------|--|---|---|
| Центробежный | Используются в вертикальных ПГ ЕЦ, возможно использования в горизонтальных ПГ ЕЦ | Возможность применения при большой влажности и солесодержании | Большая металлоемкость, повышенная коррозия, высокое гидравлическое сопротивление |



Спасибо за внимание