

# 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
Зродированная	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

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

$S_{п}$ ,  $S_{пп}$  - 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)*

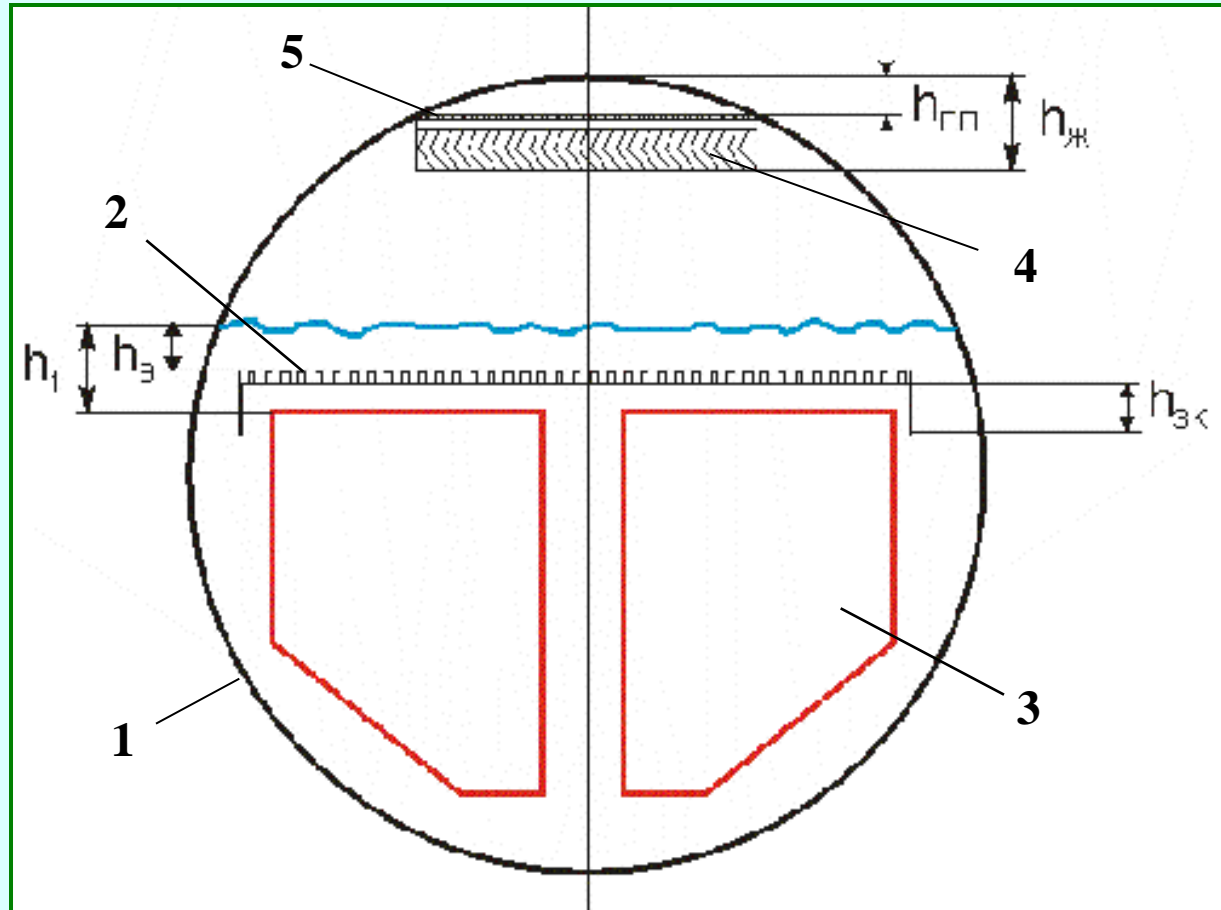
- влажность пара на входе в турбину насыщенного пара  $u_{ВХ} \leq 0,2 \div 0,25$  % ;
- влажность пара на входе в пароперегреватель прямоточного ПГ  $u_{ВХ} \leq 0,02 \div 0,05$  %

# Понятие термина “*сепарация*”

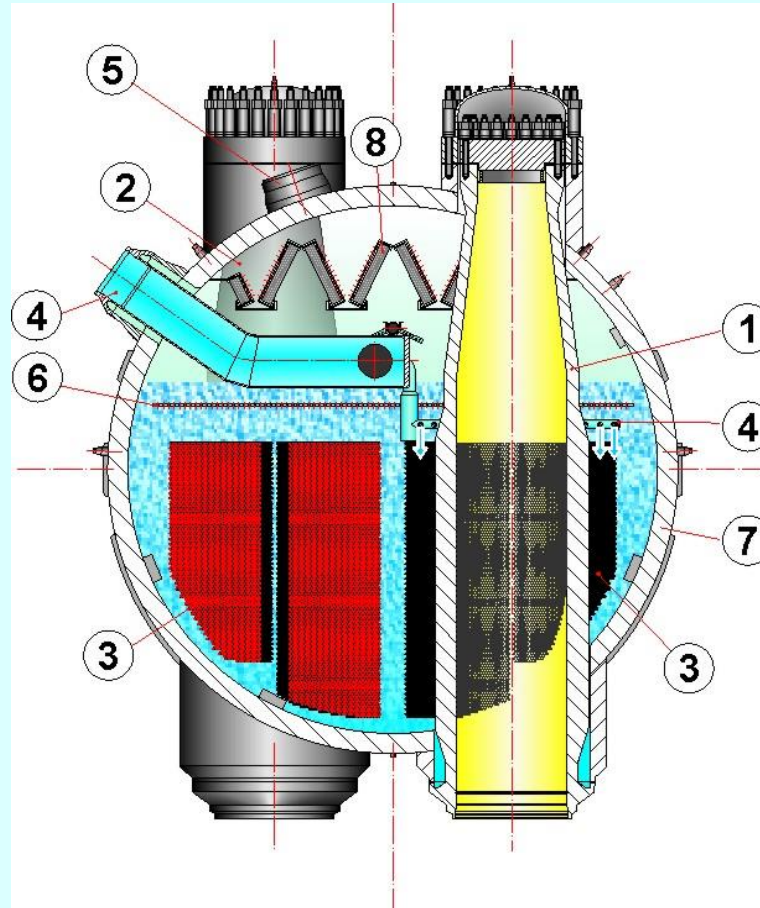
---

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

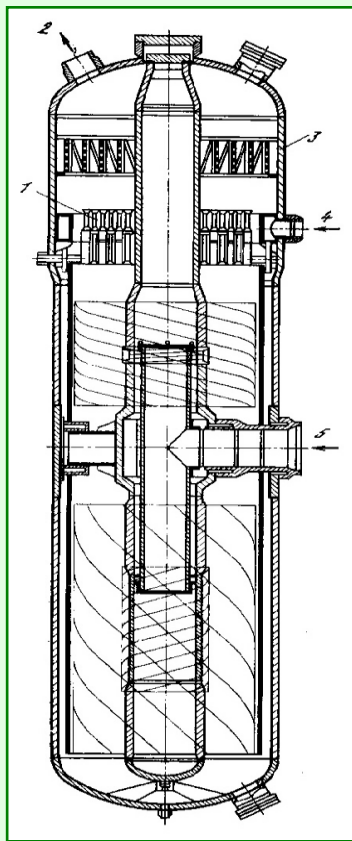
# Сепарационная схема горизонтального ПГ с U-образными трубками



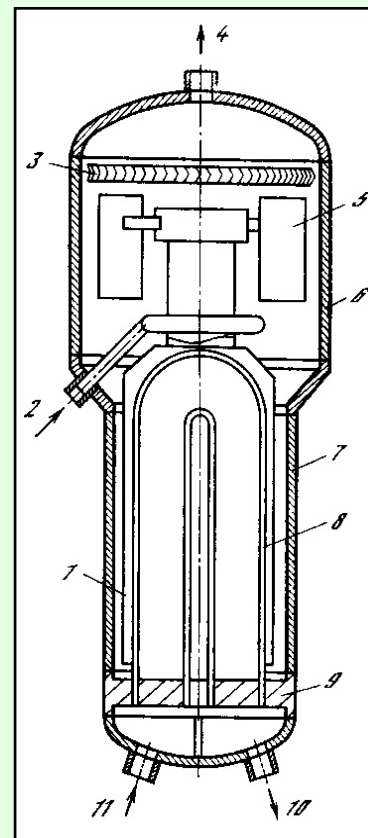
# Сепарационная схема горизонтального ПГ с U-образными трубками



# Сепарационные схемы вертикальных ПГ

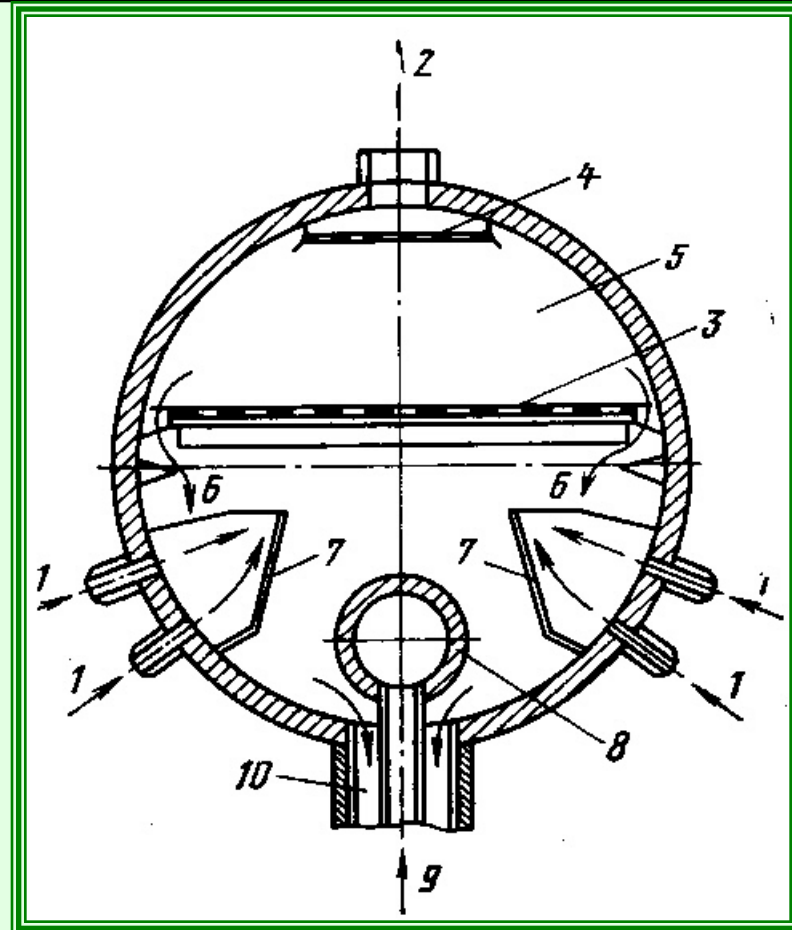


ПГ со змеевиковыми трубками



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)

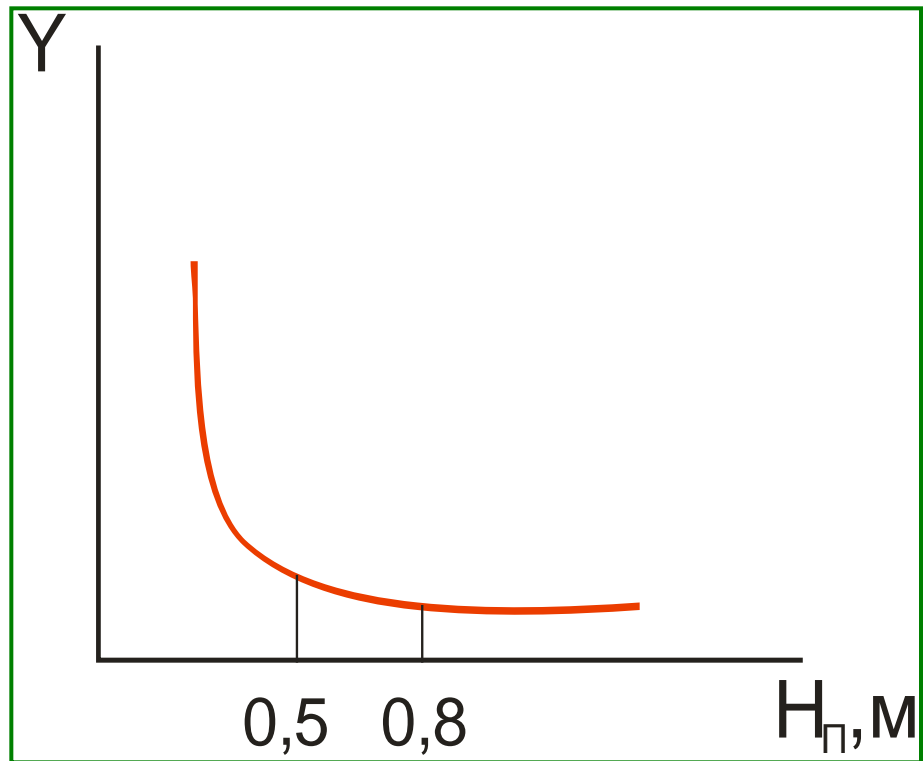
# Гравитационная сепарация

---

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

---

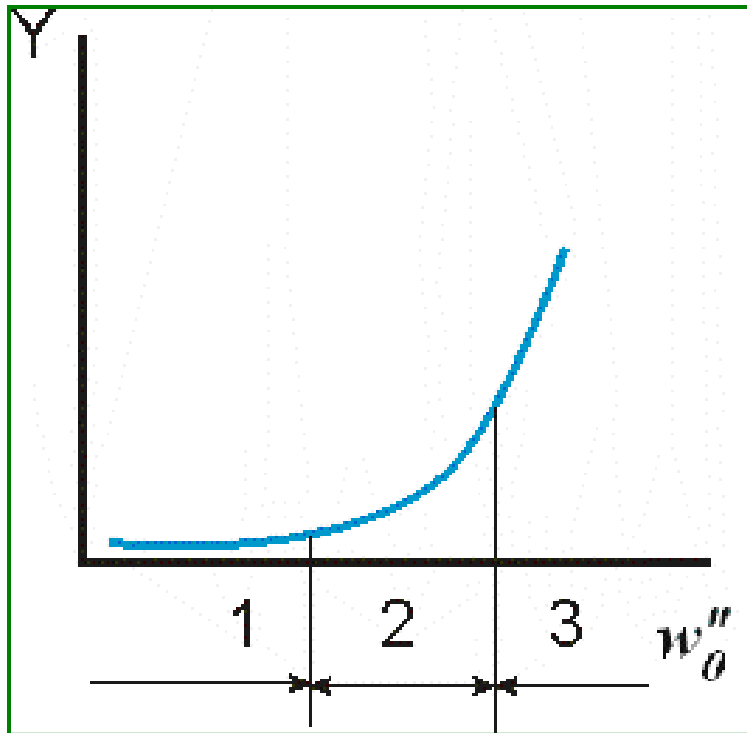
$$Y = C \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(w_0'')^{2,76}}{H^{2,3}}$$

# Зависимость влажности пара от приведенной скорости пара

ТПУ-ЭНИИ-АТЭС

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

# Гравитационная сепарация

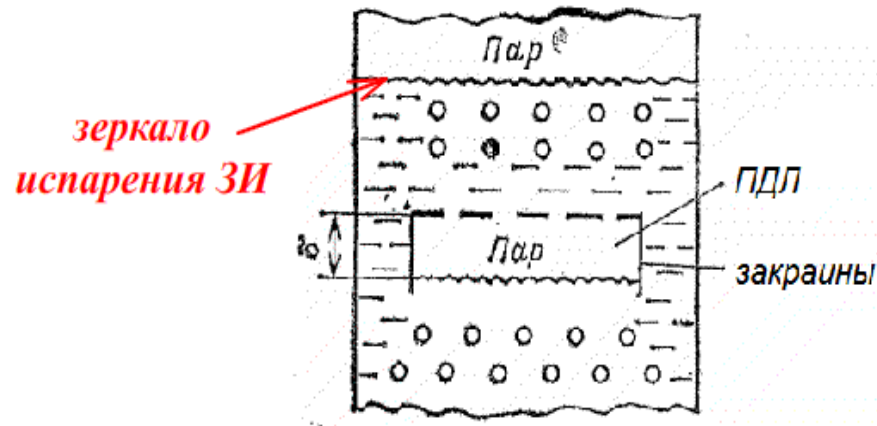


- 1  $Y = 0 \div 0,0003$ ;  $m = 1 \div 2,5$
- 2  $Y = 0,0003 \div 0,002$ ;  $m = 2,5 \div 4$
- 3  $Y > 0,002$ ;  $m = 8 \div 10$

**Зависимость влажности пара  
от приведенной скорости пара**

# Рекомендуемые значения $w_0$ ''

## Рекомендуемые значения приведенной скорости пара (нагрузки ЗИ)



ТПУ-ЭНИН-АЭС



## Погруженный дырчатый лист (щит)

---

**Назначение** - обеспечение равномерности нагрузки З.И.

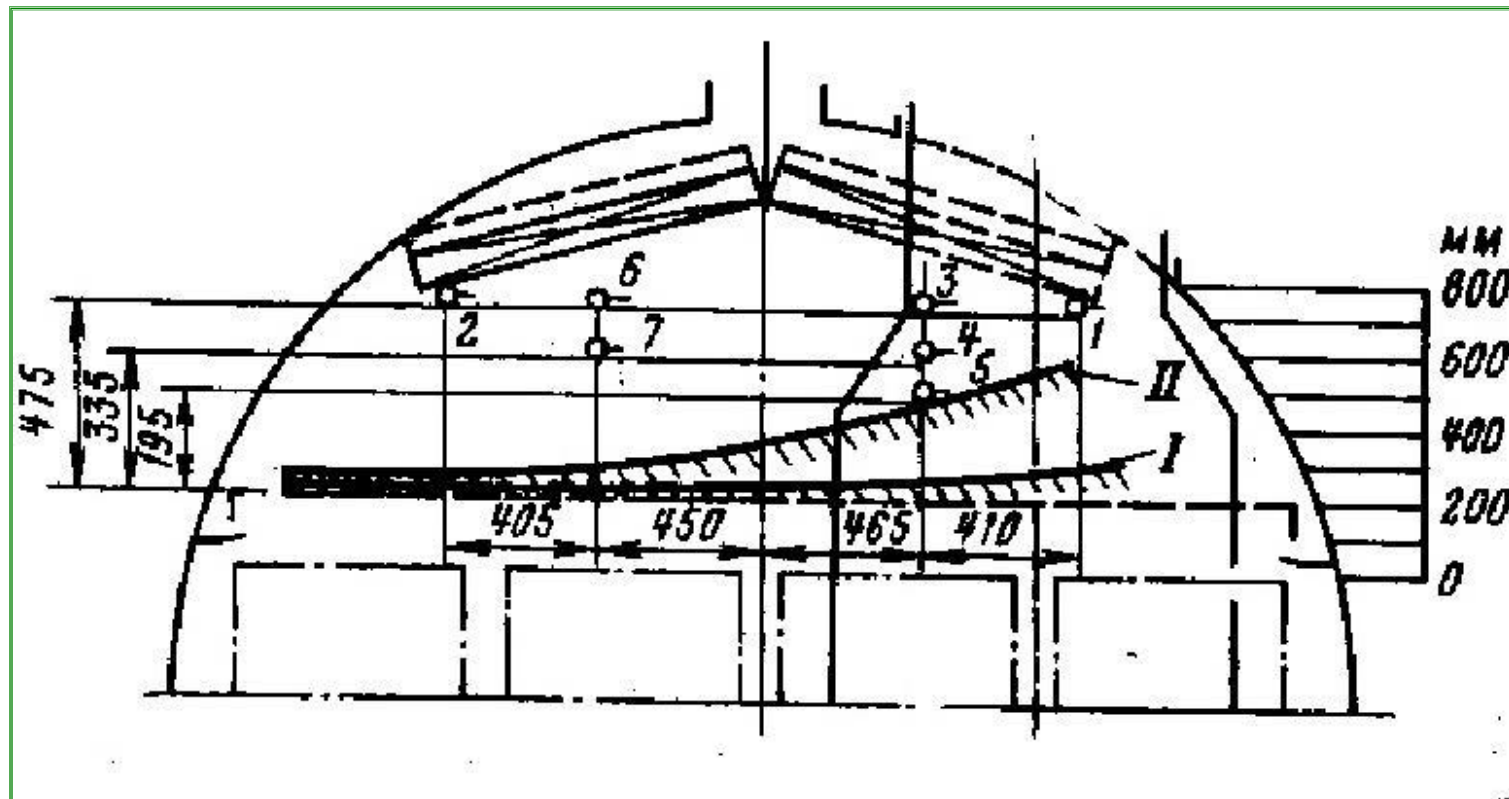
**Расположение** – на 50 – 75 мм ниже массового уровня.

**Перфорация** – отверстиями диаметром  $\geq 10$  мм.

**Обязательные элементы** – закраины.

**Режим работы** – беспровальный.

# Влияние ПДЛ на положение действительного уровня в парогенераторе

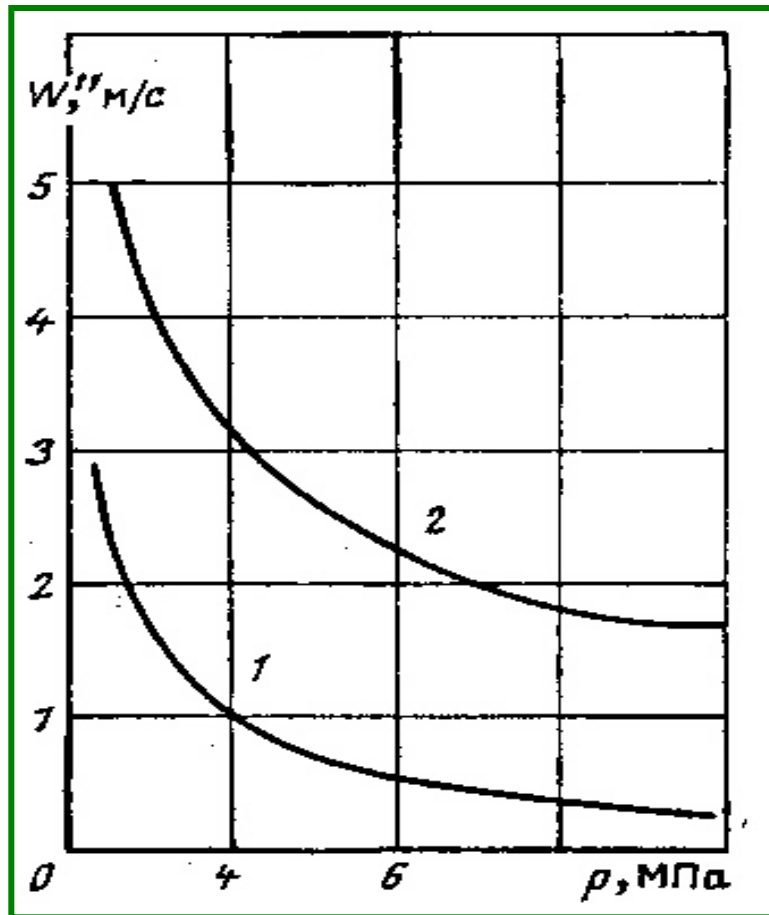


**I – парогенератор с ПДЛ; II – без ПДЛ**

# Зависимость скорости пара в отверстиях ПДЛ от давления

ТПУ-ЭНИИ-АТЭС

# Погруженный дырчатый лист



Зависимости скоростей в отверстиях  
ПДЛ от давления

1- минимальная

2-рекомендуемая

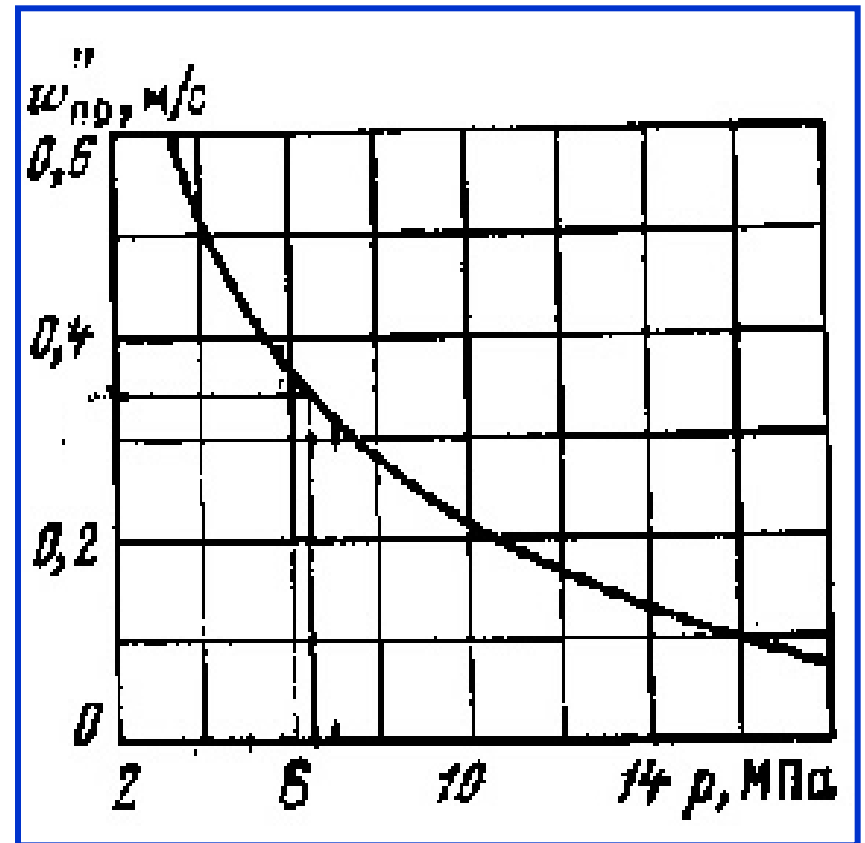
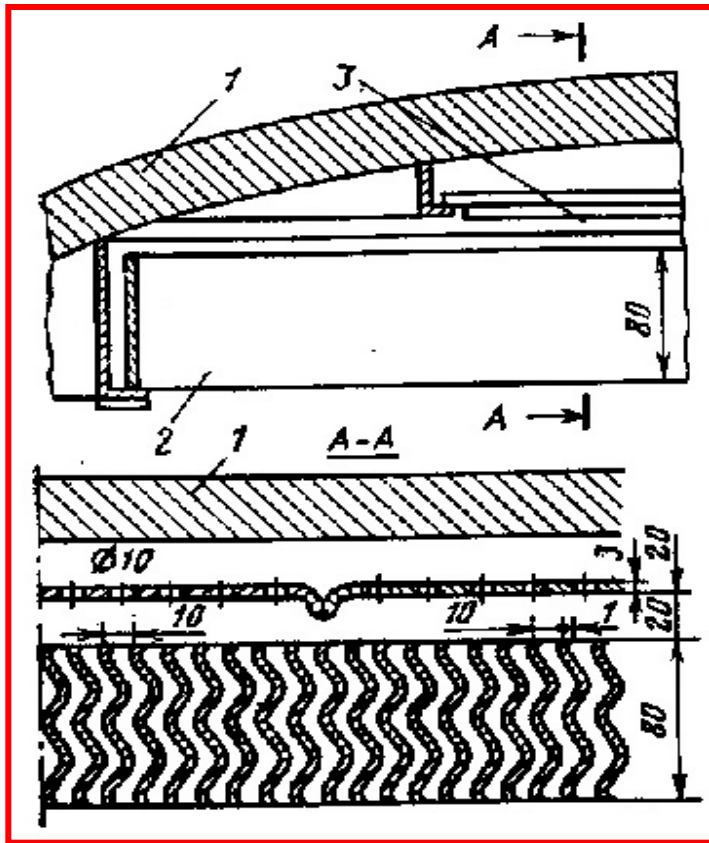


# Жалюзийные сепараторы

---

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

# Горизонтальный ЖС



Установка горизонтального ЖС

Предельные скорости перед ЖС

# Горизонтальный ЖС

---

Жалюзийные сепараторы обладают многими достоинствами:

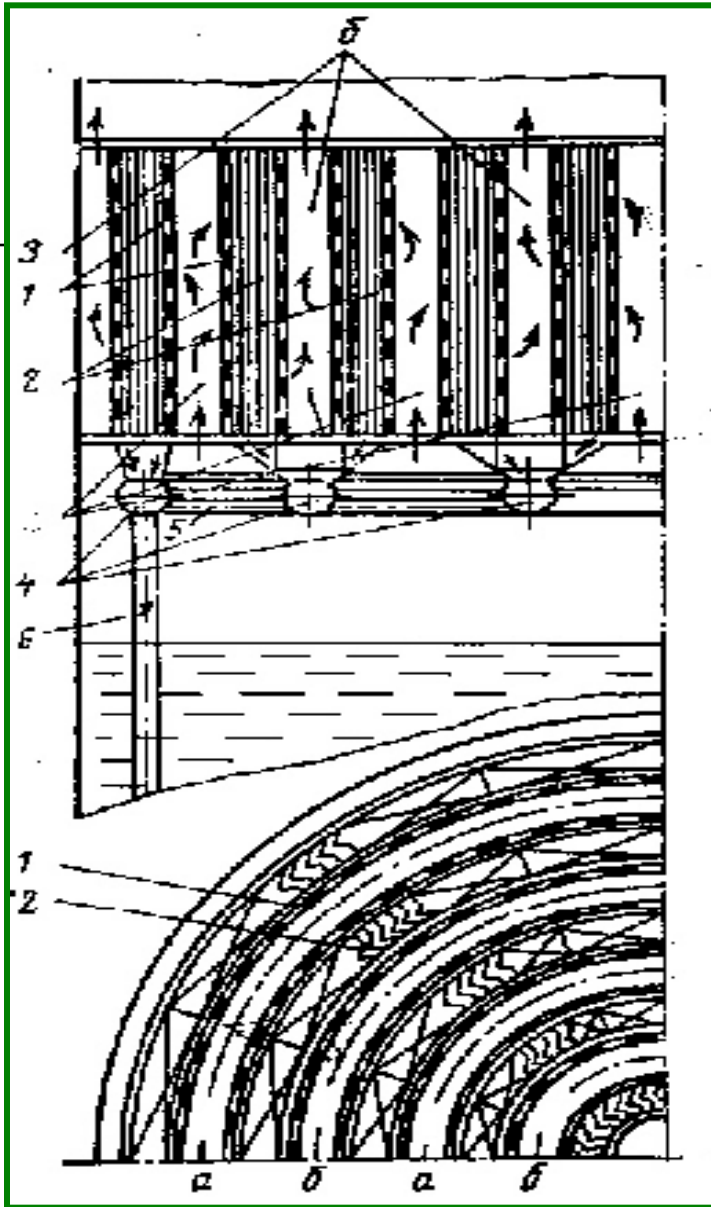
- высокая эффективность осушения пара;
- высокая надежность эксплуатации;
- малое гидравлическое сопротивление;
- простота конструкции, изготовления и

монтажа.

К недостаткам ЖС относят:

- значительную металлоемкость;
- сложность дренажа отсепарированной воды.

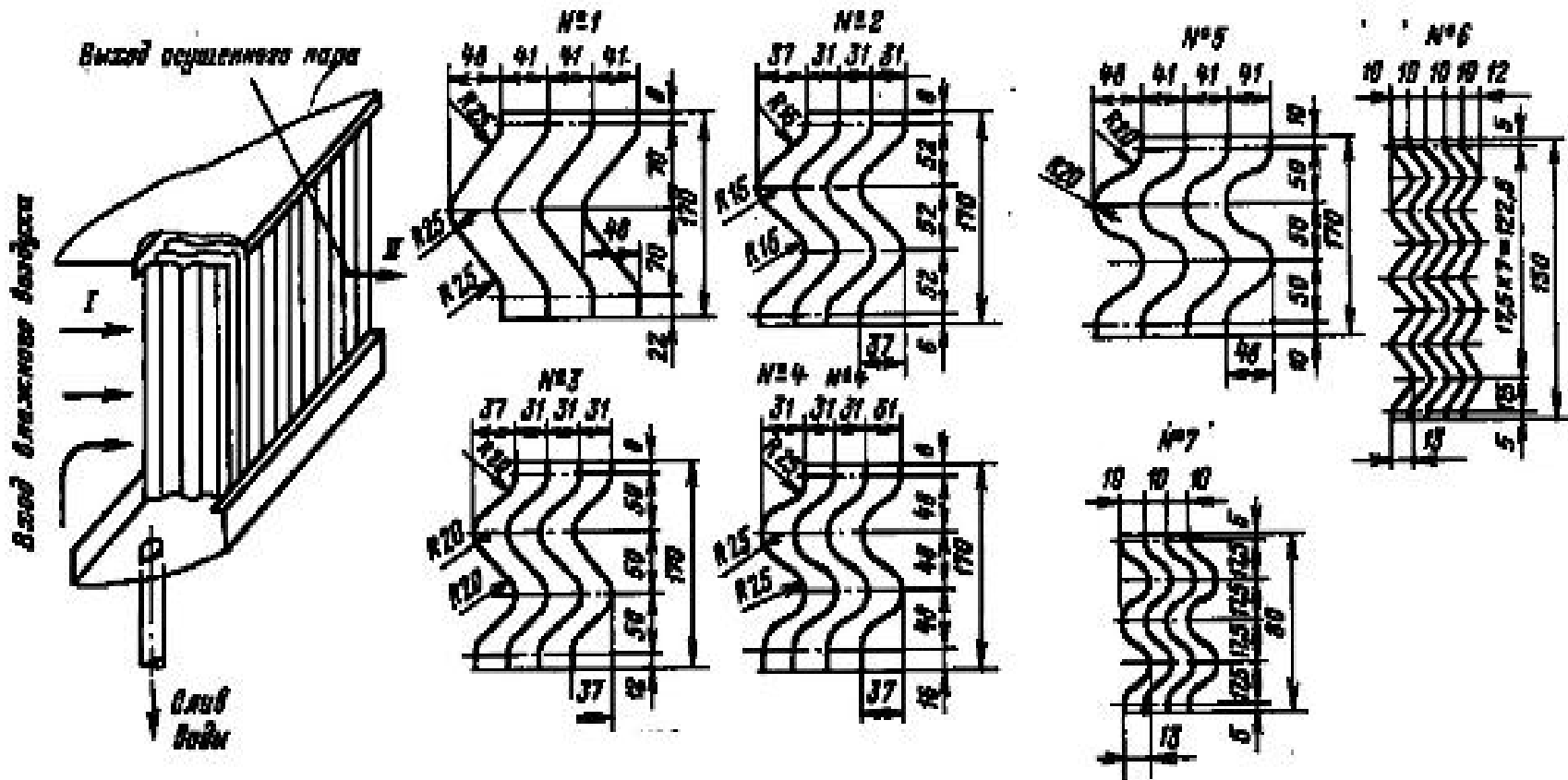
# Вертикальный ЖС



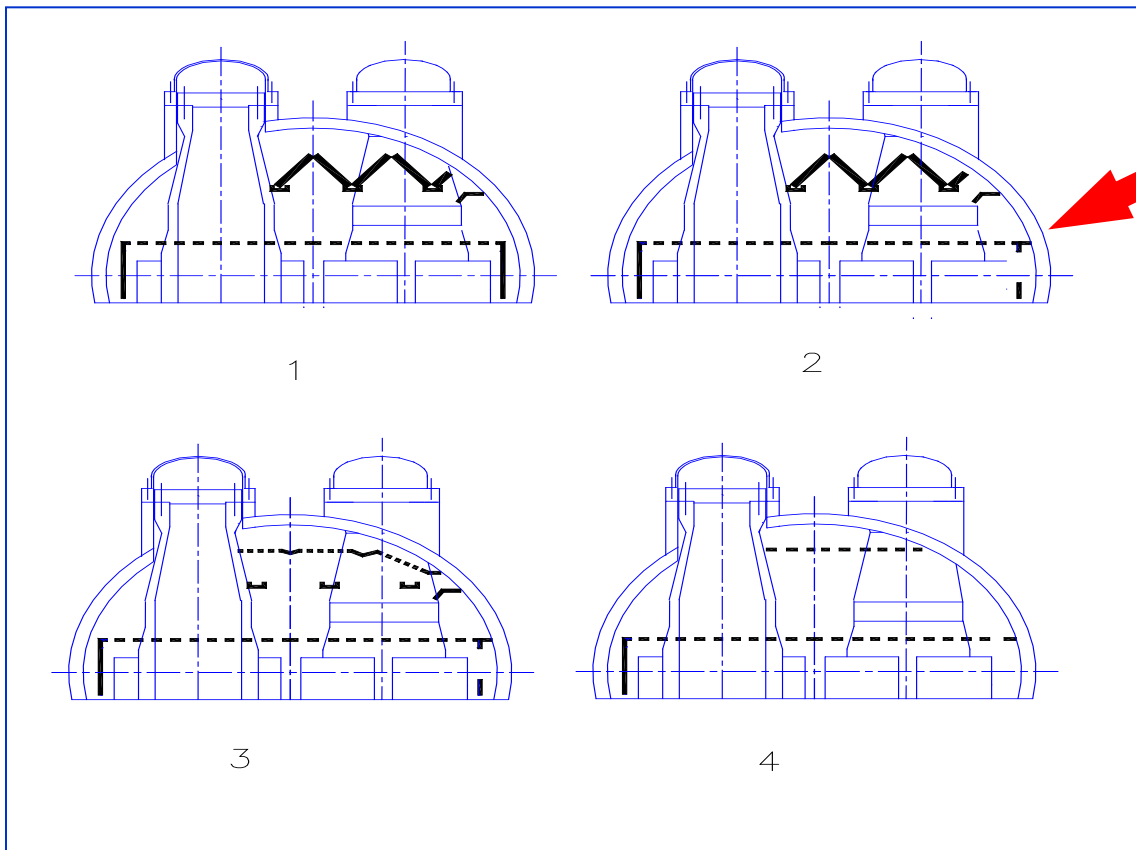
- 1 – дырчатые щиты;
- 2- жалюзи;
- 3- глухая крышка;
- 4- сборники сепарата;
- 5- сепаратоотводящие трубы



# Типы сепарационных элементов вертикального ЖС



# Изменение сепарационной схемы ПГВ-1000



1-начальная схема с жалюзи

2-закрыт канал с горячей стороны

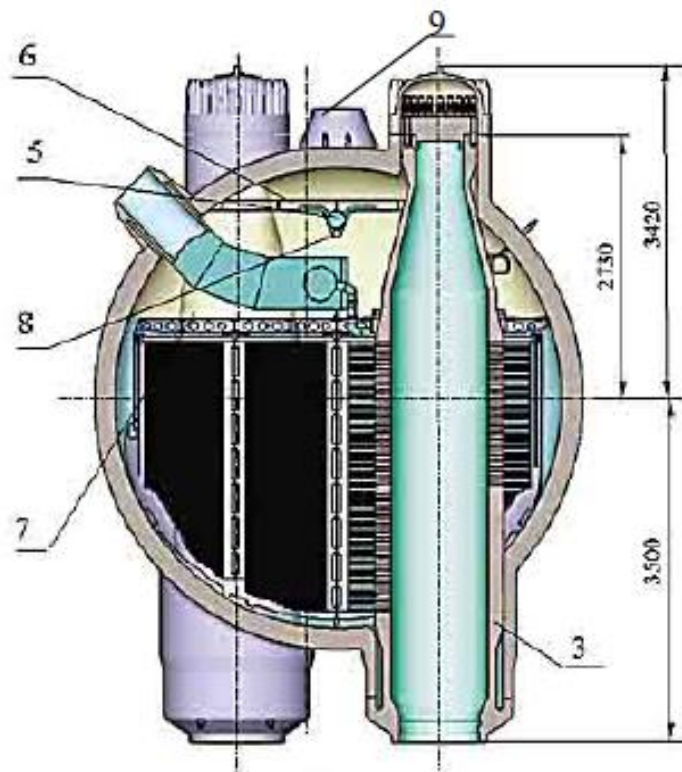
3- удалены жалюзи

4- новая схема

# Изменение сепарационной схемы ПГВ-1000

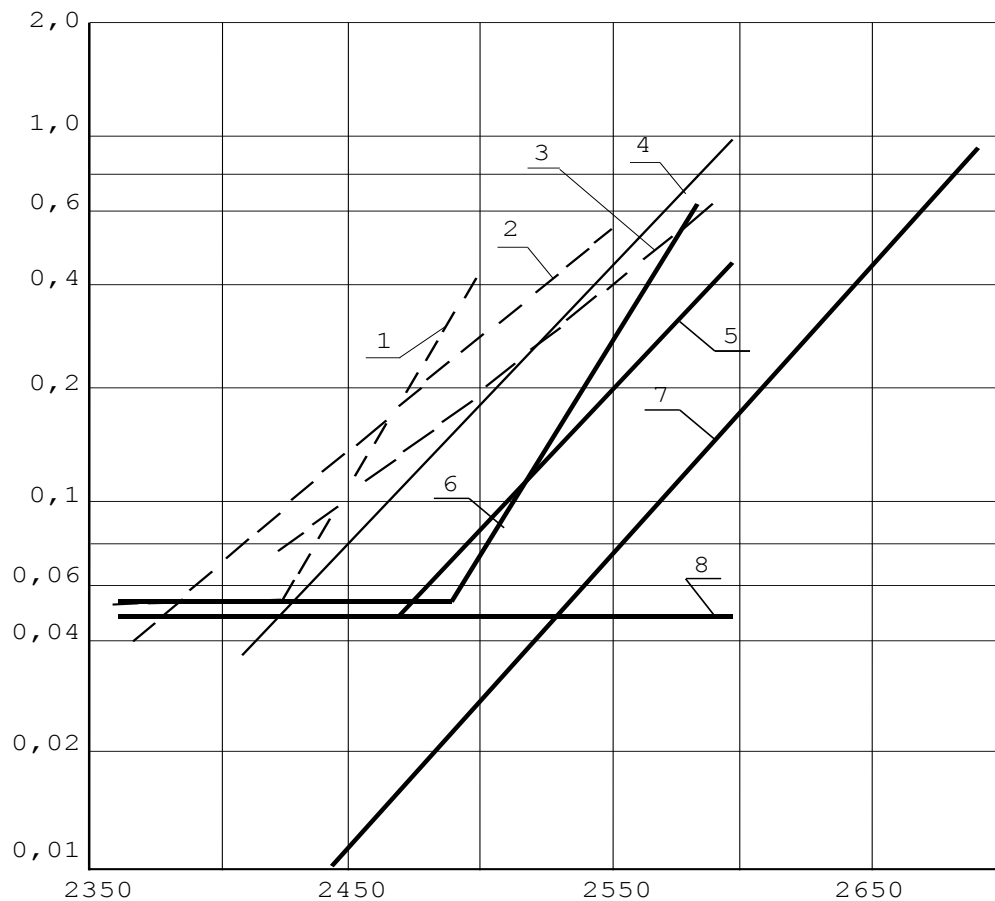
В настоящее время в новых проектах парогенераторов ПГВ-1000М (ПГВ-1000М(В)) и др. используется сепарационная схема, основанная на использовании гравитационной сепарации.

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%)

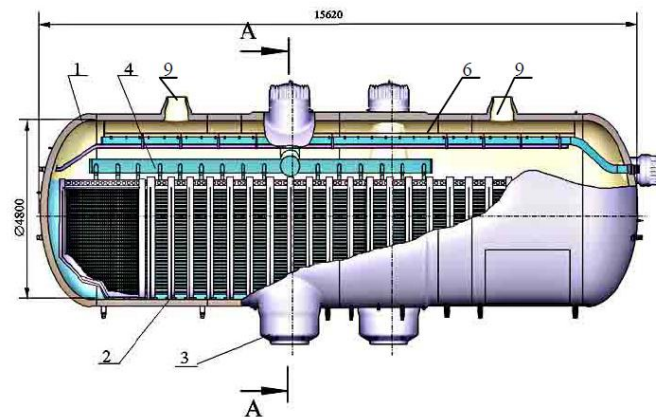
4 схема...рис. 9 (105%)

# Перспективные сепарационные схемы горизонтальных ПГ ВВЭР

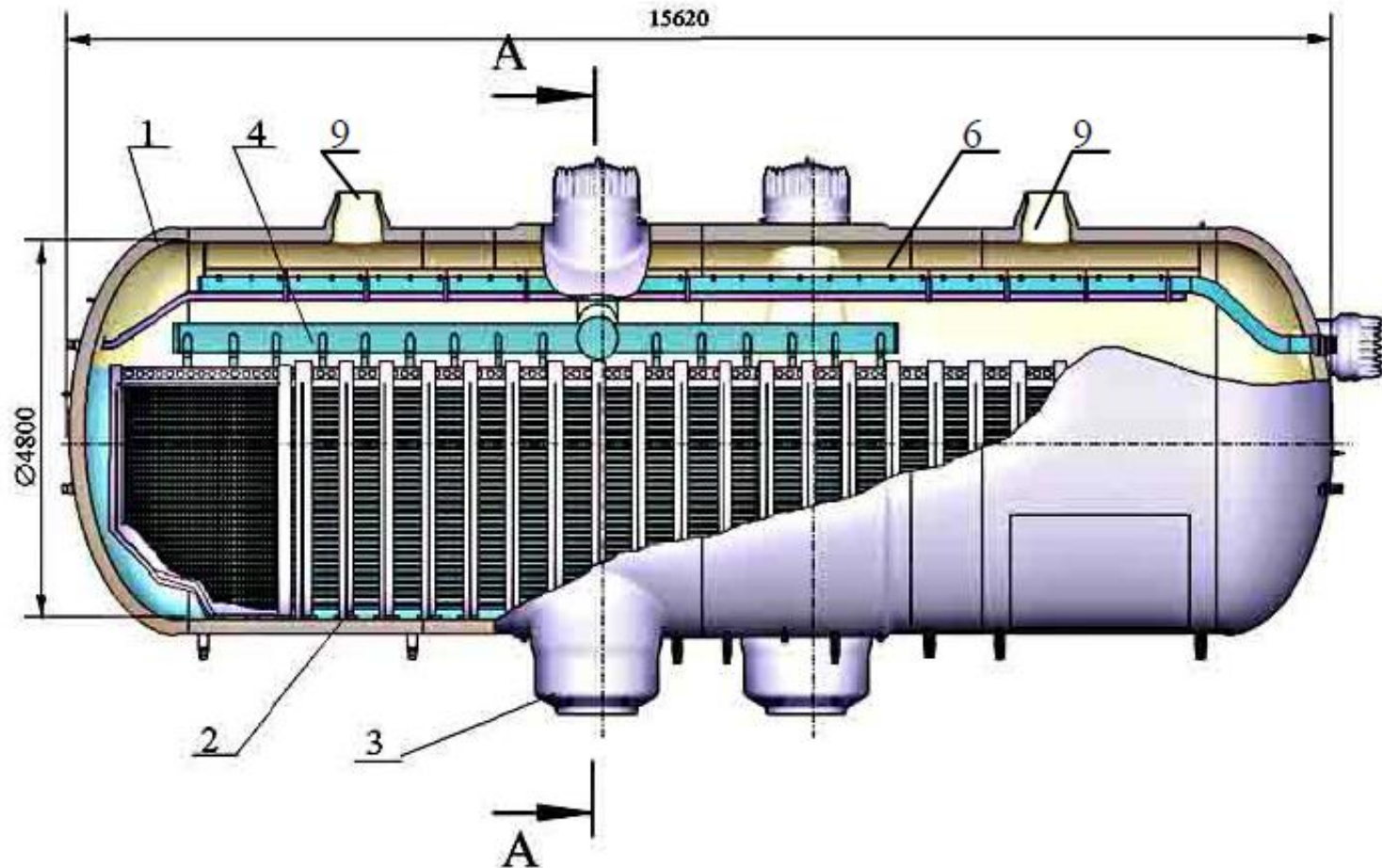
Сепарационная схема без ЖС применена на еще более мощном перспективном ПГВ-1500 реакторной установки с ВВЭР-1500.

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

---

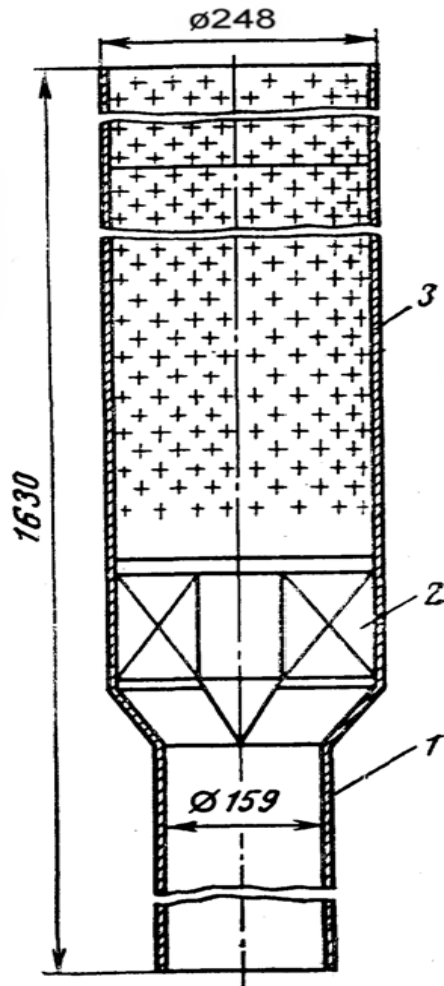
- Сепарация в осевых устройствах осуществляется с использованием закручивания потока специальными завихрителями, в радиальных сепараторах - тангенциальной подачей двухфазной смеси в объем сепарационного устройства, например, циклоны

# Центробежные сепараторы

---

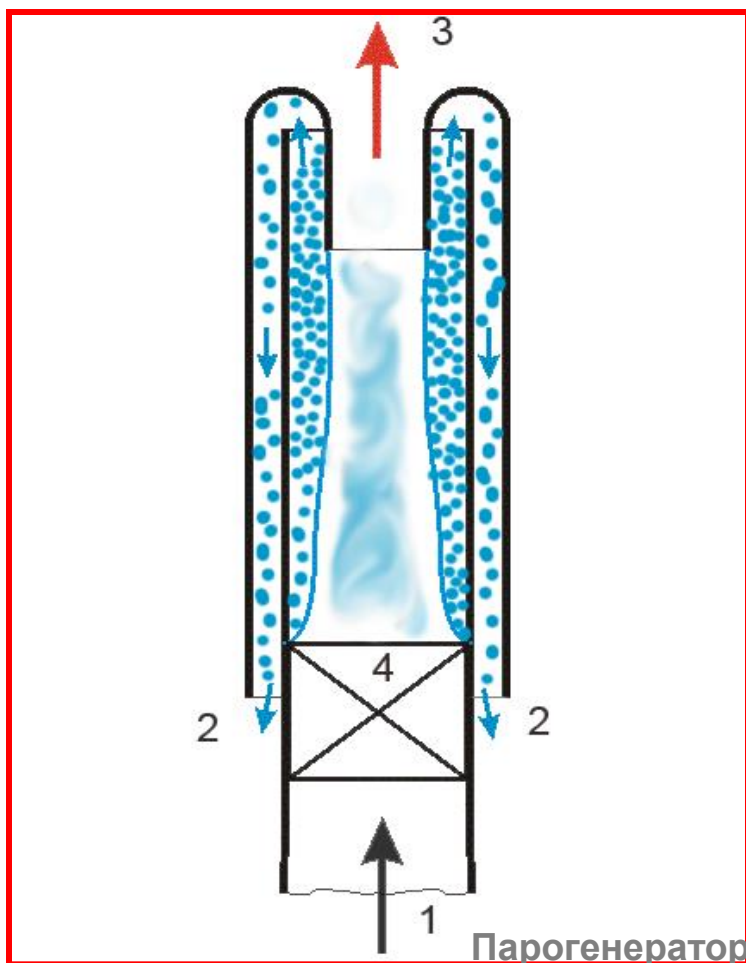
- Такие устройства компактны и достаточно эффективны, но имеют значительные гидравлические сопротивления, что, как правило, требует организации принудительной циркуляции пароводяной смеси.

# 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

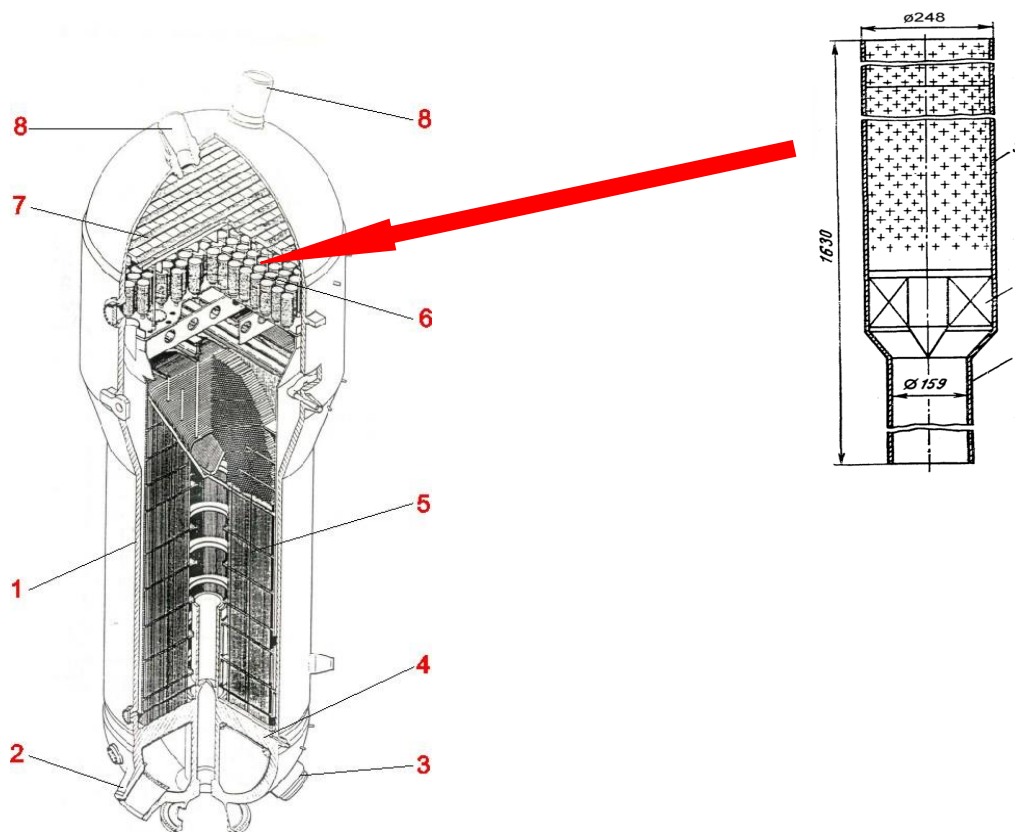
---

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 PWR



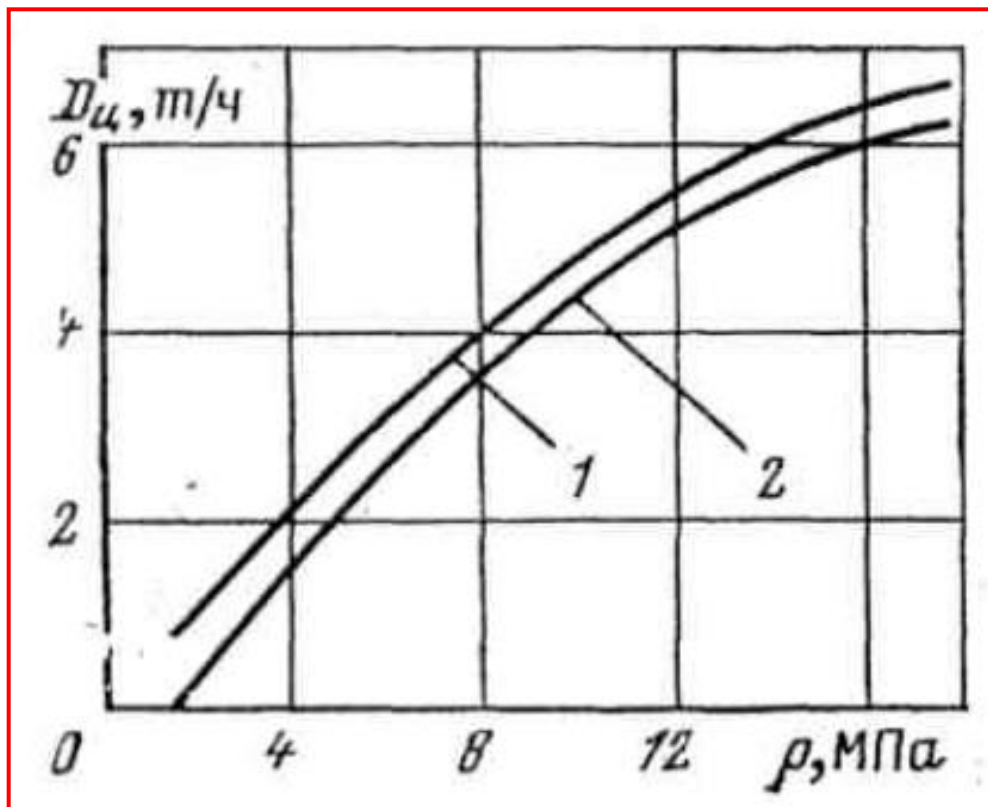


## Условия эффективной работы циклона

---

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

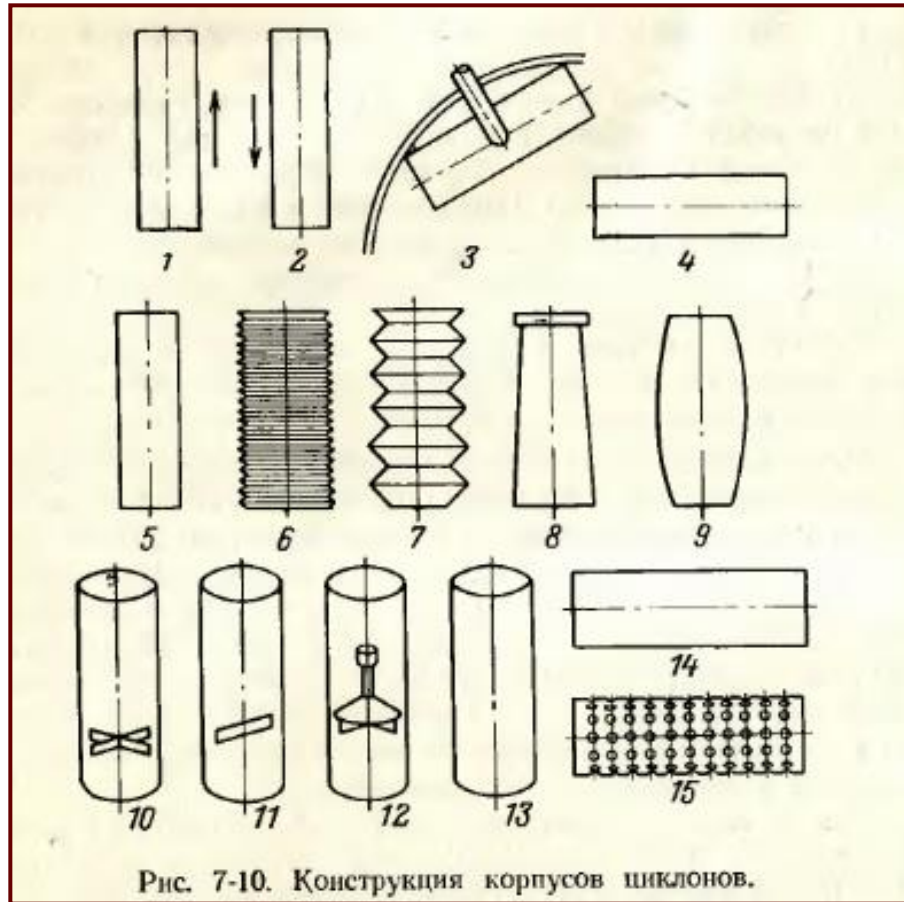
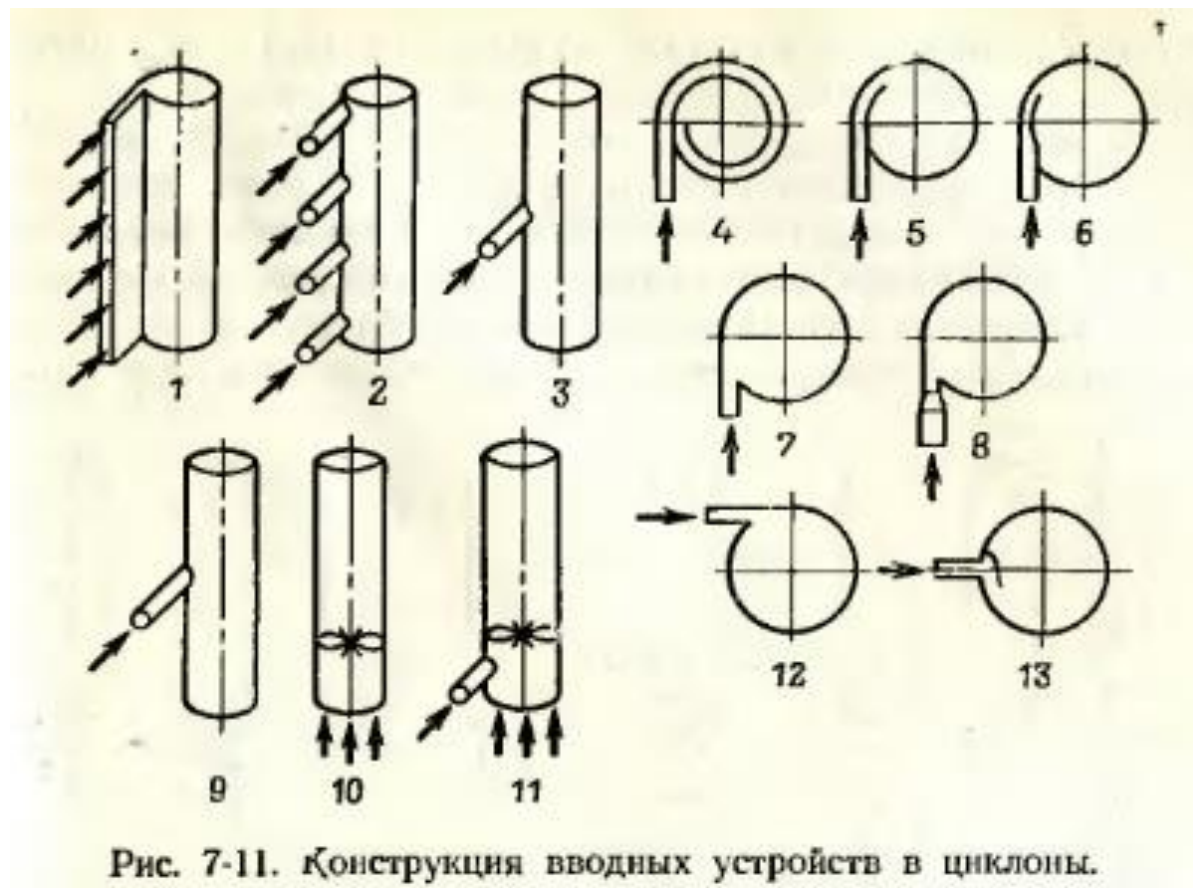
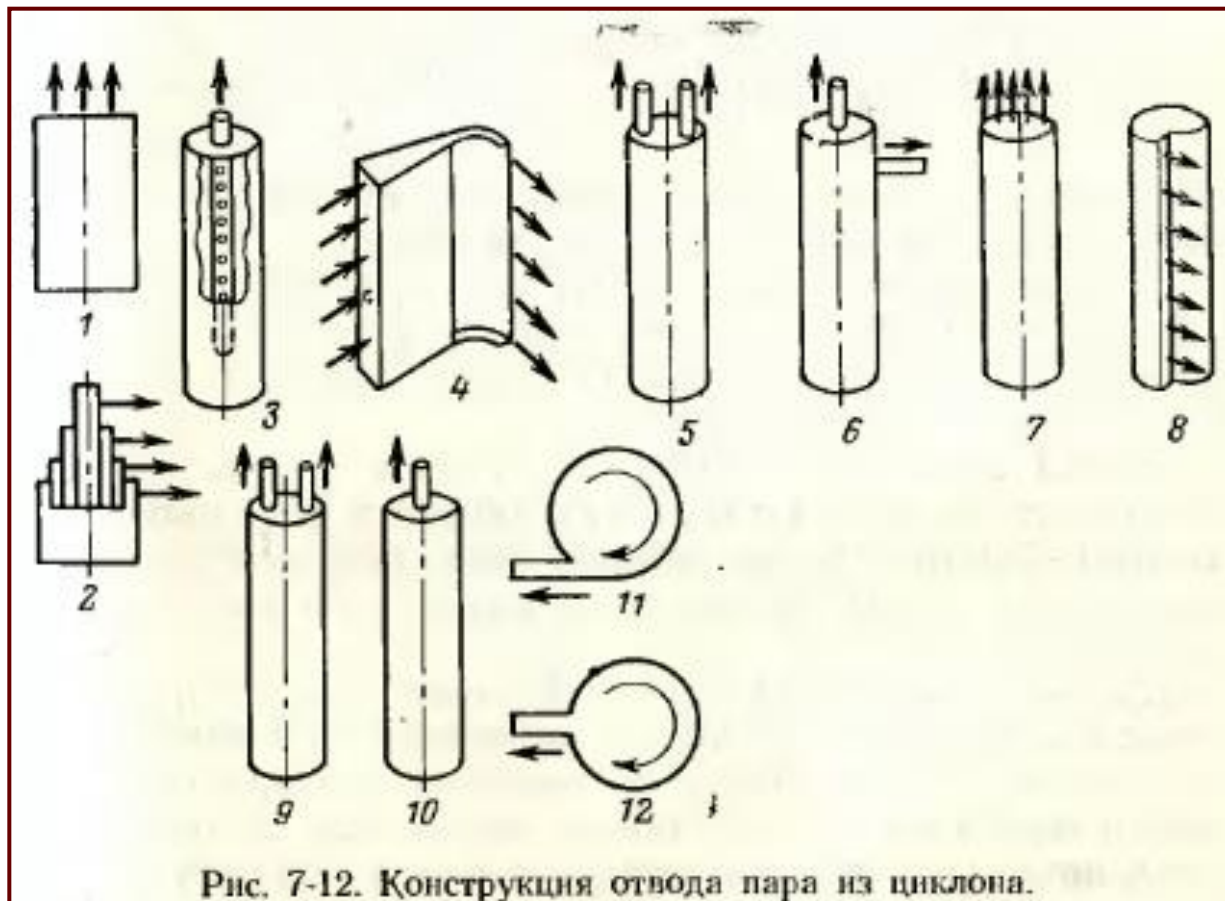


Рис. 7-10. Конструкция корпусов циклонов.

# Вводные устройства циклонов



# Вывод пара из циклонов



# Сравнение разных способов сепарации

Тип сепаратора	Особенности работы	Достоинства	Недостатки
<b>Объемный</b>	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
<b>Жалюзийный</b>	Применяется на горизонтальных и вертикальных парогенераторах ЭЦ	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