

# *Гидравлический расчет котла*

*Е.Ю. Павлюк  
Кафедра Теплоэнергетики и  
теплотехники*

# *Гидравлический расчет котла*

Проблема надежности охлаждаемых рабочей средой поверхностей нагрева котельных агрегатов является одной из важнейших для современных котельных агрегатов. С увеличением мощности котельного агрегата и его размеров возрастают неизбежные отклонения режимов работы его отдельных элементов от расчетных, увеличивая тем самым вероятность их повреждений.

Все вопросы, связанные с гидродинамикой котельных установок рассматриваются с точки зрения надежного охлаждения труб различных теплообменных поверхностей котельных установок. Это означает, что температура металла труб не превышает предельно допустимой.

Аварии также могут быть связаны с циклическими изменениями температуры металлов. Это приводит к появлению термических напряжений, и, как следствие, трещин.

# Температурный режим нагреваемых труб

$$t_{\text{ст}}^{\text{нар}} = t_{\text{ср}} + \frac{d_{\text{нар}}}{d_{\text{вн}}} q_{\text{нар}} K \left[ \frac{\delta_{\text{н}}}{\lambda_{\text{н}}} + \frac{2\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{Ме}}} \cdot \frac{d_{\text{вн}}}{(d_{\text{вн}} + d_{\text{нар}})} + \frac{1}{\alpha_2} \right]$$

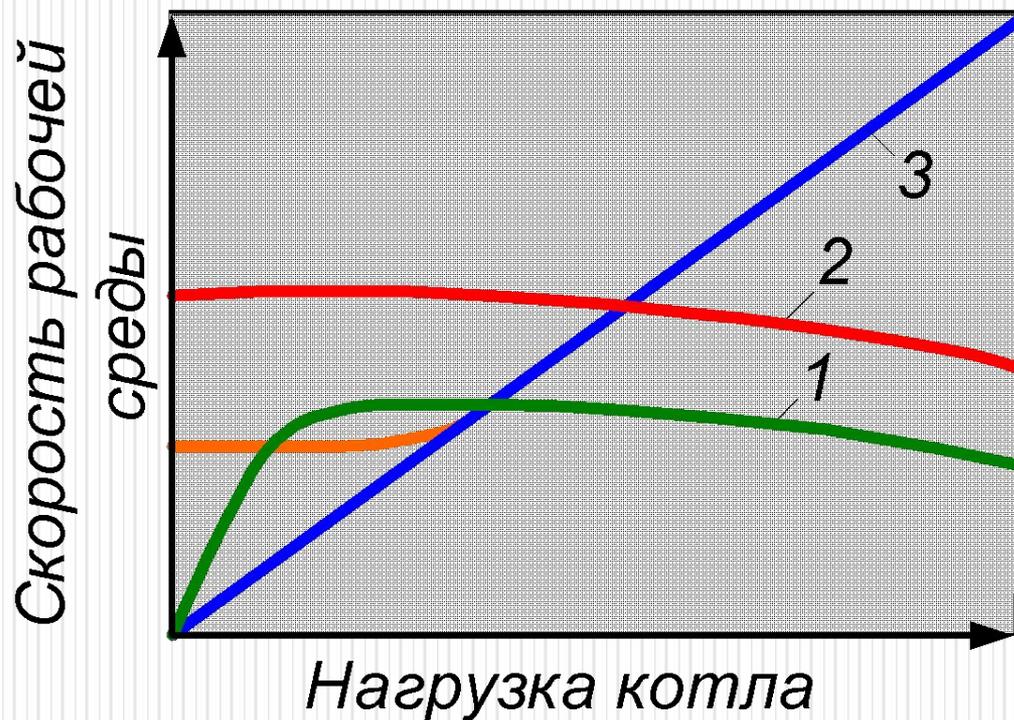
$t_{\text{ср}}$  температура среды, °С

$q$  плотность теплового потока, падающего на трубы

$K$  коэффициент растечки тепла, 0,8 – 1

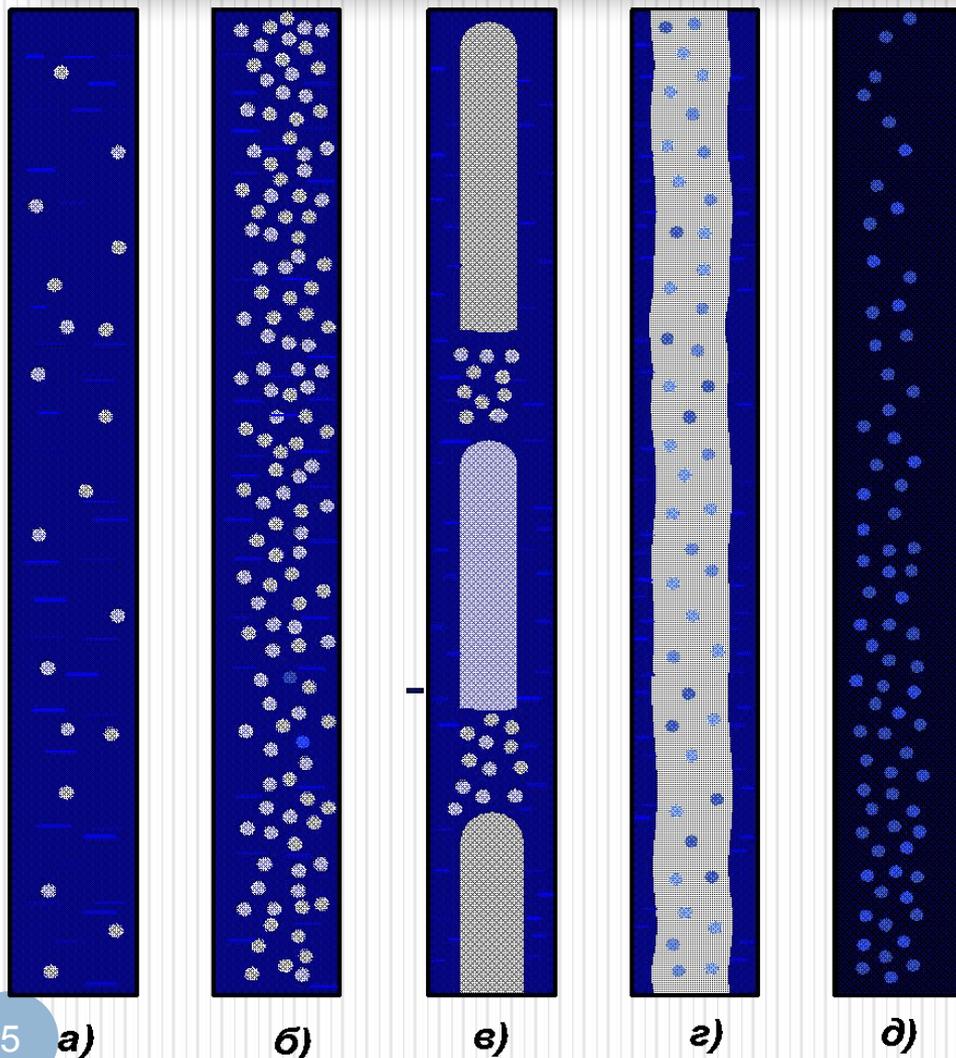
В некоторых случаях термическим сопротивлением слоя накипи можно пренебречь, в виду хорошей работы водоподготовки. С ростом параметров пара, увеличивается температура среды, и, следовательно, температуры стенки, то есть возможен ее перегрев. Подвод теплоты зависит от нагрузки на котел, от типа топки, от вида топлива. Фактически, от рабочего режима работы котла. Влияние коэффициента теплоотдачи  $\alpha_2$  определяется весовой скоростью потока рабочей среды. Скорость движения рабочей среды в трубных поверхностях зависит от вида циркуляции теплоносителя.

## Скорость движения рабочей среды в экранных трубах разных типов паровых котлов



- 1 – естественная циркуляция; максимальная скорость 1,2 – 1,5 м/с  
2 – принудительная циркуляция; 1,5 – 2,0 м/с  
3 – прямоточное движение

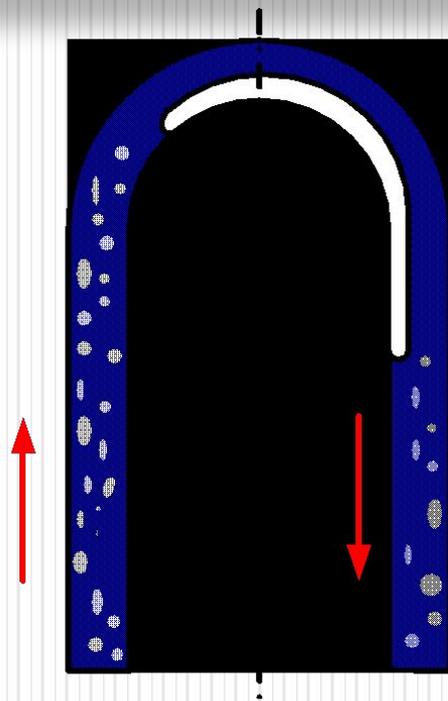
## Режимы течения пароводяной смеси в вертикальных трубах



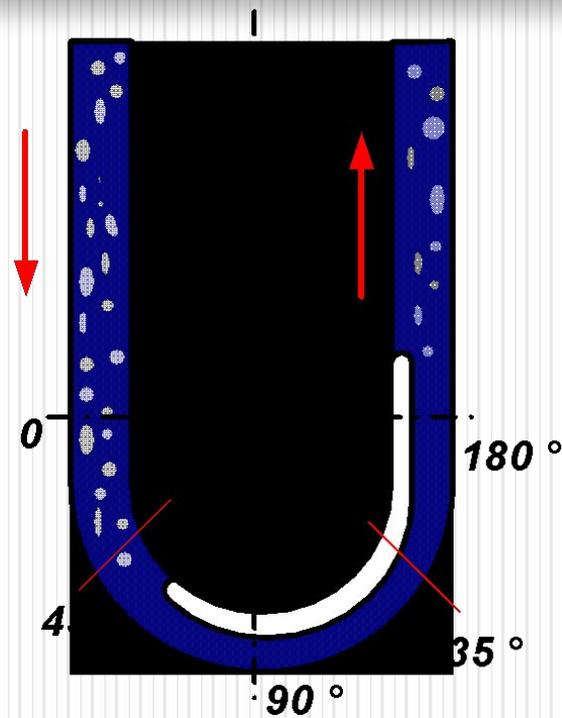
а – пузырьковый  $x < 10\%$ ;  
б – эмульсионный  $x > 10\%$ ;  
в – снарядный,  $p < 4,0$  МПа;  
г – дисперсно-кольцевой  
(стержневой)  $x = 30 \div 50\%$ ;  
д – влажного пара,  $x > 90\%$ ,  
нерабочий, аварийный режим

**РЕЖИМ ТЕЧЕНИЯ** – характер  
распределения паровой и  
водяной фаз в сечении трубы

## Расслоение потока на участках гибов труб

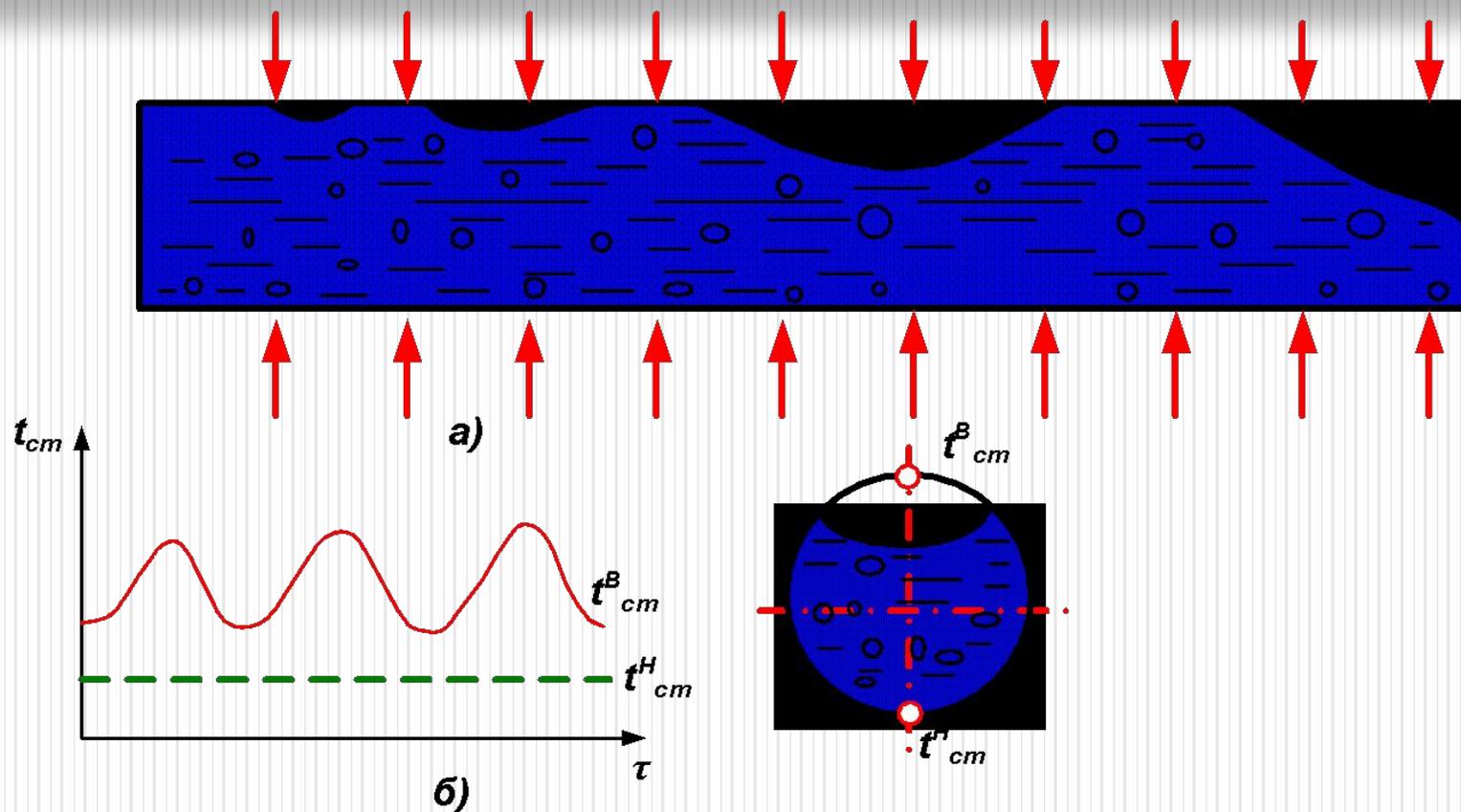


**а)**  
верхний гиб;



**б)**  
нижний гиб

## Температурный режим горизонтальной трубы при малом парообразовании



а – структура потока; б – температура верхней и нижней образующих во времени; амплитуда – 60 – 80 °С.

Расслоение потока начинается тогда, когда скорость потока меньше предельно допустимой, ~ 0,5 м/с

# *Параметры режимов течения*

Характеристики двухфазного потока:

- *ВЕСОВЫЕ*
- *ИСТИННЫЕ*
- *ОБЪЕМНЫЕ*

Для каждого вида характеристик определяют:

- *СКОРОСТЬ ПАРА*
- *СКОРОСТЬ ВОДЫ*
- *СКОРОСТЬ ЦИРКУЛЯЦИИ*
- *СКОРОСТЬ СМЕСИ*
- *СТЕПЕНЬ СУХОСТИ*

Массовая доля пара в потоке пароводяной смеси называется **МАССОВЫМ ПАРСОДЕРЖАНИЕМ  $x$** .

Объемная доля пара в потоке пароводяной смеси при равных скоростях обеих фаз называется **ОБЪЕМНЫМ ПАРСОДЕРЖАНИЕМ ПОТОКА  $\beta$** .

**НАПОРНЫМ ПАРСОДЕРЖАНИЕМ ПОТОКА  $\phi$**  называется доля сечения или объема трубы, занятая паром и соответствующая истинным скоростям фаз.

Плотность пароводяной смеси, соответствующая равным скоростям фаз, называется **РАСХОДНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ СМЕСИ  $\gamma_{см}$** .

**НИВЕЛИРНЫМ ДАВЛЕНИЕМ (ПЕРЕПАДОМ ДАВЛЕНИЯ)  $\Delta p_{нив}$**  называется давление столба среды (пароводяной смеси или однофазного потока) в трубе, панели, элементе или контуре.

**ДВИЖУЩИМ НАПОРОМ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ  $S$**  называется разность давлений столба воды в опускных и пароводяной смеси в подъемных трубах. При отнесении к единице высоты движущий напор называется удельным, к полной высоте трубы или участка – полным.

**ПОЛЕЗНЫМ НАПОРОМ ПОДЪЕМНЫХ ПАРСОДЕРЖАЮЩИХ ТРУБ  $S_{пол}$**  называется разность их движущего напора и гидравлического сопротивления

**Гидравлической (циркуляционной)** характеристикой трубного элемента или контура называется зависимость перепада давлений или полезного напора в элементе или контуре от расхода воды (при постоянном обогреве труб и энтальпии среды на входе).

**Массовой скоростью среды  $w$**  называется расход, отнесенный к единице сечения трубы.

**Скоростью циркуляции  $w_0$**  называется скорость воды при температуре насыщения, соответствующая расходу среды в трубах

**Приведенной скоростью пара  $w_0''$**  называется скорость, соответствующая расходу паровой фазы потока, отнесенному к полному сечению трубы.

Скорость, соответствующая расходу среды и расходной плотности смеси, называется **скоростью смеси  $w_{см}$**

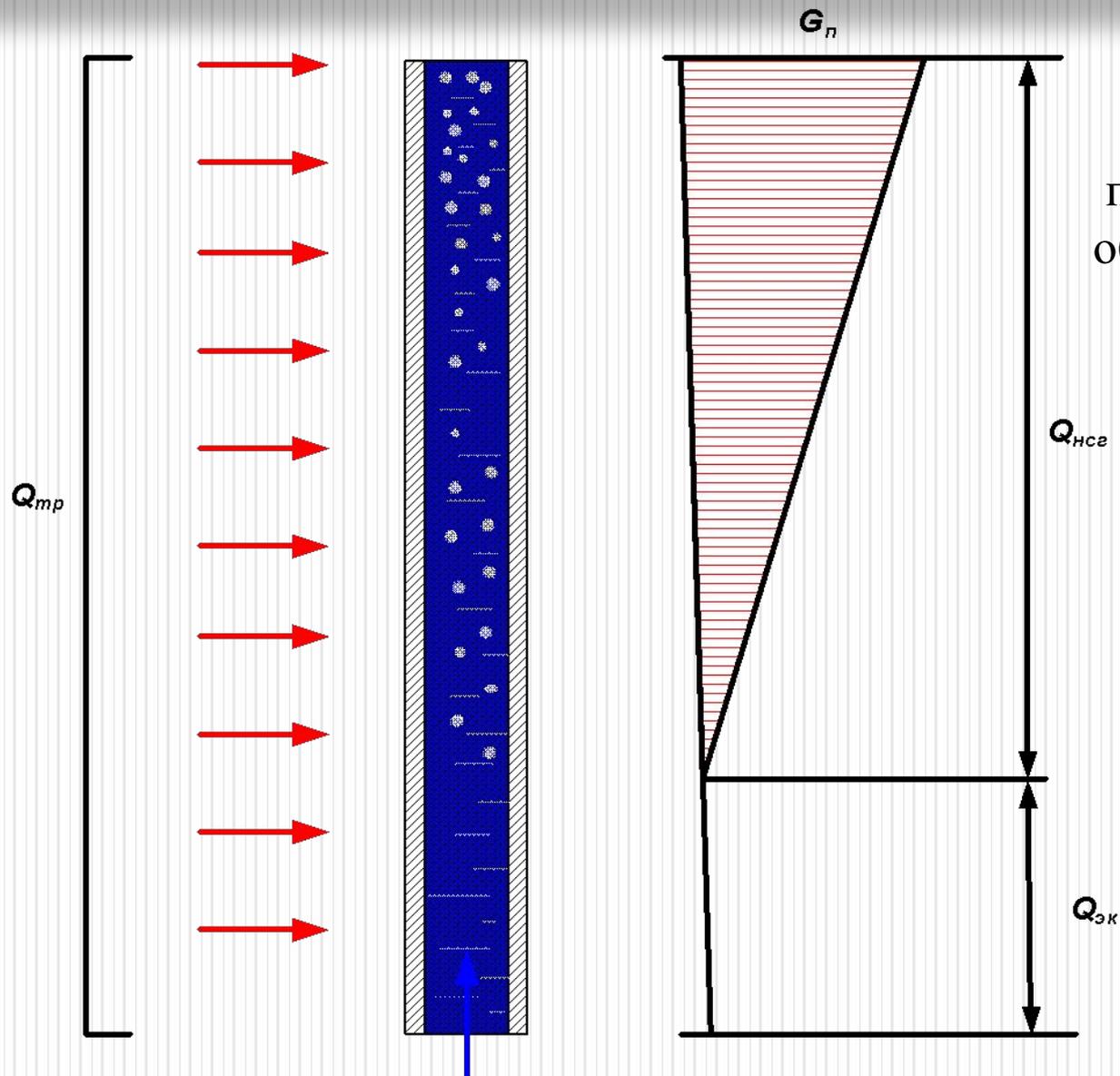
# *Весовые характеристики*

***Приведенные*** скорости пара, воды; скорость циркуляции, скорость смеси, степень сухости

***Приведенные скорости*** - это не действительные, а условные скорости. Приведенные скорости пара и воды – это скорости, которые имели бы пар и вода, если бы они занимали все сечение трубы.

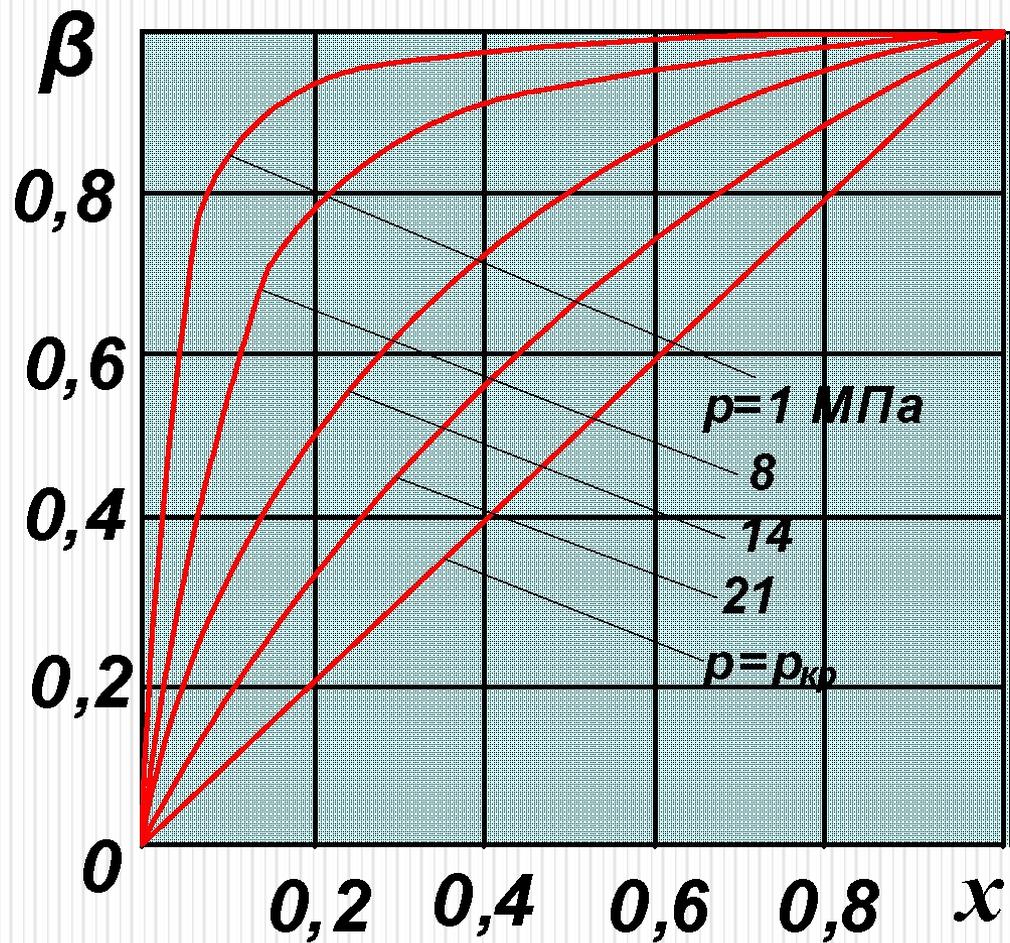
***Скорость циркуляции*** – это скорость, которую имела бы вода при температуре кипения при таком же высоком расходе, что и вся пароводяная смесь.

# Весовые характеристики



Определение  
парообразования в  
обогреваемой трубе

# *Весовые характеристики*



Зависимость объемного паросодержания  $\beta$  от массового паросодержания  $x$

# Определение гидравлического сопротивления потока

Полный перепад давлений, Па, при установившемся движении потока в трубных элементах

$$\Delta p_{\text{эл}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Sigma \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{кол}} + \Delta p_{\text{уск}} + \Delta p_{\text{нив}},$$

$\Delta p_{\text{тр}}$  потери напора от трения в прямых трубах

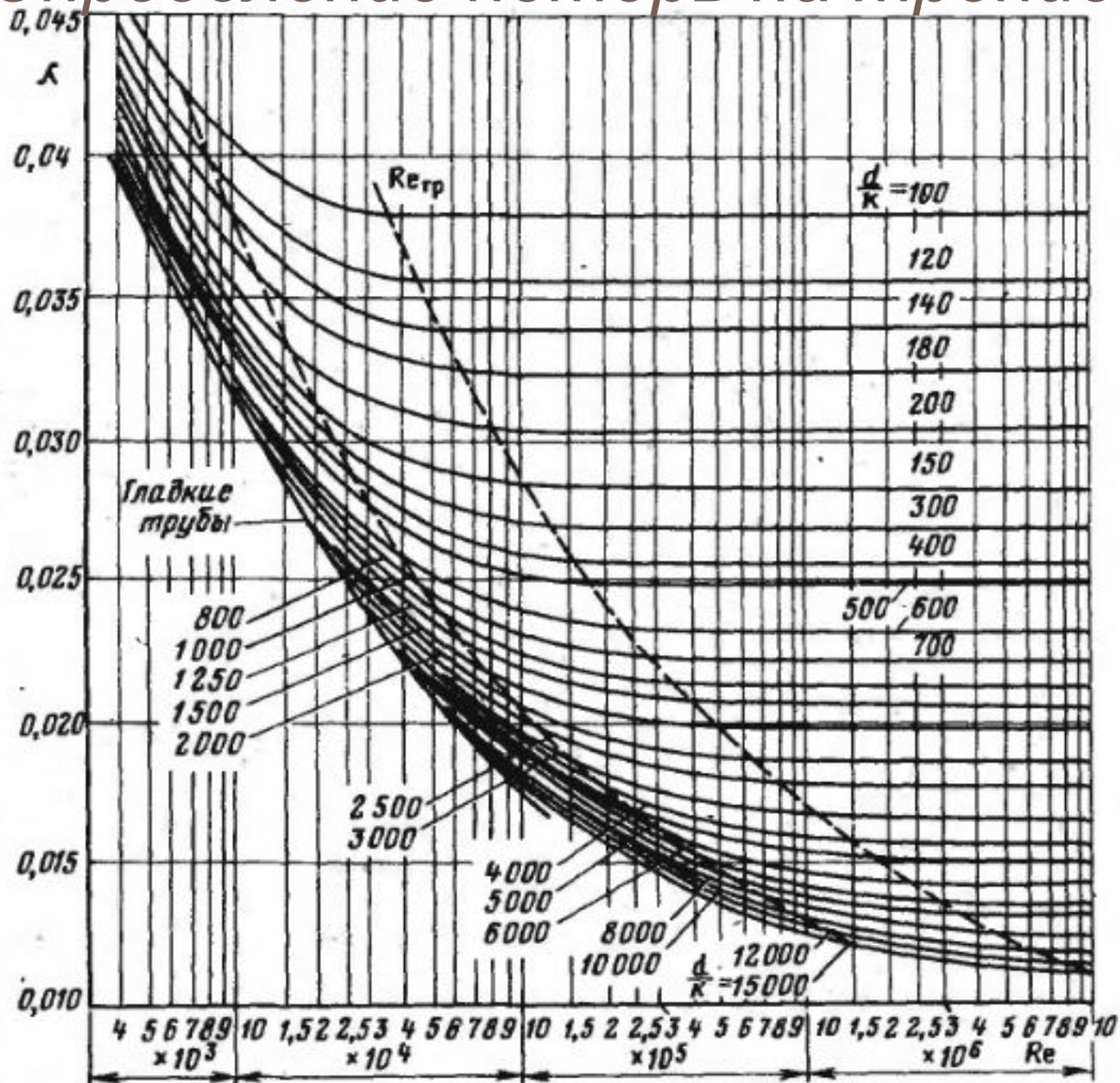
$\Sigma \Delta p_{\text{м}}$  сумма потерь напора от местных сопротивлений

$\Delta p_{\text{кол}}$  суммарное изменение статического давления в коллекторах

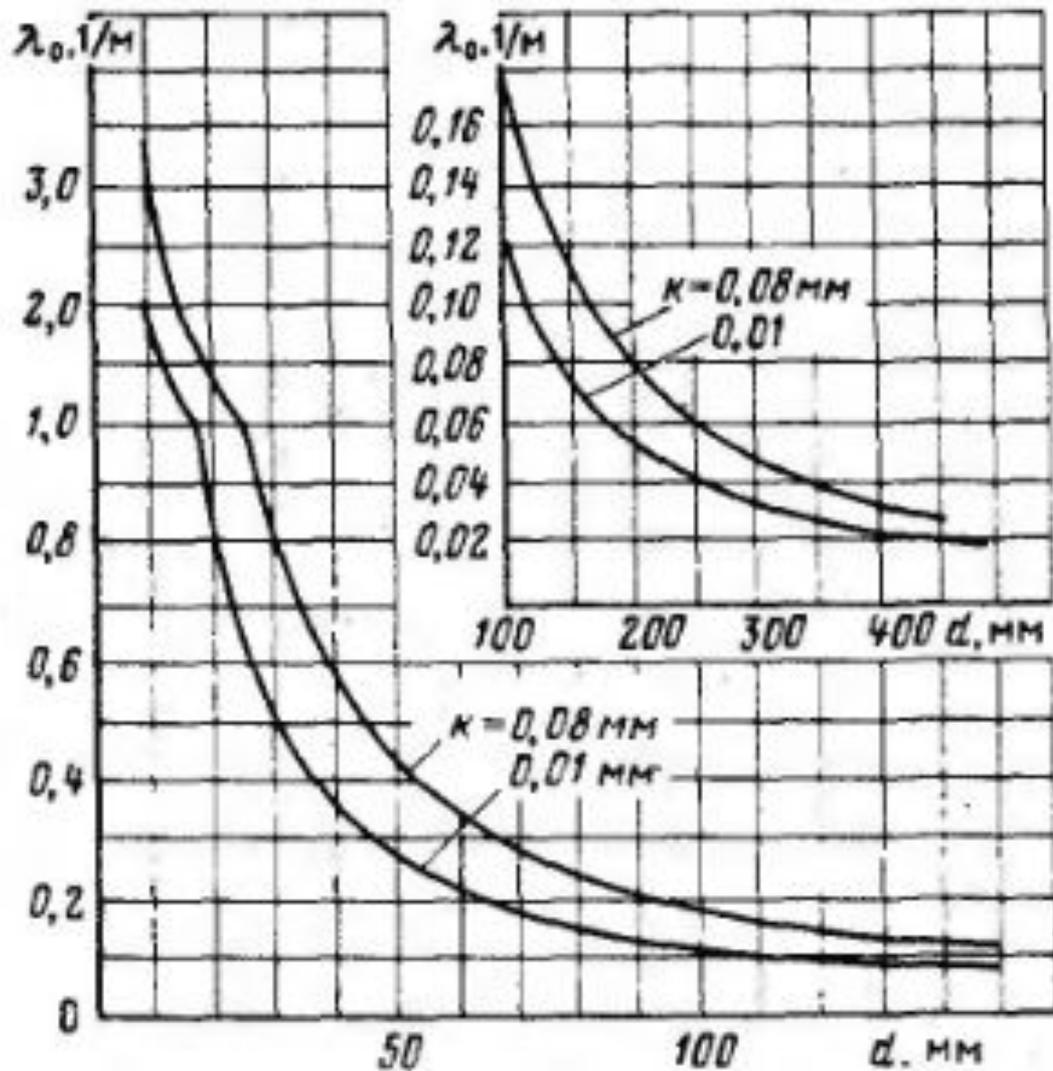
$\Delta p_{\text{уск}}$  потери напора от ускорения потока

$\Delta p_{\text{нив}}$  нивелирный перепад давлений

# Определение потерь на трение



# Приведенный коэффициент трения



$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{d}{2k} + 1,74\right)^2}$$

## *Изменение статического давления в коллекторах. Коллекторный эффект*

Скорость и изменение статического давления в коллекторе можно рассчитать как

$$w_{tx} = w_t^{\text{макс}} \left( 1 - \frac{x}{l} \right)$$

$$\Delta p_x = \Delta p \left[ 1 - \left( \frac{w_{tx}}{w_t^{\text{макс}}} \right)^2 \right]$$

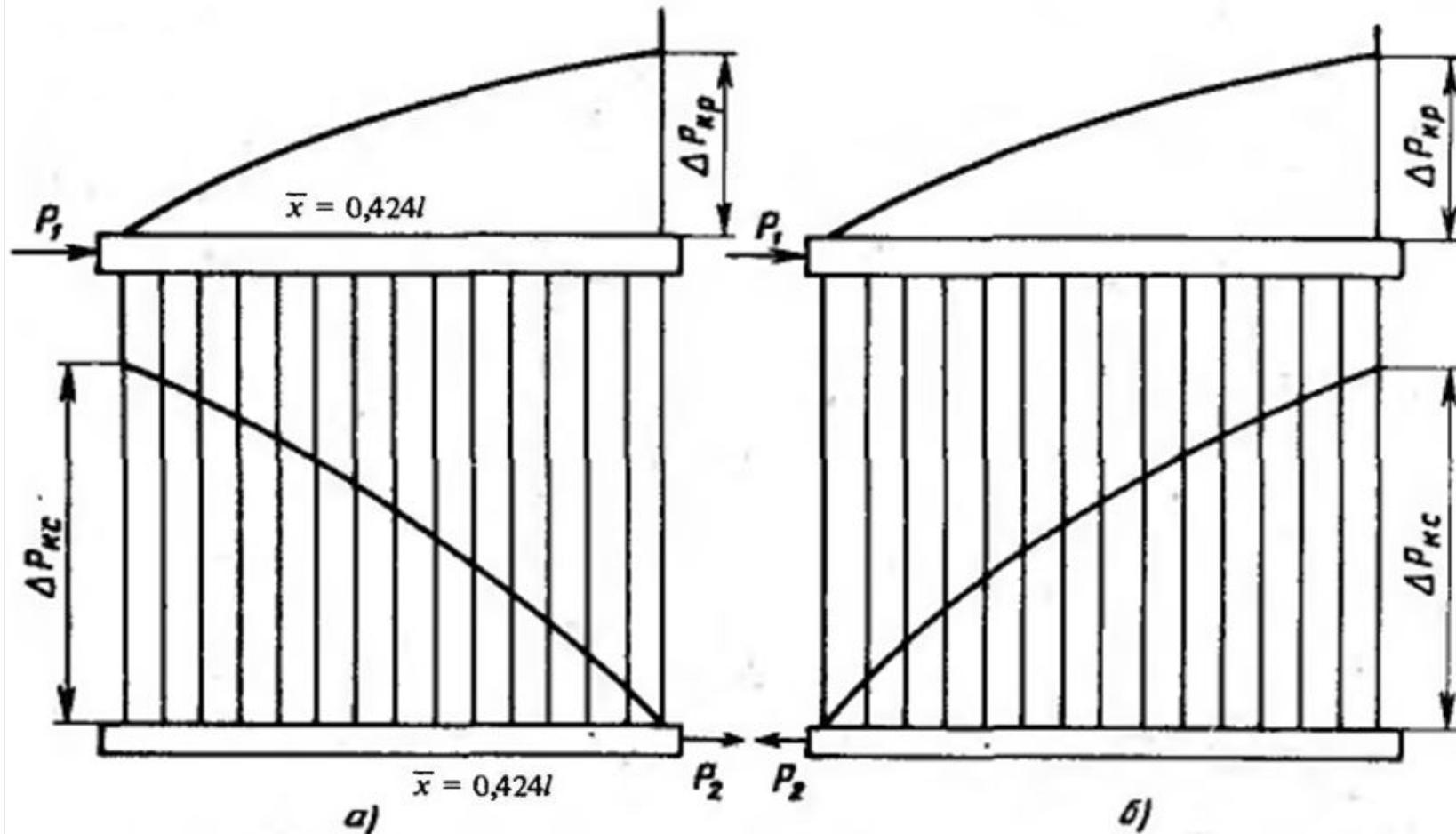
где  $x$  – расстояние от сечения с максимальной (раздающий коллектор) или нулевой скоростью (собирающий коллектор);  $l$  – длина активной части коллектора;  $\Delta p_k$  – максимальное изменение статического давления в конце коллектора

## *Изменение статического давления в коллекторах. Коллекторный эффект*

Так как в раздающем коллекторе от трения в коллекторе сопротивление на входе в трубы уменьшается давление в начале каждой трубки, то часть динамического напора расходуется на преодоление этих сопротивлений.

Иначе дело обстоит с собирающим коллектором. Сопротивление от трения в коллекторе, так и в раздающем коллекторе, уменьшает давление, а сопротивление на выходе увеличивает давление в конце трубки по сравнению с давлением в коллекторе. А так как сопротивление на выходе больше, чем сопротивление от трения в коллекторе, то давление в конце каждой трубы будет больше, чем в коллекторе. Поэтому изменение давления за счет превращения динамического напора будет складываться с сопротивлениями на входе в коллектор.

# Изменение статического давления в коллекторах. Коллекторный эффект



при  $x=0$  трубы называются развернутыми

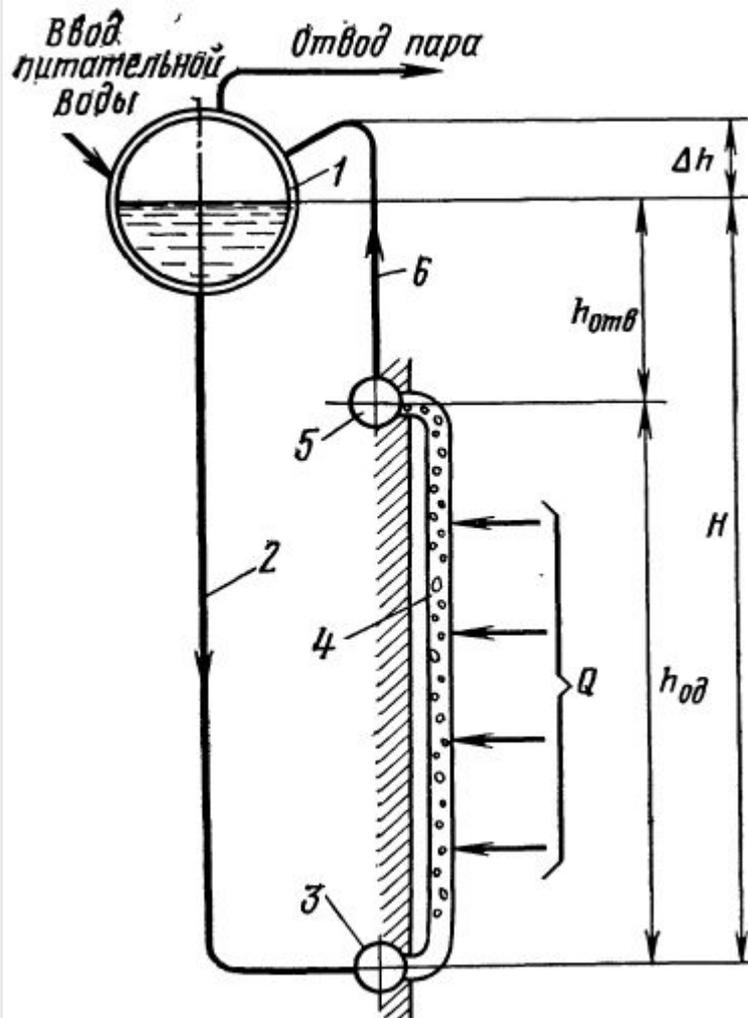
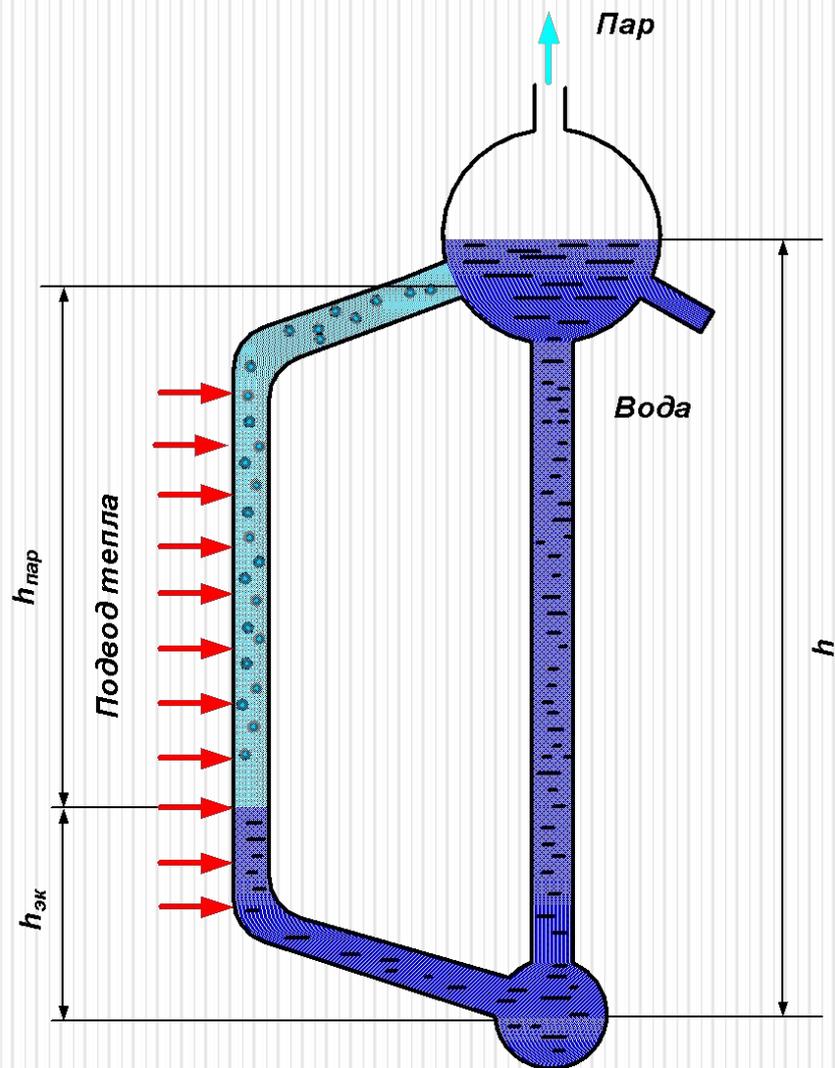
## *Изменение статического давления в коллекторах. Коллекторный эффект*

Средний перепад давлений между коллекторами

$$\begin{aligned} \left( p_1 + \overline{\Delta p}_{\text{к.р.}} \right) - \left( p_2 + \overline{\Delta p}_{\text{к.с.}} \right) &= \Delta p - \left( \overline{\Delta p}_{\text{к.с.}} - \overline{\Delta p}_{\text{к.р.}} \right) = \\ &= \Delta p - \left( 0,71\Delta p_{\text{к.с.}} - 0,79\Delta p_{\text{к.р.}} \right) \end{aligned}$$

$\Delta p$  – полное сопротивление элемента, обусловленное гидравлическими сопротивлениями и изменением статического давления в коллекторах; в скобках – дополнительное сопротивление, которое обусловлено изменением статических давлений в коллекторах, называемое **КОЛЛЕКТОРНЫМ ЭФФЕКТОМ**,  $\Delta p_{\text{кол}}$

# Контур с естественной циркуляцией



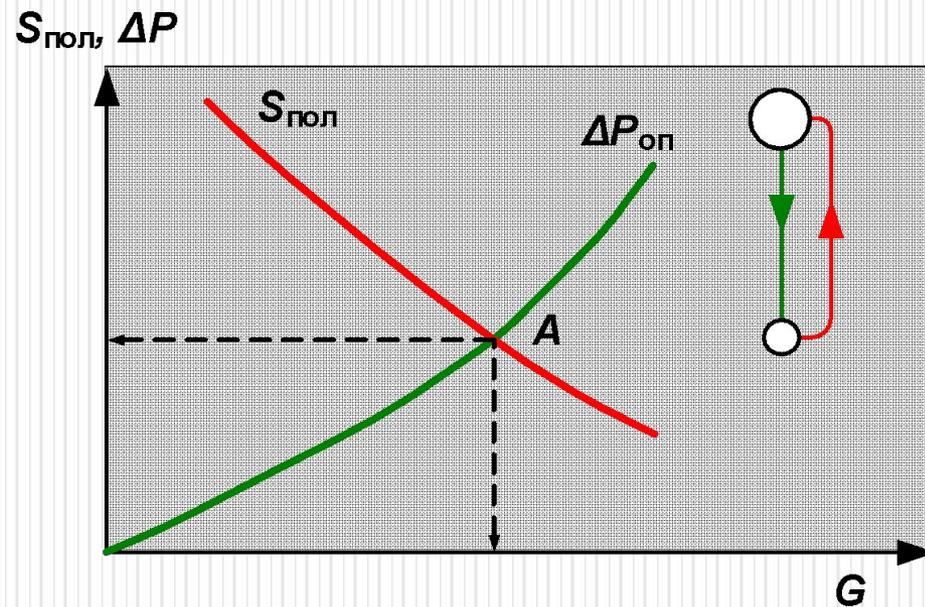
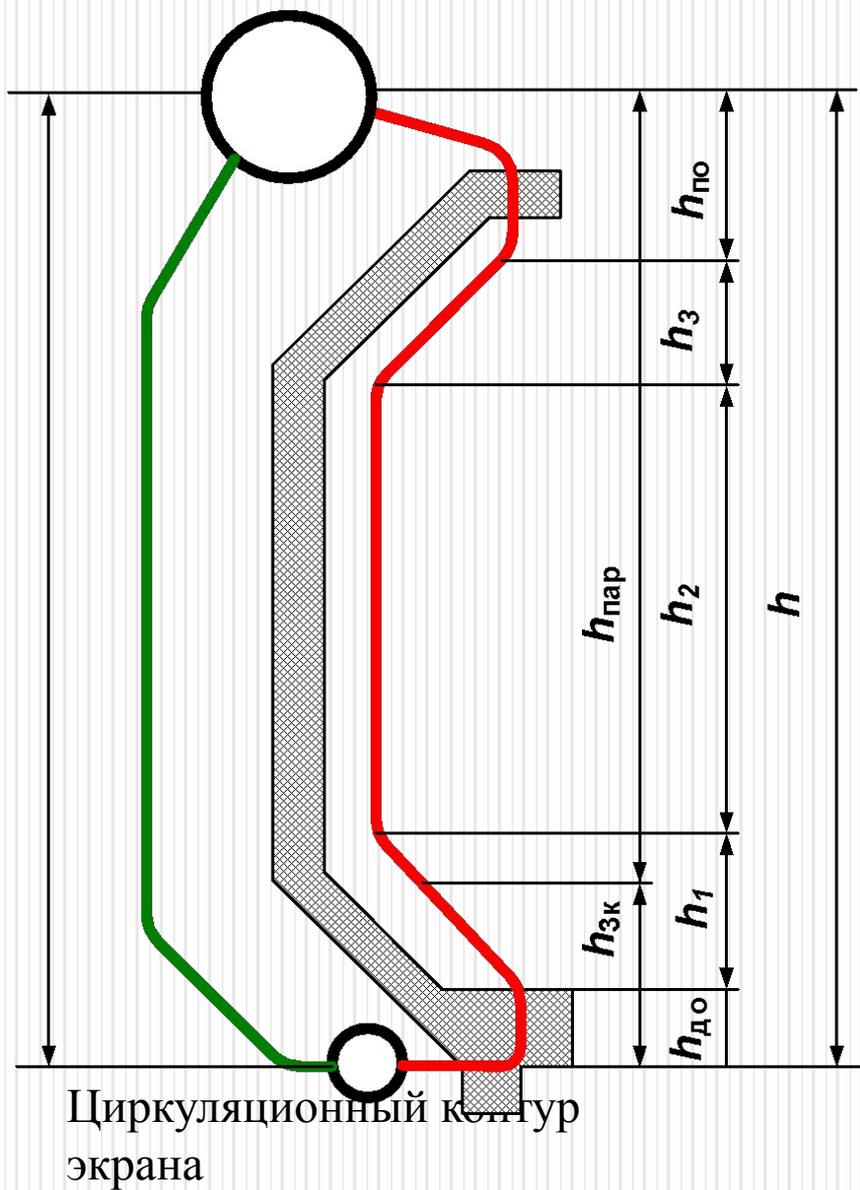
# Определение высоты точки закипания

Энтальпия в точке закипания

$$h'_{\text{тбв.}} = h_{\text{оп}} + \Delta h_{\text{сн}} + \Delta h + \frac{Q_{\text{эк}} H}{\Theta_{\text{ц}} 1}$$

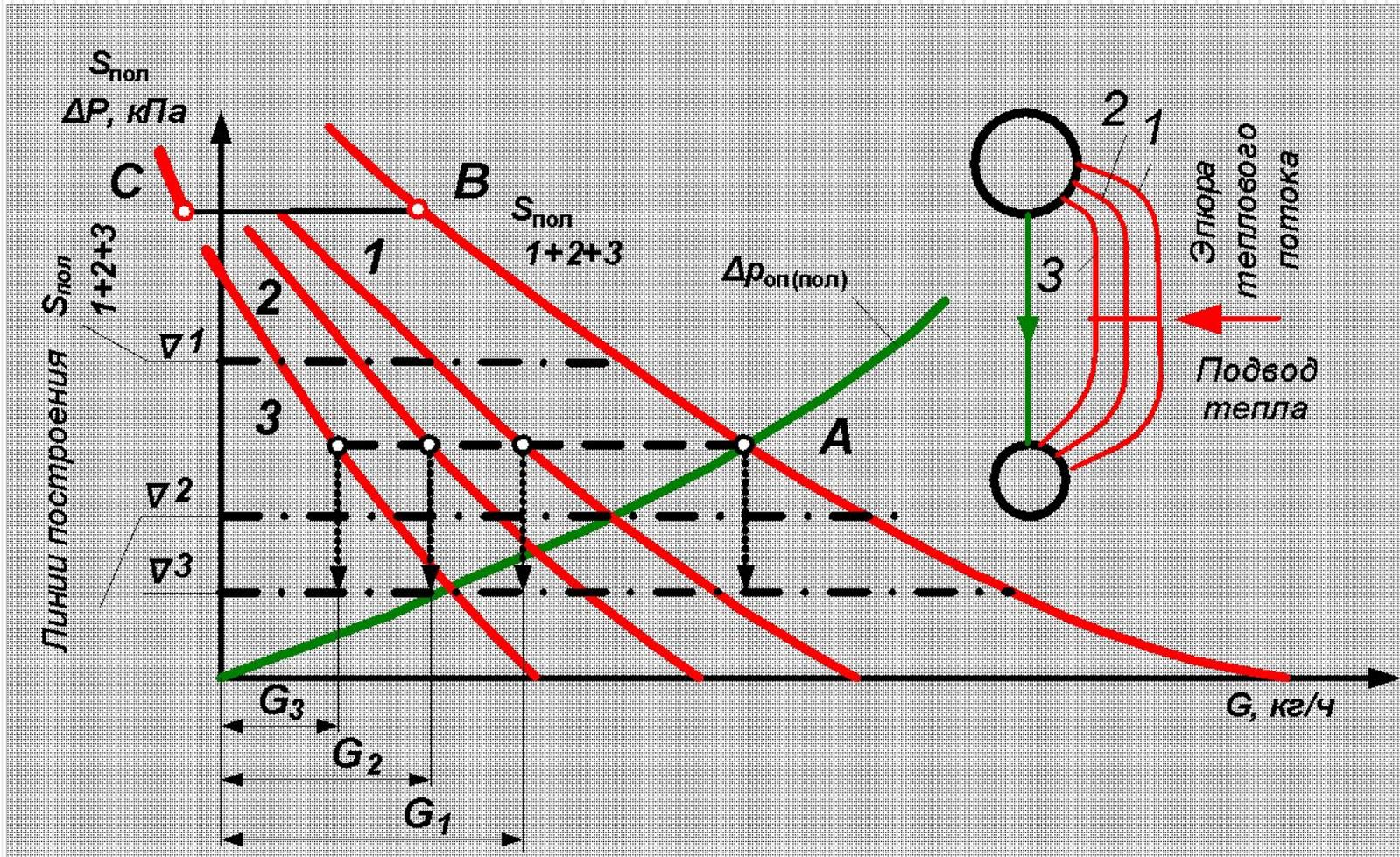
$$h'_{\text{тбв.}} = h' + \frac{\partial h'}{\partial p} g \rho' \left[ \begin{array}{c} H_{\text{оп}} - H_{\text{до}} - \\ - H_{\text{эк}} - \frac{\Delta p_{\text{оп}} + \Delta p_{\text{до}} + \Delta p_{\text{эк}}}{g \rho'} \end{array} \right]$$

## Схема расчета циркуляции



Гидравлическая характеристика простого контура циркуляции

# Расчет сложного контура циркуляции



Гидравлическая характеристика сложного циркуляционного контура

# Рекомендуемые скорости циркуляции

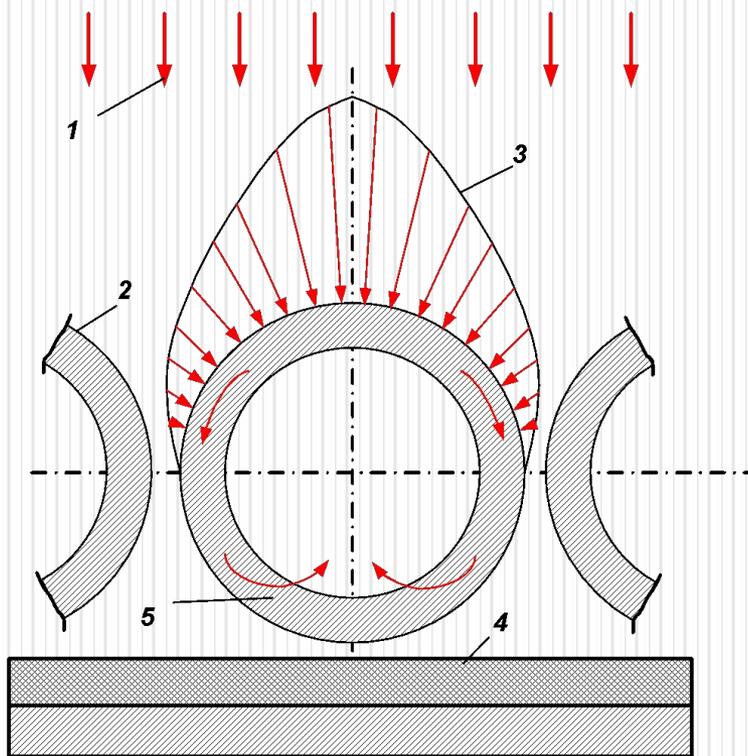
Элемент	Пределы скоростей циркуляции, м/с
Экраны с непосредственным вводом пароводяной смеси в барабан	0,5–1,5
Экраны, имеющие верхние коллекторы	0,2–1,0
Двухсветные экраны	0,5–2,0
Экраны котлов малой паропроизводительности	0,2–0,8
Первые три ряда труб первого кипяточного пучка	0,5–1,7
Остальные ряды труб первого кипяточного пучка	0,1–0,8
Последующие пучки кипяточных труб	0,1–0,5

**П р и м е ч а н и е.** При расчете циркуляции в контурах, включенных в солевые отсеки, скорости циркуляции рекомендуется принимать в 1,5 раза меньшими, чем в данной таблице.

# Рекомендуемые кратности циркуляции

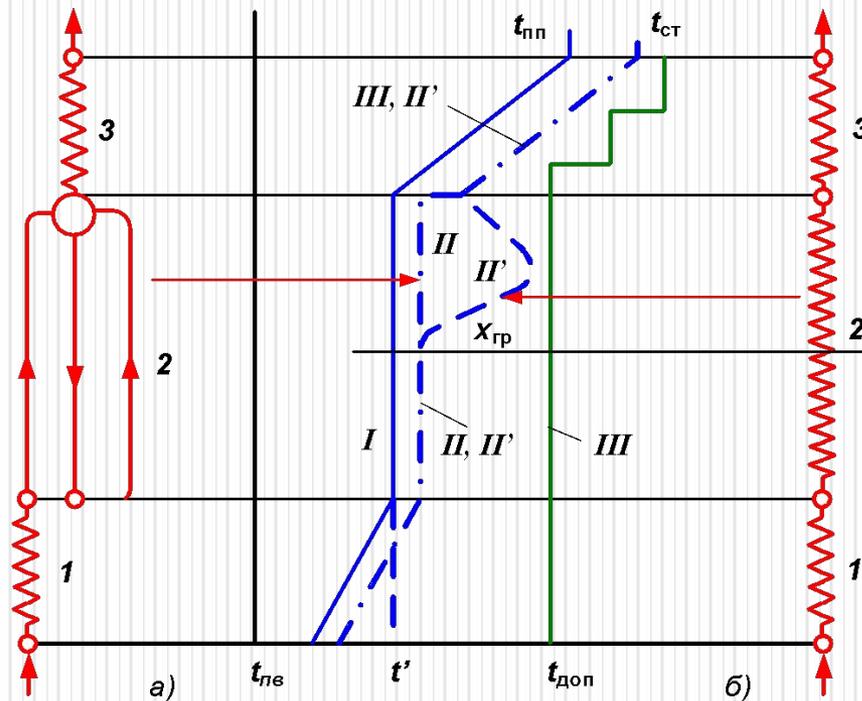
Типы паровых котлов	Давление, МПа	Производительность, кг/с	Кратность циркуляции, кг/кг
Паровые котлы сверхвысокого давления	14,0–18,5	55–180	8–5
Паровые котлы высокого давления	8,0–14,0	22–70	14–6
Паровые котлы среднего давления:			
однобарабанные, в том числе секционные	3,5–8,0	11–35	30–20
двухбарабанные	1,5–3,5	8,35–55	65–45
трех- и четырехбарабанные	1,1–3,5	8,35–55	55–35
Паровые котлы малой паропроизводительности:			
с малыми кипяtilьными пучками	3,0–4,5	2,8–11	35–25
с развитыми кипяtilьными пучками	3,0–4,5	До 4	60–40
Паровые котлы низкого давления	До 1,5	До 4	200–100

## *Распределение тепловосприятия по поверхности экранной трубы при одностороннем обогреве*



1 – тепловой поток от ядра факела; 2 – экранные трубы; 3 – эпюра тепловосприятия лобовой поверхностью трубы; 4 – обмуровка и тепловая изоляция стены топки; 5 – отвод теплоты от лобовой к тыльной стороне трубы

## Изменение температуры по водопаровому тракту котлов



Барбанный (а) и прямоточный (б) паровой котел: 1 – экономайзер; 2 – парогенерирующие трубы; 3 – пароперегреватель; I – температура рабочего тела; II – температура стенки барабанного котла; II' – то же прямоточного котла; III – допустимая температура металла

# Характеристика природных вод

Технологические  
показатели воды

Общая  
жесткость ( $J_0$ )

Кислотность

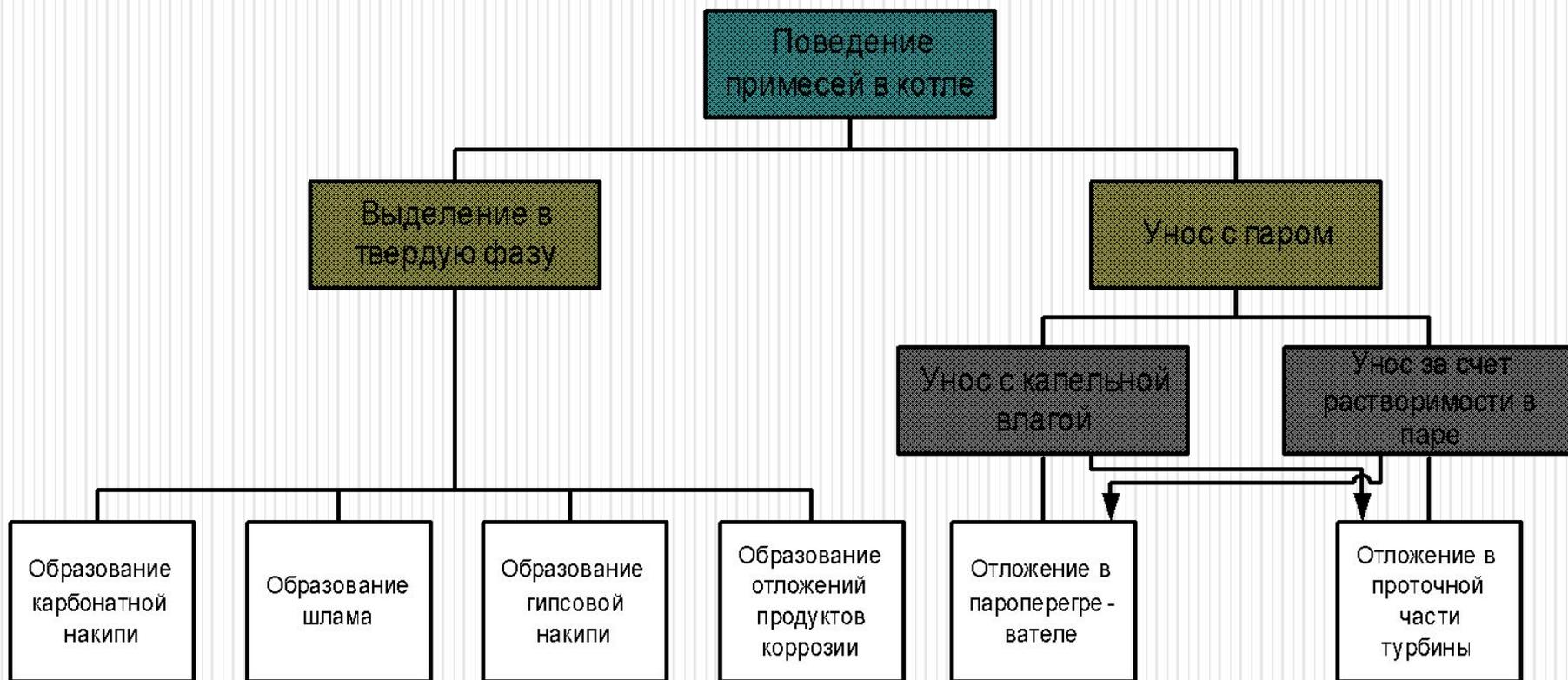
Общая  
щелочность ( $Щ_0$ )

Общее  
кремнесодержание

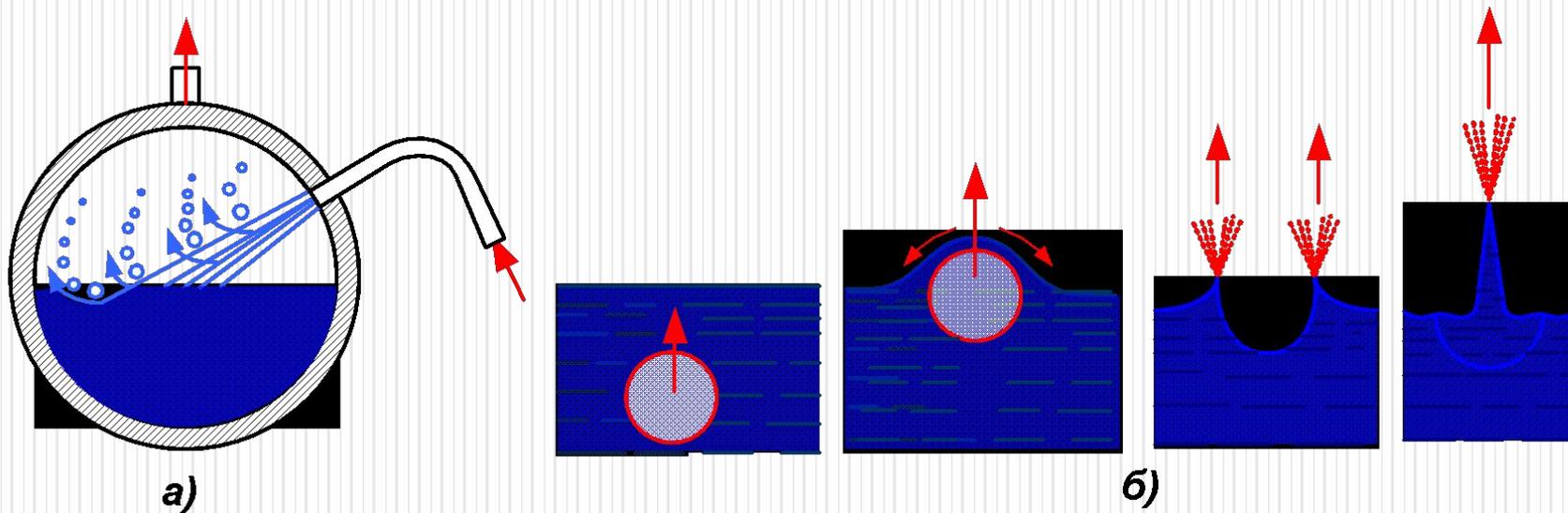
Общее  
солесодержание

Сухой остаток

# Схема поведения примесей в паре



## Модель образования влаги в паре



- а – при ударе пароводяной струи о зеркало испарения;  
б – при разрыве пузырьков насыщенного пара на зеркале испарения

## Требования к качеству питательной воды и пара

На основании Правил технической эксплуатации (ПТЭ) общая жесткость питательной воды  $C_{\text{пв}}$  не должна превышать, мкг-экв/кг:

Для котлов давления	На жидком топливе	На других топливах
До 4 МПа	5	10
От 4 до 10 МПа	3	5
От 10 и выше МПа	1	1

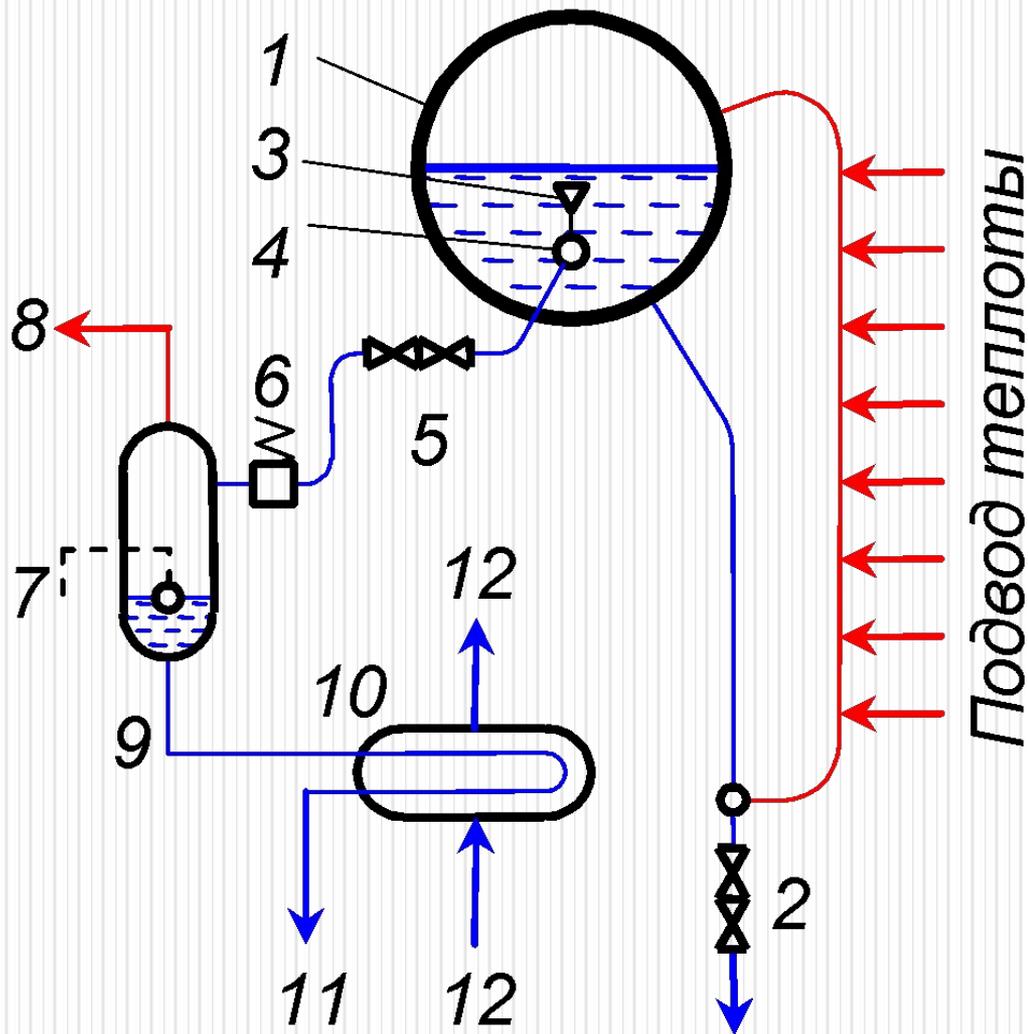
По рекомендациям ПТЭ в питательной воде котлов с давлением 7 МПа и выше – содержание кремния (в пересчете на  $\text{SiO}_2$ ) не должно превышать, мкг/кг:

Котлы давлением, МПа	ГРЭС, отопительные ТЭЦ	ТЭЦ с производственным отбором пара
7–10	80	По данным испытаний
Выше 10	40	120

## *Нормы качества питательной воды для котлов СКД*

Показатель, размерность	Величина	Показатель, размерность	Величина
Соединения Na, мкг/кг	10	O <sub>2</sub> после деаэратора, мкг/кг	10
Кремнесодержание в пересчете на SiO <sub>3</sub> , мкг/кг	20	pH	9±0,2
Жесткость, мг-экв/кг	0,2	CO <sub>2</sub> свободная, мкг/кг	0
Содержание Fe, мкг/кг	10	Избыток гидразина, мкг/кг	30 – 100
Содержание Cu, мкг/кг	5	Аммиак в пересчете на NH <sub>3</sub> , мкг/кг	500

# Принципиальная схема устройства продувки барабанного котла



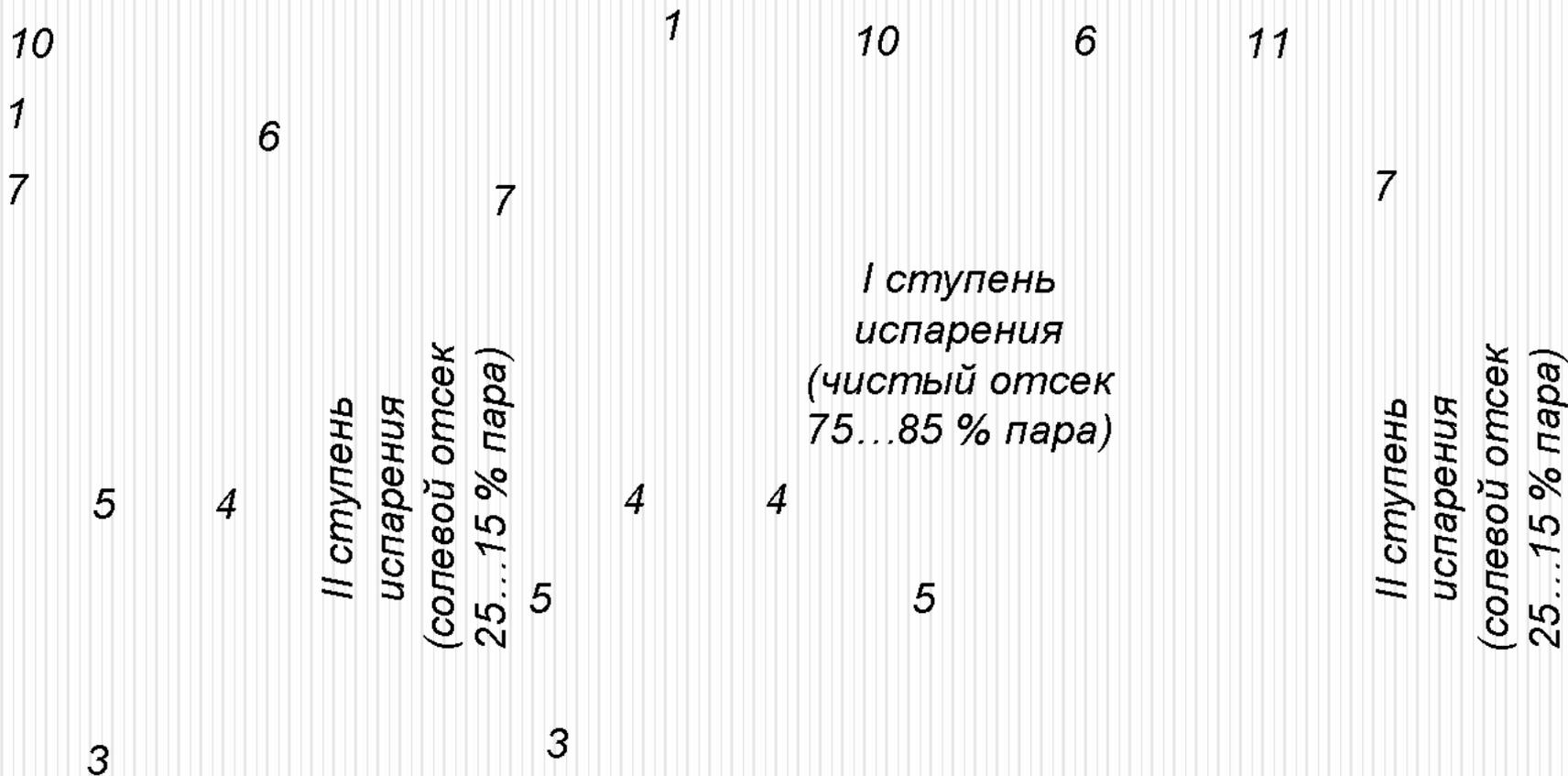
- 1 – барабан котла;
- 2 – периодическая продувка и дренаж котла;
- 3 – заборные точки непрерывной продувки;
- 4 – сборный коллектор непрерывной продувки;
- 5 – запорные клапаны;
- 6 – регулировочный клапан продувки;
- 7 – расширитель;
- 8 – отвод пара в деаэрактор;
- 9 – отвод продувочной воды в теплообменник;
- 10 – поверхностный теплообменник;
- 11 – дренаж охлажденной продувочной воды;
- 12 – теплоиспользующая вода

# *Схемы испарения в агрегатах с естественной или многократно-принудительной циркуляцией*

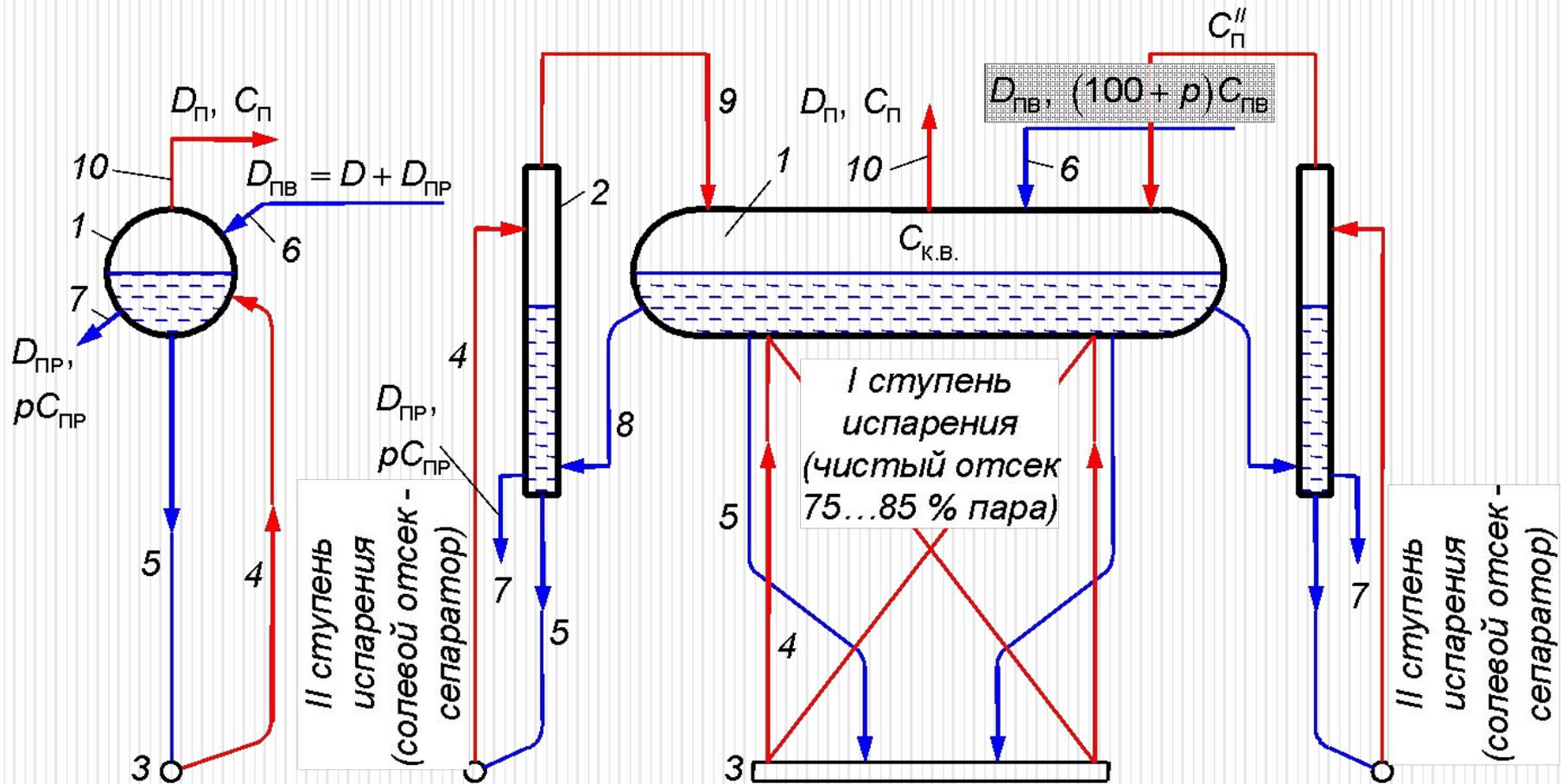


одноступенчатая схема;

# Схемы испарения в агрегатах с естественной или многократно-принудительной циркуляцией

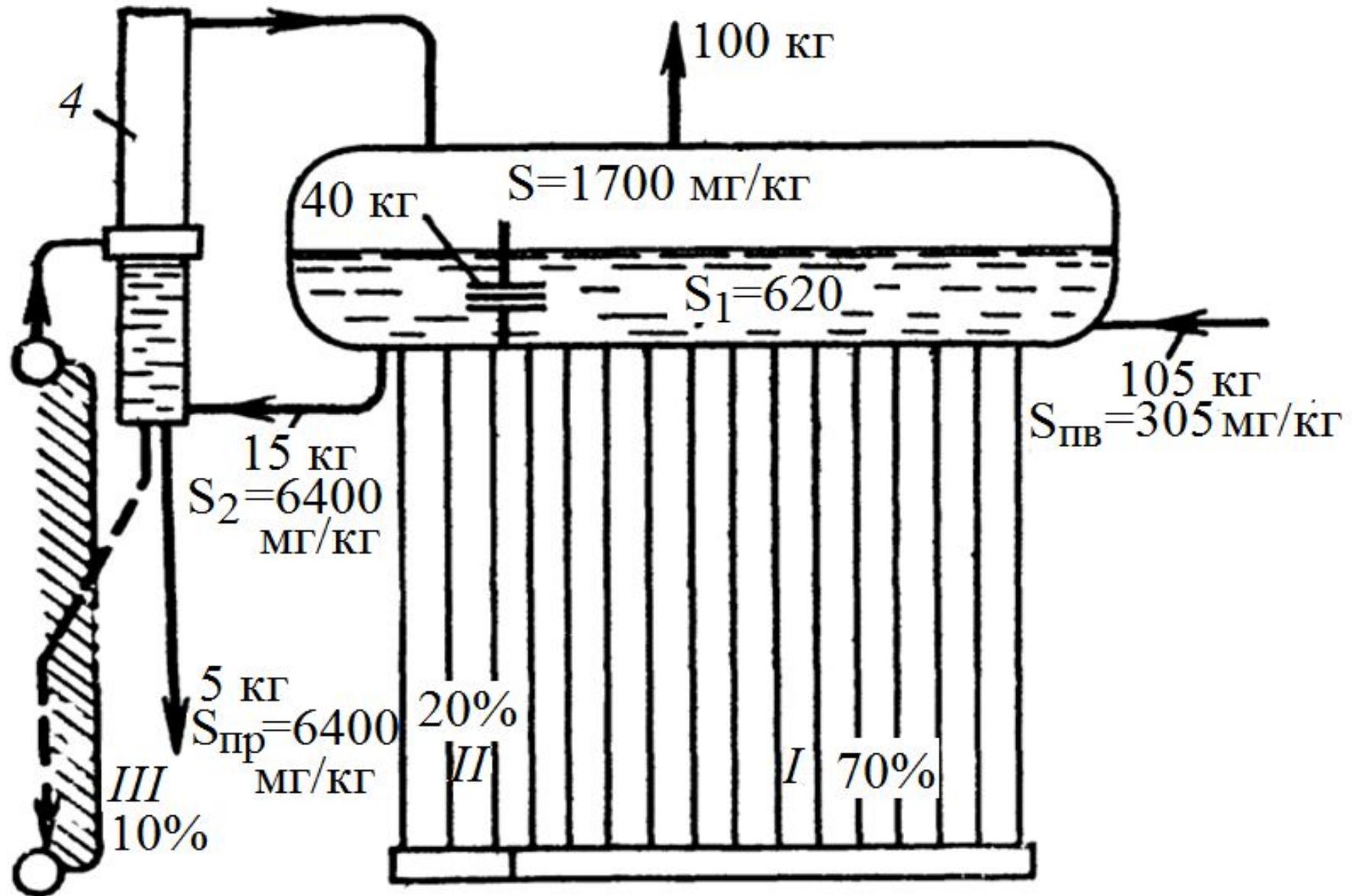


# Схемы испарения в агрегатах с естественной или многократно-принудительной циркуляцией



Двухступенчатая схема с выносными циклонами

# Ступенчатое испарение (проф. Ромм, 1937 г.)



## Уравнение баланса солей в котлоагрегате

$$(100 + p)S_{\text{пв}} = (n_3 + n_2 + p)S_1 = (n_3 + p)S_2 = pS_{\text{пр}}$$

Продувка котлоагрегата

$$p = \frac{100S_{\text{пв}}}{S_{\text{пр}} - S_{\text{пв}}}$$

Солесодержание воды в  
чистом отсеке барабана

$$S_1 = \frac{(100 + p)S_{\text{пв}}}{(n_3 + n_2 + p)}$$

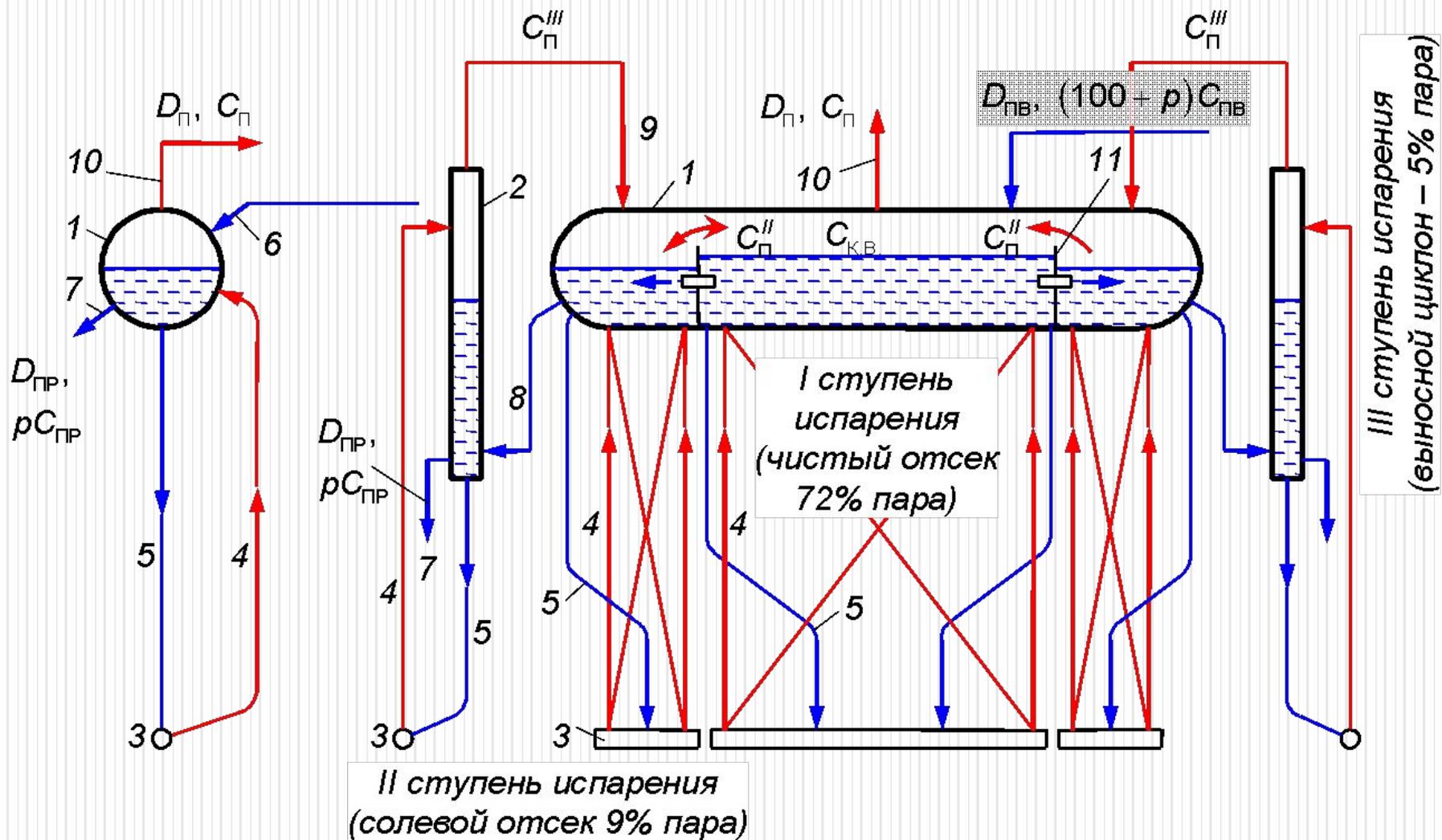
Солесодержание во второй  
ступени испарения

$$S_2 = \frac{(100 + p)S_{\text{пв}}}{(n_3 + p)}$$

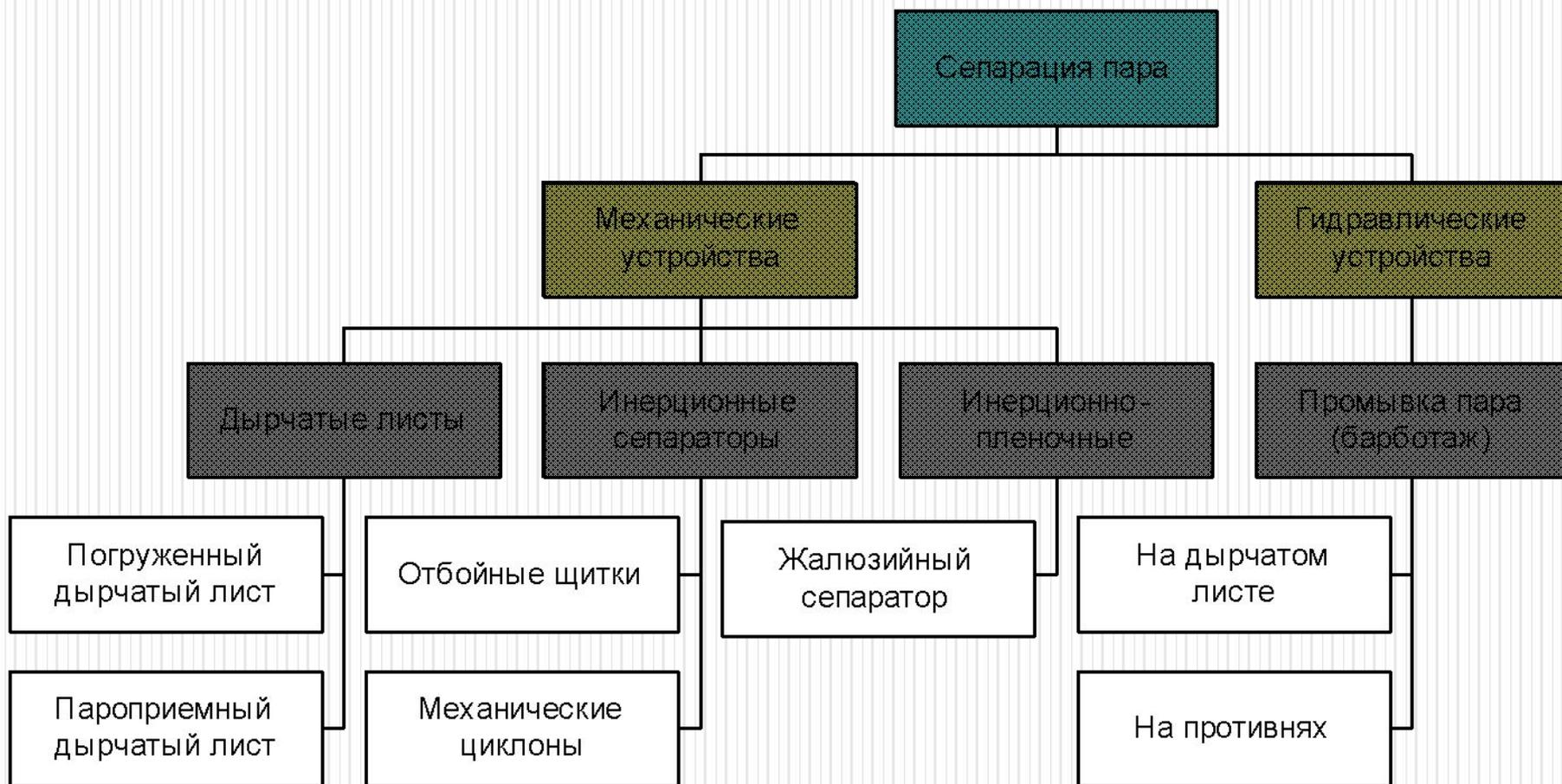
Солесодержание в третьей  
ступени испарения и продувке

$$S_{\text{пр}} = \frac{(100 + p)S_{\text{пв}}}{p}$$

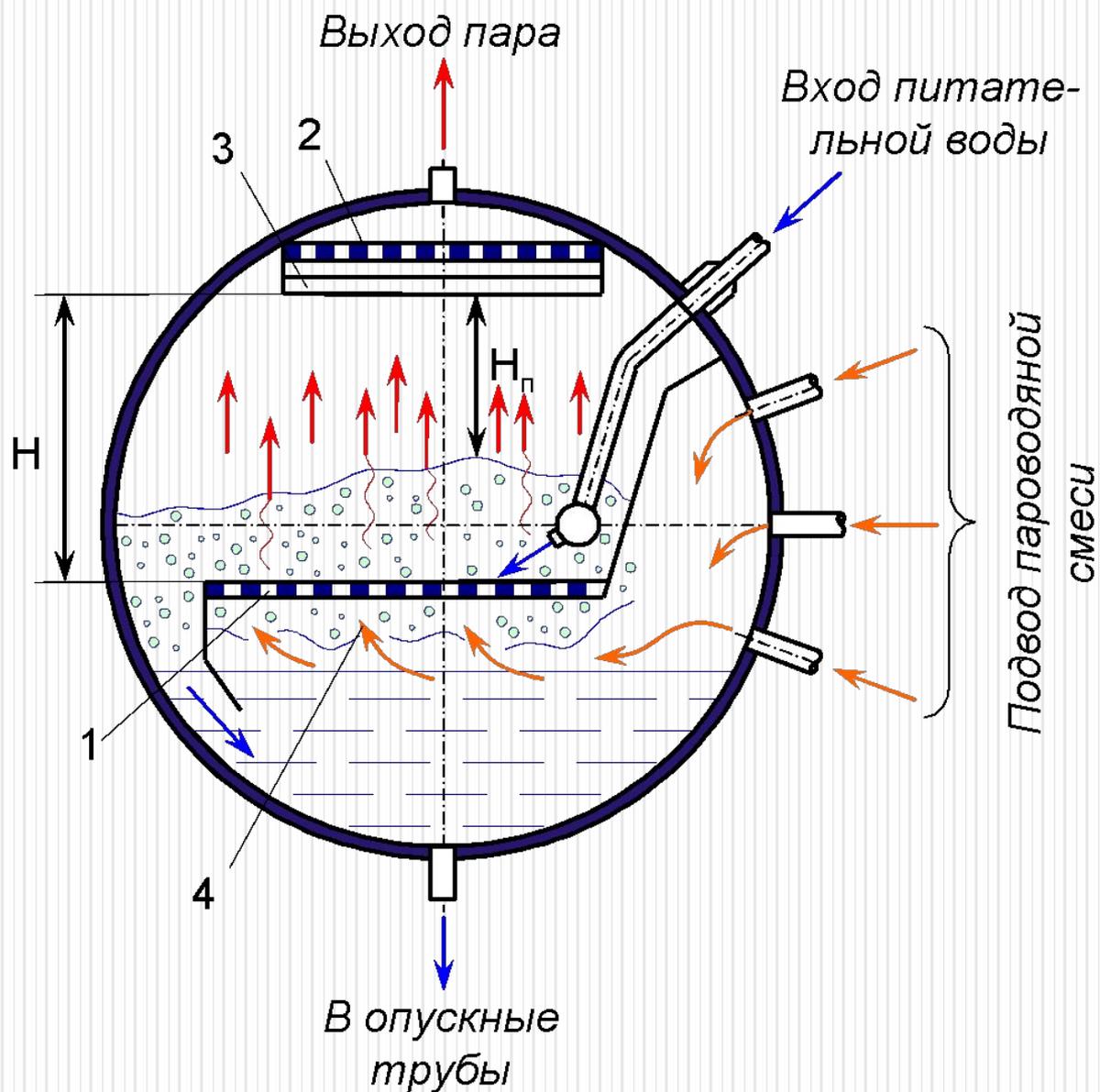
# Схемы испарения в агрегатах с естественной или многократно-принудительной циркуляцией



# Классификация современных паросепарационных устройств

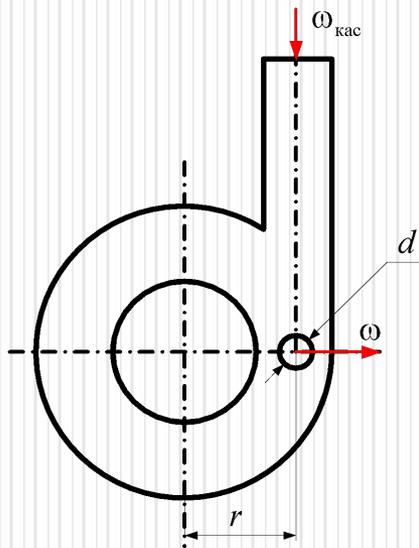


## Сепарационные устройства с дырчатыми листами

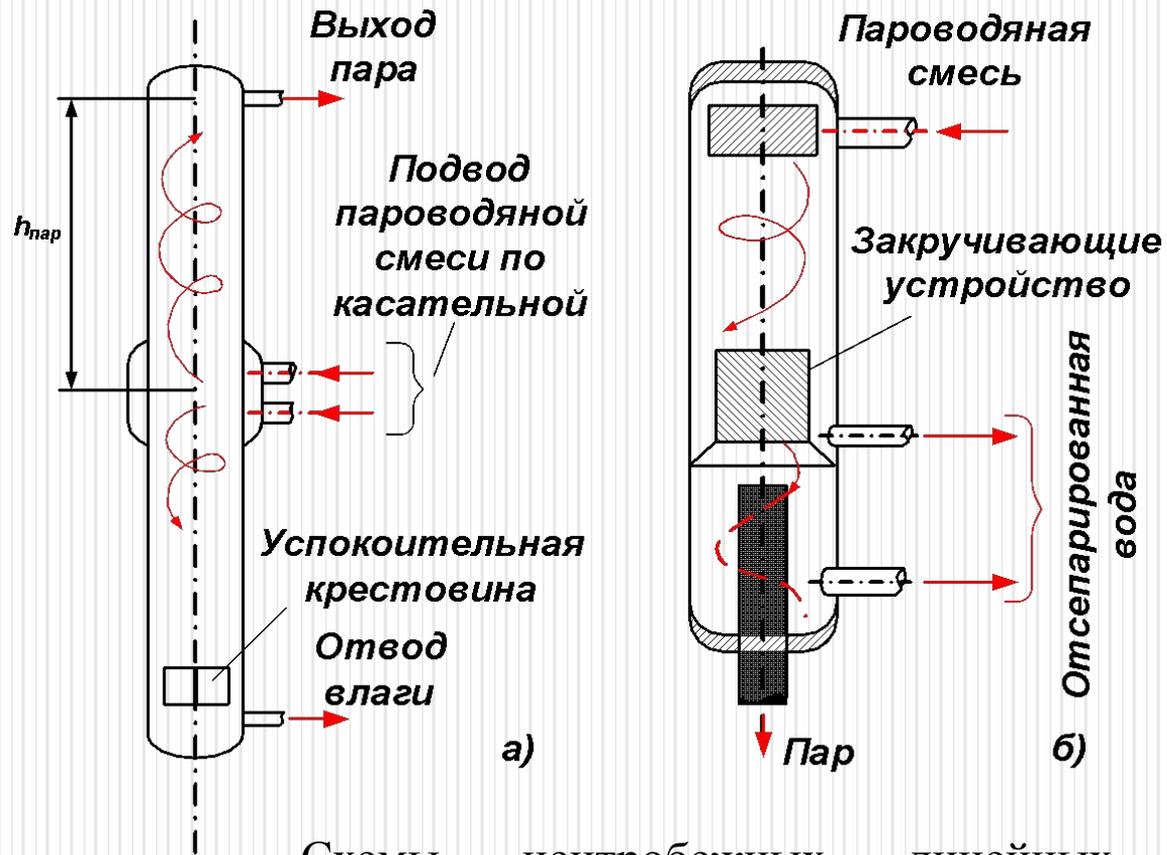


- 1 – погруженный дырчатый лист;
- 2 – потолочный пароприемный дырчатый лист;
- 3 – жалюзийный сепаратор;
- 4 – паровая подушка

# Центробежная сепарация

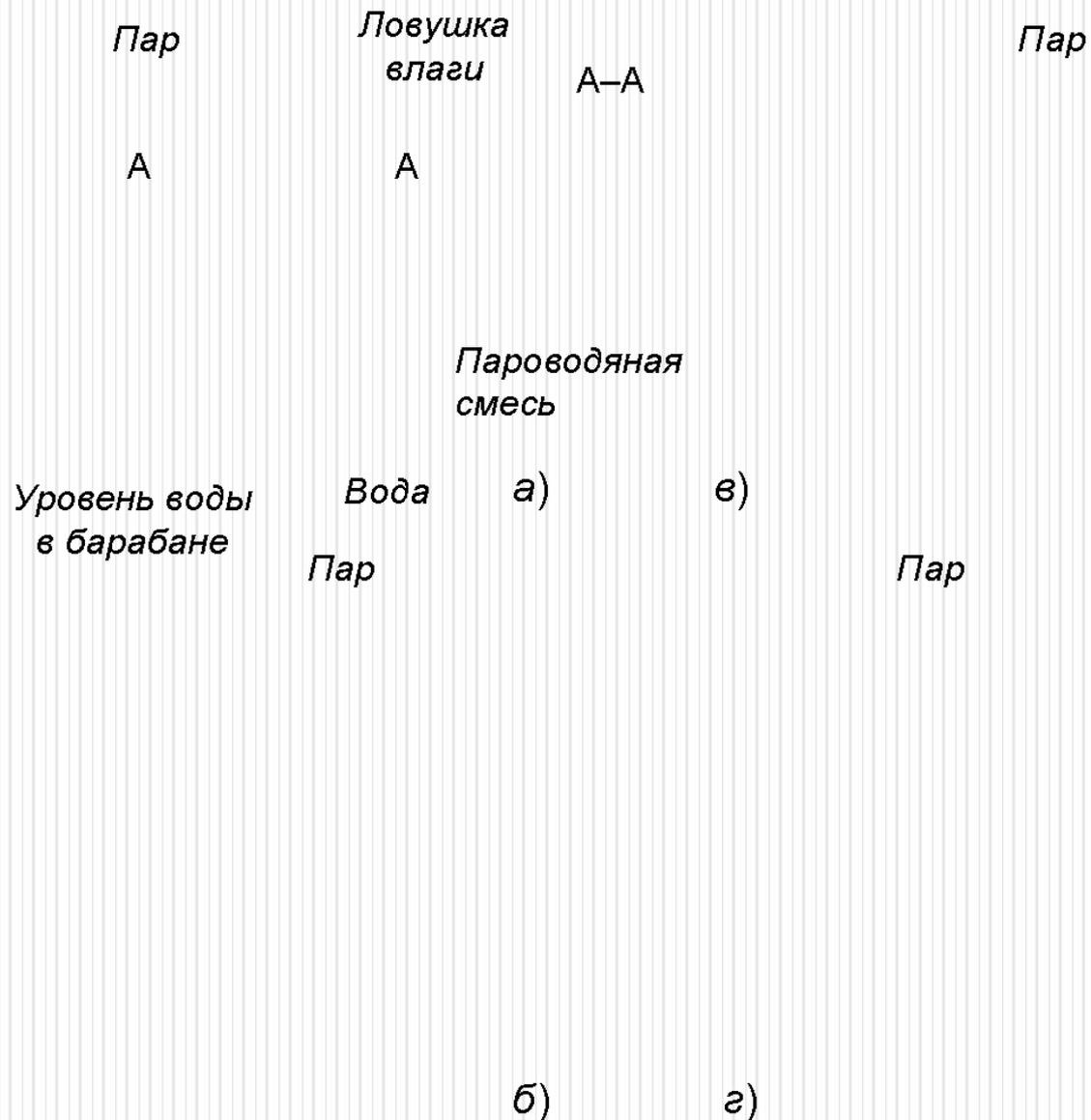


Поперечное сечение  
центробежного  
сепаратора



Схемы центробежных линейных паросепараторов: а – выносной, с центральным по высоте подводом пароводяной смеси барабанных котлов высокого давления; б – центробежный сепаратор растопочной схемы проточного котла с концевым подводом смеси

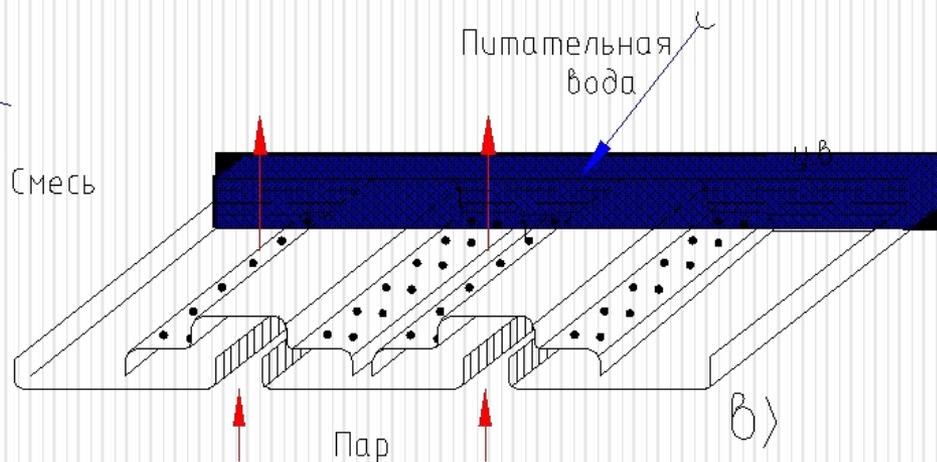
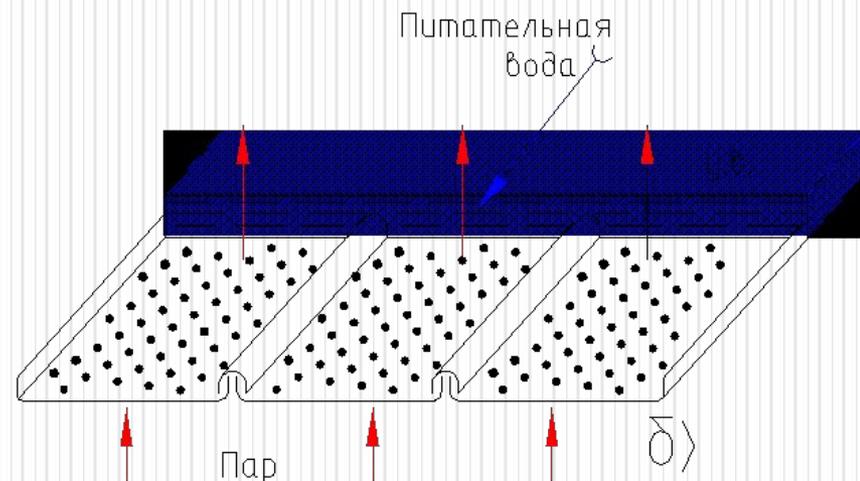
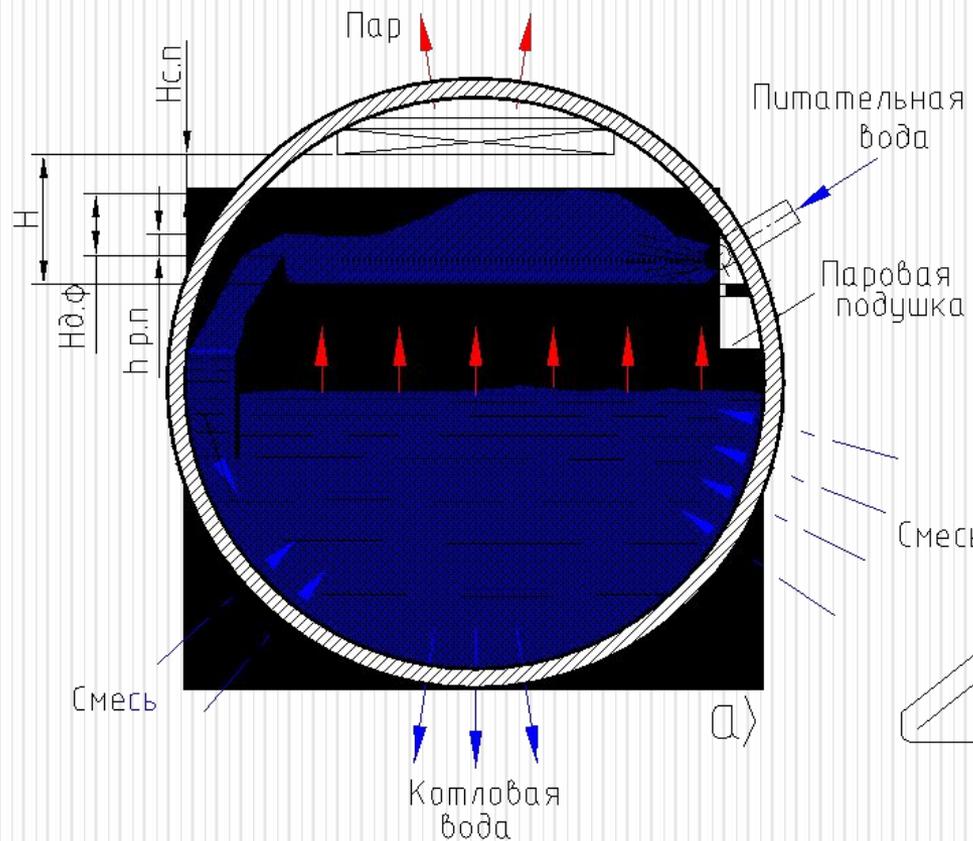
# Внутрибарабанные сепарационные циклоны



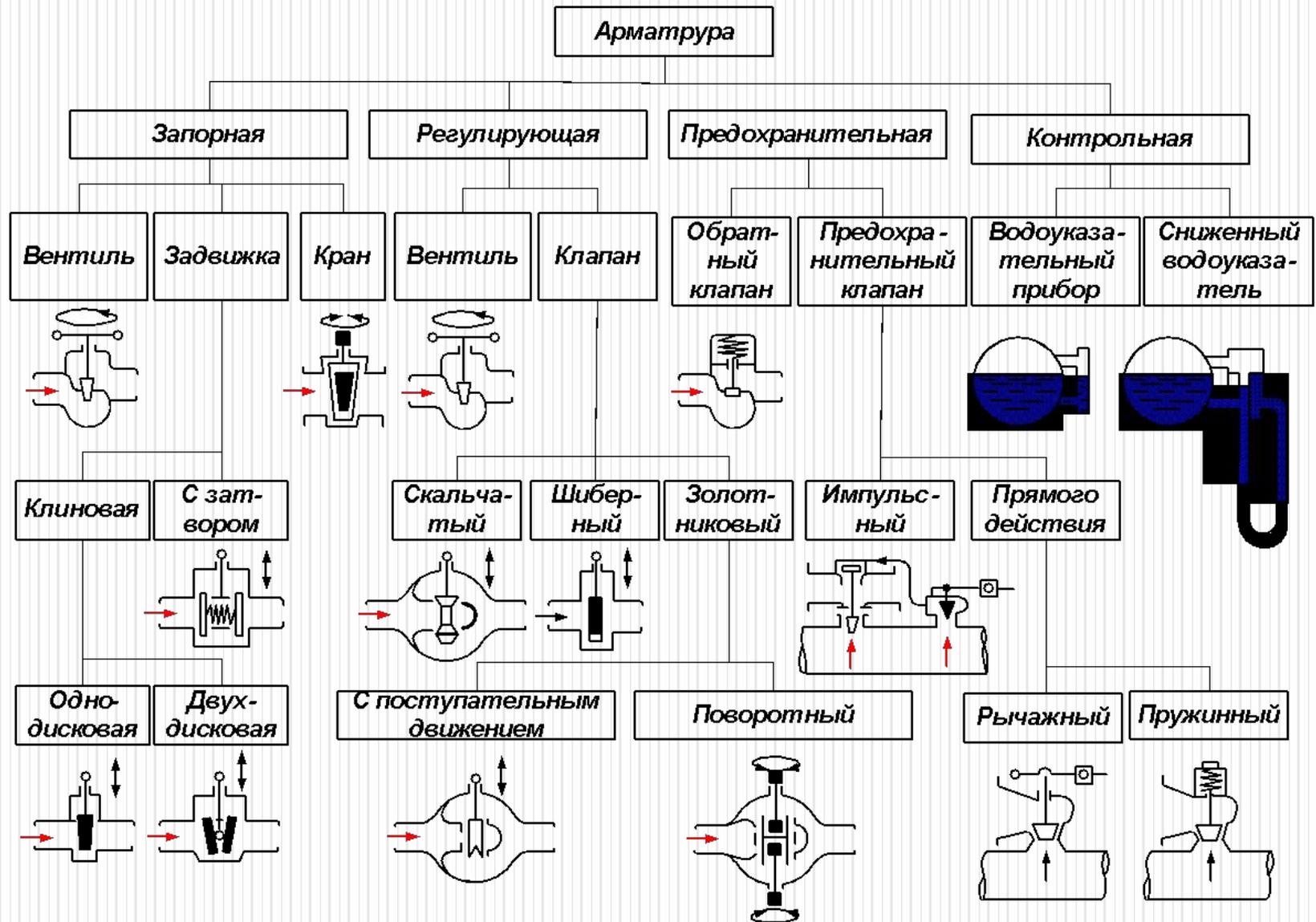
а – схема циклона с тангенциальным подводом пароводяной смеси;  
б – компоновка тангенциальных циклонов в барабане;  
в – схема циклона с аксиальным подводом смеси;  
г – компоновка аксиальных циклонов в барабане



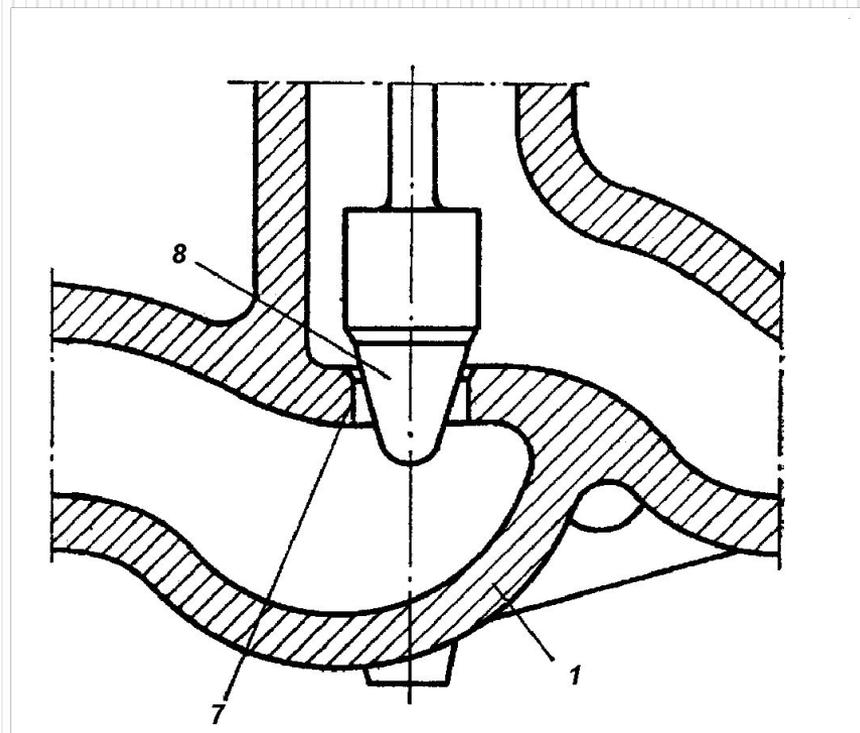
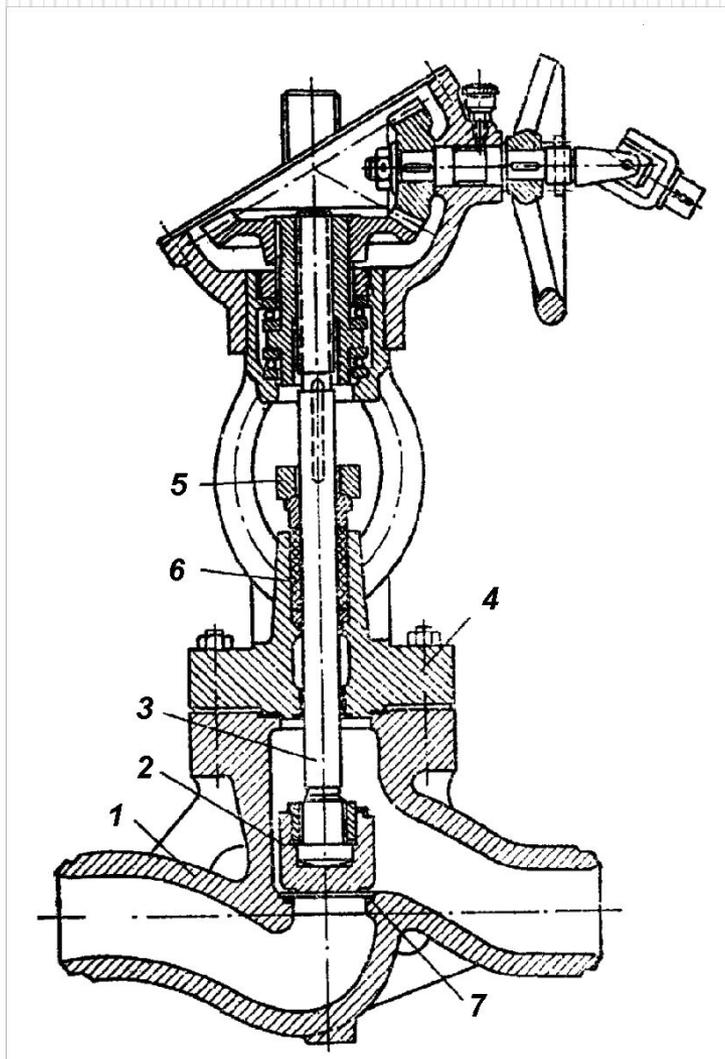
# Схема промывки пара питательной водой



# Котельная арматура

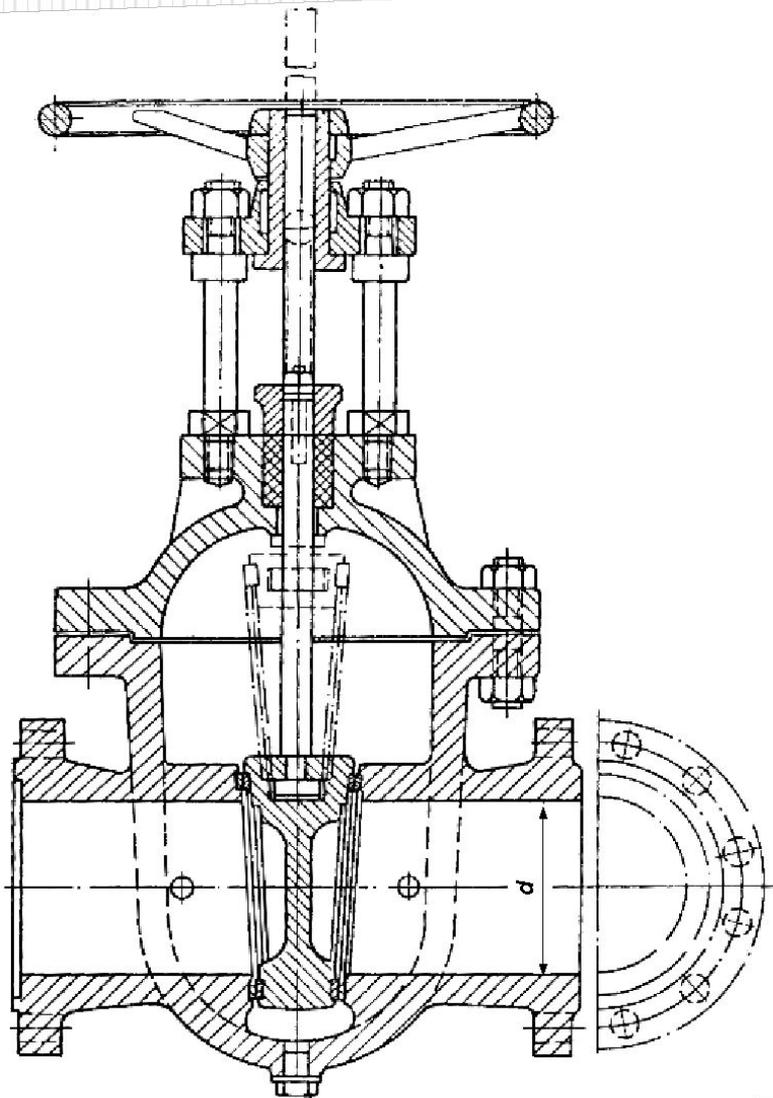


# Запорный и регулирующий вентили высокого давления

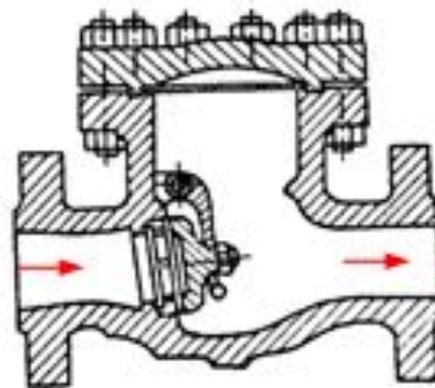
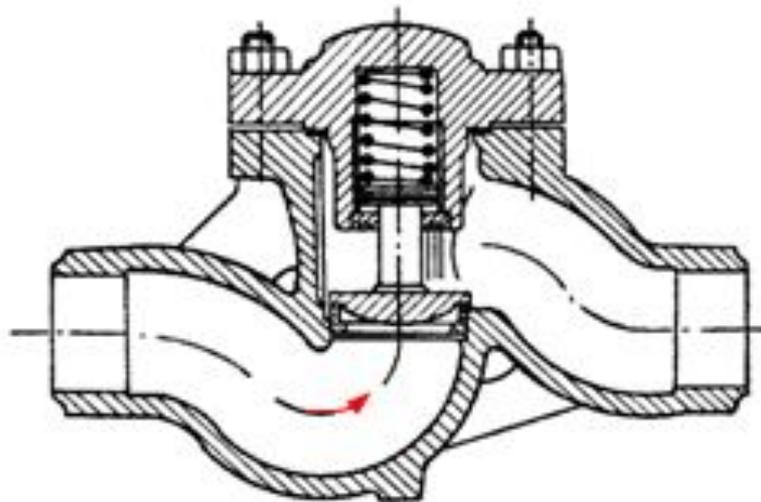


а – запорный; б – регулирующий:  
1 – корпус; 2 – тарелка; 3 – шпindelь;  
4 – крышка; 5 – сальник; 6 – набивка; 7 – седло;  
8 – профилированный конус затвора

## Запорная задвижка

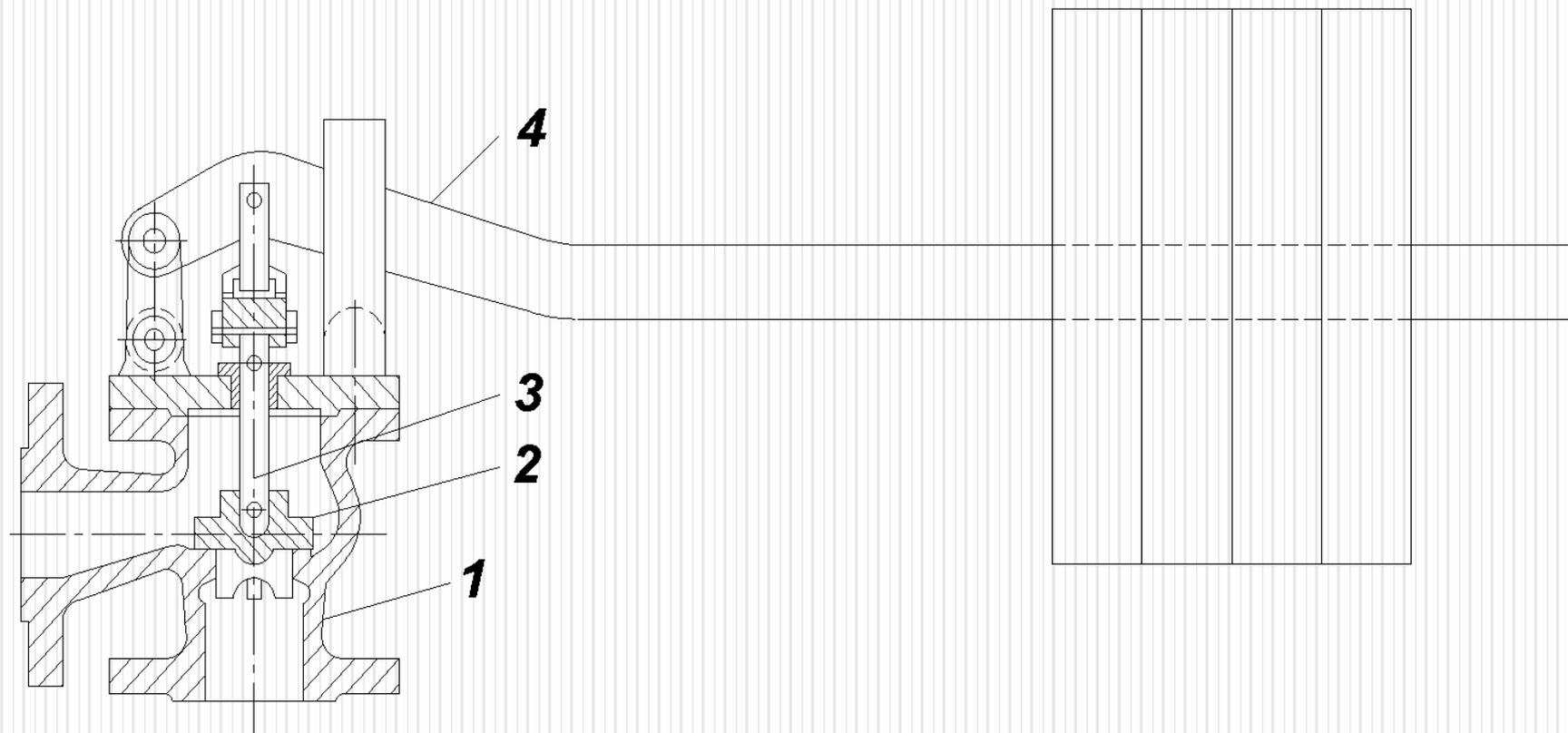


## Обратные клапаны



а – пружинный; б – клапан-хлопушка

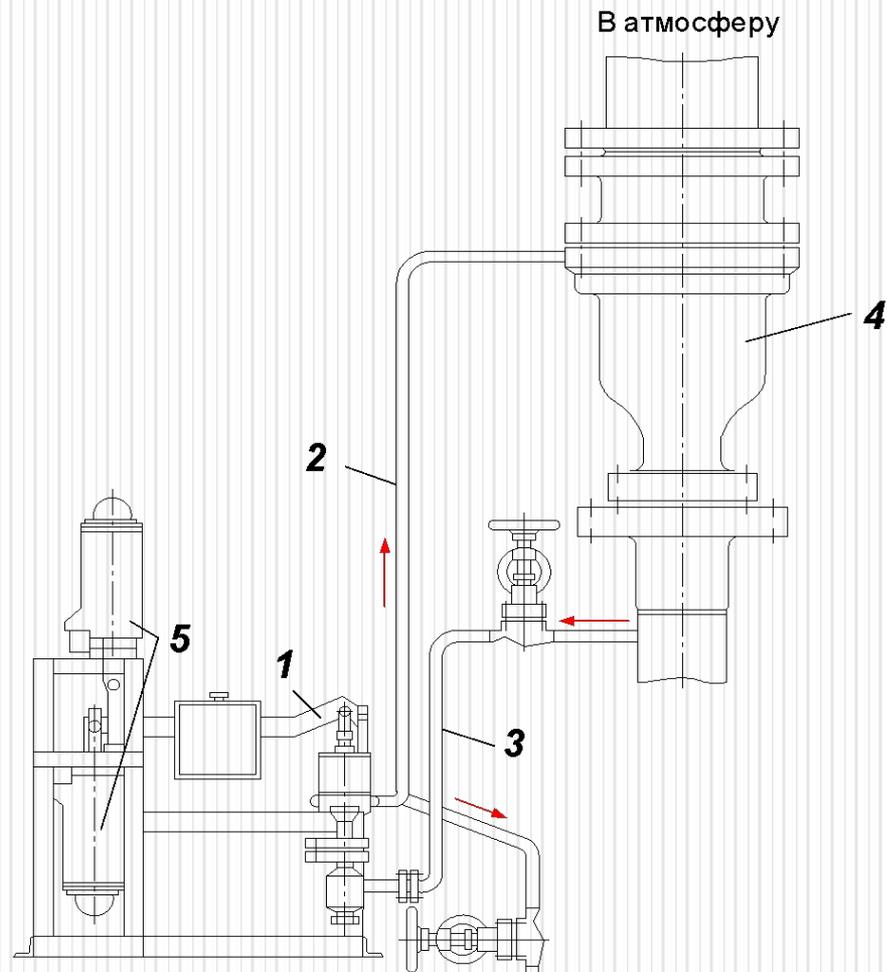
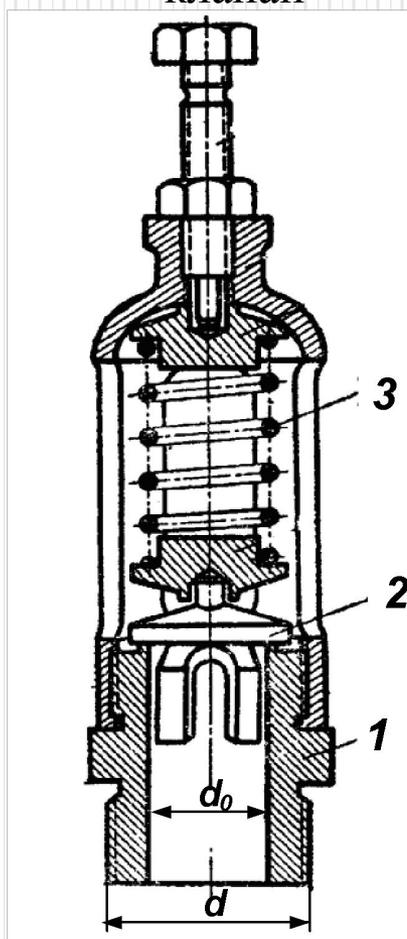
# Рычажный предохранительный клапан



1 – корпус; 2 – тарелка; 3 – шпindelь; 4 – рычажно-грузовой механизм

# Предохранительные клапаны

## Пружинный предохранительный клапан



1 – импульсный клапан; 2 – соединительная труба; 3 – дренажная линия; 4 – главный предохранительный клапан; 5 – электромагниты

# Указатель уровня воды

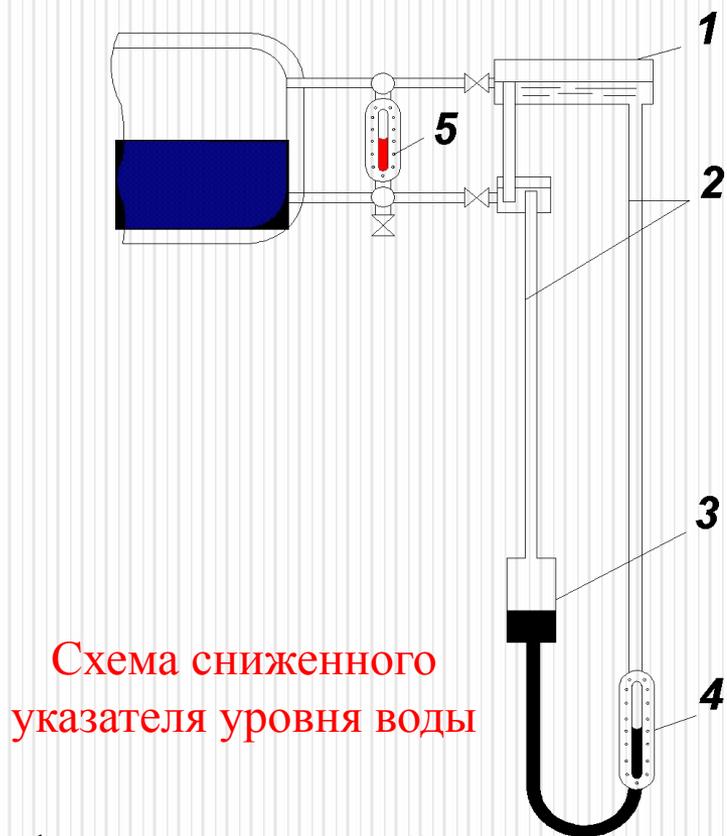
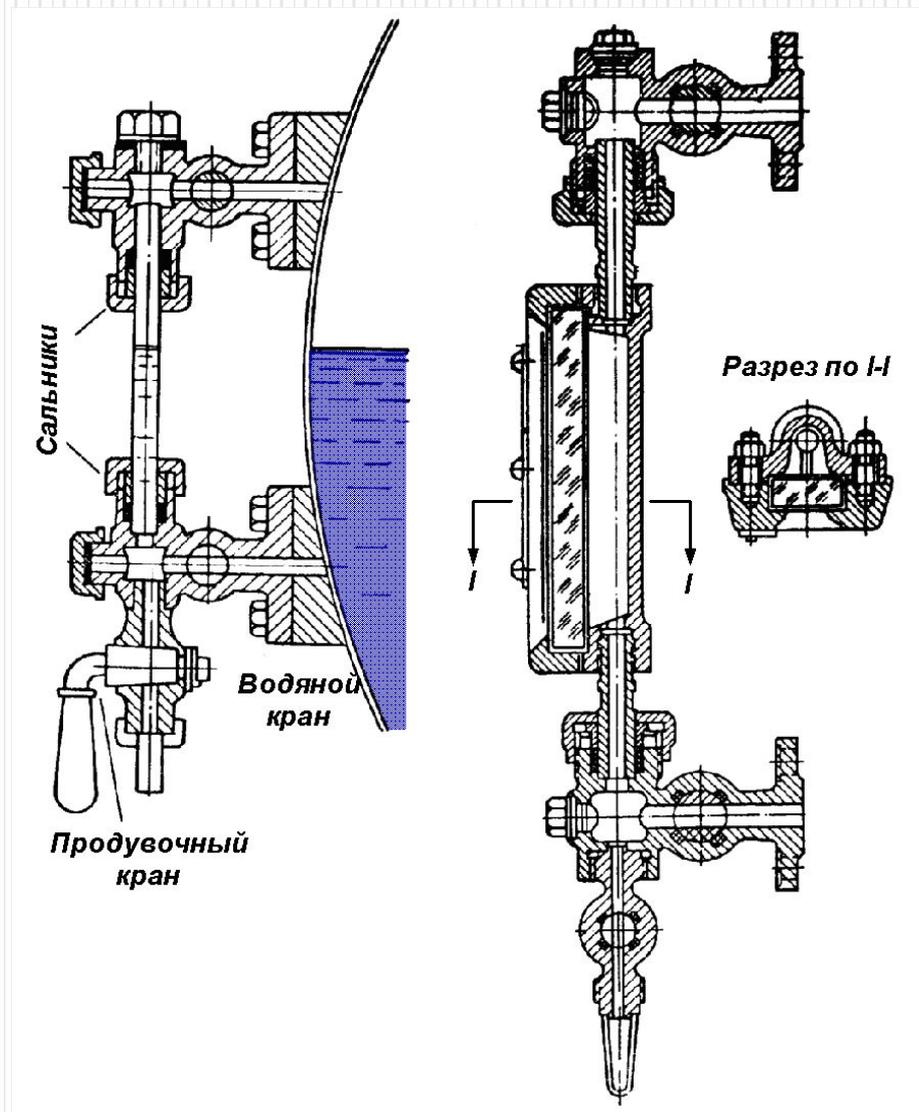


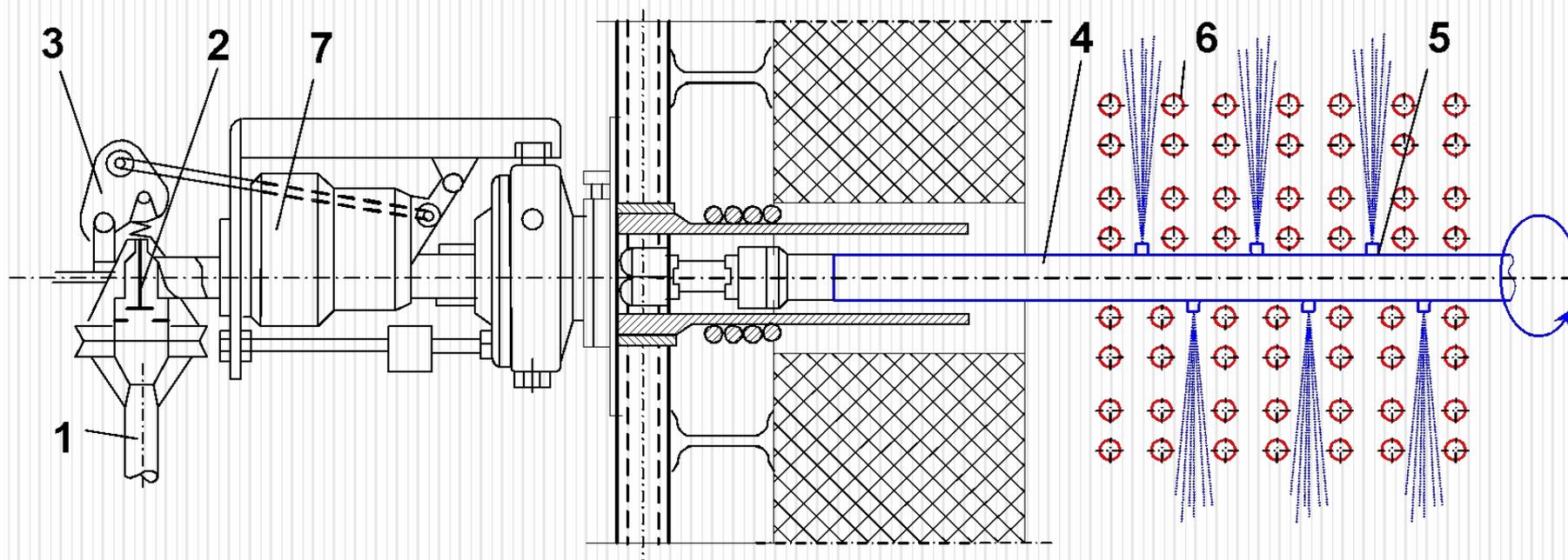
Схема сниженного  
указателя уровня воды

- 1 – компенсационный сосуд;
- 2 – соединительные трубки;
- 3 – расширительный сосуд;
- 4 – нижняя водоуказательная колонка;
- 5 – верхняя водоуказательная колонка



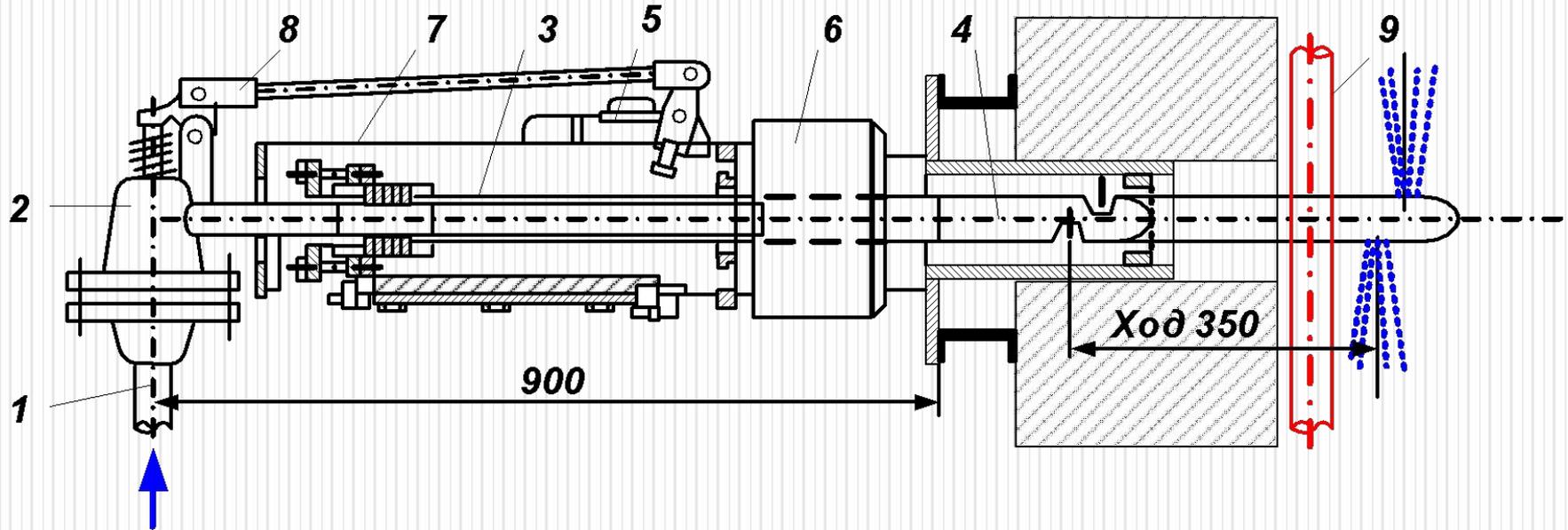
# Арматура котла

## ПАРОВОЕ ОБДУВОЧНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНВЕКТИВНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ



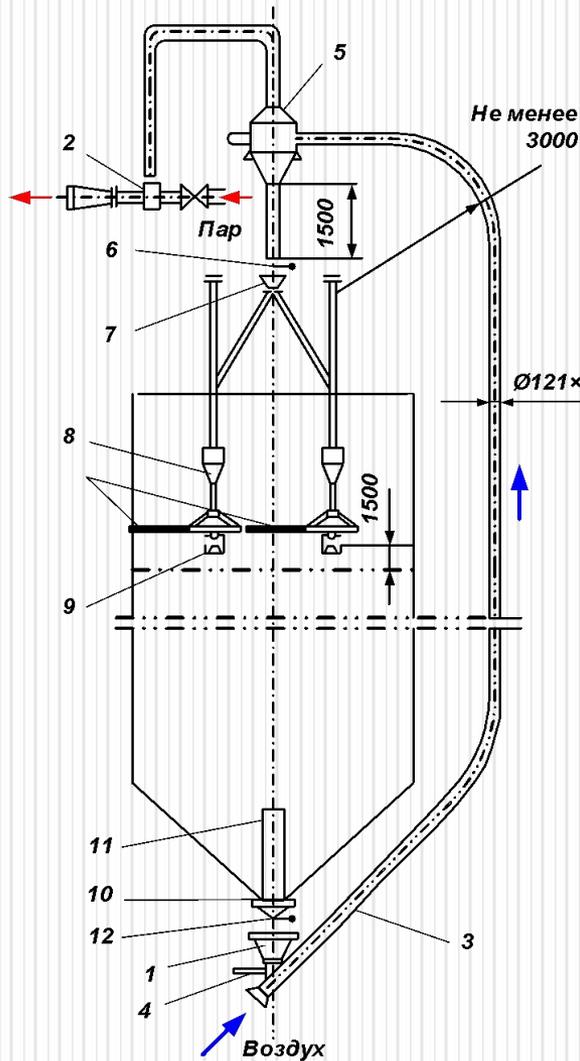
1 – подача пара; 2 – клапан; 3 – механизм управления клапаном;  
4 – обдувочная труба из жаропрочной стали; 5 – сопло; 6 – трубка перегревателя; 7 – электрический двигатель

# Маловыдвижной обдувочный аппарат



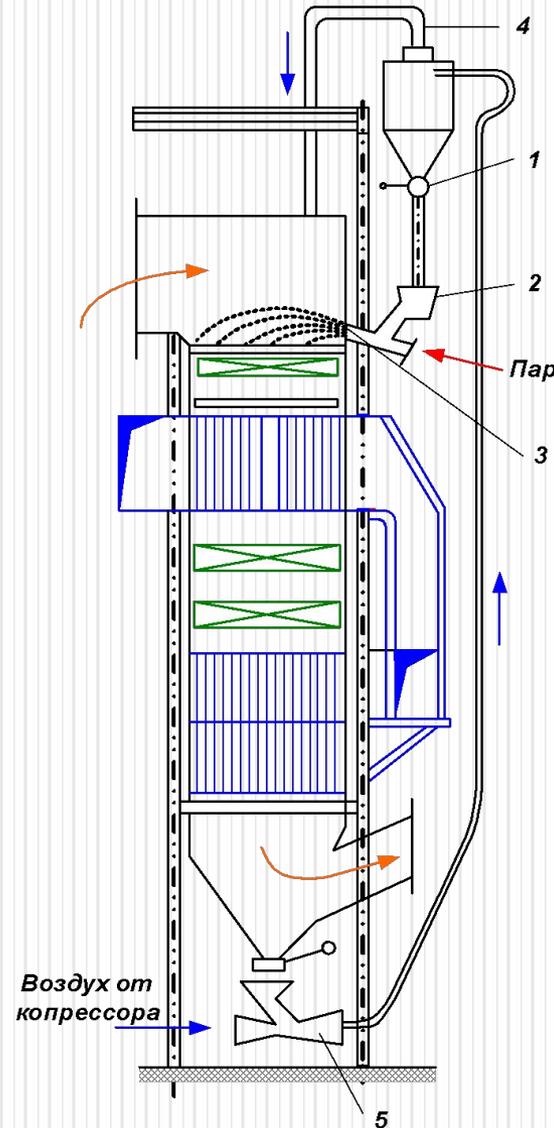
- 1 – подвод пара; 2 – клапан; 3 – шпindelь; 4 – обдувочная головка с двумя соплами Лаваля диаметром 20 мм; 5 – электродвигатель; 6 – редуктор; 7 – корпус; 8 – рычажной механизм привода клапана; 9 – экранная труба

# Схема дробеочистки



Под  
разрежением

- 1 – бункер для хранения дробы;
- 2 – эжектор на паре или на воздухе;
- 3 – дробепровод;
- 4 – питатель дробы;
- 5 – циклонный дробеуловитель;
- 6 – мигалка коническая;
- 7 – промежуточный бункер с сеткой;
- 8 – замедлитель дробы;
- 9 – разбрасыватель дробы полусферической формы с отбойным кольцом;
- 10 – сепаратор дробы;
- 11 – труба для провеивания дробы;
- 12 – мигалка плоская;
- 13 – подвод и отвод охлаждающей воды



Под  
давлением

- 1 – мигалка коническая;
- 2 – тарельчатый питатель дробы;
- 3 – пневматический разбрызгиватель дробы, расположенный на задней стенке конвективного газохода;
- 4 – сброс в газоход отработанного в аппарате воздуха;
- 5 – инжектор

