

# Закономерности перехода примесей из воды в пар

Солесодержания пара для  $i$ -ой примеси в общем случае:

$$C_{\Pi_i} = (K_{p_i} + w) C_{В_i}$$

$C_{\Pi_i}$  – солесодержание пара;

$K_{p_i}$  – растворимость веществ в паре;

$w$  – влажность пара (величина уноса влаги в барабане);

$C_{В_i}$  – массовая доля  $i$ -ой примеси в воде.

В барабанных котлах при малых давлениях растворимость солей в паре  $K_{p_i}$  достаточно низка, и солесодержание пара определяется уносом влаги  $w$ .

С ростом давления растворимость веществ в паре будет расти.

## Закономерности перехода примесей из воды в пар

Если пренебречь уносов влаги в пароперегреватель, что справедливо для прямоточных котлов, в том числе, на сверхкритические параметры пара:

$$K_{p_i} = \frac{C_{\Pi_i}}{C_{B_i}} \approx \left( \frac{\rho''_i}{\rho'_i} \right)^n$$

Растворимость в паре вещества разделяют на три группы по показанию степени  $n$ :

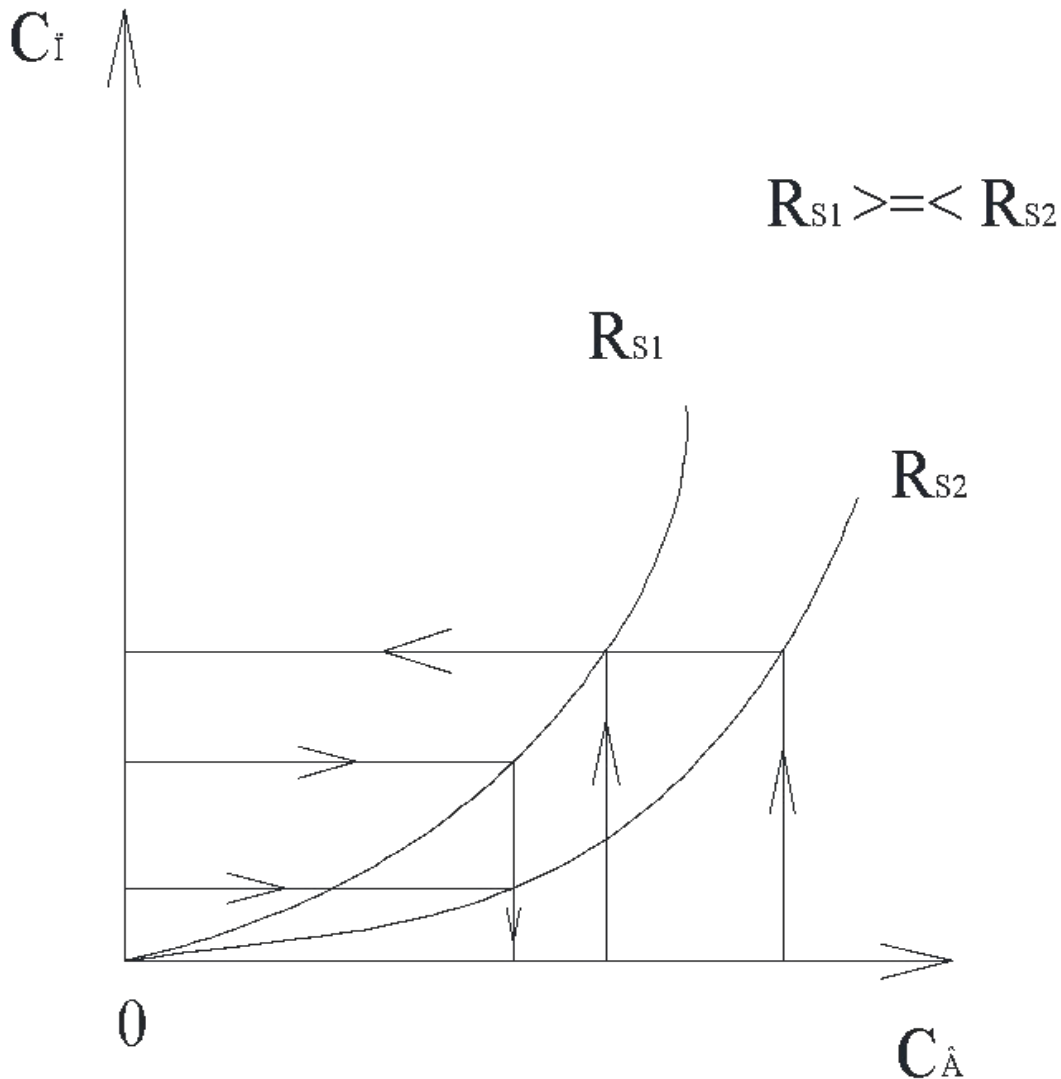
- слабые электролиты  $n=0,65 \div 0,88$ ;
- слабые кислоты  $n=1,5 \div 1,9$ ;
- сильные соли и основания  $n=3,7 \div 8,4$ .

# Закономерности перехода примесей из воды в пар

в пар

Переход примесей из воды в пар будет зависеть и от нагрузки зеркала испарения – условной поверхности границы раздела воды и пара.

Нагрузка зеркала испарения  $R_s$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$  ( $R_v$ ,  $\text{м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$ ) – это отношение объёмного расхода пара к площади поперечной поверхности или паровому объёму барабана.



## Получение чистого пара

Одной из основных задач котла является получение среды заданных параметров ( $P$ ,  $t$ ) и качества. Получение пара с требуемым солесодержанием является довольно важной технической задачей для ТЭС. От её выполнения, во многом, зависит безаварийный режим работы станции.

Пар с повышенным солесодержанием может вызвать отложение солей :

- в пароперегревателе;
- в арматуре котла;
- паровой турбине.

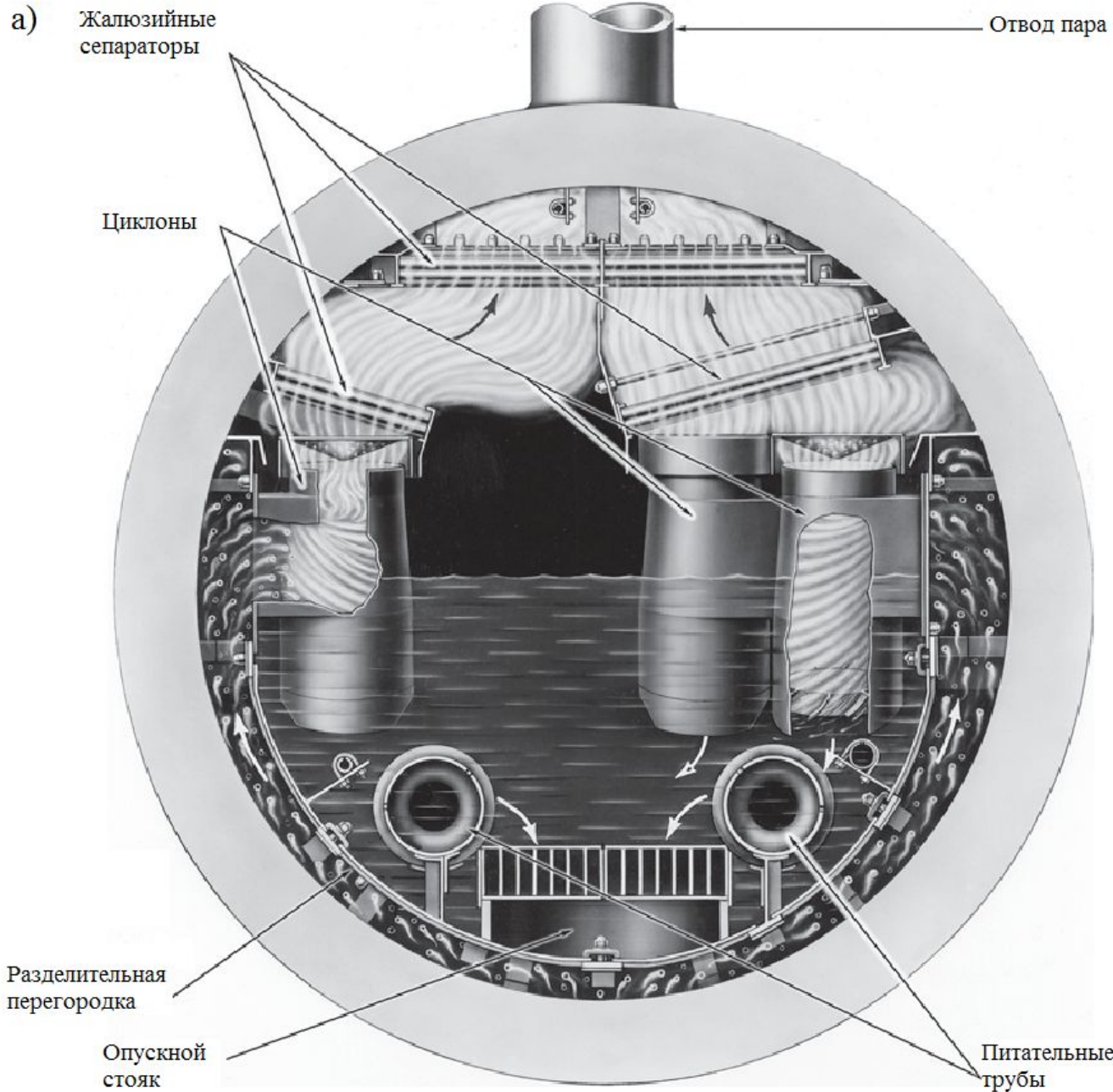
Даже небольшое количество капельной влаги, большее, чем 0.25% по массе может чрезвычайно сильно повысить вынос солей и их недопустимое отложение в пароперегревательном тракте котла и турбины

## Получение чистого пара

В котлах с естественной и многократной принудительной циркуляцией организации сепарации, испарения, промывки пара и др. осуществляется в длинном цилиндрическом сосуде большого диаметра – барабане. Функции барабана:

1. Сепарация пароводяной смеси, поступающей из испарительных поверхностей. Отделившийся пар после него поступает в пароперегреватель. Смешение котловой воды из контура циркуляции с водой из экономайзера.
2. Очистка пара от оставшихся примесей (промывка).
3. Осуществление поперечных связей между контурами циркуляции.
4. Осуществление водно-химического режима, контроль коррозии.
5. Запас воды для компенсации быстрых изменений в режиме работы котла.

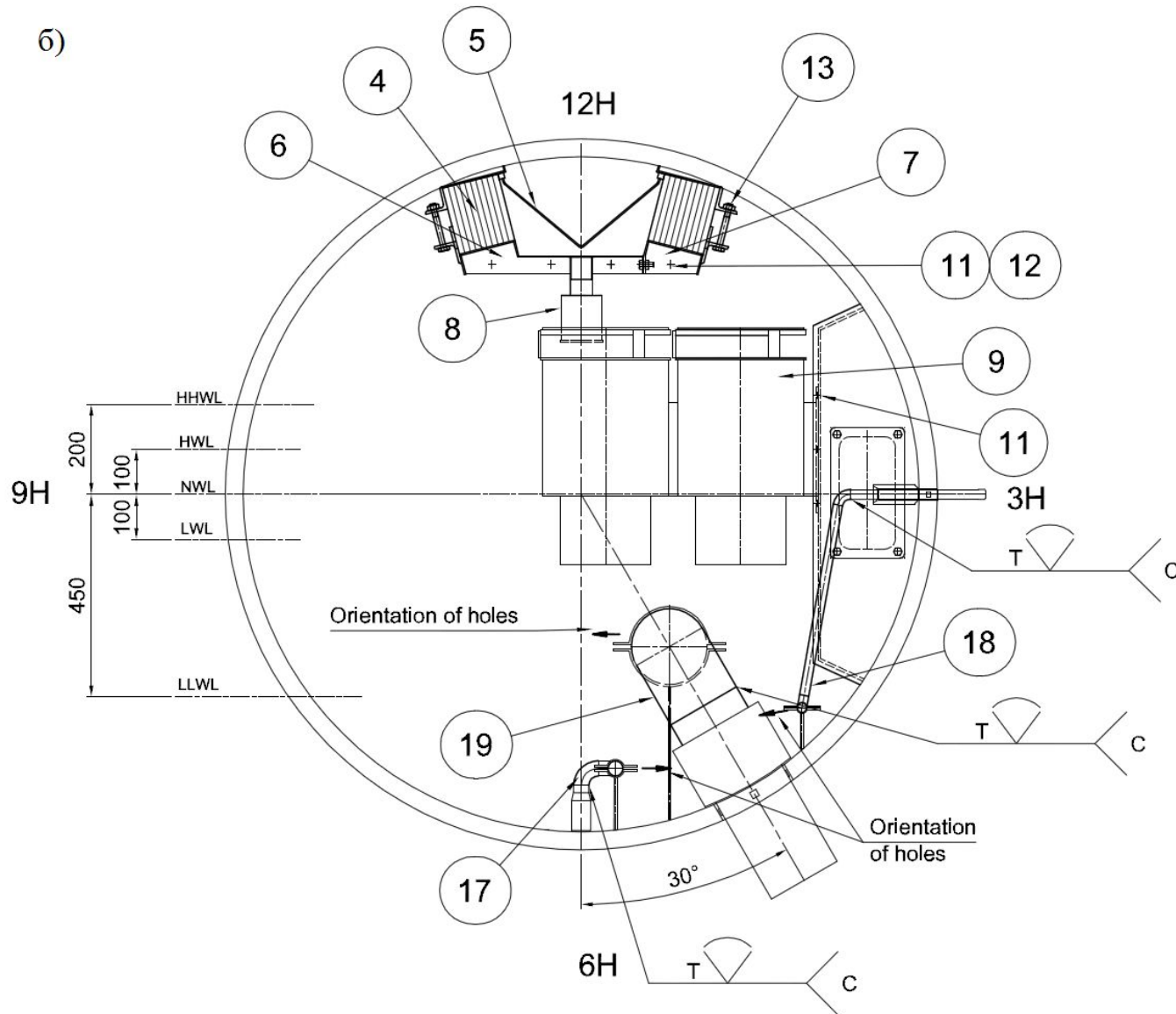
# Получение чистого



Барaban  
котла на  
давление  
19.3 МПа

# Получение чистого

пара

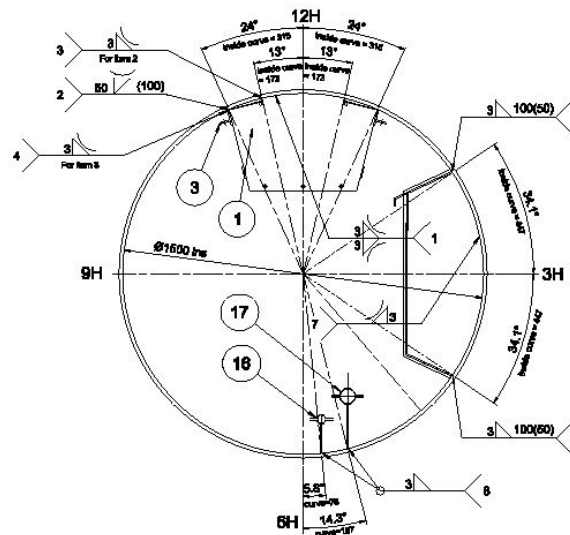
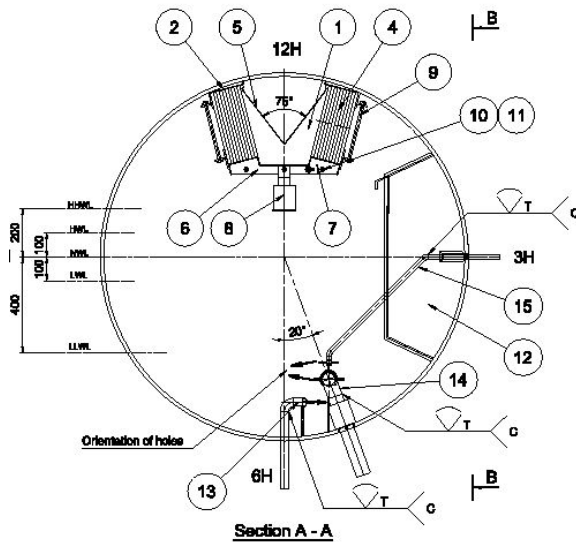
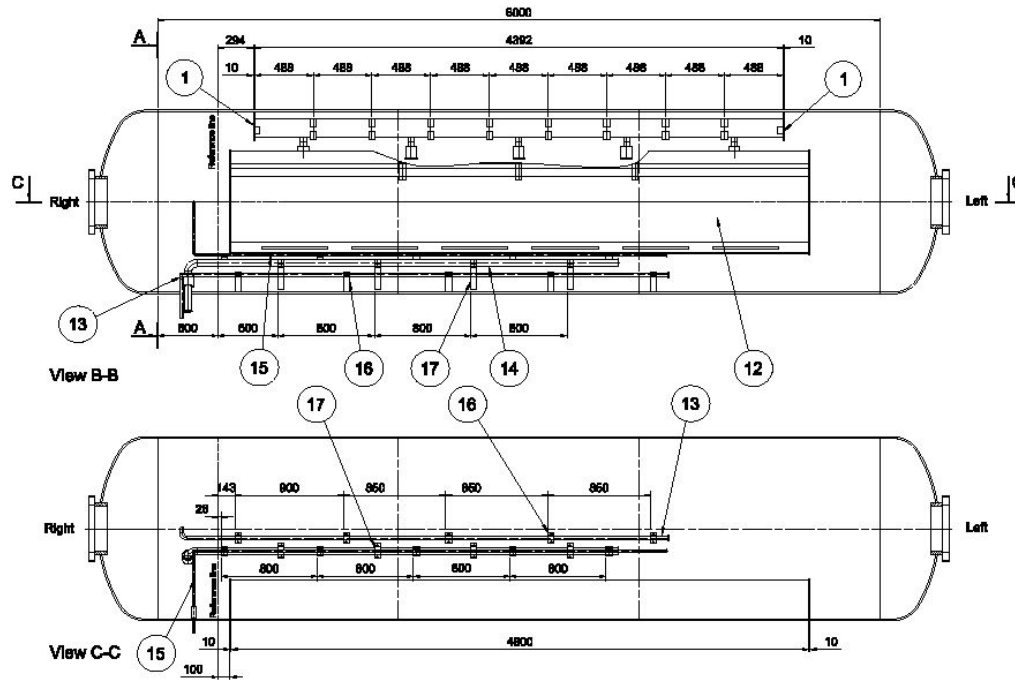


Барабан  
котла на  
давление  
5.9 МПа

# Получение чистого пара

## пана

B)



Барабан котла на давление 0.8 МПа



# Получение чистого пара

Высокоэффективная сепарация необходима для:

1. Предотвращения выноса капельной влаги в пароперегреватель, которая может повредить последний.
2. Отсутствия сноса пузырей пара в опускные трубы.
3. Препятствие выноса твердых частиц.

На сепарацию в барабане влияют различные факторы. Их можно разделить на две группы:

1) проектные:

- давление;
- длина и диаметр барабана;
- объёмный расход пара (паропроизводительность);
- степень сухости пароводяной смеси на входе в барабан;
- компоновка внутрибарабанных устройств;
- конфигурация подвода и отвода среды из барабана.

# Получение чистого пара

2) эксплуатационные:

- давление;
- нагрузка котла;
- химический режим (солесодержание котловой воды);
- уровень воды в барабане (высота парового объёма не сказывается сколько-нибудь значительно при величине более 1000 мм).

Сепарация влаги в барабане определяется:

- временем пребывания капли в паровом пространстве барабана;
- длиной пройденного пути (высотой парового пространства);
- скоростью витания.

Скорость витания частицы – это скорость, при которой сила аэродинамического воздействия потока равняется силе тяжести частицы

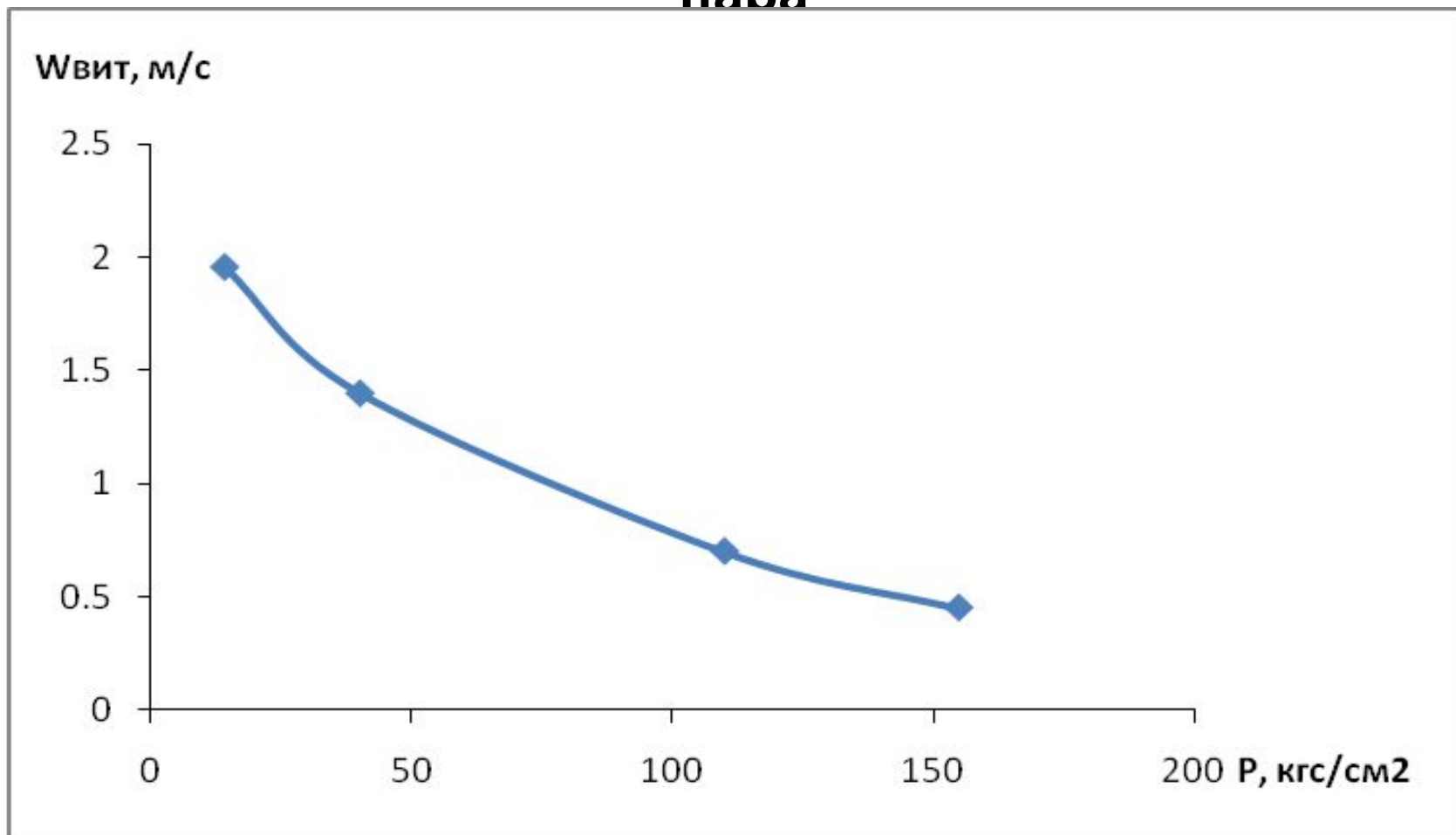
## Получение чистого пара

- Если скорость частицы равна скорости витания, то она может находиться во взвешенном состоянии в потоке среды бесконечно долгое время.
- При  $w < w_{\text{ВИТ}}$  капли из парового пространства барабана будут выпадать на зеркало испарения.
- При  $w > w_{\text{ВИТ}}$  капли воды будут уноситься потоком пара в отводящие патрубки.

Капельная влага в паровом пространстве барабана образуется при разрыве оболочек барбортируемых пузырей пара за счёт динамического воздействия парового потока.

Частички воды при этом возникают с диаметрами широкого спектра.

# Получение чистого пара



Изменение скорости витания капли с диаметром 2 мм в зависимости от давления в барабане

## Получение чистого пара

По мере увеличения в котловой воде взвешенных *твёрдых частиц*, (оксидов железа и шлама) начинает проявляться склонность воды к вспениванию. Это происходит за счёт образования на поверхностном слое высокодисперсных смесей.

При сверхкритическом солесодержании паровая фаза не успевает выделиться. Многие «капли» представляет двухфазную среду, в которой жидкость имеет ячеистую структуру (жидкость вспенивается).

Пленки паровых пузырей утоняются больше, вследствие чего происходит образование более мелкодисперсных капель.

На практике в сторону увеличения уноса влияет уменьшение парового пространства барабана.

# Получение чистого пара

Критическое солесодержание воды в барабане

Давление	Низкое	Среднее	Высокое
$S_{кр}$ мг/кг	3000	1300-1500	300-500

# Получение чистого пара

Способы сепарации пара:

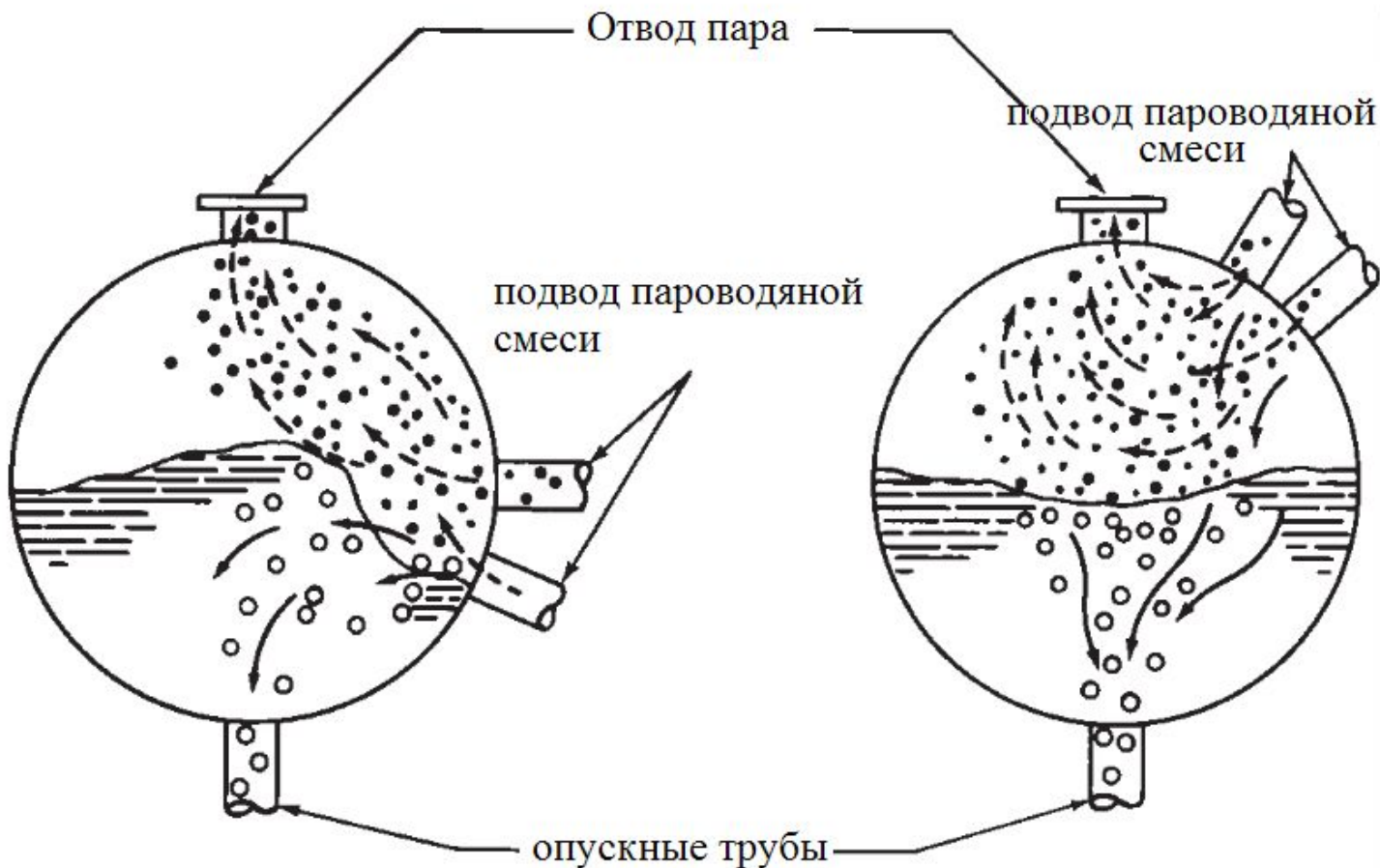
- гравитационно-осадительная;
- инерционная.

В основе гравитационно-осадительной сепарации лежит принцип выпадения капельной влаги из парового потока под действием сил тяжести.

Необходимые условия обеспечения гравитационно-осадительной сепарации пара :

- обеспечить достаточную высоту парового пространства (около 1 м);
- равномерно распределить паровую нагрузку по барабану;
- обеспечить низкую скорость пара в барабане (менее 0,3-1,0 м/с) и достаточное время пребывания среды в паровом пространстве барабана

# Получение чистого



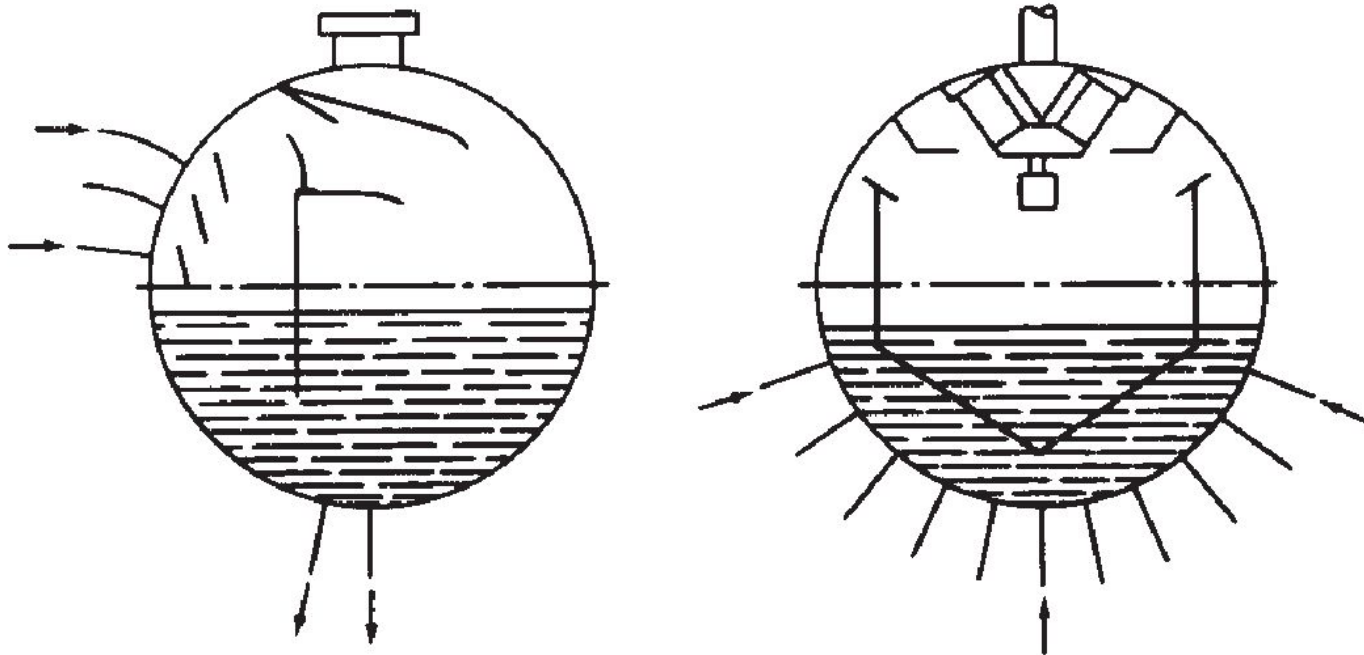
а) подвод смеси рядом со средней линией барабана

б) подвод труб над средней линией барабана

Неудовлетворительное распределение пароводяной смеси по барабану вместе с неоптимальным местом ввода



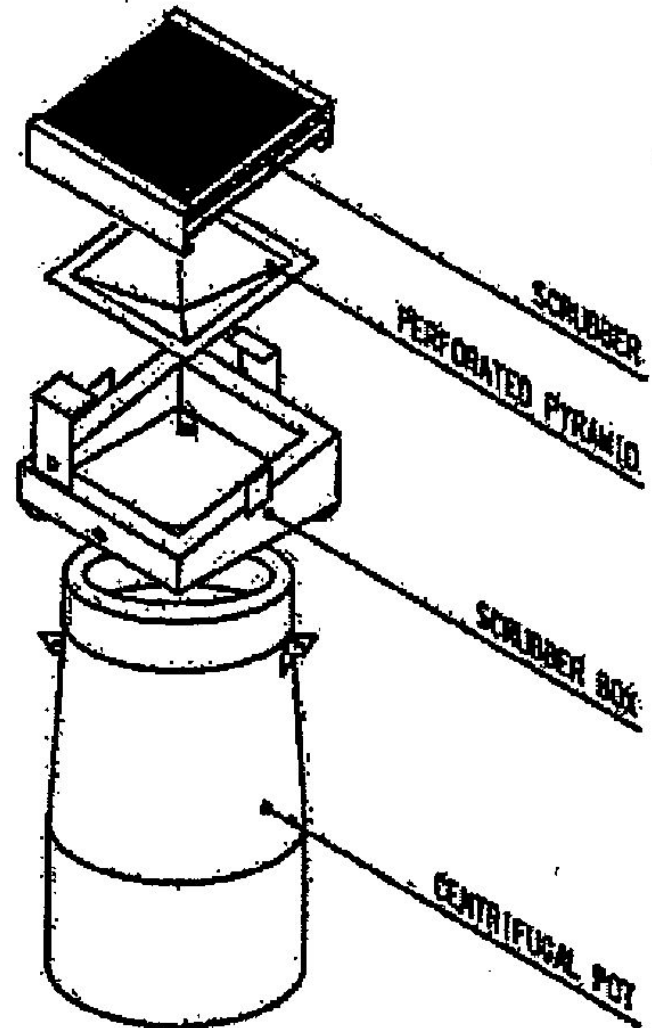
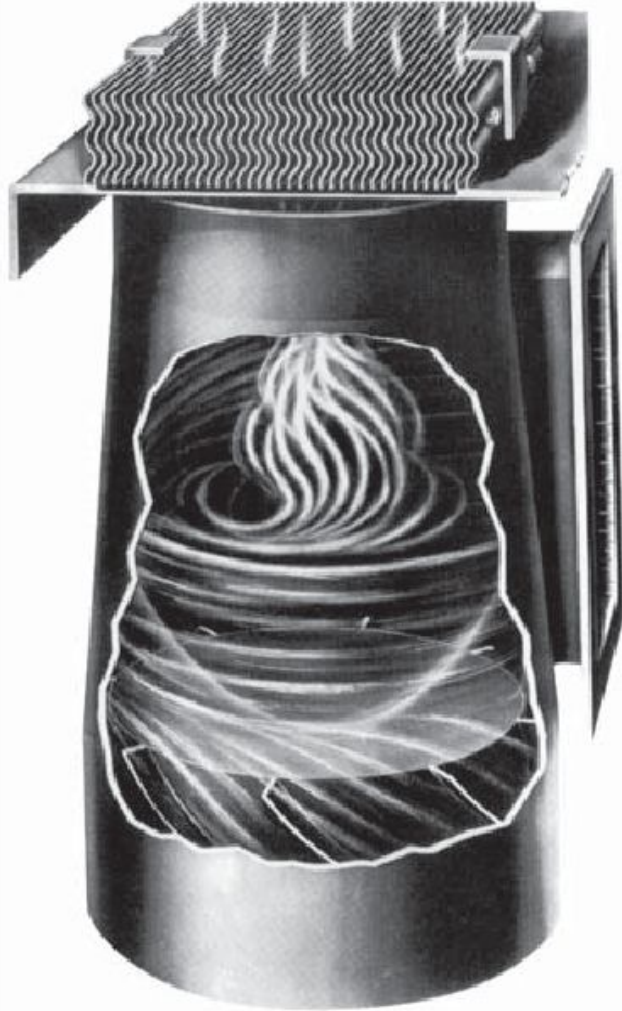
## Получение чистого



Барабана котла среднего давления с направляющими

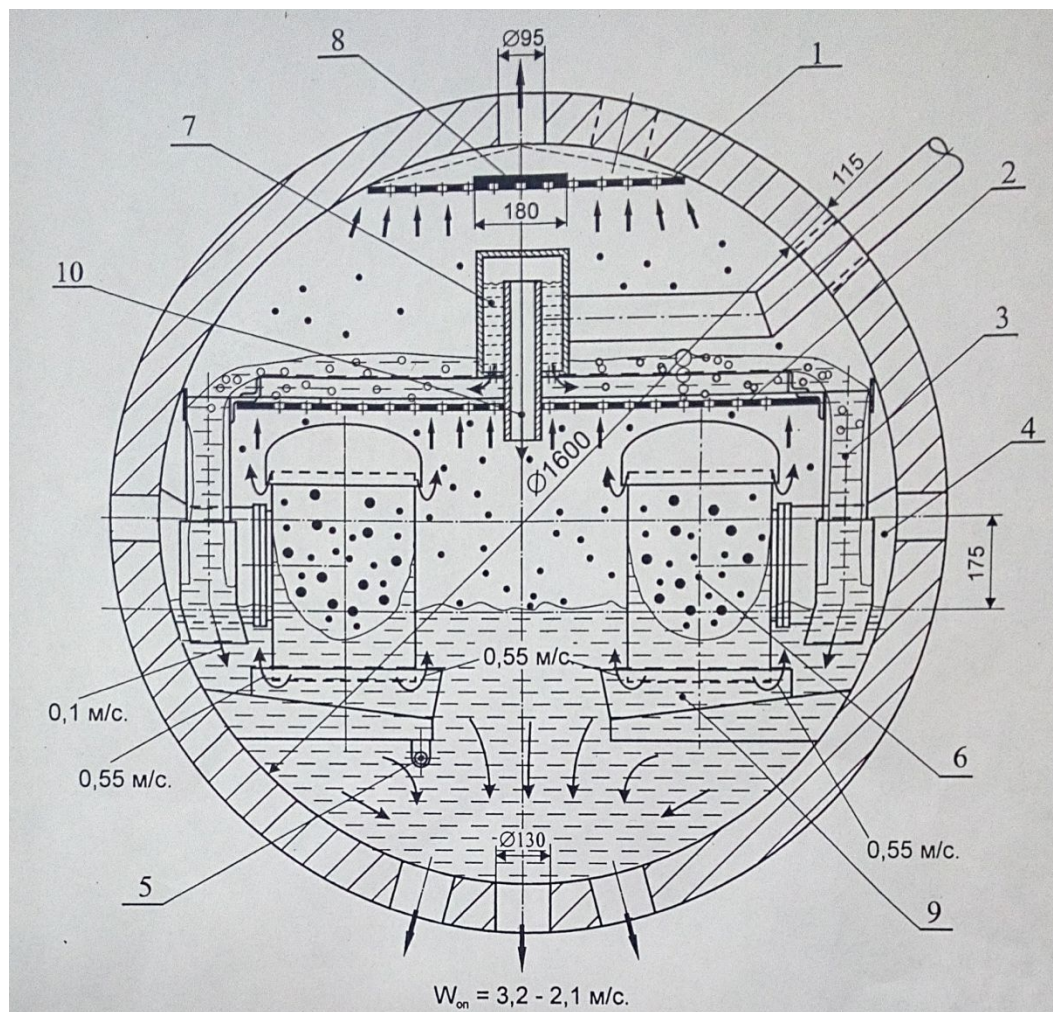
- изменение направления потока;
- добавление сопротивления;
- более равномерное распределению потока;
- увеличение пути прохождения потоком и времени пребывания в паровом пространстве барабана;
- гашение кинетической энергии потока.

# Получение чистого пара



Внутрибарабанные циклоны в котлах большого давления

# Получение чистого



Максимальный диаметр циклона ограничен по условиям монтажа 350 мм.

Поэтому число циклонов и рядов их установки возрастает с 1-2 при 0,7 МПа до 3-4 при 19 МПа.

Барaban котла ТРЕ-208:

1 – потолочный дырчатый лист; барботажный дырчатый лист; 3 - сливной короб; 4 – короб циклона; 5 – коллектор фосфатирования; 6 – циклон; 7 – короб подвода п.в.; 8 – диск; 9 – поддон; 10 – сбросной канал

# Получение чистого пара

Допустимые скорости пара в элементах сепарационных устройств котлов

$P_B$ , кгс/см <sup>2</sup>	$w_0''$ , м/с (в диаметральной сечении циклона)	
	Внутрибарабанные циклоны	Выносные циклоны (с улиточным вводом)
14	1.25	1.3 (2.3)*
40	0.9	0.8 (1.3)*
115	0.45	0.5
155	0.3	0.4

Примечание: \* — в скобках указана приведенная скорость пара для подвода среды тангенциальными сплюснутыми патрубками

# Получение чистого пара

Условия установки внутрибарабанных циклонов:

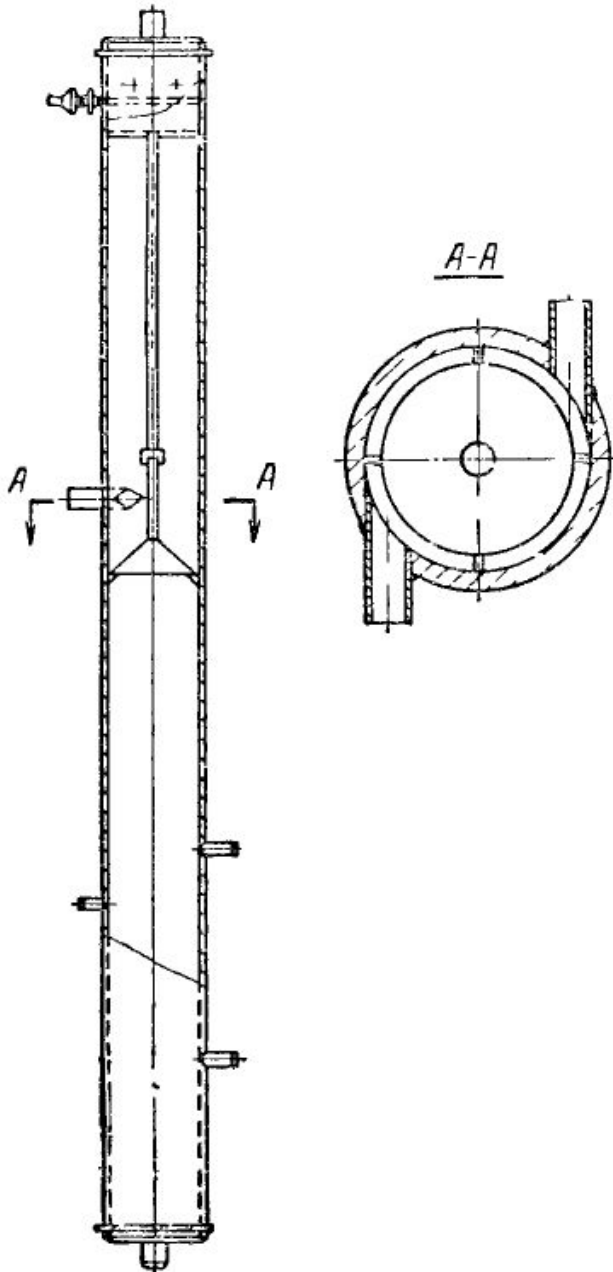
- верхняя кромка входного окна должны быть на 100 мм выше верхнего уровня воды;
- максимальный уровень воды не должен подниматься выше середины входного патрубка (при невыполнении этого условия возрастает унос влаги из циклона);
- минимальный уровень не должен опускаться ниже уровня, при котором гидрозатвор (расстояние от уровня до поддона) составляет не менее 100 мм;
- Максимальный диаметр по условию монтажа 350 мм.

# Получение чистого пара

## пара

Особенности работы выносных циклонов:

- увеличенное отношение  $u/w_0$  10÷20 (тангенциальной скорости входа к подъёмной скорости пара);
- Большая высота парового пространства;
- наружный диаметр циклона ограничивается имеющимися сортаментом и составляет 426 мм.



Толщина стенок обычно составляет от 10 до 26

# Получение чистого

пара

Двухступенчатая схема

испарения выносными  
циклонами:

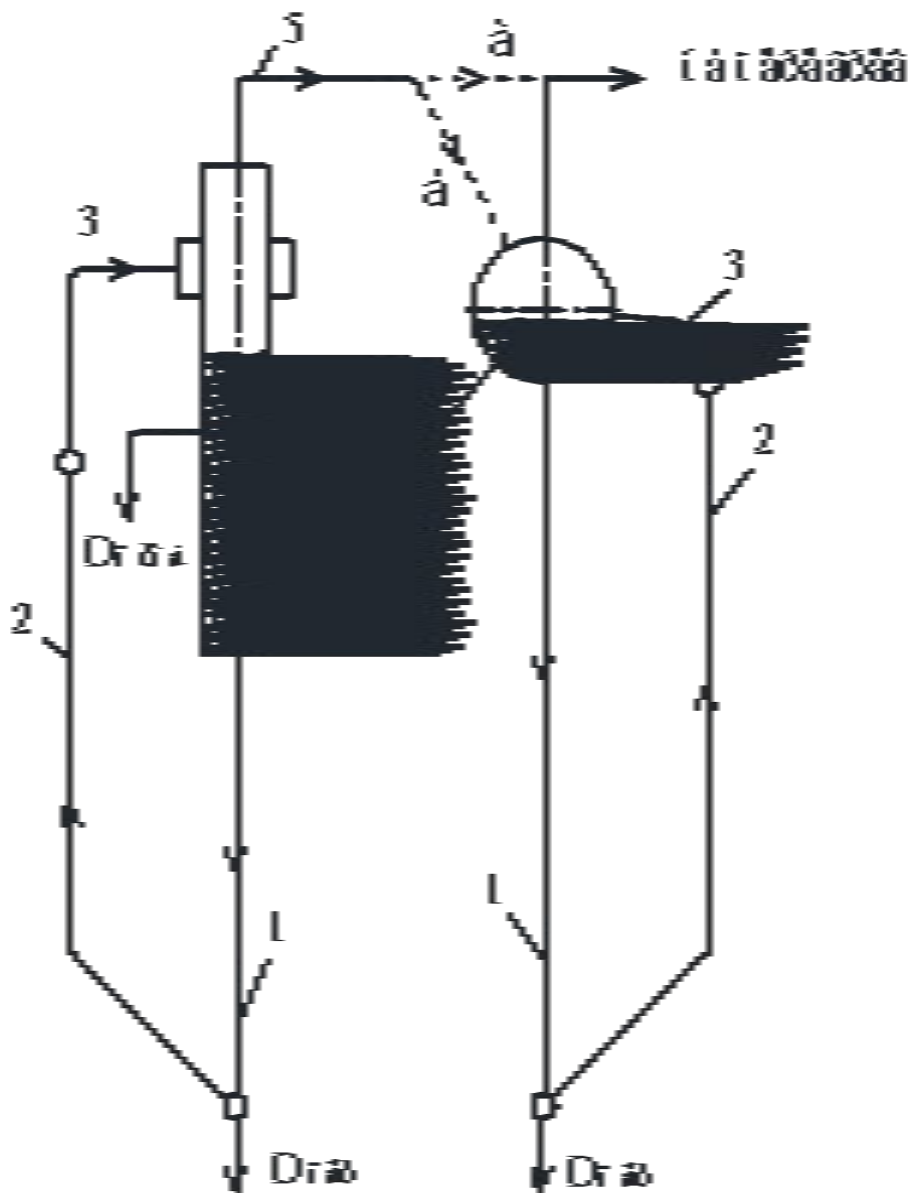
1 – опускные трубы;

2 – экраны;

3 – пароподводящие трубы;

4 – выносной циклон;

5 – паропроводящая труба.



Плюсы использования  
выносных циклонов:

- меньшая металлоёмкость котла (при проектировании);
- большая паропроизводительность (при реконструкции).

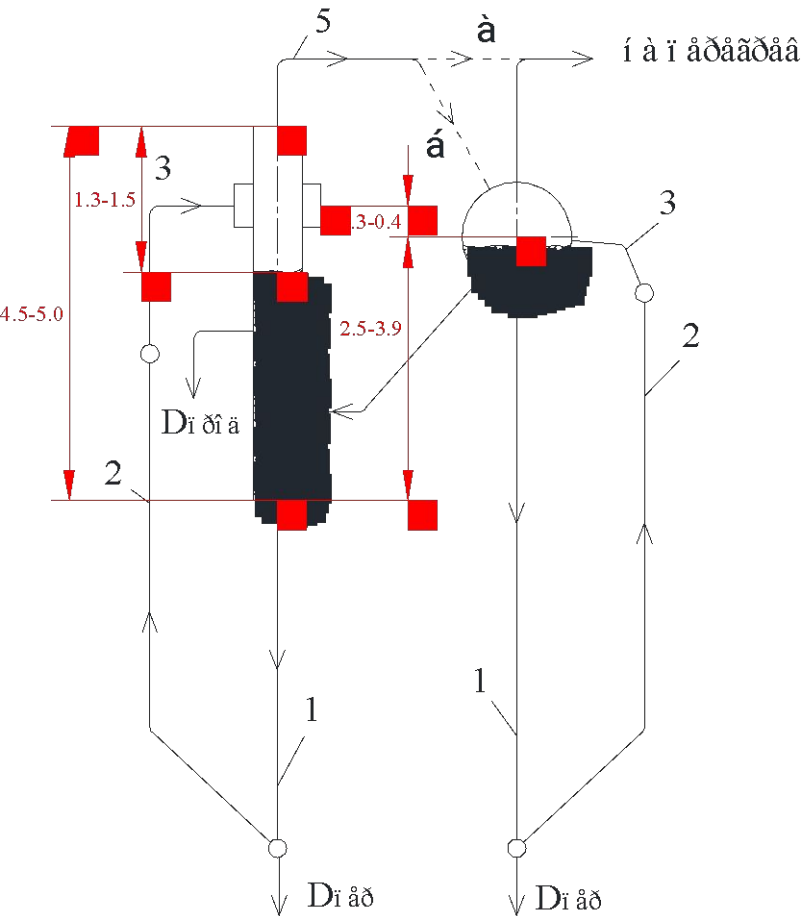


# Получение чистого

## пара

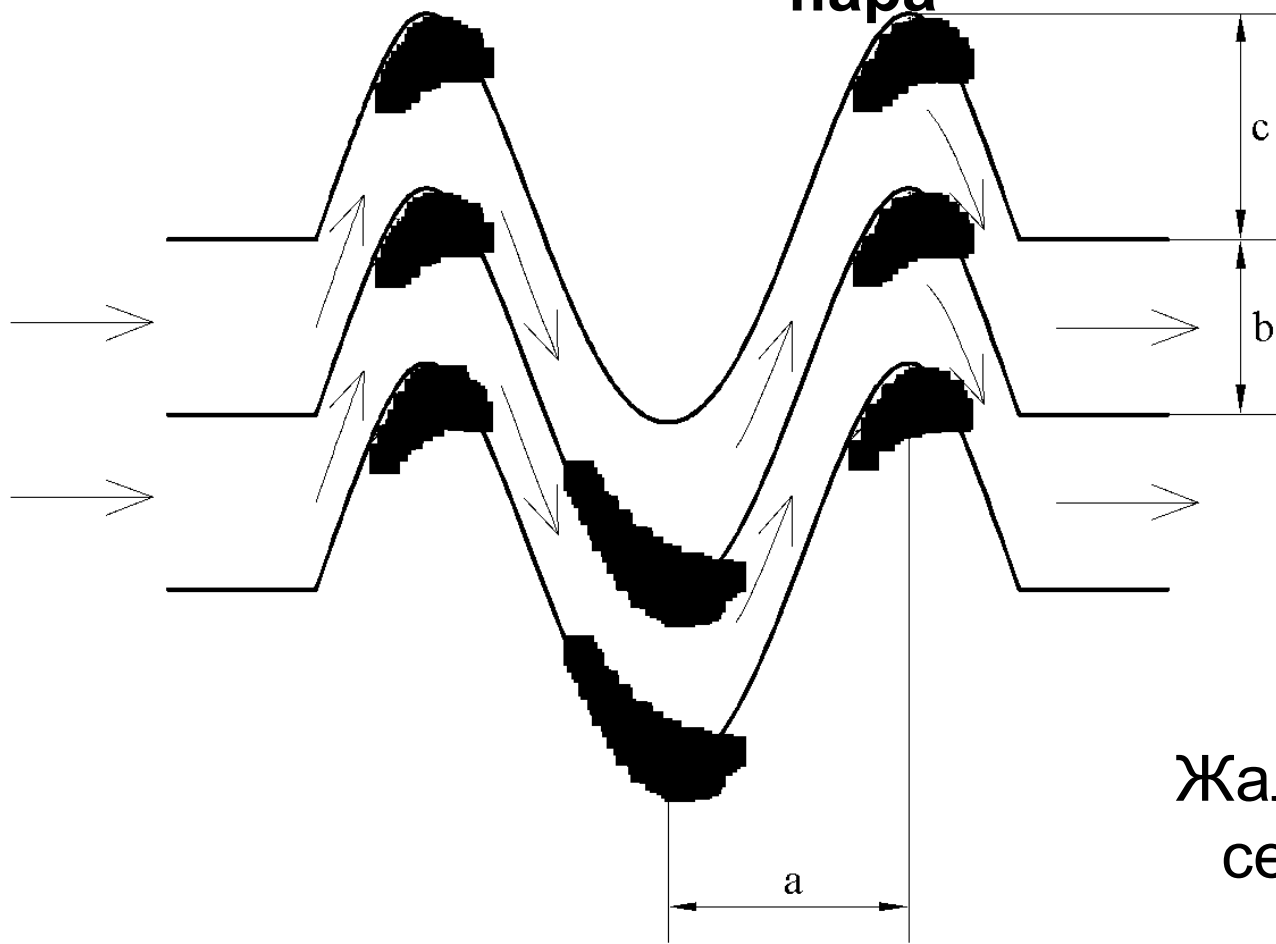
Особенности установки выносных циклонов:

- Высота парового объёма циклона 1.3-1.5 м.
- Общая высота циклона 4.5-5.0 м.
- Расстояние от нижней кромки до входного штуцера пароводяной смеси до уровня воды в барабане ограничивается по условию предотвращения сильного воронкообразования и захвата паром котловой воды: 300÷400 мм
- Высота водяной части ограничивается по условию обеспечения надёжности циркуляции: 4.5-5.0 м.





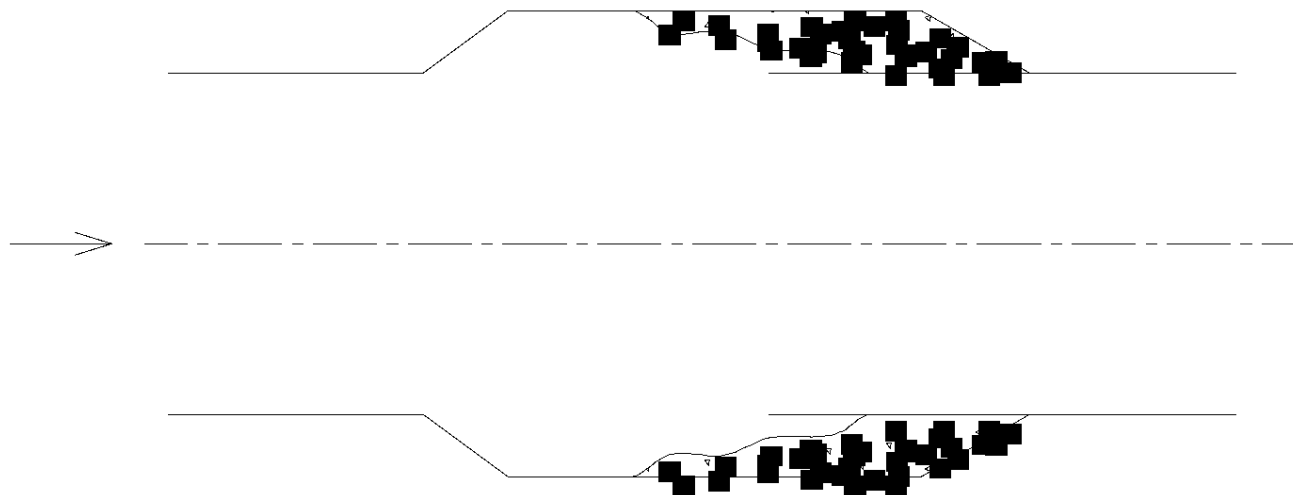
# Получение чистого пара



При  $a/b \rightarrow \min$  увеличивается эффективность работы и сопротивление сепаратора.

Для эффективной работы  $c/b > 1$ .

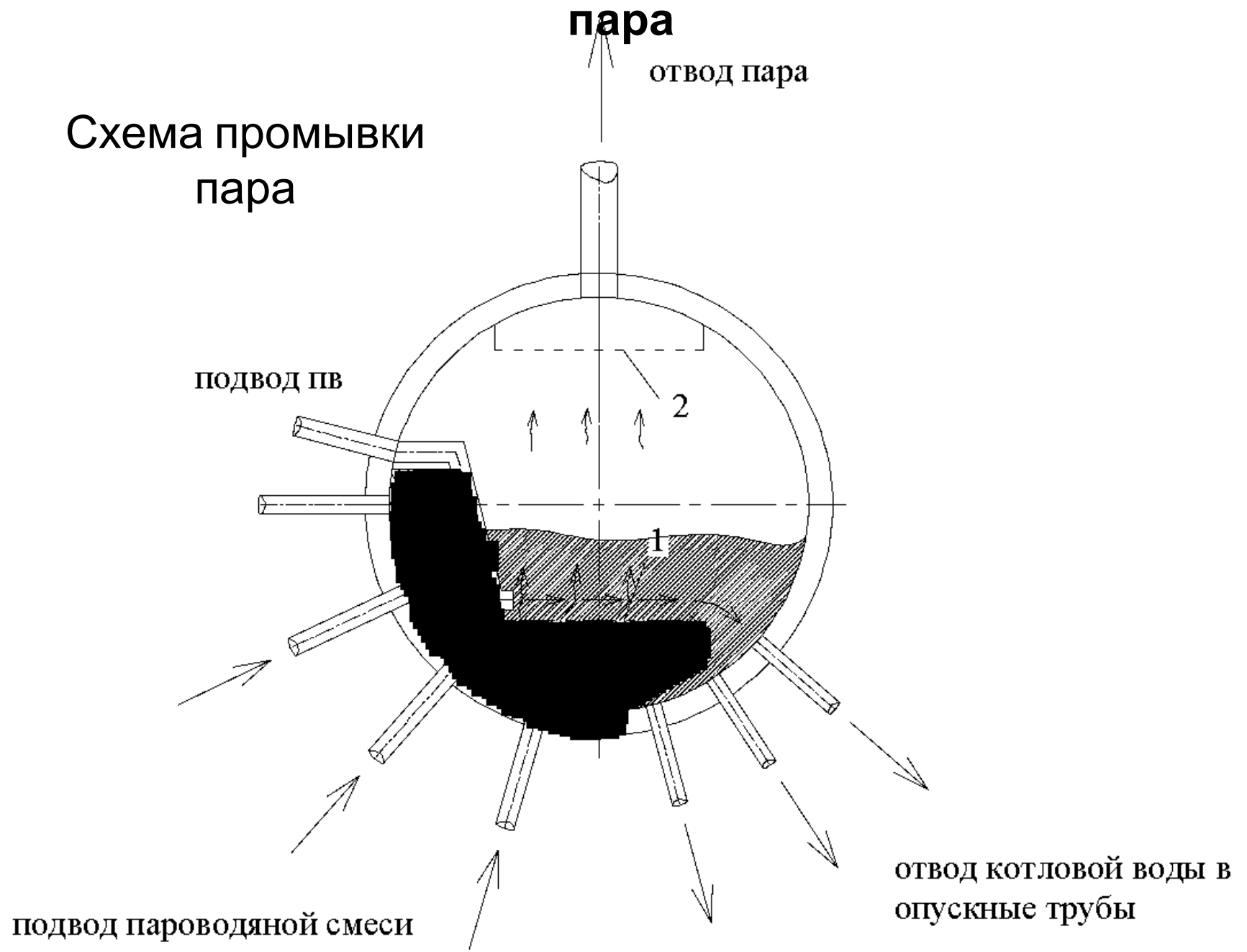
# Получение чистого пара



Плёночный  
сепаратор

# Получение чистого пара

Схема промывки пара



## Получение чистого пара

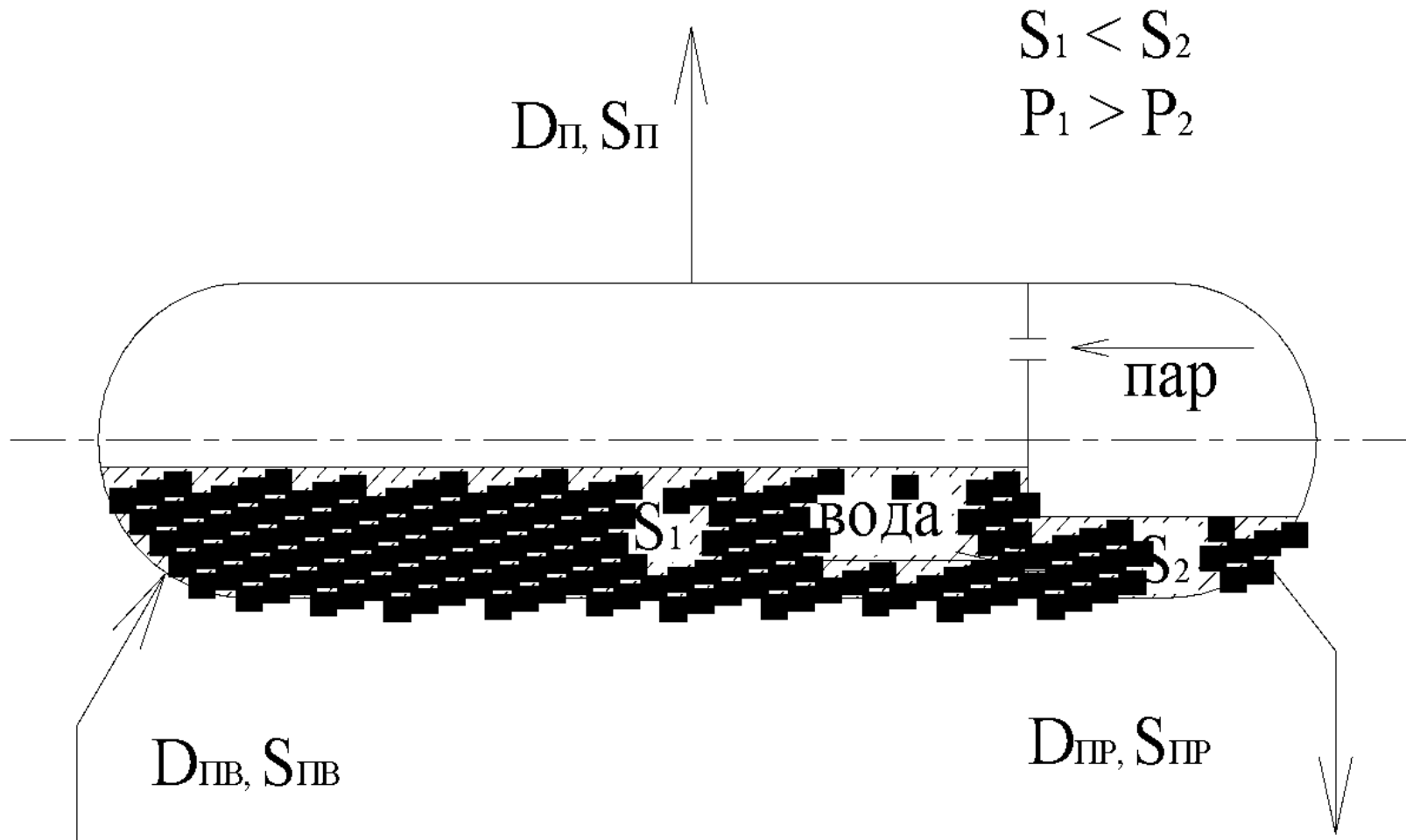
Ступенчатое испарение пара при его постоянном качестве направлено на снижение расхода непрерывной продувки и возможности работы на питательной воде ухудшенного качества.

Непрерывная продувка предназначена для поддержания солевого баланса при испарении. Производится из места с наибольшим солесодержанием.

Периодическая продувка предназначена для очистки контура циркуляции от скопившегося шлама. Производится из нижних точек контура циркуляции.

# Получение чистого пара

Схема двухступенчатого испарения



## Получение чистого пара

Ступенчато испарение организуется таким образом, что солесодержание воды соленого отсека равно солесодержанию воды в барабане при одноступенчатом испарении.

Большая часть пара образуется в чистом отсеке. При этом:

$$S_{cp} = \frac{S_1 \cdot D_1 + S_2 \cdot D_2}{D} < S_2$$

## Получение чистого пара

Ступенчато испарение организуется таким образом, что солесодержание воды соленого отсека равно солесодержанию воды в барабане при одноступенчатом испарении.

Большая часть пара образуется в чистом отсеке. При этом:

$$S_{cp} = \frac{S_1 \cdot D_1 + S_2 \cdot D_2}{D} < S_2$$

Оптимальное распределение паропроизводительности по ступеням имеет место при одинаковой кратности упаривания ступеней  $a$

$$a = \frac{S_1}{S_{нв}} = \frac{S_2}{S_1}$$

# Получение чистого пара

Солевой баланс барабана (1 ступень)

$$(D + D_{np}) \cdot S_{нв} = S_{np} \cdot D_{np} + S_{нап} \cdot D(1 - \omega) + S_{\epsilon} \cdot \omega \cdot D$$

$$(D + D_{np}) \cdot S_{нв} = S_{np} \cdot D_{np}$$

$$(a =) \frac{S_{np}}{S_{нв}} = \frac{D + D_{np}}{D_{np}}$$

Для двухступенчатого испарения

$$S_1 = a \cdot S_{нв}$$

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{S_2}{a \cdot S_{нв}} = a \rightarrow \frac{S_2}{S_{нв}} = a^2 \rightarrow a = \sqrt{\frac{D + D_{np}}{D_{np}}}$$



# Получение чистого пара

Солевой баланс барабана (1-ой ступени)

$$(D + D_{np}) \cdot S_{не} = (D + D_{np} - D_1) \cdot S_1 \rightarrow \frac{D_1}{D}$$

Солевой баланс барабана (2-ой ступени)

$$(D + D_{np} - D_1) \cdot S_1 = (D + D_{np} - D_1 - D_2) \cdot S_2 \rightarrow \frac{D_2}{D}$$

## Получение чистого

$$(D + D_{np}) = \left( D + D_{np} - D_1 \right) \cdot a, \quad | :D$$

$$\frac{D_1}{D} \cdot a = a \left( 1 + \frac{D_{np}}{D} \right) - \left( 1 + \frac{D_{np}}{D} \right),$$

$$\frac{D_1}{D} = \left( 1 + \frac{D_{np}}{D} \right) \cdot \left( \frac{a-1}{a} \right).$$

$$\left( 1 + \frac{D_{np}}{D} - \frac{D_1}{D} \right) = \left( 1 + \frac{D_{np}}{D} - \frac{D_1}{D} - \frac{D_2}{D} \right) \cdot a$$

$$\frac{D_2}{D} \cdot a = \left( 1 + \frac{D_{np}}{D} - \frac{D_1}{D} \right) \cdot a - \left( 1 + \frac{D_{np}}{D} - \frac{D_1}{D} \right)$$

$$\frac{D_2}{D} = \left( 1 + \frac{D_{np}}{D} - \frac{D_1}{D} \right) \cdot \left( \frac{a-1}{a} \right)$$

## Получение чистого пара

Оптимальное соотношение расхода непрерывной продувки и паропроизводительности каждой ступени

Расход продувки, в %	Расход 1-ой ступени	Расход 2-ой ступени
0.5	0.935	0.065
<b>1.0</b>	<b>0.91</b>	<b>0.09</b>
2.0	0.87	0.13
<b>3.0</b>	<b>0.85</b>	<b>0.15</b>