ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
"ФИРМА ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ ОРГРЭС"

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАЛАДКЕ ВНУТРИКОТЛОВЫХ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ

СЛУЖБА ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА ОРГРЭС

Москва 2001

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.311

Составлено Открытым акционерным обществом "Фирма по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС"

Исполнитель канд. техн. наук *А.И. ФЕДОРОВ*

© СПО ОРГРЭС, 2001

Подписано к печати 29.05.2001 | Формат 60 × 84 1/8
Печать ризография | Усл.печ.л. 6,6 Уч.-изд. л. 6,7 | Тираж 350 экз.
Заказ № 361 | Издат. № 00-149

Лицензия № 040998 от 27.08.99 г.

Производственная служба передового опыта эксплуатации
энергопредприятий ОРГРЭС
105023, Москва, Семеновский пер., д. 15

ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы барабанных котлов во многом определяется "правильной" (надежной) работой внутрикотловых сепарационных устройств. От того насколько "правильно" работают сепарационные устройства зависит долговечность пароперегревателя, запорной арматуры, а также рабочая кампания турбины. Кроме того, "правильная" работа сепарационных устройств существенным образом влияет на надежность циркуляционных контуров котла. От "правильной" и надежной работы сепарационных устройств зависит также величина непрерывной продувки, а значит и к.п.д. (нетто) котла. Все вместе взятое накладывает довольно жесткие требования на состояние и конструкцию сепарационных устройств. В практике эксплуатации котельных установок ТЭС и котельных встречаются случаи превышения норм ПТЭ по качеству пара, солевых перекосов между отсеками, малой кратности между ступенями испарения, превышения величин непрерывных продувок котлов, установленных нормами, ограничения паровых нагрузок котлов по качеству пара и т.д. Однако практическое пособие по наладке сепарационных устройств отсутствует.

Использование данных Рекомендаций позволит повысить надежность и экономичность, а также уровень эксплуатации котельных установок.

Действие Рекомендаций распространяется на барабанные котлы с естественной циркуляцией давлением 1,4-13,8 МПа (14-140 кгс/см^2).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

D — паропроизводительность котла, кг/ч

P — давление, кгс/см^2

D_I, D_{II}, D_{III} — соответственно паропроизводительности 1-й, 2-й и 3-й ступеней испарения, т/ч

$n_I = \frac{D_I}{D} \cdot 100\,\%$, $n_{II} = \frac{D_{II}}{D} \cdot 100\,\%$, $n_{III} = \frac{D_{III}}{D} \cdot 100\,\%$ — соответственно относительные паропроизводительности 1-й, 2-й и 3-й ступеней испарения, в % от паропроизводительности котла

$p = \frac{D_{пр}}{D} \cdot 100\,\%$ – величина непрерывной продувки в % от паропроизводительности котла

$S_{пв}$, $S_{квI}$, $S_{квII}$, $S_{квIII}$ – соответственно солесодержание питательной и котловых вод 1-й, 2-й и 3-й ступеней испарения, мг/кг

Na – концентрация солей натрия, мкг/кг

SiO_2 – концентрация кремнекислоты, мг/кг

$W''_{ос}$ – осевая подъемная скорость пара, м/с

$W''_{вит}$ – скорость витания, м/с (скорость, при которой вес капли равняется силе аэродинамического сопротивления)

$H_п$ – высота парового объема, м

$k = \frac{W''_{ос}}{\sqrt[4]{g \cdot \sigma \frac{\rho' - \rho''}{\rho''^2}}}$ – удельная безразмерная паровая нагрузка.

ρ', ρ'' – плотность воды и пара на линии насыщения, кг/м^3

g – ускорение свободного падения, м/с^2

σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, н/м

x – массовое паросодержание

ζ – коэффициент сопротивления

λ_o – приведенный коэффициент трения

K – кратность циркуляции

W_o – скорость циркуляции воды, м/с

$G_{оп}$ – расход воды по опускной системе, кг/с

ПВ – питательная вода

НП – насыщенный пар

КВ – котловая вода

ПП – перегретый пар

ПВС – пароводяная смесь

СУ – сепарационные устройства.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВНУТРИКОТЛОВЫХ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Элементы паровых котлов, в которых осуществляется отделение пара от воды или снижение концентрации солей в паре, называются сепарационными устройствами (СУ). Сепарационные устройства котлов должны обеспечивать (при различных режимных и водно-химических условиях) надежную работу котла, исключающую занос солями пароперегревателя и турбины, расстройства циркуляции и отложение накипи на обогреваемых элементах котла. Выработка котлом пара, удовлетворяющего нормам ПТЭ [1], обеспечивает длительную надежную работу котла и турбины.

Примеси, содержащиеся в насыщенном паре котла, могут попадать туда двумя путями: в связи с механическим уносом влаги (капелек котловой воды) и в связи с непосредственным их растворением в паре (избирательный вынос).

Содержание солей в паре $C_п$ определяется по формуле

$$C_п = 0{,}01 \cdot (w + \kappa_р) \cdot C_{кв}, \qquad (1)$$

где $C_{кв}$ – содержание примесей в котловой воде;

w – коэффициент механического уноса, численно равный влажности пара, %. (Работами ЭНИН, МЭИ и МО ЦКТИ показано, что концентрация веществ в каплях влаги и котловой воде, из которой образуется пар, одинаковы);

$\kappa_р$ – коэффициент распределения данного соединения между паром и водой (непосредственное физико-химическое растворение вещества в паре), %.

Для котлов низкого и среднего давления $\kappa_р = 0$ для основных солей, по которым нормируется пар (Na, SiO_2 и т.д.) [2]. У котлов высокого давления ($P_б > 70$ кгс/см^2) наряду с капельным уносом имеет место значительный избирательный вынос различных солей, прежде всего кремнекислоты (SiO_2). В соответствии с этим и принципы построения сепарационных устройств котлов среднего и высокого давления различны.

Прохождение пара через слой воды (барботаж) сопровождается отрывом капель влаги от зеркала испарения и последующим их забросом в паровой объем барабана. В барабанных котлах процесс барботажа происходит в паропромывочных устройствах, в дырчатых погружных листах, в любых других сепарационных устройствах при подводе пара под уровень воды барабана; условно к барботажному процессу можно отнести и процесс разделения пара от воды во внутрибарабанных и выносных циклонах (только там наряду с процессом барботажа идет и процесс инерционного разделения пара от воды). Образование капель влаги при барботаже обусловлено как за счет динамического воздействия парового потока, так и высвобождения поверхностной энергии при разрыве оболочек всплывающих пузырей. При разрыве оболочек паровых пузырей могут образовываться капли широкого спектра диаметров. Это обусловлено переменной толщиной пленки пузыря, которая в момент разрыва имеет минимальное значение в верхней части купола, а максимальное значение у основания пузыря (за счет стока влаги). Дополнительный выброс в основном крупнодисперсной влаги происходит также за счет смыкания кольцевых волн, образующихся при заполнении жидкостью нижней полусферы пузыря.

В области малых скоростей пара (нагрузок) основное количество капель влаги генерируется за счет разрыва оболочек паровых пузырей. С увеличением скорости пара (нагрузки) увеличивается генерация капель влаги за счет динамического воздействия парового потока. Скорость парового потока существенным образом влияет на высоту подъема капель влаги, образующихся при барботаже. На начальном участке подъема оторвавшихся капель (подпрыгивание) их скорость, как правило,

выше скорости парового потока и поэтому они тормозятся. Например, по данным [2], для капель диаметром 0,2 мм, взлетающим в неподвижном водяном паре (с давлением 110 кгс/см^2) высота подъема капель составляет около 10 мм. В некоторый момент скорости пара и капли сравниваются и капли при этом могут увлекаться паровым потоком. Скорость, при которой сила аэродинамического сопротивления капли равняется весу капли называется скоростью витания. Если скорость парового потока меньше скорости витания, то такие капли "подпрыгнув" на определенную высоту могут выпасть из парового потока обратно на зеркало испарения (осадительная сепарация). Если скорость парового потока выше скорости витания, то такие капли могут транспортироваться на любую высоту (несепарируемые капли). Как уже говорилось, в паровой объем барабана выбрасывается громадное количество капель с широким спектром скоростей и диаметров. При увеличении диаметра капли скорость витания капли увеличивается, а значит и отсепарировать крупные капли легче, чем мелкие. Причину увеличения влажности (солесодержания) пара при увеличении нагрузки котла (осевой подъемной скорости пара в барабане) можно объяснить тем, что по мере возрастания нагрузки котла из парового объема барабана могут быть вынесены все более и более крупные капли. Если при небольших нагрузках котла $W''_{ос} > W''_{вит}$ только для мельчайших капель, то по мере увеличения нагрузки $W''_{ос} > W''_{вит}$ уже для все более крупных капель. Например, по данным [3], для капли диаметром 2 мм скорость витания будет:

при P = 14 кгс/см^2 $W''_{вит}$ = 1,96 м/с;

P = 40 кгс/см^2 $W''_{вит}$ = 1,4 м/с;

P = 110 кгс/см^2 $W''_{вит}$ = 0,7 м/с;

P = 155 кгс/см^2 $W''_{вит}$ = 0,45 м/с.

Работа сепарационных устройств котлов характеризуется кроме солесодержания (концентрация солей натрия) пара еще и влажностью (коэффициентом уноса)

$$\omega = \frac{Na_п}{Na_{кв}} \cdot 100\,\%, \qquad (2)$$

где $Na_п$ – концентрация солей натрия в паре;

$Na_{кв}$ – концентрация солей натрия в котловой воде.

Между влажностью пара и паропроизводительностью котла D существует зависимость

$$\omega = A \cdot D\%, \qquad (3)$$

где A – коэффициент, зависящий от конструкции сепарационных устройств, давления, солесодержания котловой воды и его "букета", а также и от других параметров.

В логарифмической системе координат вид зависимости (3) представляет собой ломаную линию с разными показателями степени для разных нагрузок.

В зависимости от нагрузки котла можно выделить, как минимум, три области [4] – [8].

В первой области показатель степени составляет 1 – 2,5 (в зависимости от конструкции сепарационных устройств), при этом влажность отпускаемого пара составляет от 0 до 0,03%. Основное количество влаги в этой области генерируется за счет разрыва оболочек паровых пузырей (малые скорости пара, а следовательно и малое значение кинетической энергии пара), а унос определяется транспортировкой мельчайших капель влаги.

Во второй области нагрузок показатель степени находится в пределах от 2,5 до 4,0, а влажность отпускаемого пара имеет значение от 0,03 до 0,2%. В этой области основное количество капель образуется за счет динамического воздействия парового потока.

В третьей области показатель степени равен 8 – 10, а влажность отпускаемого пара более 0,2%. В этой области процесс носит кризисный характер и действительный уровень воды в барабане приближается к пароотборным трубам.

Точка перехода из 2-й области в 3-ю называется критической и работа сепарационных устройств в этой области недо-

пустима. Работа котла в 3-й области сильно зависит от нагрузки, при этом влажность отпускаемого пара составляет 0,2-1,0% и более. Ленточные солемеры показывают резкое увеличение солесодержания пара (броски).

С паровой нагрузкой котла D связаны следующие характеристики сепарационных устройств:
массовая нагрузка зеркала испарения

$$\frac{D}{F_{з\,и}} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)};$$

осевая подъемная скорость пара

$$W_o'' = \frac{D}{3600 \cdot F_{з\,и} \cdot \rho''} \text{ м/с};$$

удельная паровая безразмерная нагрузка k [9]

$$k = \frac{W_{oc}''}{\sqrt[4]{g \cdot \sigma \frac{\rho' - \rho''}{(\rho'')^2}}},$$

где $F_{з\,и}$ — площадь зеркала испарения (или площадь пароприемного потолка).

Следующий параметр, который существенно влияет на величину влажности пара, а значит и на величину критических нагрузок, это высота активного сепарационного объема. Связь между влажностью пара, паропроизводительностью и высотой парового объема $h_п$ можно представить следующей формулой [5]

$$\omega \sim M \frac{(W_o'')^{2,76}}{H_п^{2,3}} \%, \qquad (4)$$

где M — размерный коэффициент, определяемый физическими свойствами воды и пара.

Как видно из этой формулы, существует обратно пропорциональная зависимость между влажностью пара и высотой парового объема. Экспериментально было показано, что при увеличении высоты парового объема более 1000 мм, влажность пара уже практически мало зависит от дальнейшего ее увеличения [4] — [7].

На работу сепарационных устройств котлов существенное влияние оказывает **солесодержание котловой воды** ($S_{кв}$). Проявляется это следующим образом. При работе котла при постоянной паропроизводительности при увеличении солесодержания котловой воды происходит очень плавное увеличение солесодержания пара, при достижении определенного значения солесодержания котловой воды происходит резкое увеличение влажности пара котла (солесодержания), регистрирующие солемеры отмечают резкое увеличение солесодержания пара (бросок). Объяснить это можно следующим образом: по мере увеличения концентрации веществ в котловой воде и прежде всего коллоидных частиц оксидов железа, шлама и др. веществ, поверхностный слой приобретает структурную вязкость. Длительность существования паровых пузырей до их разрушения увеличивается (набухание), пленки паровых пузырей успевают утониться и при разрыве их образуется большое количество мелких капель (трудно сепарируемых), вода приобретает способность к **вспениванию**. Значение солесодержания котловой воды, при котором происходит резкое увеличение влажности пара, называется критическим ($S_{кв}^{крит}$). Величина критического солесодержания зависит от давления пара в котле, конструкции сепарационных устройств, солевого состава воды ("букета"), паровой нагрузки сепарационных устройств и т.д. Наиболее точно критическое солесодержание котловой воды можно определить только на основании теплохимических испытаний конкретного котла. Ориентировочно для котлов низкого давления величина критического солесодержания составляет около 3000 мг/кг, для котлов среднего давления — 1300—1500 мг/кг, а для котлов высокого давления — 300—500 мг/кг.

Одним из вариантов приспособления работы котлов на воде закритического солесодержания при умеренных значениях непрерывной продувки является применение **ступенчатого испарения котловой воды.** Его сущность состоит в том, что водяной объем барабана и парообразующие циркуляционные контуры разбиваются на два или три независимых отсека с подачей всей питательной воды только в 1-й отсек

и отводом воды в продувку из последнего отсека. При такой схеме питания резко возрастает "внутренняя" продувка первого (чистого) отсека, которая будет равна ($n_{ц}$ + P) % (при выполнении котла, например по двухступенчатой схеме испарения), а увеличение продувки будет составлять в $\frac{n_{ц} + P}{P}$ раза, по сравнению с котлом без ступенчатого испарения. В связи с этим концентрация солей в котловой воде 1-й ступени резко уменьшается и соответственно улучшается качество пара. Для 2-й ступени испарения концентрация солей продувочной воды будет практически такой же, как и у котла без ступенчатого испарения (при одинаковых значениях непрерывных продувок P = const для обеих схем). Если принять, что коэффициенты выноса (или влажность пара) до и после перевода котла на ступенчатое испарение были одинаковыми, то качество пара (солесодержание) котла при переводе на ступенчатое испарение будет выше, чем у котла с одноступенчатой схемой испарения. Если же качество пара (солесодержание) котла со ступенчатым испарением принять одинаковым, как и у котла без ступеней испарения, то тогда котел со ступенчатым испарением будет работать с меньшей величиной непрерывной продувки (чем котел без ступеней испарения). В отечественном котлостроении в качестве сепараторов пара последних ступеней испарения применяют, как правило, выносные циклоны. Выносные циклоны — это устройства, которые лучше всего приспособлены для работы на воде повышенного солесодержания. (За счет развития соответствующей паровой высоты и использования центробежных сил для подавления вспенивания).

В котлах высокого давления наряду с капельным уносом имеет место значительный избирательный унос различных солей и прежде всего кремнекислоты (SiO_2), за счет непосредственного физико-химического растворения солей в паре. Избирательный вынос кремнекислоты (при pH = 9,0 – 12,0) для котлов с давлением 115 кгс/см^2 составляет 2,0 – 1,0%, а для котлов с давлением 155 кгс/см^2 — 4,0 – 2,5% [9].

Для снижения кремнесодержания в паре котлов высокого давления в сепарационной схеме предусматривается паропромывочное устройство. Наличие этого устройства приводит к некоторым особенностям работы всей сепарационной схемы котлов высокого давления, по сравнению с котлами среднего давления.

В котлах высокого давления эффективность паропромывочного устройства характеризуется коэффициентом промывки

$$\lambda = \frac{SiO_{2\,н\,п}}{SiO_{2\,п\,в}}, \qquad (5)$$

где $SiO_{2\,н.п}$ — кремнесодержание пара на выходе из барабана;

$SiO_{2\,п\,в}$ — кремнесодержание питательной воды.

Коэффициент уноса с паропромывочного устройства $K_{пром}$ определяется по формуле

$$K_{пром} = \frac{SiO_{2\,н\,п}}{SiO_{2\,пром}}, \qquad (6)$$

где $SiO_{2\,пром}$ — кремнесодержание воды на паропромывочном устройстве.

Для котлов высокого давления по данным испытаний $K_{пром}$ составляет 8 – 10%.

Кремнесодержание промывочной воды определяется по формуле

$$SiO_{2\,пром} = \frac{SiO_{2\,сл} + SiO_{2\,п\,в}}{2}, \qquad (7)$$

где $SiO_{2\,сл}$ — кремнесодержание воды на сливе с паропромывочного устройства.

Степень очистки пара на паропромывочном устройстве определяется по формуле

$$E = \frac{SiO_{2\,н\,п}}{SiO_{2\,н\,п(до)}}, \qquad (8)$$

где $SiO_{2\,н\,п(до)}$ — кремнесодержание насыщенного пара до паропромывочного устройства.

Кремнесодержание пара до паропромывочного устройства определяется из следующей формулы

$$SiO_{2\ н\ п(до)} = K \cdot SiO_{2\ к\ в}, \qquad (9)$$

где $SiO_{2\ к\ в}$ – кремнесодержание котловой воды;

K – коэффициент уноса кремниевой кислоты из котловой воды в пар до промывки.

Из приведенных формул следует, что кремнесодержание пара после промывки (пар котла $SiO_{2\ н.п}$) зависит как от кремнесодержания питательной воды, так и от кремнесодержания пара до промывки.

В конечном итоге чем ниже будет кремнесодержание промывочной воды ($SiO_{2\ пром}$), тем чище будет пар котла. Концентрация кремнекислоты в промывочном слое зависит, как от качества питательной воды, так и от количества кремнекислоты, поступающей из парового объема до промывки. При неналаженной работе сепарационных устройств до промывки, наряду с избирательным уносом [формула (9)] возможен вынос значительного количества капель котловой воды, где кремнесодержание в 5–8 раз выше, чем в питательной воде. Попадание капель котловой воды на промывку (капельный унос) приводит к увеличению кремнесодержания промывочной воды и, как следует из формулы (6), приводит к увеличению кремнесодержания пара котла.

Качество пара котла зависит от следующих основных факторов:

1. Паровая нагрузка котла

Она определяет скорости пара в рабочих сечениях сепарационных устройств, а значит и нагрузки зеркала испарения и паровых объемов. Как правило с увеличением паропроизводительности котла солесодержание (влажность) пара котла возрастает [как следует из формулы (3)].

При увеличении нагрузки, а значит и скоростей пара в рабочих сечениях сепарационных устройств из парового объема барабана начинают выноситься капли все большего диаметра (с увеличением диаметра капли возрастает скорость витания капли), что приводит к увеличению влажности пара, а значит и соле-кремнесодержания пара.

2. Уровень воды в барабане

Подъем уровня воды в барабане (циклоне) приводит к уменьшению сепарационно-активной паровой высоты и, как следует из формулы (4), качество пара котла ухудшается. Во внутрибарабанных или выносных циклонах при подъеме уровня воды к вводам происходит, как бы подтормаживание закрученного потока, выходящего из тангенциального патрубка. В результате чего в паровой объем циклонов начинает выноситься значительное количество воды.

Из водяного объема барабана в паровой объем за счет барботажа выбрасывается громадное количество капель разных размеров и с разными скоростями. Чем крупнее капля и больше ее скорость, тем бóльшая высота парового объема необходима для ее сепарации (осаждения). Поэтому при снижении высоты парового объема барабана количество несепарируемых капель возрастает, что и приводит к ухудшению качества пара.

3. Солесодержание, кремнесодержание котловой (питательной) воды

С увеличением солесодержания котловой воды, как следует из формулы (2), даже при постоянной влажности пара (ω = const) происходит непрерывный рост солесодержания пара. При достижении солесодержания котловой воды критического значения происходит резкое ухудшение качества пара. Для возможности работы котлов на воде закритического солесодержания применяют ступенчатое испарение, с установкой в солевых отсеках циклонов.

2. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ СРЕДНЕГО И ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Конструкцию и работу сепарационной схемы котлов среднего давления рассмотрим на примере котла ЦКТИ-75-39 (рис. 1).

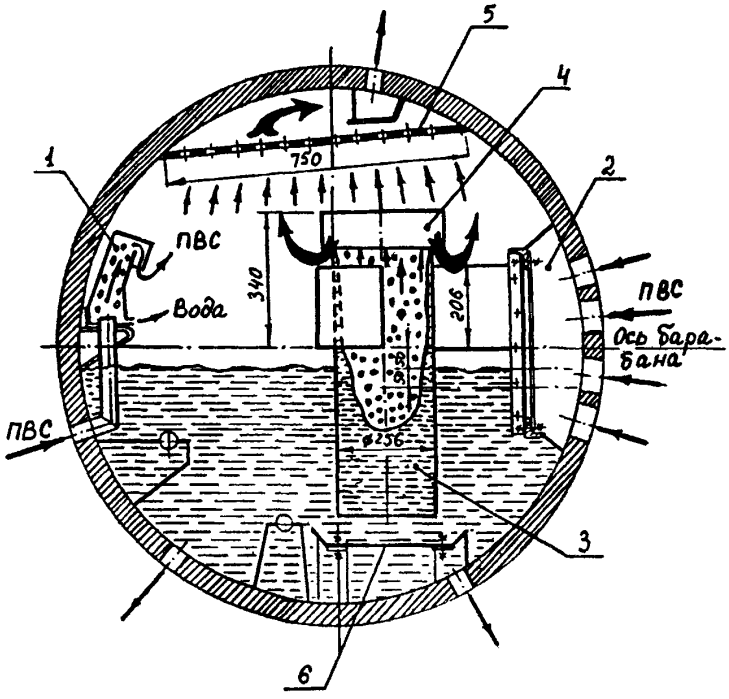


Рис. 1. Сепарационная схема котла ЦКТИ-75-39:
1 – распределитель питательной воды; 2 – короб приема пароводяной смеси; 3 – внутрибарабанный циклон; 4 – колпак; 5 – дырчатый пароприемный потолок, 6 – поддон; ПВС – пароводяная смесь

Пароводяная смесь после экономайзера подводится в барабан по 35 трубам и далее она поступает в распределитель питательной воды с отражательными щитками. Вода вытекает на зеркало испарения через систему отверстий, а пароводяная смесь, сделав поворот на отражательном щитке, поступает в паровой объем.

Пароводяная смесь от фронтового и заднего экранов подводится в короб приема пароводяной смеси, из которого по патрубкам поступает в 18 улиточных циклонов диаметром 250 мм. В циклонах, за счет действия центробежных сил происходит грубое разделение пара от воды. Вода по винтовой линии отводится вниз в водяной объем; для гашения крутки водяного объема в каждом циклоне устанавливаются крестовины, а для уменьшения сноса пара в опускные трубы под циклонами устанавливаются поддоны. Над всеми циклонами устанавливаются "колпаки", которые поворачивают поток пара на 180° и подают в паровой объем. В паровом объеме происходит осадительная сепарация капель влаги, если $W''_{ос} < W''_{вит}$, то капли "выпадают" из парового потока (падают на зеркало испарения), если $W''_{ос} > W''_{вит}$, то капли могу транспортироваться паровым

потоком из барабана через дырчатый пароприемный лист в отводящие трубы.

Пароводяная смесь от передних панелей боковых экранов подается в четыре внутрибарабанных циклона, расположенных в торцах барабана. Пар после указанных циклонов сначала направляется в торец барабана, а затем, повернув на 180°, поступает в центральную часть барабана (удлинение пути движения пара, а значит и лучшая сепарация).

Пароводяная смесь задней панели боковых экранов подводится в два выносных циклона диаметром 377 мм, пар из которых подводится в торцы барабана, а питание циклонов осуществляется из водяного объема барабана.

Конструкцию и работу сепарационной схемы котлов высокого давления рассмотрим на примере котла БКЗ-210-140 (рис. 2).

Вода после экономайзера по 12 трубам диаметром 60 мм подводится в 12 питательных коробов диаметром 108×4,5 мм, из которых по системе отверстий диаметром 10 мм (20 отверстий в каждом коробе) выливается на корытчатое паропромывочное устройство (100%-ная подача питательной воды на промывку). Пароводяная смесь от экранов чистого отсека поступает в приемные короба, а далее по системе подводящих коробов внутрибарабанных циклонов (22 короба на фронтовой части барабана и 22 короба на задней части барабана) поступает в циклоны. В циклонах, за счет действия центробежных сил происходит грубое разделение пара от воды. Вода по винтовой линии отводится вниз, в водяной объем (для гашения крутки водяного объема в нижней части корпуса циклонов установлены лопастные вставки). Для

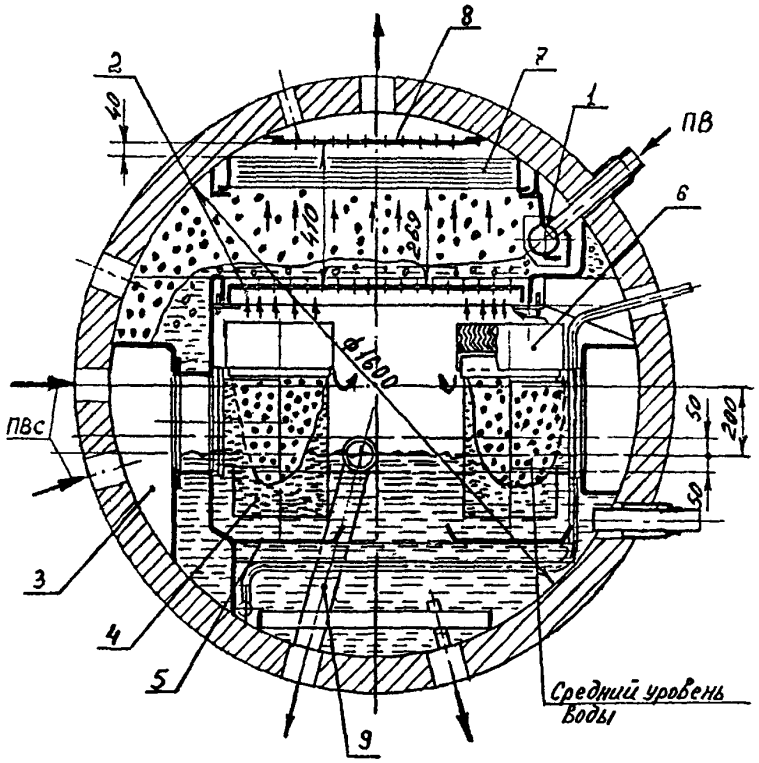


Рис. 2. Сепарационная схема котла БКЗ-210-140:

1 – питательный короб; 2 – паропромывочное устройство; 3 – приемный короб пароводяной смеси; 4 – внутрибарабанный циклон; 5 – поддон; 6 – жалюзийная крышка циклона; 7 – жалюзийный сепаратор; 8 – дырчатый пароприемный потолок; 9 – аварийный слив

уменьшения сноса пара в опускные трубы под циклонами установлены поддоны (лопастные вставки также уменьшают снос пара). Над каждой парой циклонов устанавливаются жалюзийные крышки для осушки пара на выходе из циклонов. Пар вместе с каплями влаги после жалюзийных крышек "напрямую" поступает к паропромывочному устройству. Из-за малого расстояния между жалюзийной крышкой циклонов и паропромывочным устройством (около 90 мм) вся влага (капли) после циклонов непосредственно поступает на промывочный лист. В паропромывочном корытчатом устройстве за счет контакта пара с "чистой" питательной водой происходит снижение концентрации прежде всего кремнекислоты, а также и других солей (NaCl, Na_2SO_4 и т.д.). Промывочная вода по системе сливных каналов стекает в водяной объем барабана, а промытый пар поступает в паровой объем ($H''_{\text{п}} = 269$ мм), где происходит осадительная сепарация капель из пара, а также капель, подбрасываемых с промывочного листа за счет динамического воздействия парового потока. Далее пар поступает в жалюзийный сепаратор, в котором за счет инерционных сил капли в паре могут сепарироваться на волнистых пластинах жалюзи и при определенных условиях в виде пленки стекать на промывочный лист. Затем пар поступает в дырчатый пароприемный потолок, который служит для выравнивания осевых подъемных скоростей пара по длине барабана и через систему отводящих труб поступает во входной коллектор потолочного пароперегревателя.

Разделение пара от воды во 2-й ступени испарения осуществляется в выносных циклонах диаметром 426×35 мм с внутренней улиткой (по два циклона с каждой стороны). Питание выносных циклонов осуществляется из чистого отсека барабана по трубам диаметром 133×10 мм, по одной трубе с каждой стороны. Отвод пара из выносных циклонов осуществляется по трубам диаметром 133×10 мм (по 4 трубы с каждой стороны) в барабан котла под паропромывочное устройство.

В котлах с паропромывочным устройством решающее влияние на качество пара оказывает качество промывочной воды. Часть пара, вырабатываемого экранами, проходя паропромывочное устройство, конденсируется (если экономайзер некипящий), нагревая питательную воду до температуры насыщения. Таким образом, количество пара, образующегося в экранной системе котла, оказывается больше его полезной паропроизводительности на величину, зависящую от параметров пара, количества и температуры подаваемой на промывку воды. Относительное количество сконденсировавшегося пара вычисляется по формуле

$$\frac{G}{D} = \frac{a \cdot (1 + y) \cdot (i' - i_{\text{пв}})}{r}, \qquad (10)$$

где G – количество образовавшегося конденсата;

a – доля общего количества питательной воды, подаваемой на промывку;

$y = \frac{D_{\text{пр}}}{D}$ – относительная величина непрерывной продувки котла;

i' – энтальпия воды при температуре насыщения, ккал/кг;

$i_{\text{пв}}$ – энтальпия питательной воды, поступающей на паропромывочное устройство, ккал/кг;

r – скрытая теплота парообразования.

Из анализа формулы (10) следует, что при работе котла с отключенным ПВД ($t_{\text{пв}} = 150$°С) количество сконденсировавшегося пара возрастет. При подаче на промывочный лист, например, только 50% питательной воды количество сконденсировавшегося пара уменьшается приблизительно в 2 раза.

Величина капельного уноса из парового объема до промывочного устройства (паровая нагрузка парового объема до промывочного листа) зависит от W''_{oc} : чем выше паровая нагрузка, тем больше вынос капель воды из парового объема на промывочный лист. Капли котловой воды, попадающие на промывочное устройство, ухудшают качество промывочной воды, а значит и ухудшают качество промытого пара после паропромывочного устройства.

Из приведенных данных видно, что чем значительнее температура питательной воды отличается от температуры насыщения, то тем больше паропроизводительность экранов (паровая нагрузка циклонов) отличается от паропроизводительности котла и тем выше капельный унос на промывочный лист. Таким же образом влияет на количество сконденсировавшегося пара и количество подаваемой на промывку питательной воды. По данным АО "Фирма ОРГРЭС" и ряда других организаций для нормальной работы паропромывочного устройства вполне достаточна 50%-ная подача питательной воды на промывку.

При эксплуатации котлов необходимо обязательное включение ПВД. В случаях, когда ПВД отключен, необходимо снижение нагрузки котла ориентировочно до 60-80% номинальной паропроизводительности котла.

3. МЕТОДИКА НАЛАДКИ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

3.1. ОСМОТР СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Основные задачи осмотра внутрикотловых сепарационных устройств заключаются в выявлении соответствия выполненных устройств проекту и нормам проектирования, в выявлении дефектов, повреждений и т.д., которые могут привести при эксплуатации к снижению надежности работы котла (ухудшению качества пара, расстройству циркуляции и т.д.).

3.1.1. Подготовка к внутреннему осмотру

При подготовке к внутреннему осмотру необходимо:

1. Подробно ознакомиться с проектом котла по внутрикотловым устройствам. Ознакомиться с режимами работы котла (регулировочный режим, сбросы нагрузки и давления и т.д.), с состоянием воднопродувочного режима котла.

2. Подготовить необходимые приборы и приспособления:

а) переносную лампу с длинным шнуром на 12 В;

б) гидравлический уровень для измерения горизонтальности барабана и отметок всех водоуказательных приборов (по отношению к оси барабана);

в) длинный резиновый шланг, подключаемый, как правило, к пожарному водопроводу, для определения плотности сварных швов и сборки сепарационных устройств;

г) метр (рулетку), штангенциркуль и мел.

3. Составить подробную циркуляционно-сепарационную схему котла с указанием скоростей среды в основных рабочих сечениях устройств и выявить наиболее "слабые" места в данной схеме, в том числе и по узлу регулирования температуры перегретого пара.

3.1.2. Осмотр внутрикотловых сепарационных устройств

Дырчатые пароприемные потолки

Проверяется отрыв или прогиб листов, наличие щелей, соответствие диаметра и количества отверстий проекту (или нормам), их зашламленность, плотность короба потолка, точное геометрическое местоположение листов по отношению к телу барабана, в особенности по высоте.

Паропромывочные устройства

Проверяется отрыв, прогиб, сдвиг дырчатых листов, соответствие диаметра и количества отверстий проекту и их зашламленность, высота порога на переливе, количество и сечение сливных коробов, точное геометрическое местоположение листов по высоте барабана, плотность короба, образуемого листами и сливными коробами (пар до промывки должен поступать только через отверстия дырчатых листов).

Внутрибарабанные циклоны

Проверяется отрыв с места циклонов, их крышек, плотность соединения циклонов с коробами приема пароводяной смеси и наличие прокладок между ними, эллиптичность циклонов, точное местоположение их по высоте, наличие щели в паровом объеме циклона между корпусом и крышкой (так называемый замок) для удаления пленки влаги; отсутствие в корпусе циклона в месте приварки улитки выступов, шероховатостей, сварочного грата и т.д.; наличие в водяном объеме лопастных вставок или крестовин и поддонов; отсутствие в корпусе циклонов сквозных отверстий.

Короба приема пароводяной смеси к внутрибарабанным циклонам

Проверяется плотность, наличие щелей и непроваров в этих коробах. (Особенно опасны неплотности коробов, находящиеся в паровой части барабана и примыкающие к коробу дырчатого потолка). Плотность этих коробов проверяется, как правило, только при опрессовке их водой при демонтированных циклонах.

Короба подвода питательной воды

Проверяется плотность, наличие щелей и непроваров в этих коробах. (Особенно опасны неплотности этих коробов из-за близкого их примыкания к дырчатым пароприемным потолкам). Плотность этих коробов проверяется опрессовкой их водой.

Линии подвода фосфатов (и других химических реагентов), разогрева барабана и др.

Проверяется плотность, наличие непроваров этих труб, диаметр и количество отверстий и их расположение на трубах.

Солевые внутрибарабанные отсеки

Проверяется плотность перегородок между ступенями испарения, наличие перегородок в коллекторах циркуляционных контуров. Измеряется сечение пароперепускного окна и трубы (короба) питания солевого отсека. Проверяется правильность подключения опускных, пароподводящих и питательных труб и отсутствие перекрытия сечения каких-либо труб сепарационными устройствами.

Солевые выносные отсеки

Проверяется правильность подключения циркуляционных труб к выносным циклонам и их диаметры. Проверяется правильность подключения к циклону непрерывной продувки котла. При ревизии самого циклона проверяется правильность выполнения улитки, дырчатого потолка и крестовины в водяном объеме. Промеряется отметка установки ввода в циклон по отношению к геометрической оси барабана.

Шламовые следы на теле барабана

По шламовым следам на теле барабана (или элементах сепарационных устройств) можно точно установить зону колебания уровня воды в барабане (или отсека). Кроме того, можно точно установить некоторые дефекты сборки, так как возле места прорыва струй (минуя сепарационное устройство), на теле барабана видны шламовые следы (подтеки и языки в виде веера). В частности, хорошо заметны по характерным белесоватым подтекам прорывы питательной воды из коробов подвода или насадков.

Линии отборов проб котловой воды

Проверяется плотность и наличие непроваров на линиях отборов проб котловой воды. Это необходимо в связи с тем, что очень часто зонд отбирает пробу воды, например солевого отсека, а линия проходит через водяной объем чистого отсека. При неплотности линии в отбор может поступать вода чистого отсека и искажать представительность пробы. При отборе пробы воды зондом необходимо исключить возможность захвата пара в пробу из-за близкого расположения зонда к уровню.

Штуцера водоуказательных колонок

Штуцера проверяются на отсутствие шлама в них, а также защищенность их от динамического влияния потоков пара и воды. И то и другое приводит к искажению показаний колонок прямого действия. Кроме того, необходимо проверить чтобы штуцера колонок (импульсы по пару и воде) были заведены в тот отсек, где они должны мерить уровень. Очень часто в практике встречаются случаи, когда водоуказательные колонки солевых внутрибарабанных отсеков импульс по воде отбирают из водяного объема солевого отсека, а импульс по пару из парового объема чистого отсека, что приводит к завышению показаний колонки.

Зонды по отбору проб пара

Прежде всего проверяется наличие этих устройств, а также их соответствие требованиям и нормам [10] по отбору представительной пробы пара, прежде всего насыщенного. Из практики следует, что очень часто на "старых" котлах были когда-то запроектированы устройства, которые на сегодняшний день морально и физически устарели, так как отбирают непредставительную пробу пара. Такие устройства необходимо демонтировать и установить новые, более совершенные. (Более подробно этот вопрос рассмотрен в разд. 3.3).

В зависимости от целей и задач внутреннего осмотра разбирается то или иное количество устройств. Для полного осмотра сепарационных устройств котла, как правило, необходим демонтаж всех внутрибарабанных устройств.

3.2. ПРОВЕРКА ПЛОТНОСТИ СБОРКИ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ОПРЕССОВКОЙ ВОДОЙ

Визуальная проверка плотности сборки сепарационных устройств просветкой лампой, или мыльной эмульсией с подачей сжатого воздуха на место смачивания рекомендуется в основополагающих работах по наладке сепарационных устройств [11] – [13], как показал опыт, не дают возможности в полной мере проверить плотность сборки сепарационных устройств.

Для проверки плотности (щели, непровары, трещины в швах и т.д.) сборки сепарационных устройств АО "Фирма ОРГРЭС" применяет опрессовку их водой.

Опыт наладки паровых котлов, которые имели значительное превышение норм ПТЭ по качеству пара (иногда в десятки и сотни раз) из-за неплотностей в сепарационных устройствах (швах, узлах сборки, фланцах и т.д.), показывает, что обычными методами (просветка лампочкой, визуальный осмотр и т.д.) такие неплотности найти практически невозможно. Сложность отыскания заключается еще и в том, что все устройства, в том числе и сварные швы, покрыты слоем шлама и продуктов коррозии, кроме того, сами щели, способные резко ухудшить качество пара, имеют небольшие размеры (например, щель шириной 1 – 2 мм и длиной 10 – 20 мм в верхнем шве короба приема пароводяной смеси способна пропустить такое количество котловой воды, что качество пара может быть значительно выше нормы).

3.3. МЕТОДИКА И УСТРОЙСТВА ОТБОРА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОЙ ПРОБЫ ПАРА И ВОДЫ

3.3.1. Большое значение при наладке сепарационных устройств барабанных котлов имеет получение представительной пробы насыщенного пара, т.е. такой пробы, в которой соотношение жидкой и паровой фаз было бы таким же, как и в основном потоке пара. Чтобы проба пара была представительна по отношению ко всем содержащимся в нем примесям, необходимо обеспечить поступление в зонд потока пара со средней влажностью в месте отбора.

3.3.2. Влажность или солесодержание насыщенного пара определяется путем отбора пробы пара, которая остается представительной при соблюдении следующих условий:

1-е – скорость пара на входе в пробоотборный зонд должна быть равна сред-

ней скорости потока пара в месте отбора (изокинетичность отбора пробы);

2-е – жидкость, находящаяся в пленке на стенке трубопровода должна быть сорвана и находиться в потоке пара;

3-е – капли жидкости должны быть равномерно перемешаны в потоке пара по сечению трубопровода;

4-е – жидкость, выпадающая на внутреннюю стенку пробоотборного устройства, не должна стекать обратно в трубопровод, из которого отбирается проба.

Выполнение всех этих четырех условий накладывает довольно жесткие требования на конструкцию отборного устройства и его расположение. Первое условие выполнить довольно легко соответствующим расчетом, а затем выбором расхода пробы для достижения равенства скоростей пара в зонде и трубопроводе; четвертое условие также в какой-то степени можно выполнить соответствующей конструкцией зонда и подбором скорости в зонде.

Рассмотрим подробно второе и третье условия. При движении по паропроводу влажного пара часть влаги осаждается (сепарируется) на стенках паропровода, а другая ее часть, увлекаемая паром, более или менее равномерно распределяется по сечению паропровода. Соотношение между количеством влаги, остающейся в потоке пара и той, которая течет по стенке трубы в виде пленки зависит прежде всего от скорости пара, влажности (дисперсности) пара и диаметра паропровода. Влияние скорости пара сказывается в том, что при малых скоростях вся влага в основном осаждается на стенках паропровода и течет в виде пленки. При достижении некоторой скорости пара начинается процесс срыва капель влаги со стенки паропровода. Такую скорость пара принято называть **критической** (рис. 3). Срыв пленки влаги протекает сначала медленно, но с повышением скорости возрастает, и при скоростях, превышающих критическую, основная масса влаги срывается со стенки паропровода.

Следовательно, основным условием отбора представительной пробы влажного пара является его отбор из того участка, где влага еще не успела выпасть на стенку (входной участок паропровода), либо из того участка паропровода, где основное количество влаги сорвано со стенки соответствующим подбором скорости пара (применение смесителей), как правило, $W_0'' \geq W_{кр}''$.

Ниже будут рассмотрены основные конструкции зондов, которые при промышленных испытаниях котлов позволяют получить представительную пробу пара [10], [13] – [20].

3.3.3. Отбор пробы насыщенного пара при отводе пара из барабана большим количеством труб небольшого диаметра ($d_{вн} < 100$ мм) производится зондами:

а) Устьевой зонд конструкции ВТИ-ОРГРЭС (рис. 4)

Данное устройство было проверено, как при стендовых исследованиях (МЭИ) [15], так и в промышленной практике (работы АО "Фирма ОРГРЭС"). Было установлено, что в диапазоне скоростей отбора проб пара $\frac{W_{отб}''}{W_{пар}''} = 0{,}9-1{,}5$ от изокинетичного, сохраняется представительность отбора

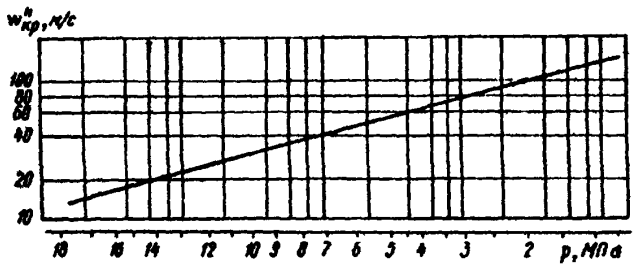


Рис. 3. Зависимость критической скорости пара срыва пленки влаги от давления

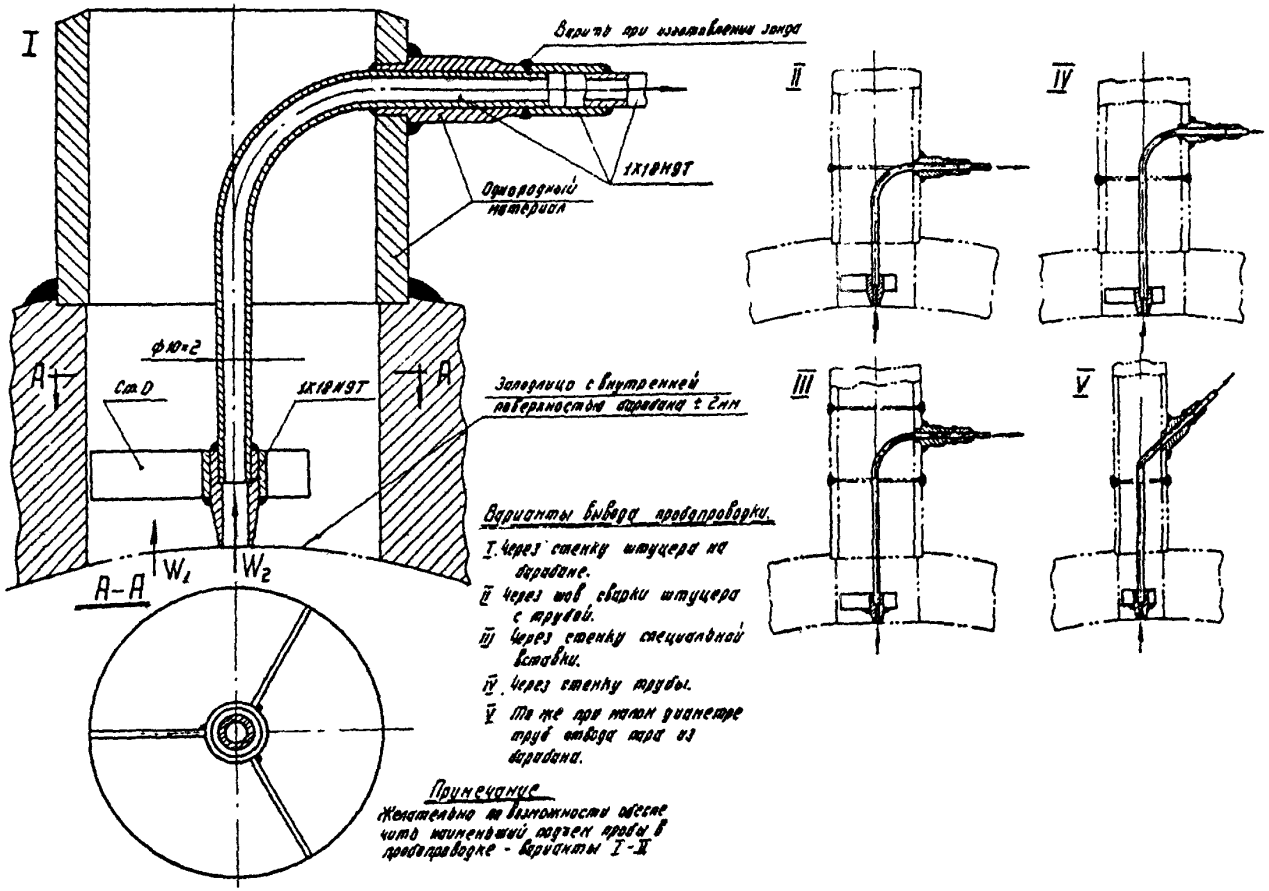


Рис. 4. Устьевой зонд для отбора проб насыщенного пара

пробы пара. Такие "хорошие" результаты получаются потому, что отбор пробы пара производится из устья трубы, т.е. из того места, где капли, находящиеся в паре, еще не выпали (отсепарировались) на стенку этой трубы.

Условия и требования изготовления устьевого зонда:

зонд устанавливается в центре устья трубы таким образом, чтобы его входное сечение располагалось по касательной к внутренней поверхности барабана;

для исключения влияния торцов пробоотборной трубки (наконечника) на представительность пробы за счет торможения потока он выполнен заостренным;

при установке зонда надо стремиться к тому, чтобы участок подъема пробы был как можно меньше. По выходу из отводящей трубы пробопроводку следует сразу направить вниз;

так как зонд должен быть выполнен из нержавеющей стали, а отводящая труба выполняется из углеродистой стали, то для их прочного соединения и облегчения монтажа применяется штуцер, изготовленный из материала трубы и муфта из нержавеющей стали. Штуцер и муфта привариваются к зонду при его изготовлении, а при монтаже на котле свариваются штуцер и труба (однородные материалы);

диаметр входного отверстия зонда рассчитывается из условия равенства скоростей (изокинетичности) потока пара в трубе и зонде, т.е.

$$W''_{отб} = W''_{пар} \qquad (11)$$

при паровой нагрузке котла, равной $0{,}8D_н$.

Из уравнения (11) получаем диаметр устьевого зонда

$$d_з = d_{тр}\sqrt{\frac{G_{проб}}{G_{тр}}}, \qquad (12)$$

где $d_{тр}$ – диаметр отводящей трубы;

$G_{проб}$ – расход пробы пара, обычно принимается 30 – 50 кг/ч;

$G_{тр}$ – расход пара в отводящей трубе.

При испытаниях котлов данное устройство устанавливается в средней по длине барабана трубе и в двух крайних.

б) Зонд со смесителем – трубой Вентури

Если по каким-либо причинам устьевые зонды на входе в трубе установить невозможно, а скорость пара в трубопроводе в несколько раз ниже критической, то для отбора представительной пробы пара можно применить зонд со смесителем – трубой Вентури (рис. 5). Расчет данного устройства заключается в том, чтобы в самом узком сечении трубы Вентури выполнялось условие $W''_с \geq W''_{кр}$ (см. рис. 3). Кроме того, ось зонда должна находиться строго на оси трубы, а зонд должен устанавливаться отверстием навстречу потоку пара. Диаметр суженной части трубы Вентури рассчитывается по формуле

$$d_с = d_{тр}\sqrt{\frac{W''_{тр}}{W''_с}}, \qquad (13)$$

где $W''_{тр}$ и $W''_с$ – скорости пара в трубе и суженной части.

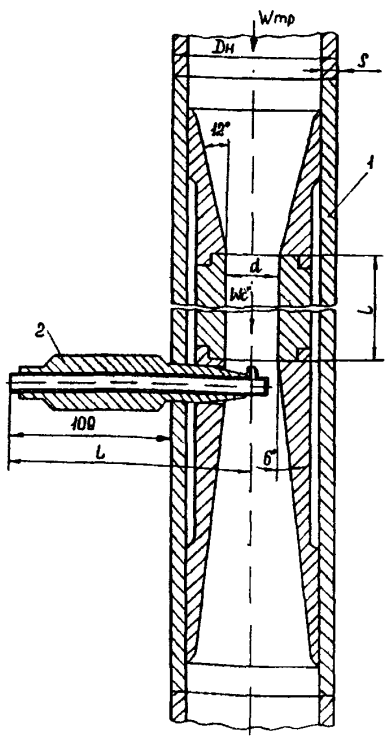


Рис. 5. Зонд со смесителем – трубой Вентури:
1 – смесительное устройство; 2 – пробоотборное устройство

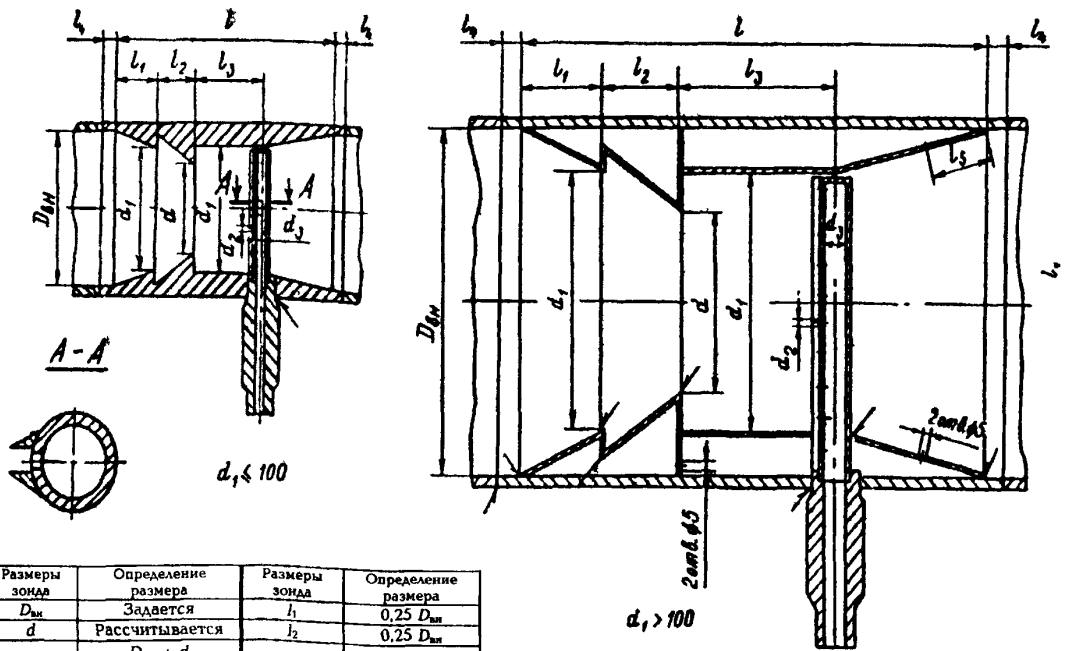
3.3.4. Отбор пробы насыщенного пара из труб большого диаметра ($d_{вн}$ > 100 мм) применяется в паровых котлах низкого давления без пароперегревателя.

Сложность отбора представительной пробы из паропровода заключается в том, что влага в паропроводе может находиться как на стенке трубы в виде пленки, так и в виде капель в сечении самой трубы. Для того, чтобы получить представительную пробу пара в таком потоке, необходимо создать условия для срыва этой пленки влаги со стенки трубопровода и равномерного распределения влаги по сечению трубы. В какой-то степени этому условию удовлетворяет щелевой зонд, установленный за смесителем (конструкция ЦКТИ) (рис. 6). Данное устройство должно устанавливаться только на горизонтальном или нисходящем вертикальном участке паропровода, причем в горизонтальном паропроводе зонд должен устанавливаться только вертикально с отводом пробы вниз. По данным стендовых испытаний МЭИ [15] данное устройство, как правило, дает завышение истинного солесодержания в 1,5 – 2 раза при условии, что скорости пара в щели зонда и паропровода равны.

Для получения представительной пробы пара ЦКТИ рекомендует в суженном сечении смесителя поддерживать скорость пара не ниже, чем на рис. 3.

ЦКТИ и ОРГРЭС иногда практикуют установку зондов за измерительными диафрагмами на расстоянии $(5-6)d_{вн}$. Такой метод можно применять, например, при отборе проб пара из паропроводов выносных циклонов. На рис. 7 в качестве примера показана тарировка устьевого зонда, установленного за измерительной диафрагмой в паропроводе выносного циклона котла низкого давления.

3.3.5. Отбор пробы насыщенного пара выносных циклонов производится щелевым зондом (рис. 8). Щелевой зонд устанавливается за дырчатым потолком циклона щелью навстречу потоку пара. Рабочая длина зонда должна быть равна диа-



Размеры зонда	Определение размера	Размеры зонда	Определение размера
$D_{вн}$	Задается	l_1	0,25 $D_{вн}$
d	Рассчитывается	l_2	0,25 $D_{вн}$
d_1	$\frac{D_{вн}+d}{2}$	l_3	0,5 $D_{вн}$
d_2	2 – 5	l_4	10 – 20
d_3	(0,1 – 0,15)d_1	l_5	10
l	1,5 $D_{вн}$	l_6	(0,5 – 0,75) d_3
		l_7	1,1 d_2

Рис. 6. Щелевой зонд со смесителем

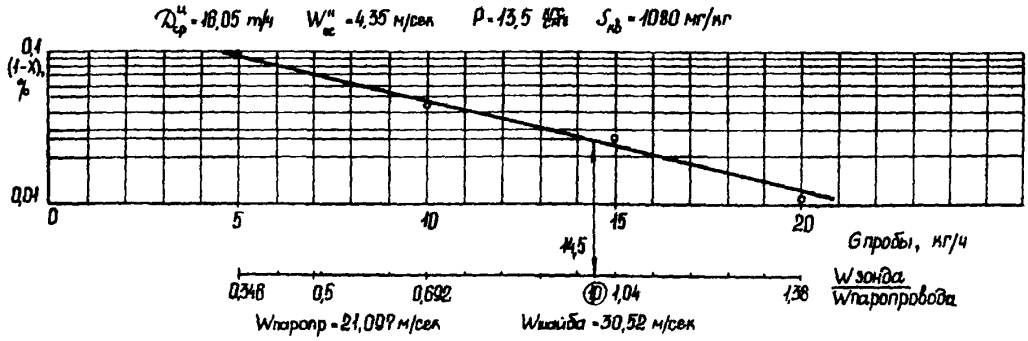


Рис. 7. Зависимость влажности пара по устьевому зонду циклона в зависимости от расхода пробы (зонд установлен за шайбой для срыва)

метру циклона. Учитывая большую длину зонда, для исключения его поломки и вибрации свободный конец зонда заглубляется в специальное отверстие в стенке циклона. Для обеспечения равномерного отбора пробы пара по всей длине зонда сечение трубки зонда должно быть не менее чем в 2 раза больше суммарного сечения отверстий; диаметр отверстий зонда принимается равным 2 мм.

3.3.6. Установка зондов в трубы отвода пара из барабана в той или иной степени загромождает поперечное сечение трубы, а значит и приводит к снижению расхода среды в этой трубе. В некоторых случаях это необходимо учитывать, например, при установке устьевых зондов в отводящие трубы малого диаметра (28÷38 мм).

Еще большие потери давления возникают при установке в отводящих трубах сужающих устройств. Например, при установке сужающего устройства ЦКТИ (см. рис. 6) для котла с давлением 40 кгс/см^2 и при скорости пара в сужающем устройстве, равной критической (см. рис. 3), потери будут составлять:

$$\Delta P = \zeta_{с.у} \frac{W''^2_{о.кр}}{2g} \cdot \rho'' = 5{,}0 \frac{60^2 \cdot 19{,}7}{2 \cdot 9{,}81} =$$

$$= 18073 \text{ кгс/м}^2 = 1{,}8 \text{ кгс/см}^2.$$

В то же время сопротивление смесителя с трубой Вентури (см. рис. 5) будет составлять при $\zeta_{с.у} = 0{,}1$ значение в 50 раз меньше, т.е. около 361 кгс/м^2.

Такое значительное сопротивление смесительного устройства ЦКТИ не позволяет устанавливать его, например, в паропроводах отвода пара из выносных циклонов в барабан, так как на величину сопротив-

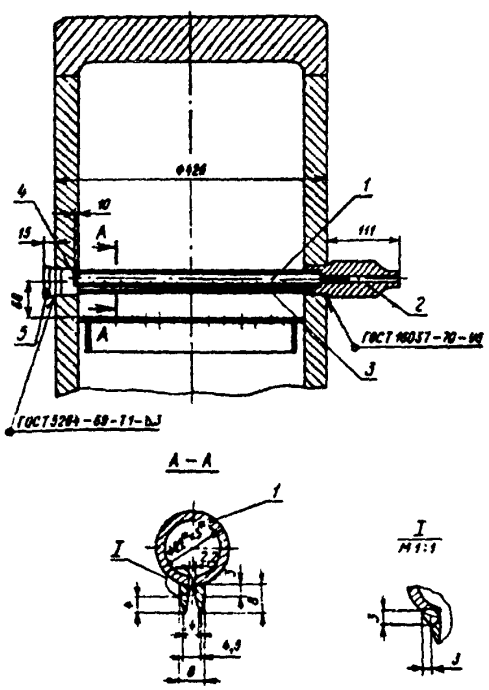


Рис. 8. Щелевой зонд:
1 – труба Ø 22×3 мм, 2 – штуцер, 3 – щелевая насадка, 4 – донышко, 5 – заглушка

ления сужающего устройства произойдет опускание уровня воды в циклоне.

3.3.7. Отбор пробы непромытого пара перед промывочным устройством, а также определение эффективности работы промывочного, а также предвключенных сепарационных устройств и парового объема до промывочного листа производится с помощью зонда, показанного на рис. 9 [14].

Зонд устанавливается на том или ином листе паропромывочного устройства и составляет с ним единое целое. Он представляет собой положенные навстречу друг другу половинки труб разного диаметра: верхняя — большего, нижняя — меньшего. Верхняя часть зонда перекрывает некоторое количество отверстий дырчатого листа. Таким образом, входными отверстиями зонда являются сами отверстия паропромывочного листа. Для установки нижней части зонда в листе прорезается соответствующих размеров щель. Проба пара, поступающая в перекрытые зондом отверстия, направляется в нижнюю часть зонда, являющуюся желобом для сбора выпадающей из пробы влаги, а оттуда — в пробопроводку. Так как отверстия в паропромывочных листах обычно располагаются в шахматном порядке, целесообразно располагать зонд по диагональному ряду отверстий. Длина зонда 150 — 200 мм. Общая площадь и количество входных отверстий рассчитывается из условия равенства скоростей пара в них (определяется по расходу пробы) и в остальных отверстиях паропромывочного листа при нагрузке котла равной $0{,}8D_н$. Так как диаметр отверстий паропромывочного листа обычно принимают около 5 мм, поэтому для отбора пробы требуется небольшое число отверстий (обычно 4 — 5). Рабочие отверстия должны быть равномерно распределены по его длине, а лишние, попавшие под зонд, должны быть заглушены (лучше всего заклепками).

3.3.8. Отбор проб из потока с однофазной средой (перегретый пар, включая промперегрев, питательную и котловую воду и воду впрыска) осуществляется с помощью единого трубчатого зонда (рис. 10). Зонд представляет собой трубку со срезанным

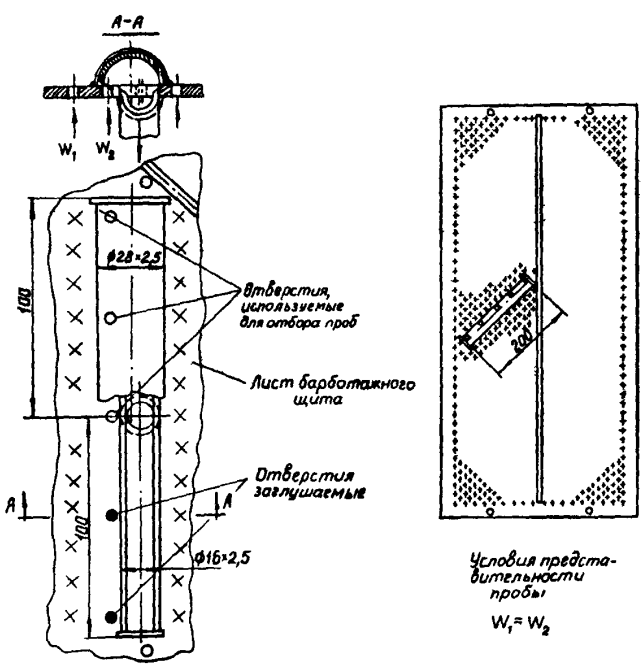


Рис. 9. Зонд для отбора пробы непромытого пара

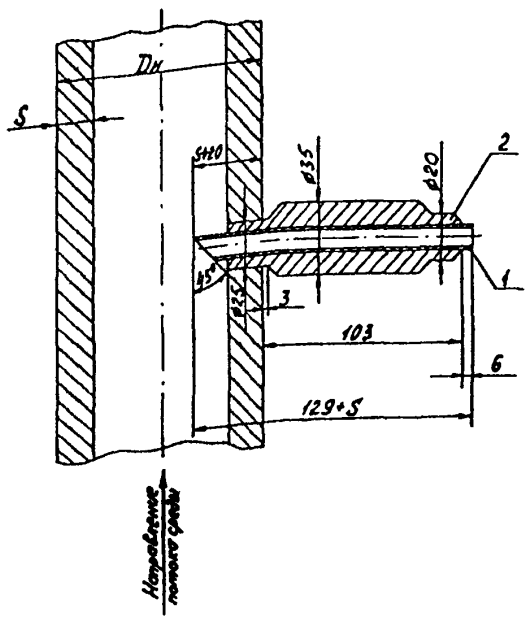


Рис. 10. Трубчатый зонд для отбора проб однофазной среды:
1 – труба диаметром 10×2 мм; 2 – втулка

под углом 45° приемным концом, вставленную в трубопровод, срезом навстречу потоку. Конец зонда заглубляется внутрь трубы приблизительно на 20 мм. При установке зонда необходимо иметь прямой участок длиной до зонда не менее $10d_{вн}$ и $5d_{вн}$ после него.

Для отбора представительной пробы котловой воды 1-й, 2-й или 3-й ступеней испарения зонд устанавливается в опускные трубы соответствующих ступеней испарения.

3.3.9. Отбор проб промывочной воды [14] выполняется с помощью пробоотборного устройства, показанного на рис. 11. Устройство представляет собой воронку прямоугольного сечения с внутренним направляющим листом. Назначение последнего — резко повернуть поток промывочной воды вверх непосредственно перед отводом пробы, чтобы захваченный водой пар выходил вверх и не попадал в пробопроводку.

Пароприемная воронка устанавливается на крепежном элементе паропромывочного щита несколько ниже слива воды.

Воронка выполняется из листовой нержавеющей стали толщиной 1 – 2 мм. Линия пробопроводки выводится из барабана котла через стенку одной из опускных труб с помощью толстостенного штуцера. Линия пробопроводки как внутри барабана, так и вне его должна быть проведена с уклоном по ходу пробы.

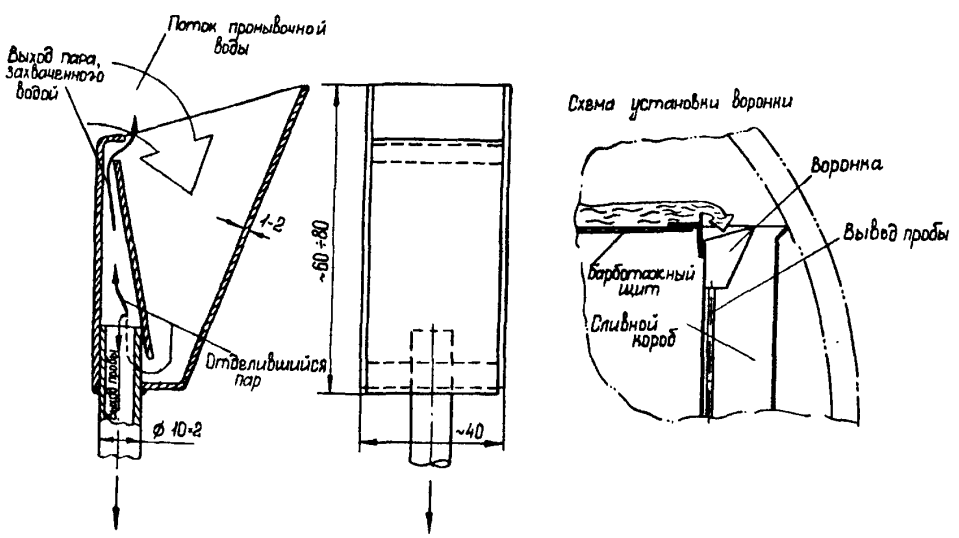


Рис. 11. Зонд для отбора проб промывочной воды

3.4. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЕЙ ВОДЫ В БАРАБАНАХ И ВЫНОСНЫХ ЦИКЛОНАХ

3.4.1. Измерение уровней воды в барабанах

Для надежной работы котлов большое значение имеет соответствие уровня воды водоуказательных колонок уровню воды в барабане. При прохождении пара через слой воды барабана (барботаж) плотность пароводяной смеси в барабане будет меньше плотности воды. Соответственно и уровень воды в водоуказательных колонках будет ниже фактического уровня в барабане. Кроме того, температура воды в колонке будет ниже, чем температура воды в барабане, которая равна температуре кипения. Это приводит также к снижению видимого уровня воды в колонках.

Следует различать:

Видимый уровень ($H_{вд}$) – положение мениска в водоуказательной колонке.

Весовой уровень ($H_{вес}$), отличающийся от видимого в соответствии с различием плотности воды при температуре кипения в барабане и воды в водоуказательной колонке.

Действительный (физический) ($H_{физ}$), отличающийся от весового на величину набухания слоя воды в барабане, вызванную наличием паровых пузырьков в толще воды.

Следует отметить, что сепарационно-активная паровая высота барабана отсчитывается от действительного уровня воды. Поправку на охлаждение воды в водоуказательных колонках для котлов различных давлений можно подсчитать с помощью графиков на рис. 12 [21] по формуле

$$\Delta H = H_{вд}\left(1 - \frac{H_{вес}}{H_{вд}}\right). \qquad (14)$$

Как следует из рис. 12, чем выше давление в барабане, тем значительнее видимый уровень воды отличается от весового в барабане.

Поправку на набухание воды в барабане для определения действительного уровня можно определить по формуле

$$\Delta H_{нб} = H_{вес}\frac{\varphi}{1-\varphi}, \qquad (15)$$

где напорное паросодержание рассчитывается по формуле [21], [22]

$$\varphi = \frac{W_o''}{a + W_o''}, \qquad (16)$$

здесь W_o'' – приведенная скорость пара на зеркале испарения;

a – величина, зависящая от давления и диаметра барабана d (мм) рассчитываемая по следующим формулам:

$$a = 0{,}65 - 0{,}0039\,P\left(\frac{d}{63}\right)^{0{,}17} \text{ при } P = 1\text{÷}30 \text{ кгс/см}^2;$$

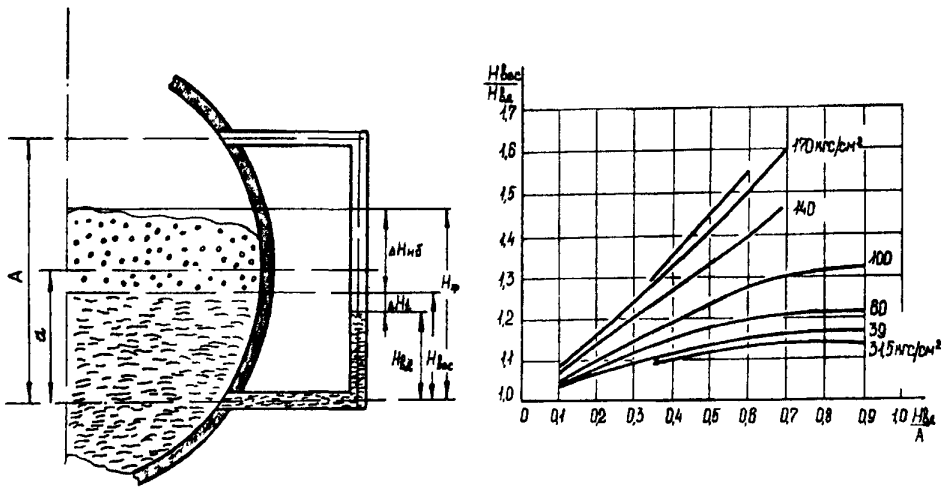


Рис. 12. Поправка на охлаждение воды в водоуказательной колонке

$a = 0{,}65 - 0{,}0039\,P$ при $P = 30\text{÷}125$ кгс/см^2;

$a = 0{,}33 - 0{,}00135\,P$ при $P = 125\text{÷}185$ кгс/см^2.

Следует отметить, что поправку на набухание слоя воды можно не учитывать при отсутствии барботажа слоя воды, например при установке в барабане циклонов и при нормальной их работе (отсутствие сноса пара).

При установке в барабане погружных дырчатых листов, различных жалюзи и в любом другом случае при подаче пара под слой воды поправку на набухание слоя необходимо учитывать.

Большое влияние на искажение показаний видимого уровня по водоуказательной колонке оказывает защищенность паровых и водяных штуцеров колонок от динамического воздействия потоков пара и воды, варианты защиты которых приведены на рис. 13.

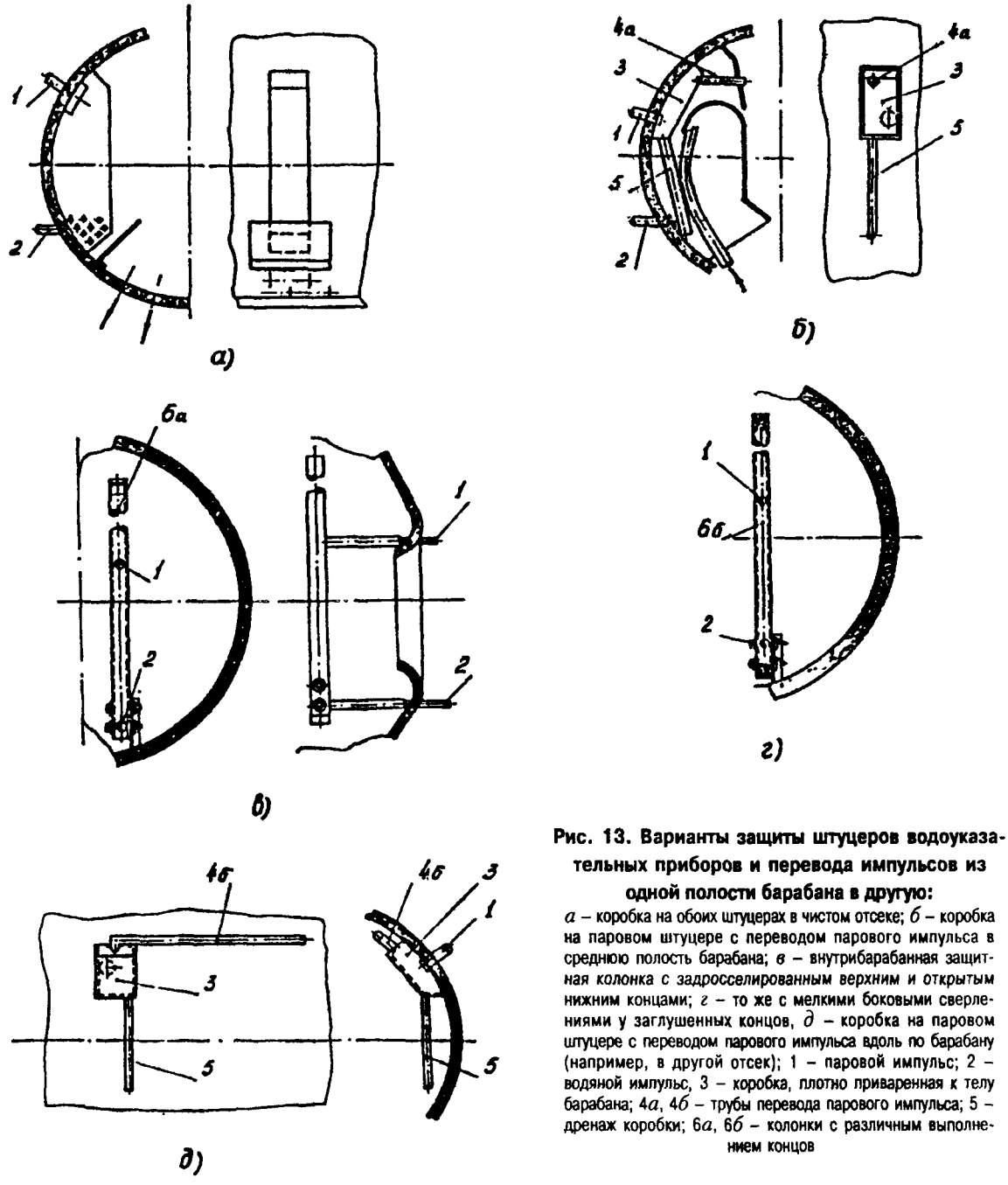


Рис. 13. Варианты защиты штуцеров водоуказательных приборов и перевода импульсов из одной полости барабана в другую:

а – коробка на обоих штуцерах в чистом отсеке; *б* – коробка на паровом штуцере с переводом парового импульса в среднюю полость барабана; *в* – внутрибарабанная защитная колонка с задросселированным верхним и открытым нижним концами; *г* – то же с мелкими боковыми сверлениями у заглушенных концов, *д* – коробка на паровом штуцере с переводом парового импульса вдоль по барабану (например, в другой отсек); 1 – паровой импульс; 2 – водяной импульс, 3 – коробка, плотно приваренная к телу барабана; 4*а*, 4*б* – трубы перевода парового импульса; 5 – дренаж коробки; 6*а*, 6*б* – колонки с различным выполнением концов

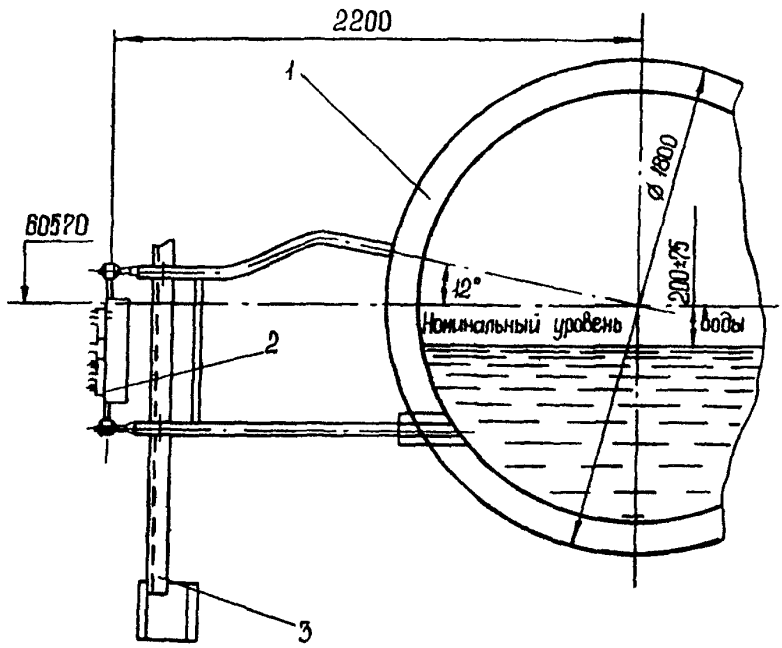


Рис. 14. Установка указателя уровня на барабане котла ТПЕ-214:
1 – барабан, 2 – указатель уровня Т-228б, 3 – каркас

Кроме того, при измерении уровней воды водоуказательными колонками для исключения значительных искажений их показаний необходимо соблюдать следующие рекомендации:

положение отметок уровней на каждой колонке периодически должно проверяться гидроуровнем по отношению к оси барабана;

соединительные водяные линии от барабана к колонке не должны иметь водяных "мешков". (Уклон линии должен быть в сторону барабана);

должны быть исключены пропаривание в паровой соединительной линии или паровой части колонки (ложное завышение уровня воды в колонке) и течи на водяной соединительной линии или водяной части колонки (ложное занижение уровня воды в колонке);

колонки с короткими соединительными трубами обеспечивают более четкий контроль уровня по сравнению с колонками, вынесенными на значительное расстояние от барабана.

На рис. 14 в качестве примера приведена установка водоуказательных колонок на котле ТПЕ-214.

3.4.2. Измерение уровней воды в выносных циклонах

Одной из основных причин нарушения нормальной эксплуатации выносных солевых отсеков является значительное отклонение уровня воды в циклоне от расчетных по проекту.

На рис. 15 приведена схема установки приборов для измерения уровня воды в выносном циклоне. В качестве измерительных приборов используются различные типы дифференциальных манометров, рассчитанных на соответствующее давление и перепад. Для правильного измерения уровня воды в выносном циклоне необходимо руководствоваться следующими положениями.

Так как уровень воды в циклоне вследствие ее вращения имеет форму воронки, то измерять уровень воды непосредственно в корпусе циклона нельзя. Дифферен-

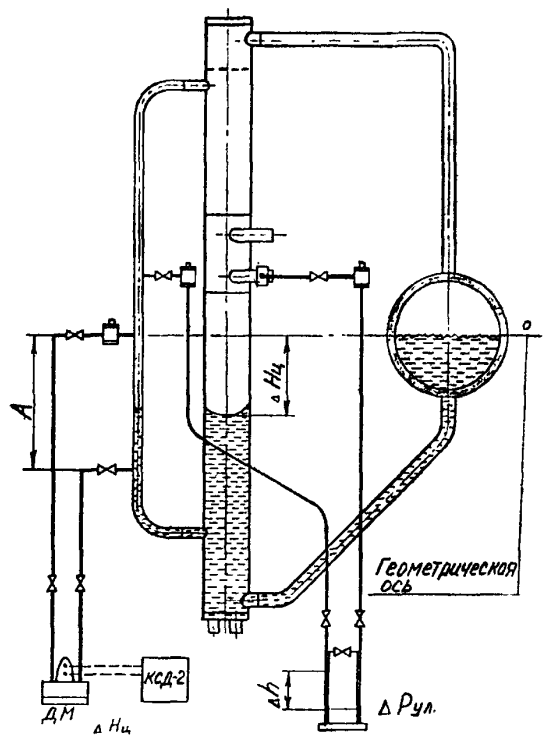


Рис. 15. Схема измерения уровня воды в выносном циклоне и сопротивления улитки циклона

циальный манометр должен подключаться к успокоительной трубе – шунту. Если на циклоне не установлена успокоительная труба, то ее следует установить, присоединив к имеющимся специально для этой цели заводским штуцерам. Диаметр успокоительной трубы должен быть не менее 50 – 60 мм.

Во избежание образования в паровом штуцере водяных пробок,он должен быть установлен строго горизонтально, иметь внутренний диаметр не менее 20 мм, а длину не более 150 – 200 мм. На конце парового штуцера должен быть установлен конденсационный сосуд с воздушником.

Вентиль на водяной импульсной линии должен быть установлен сразу же по выходу ее из успокоительной трубки, а на паровой линии – только после конденсационного сосуда.

Участки обеих импульсных линий, расположенных ниже водяного штуцера, должны быть проложены до дифференциального манометра рядом, в одинаковых температурных условиях для обеспечения равенства высот столбов и плотностей заполняющих их жидкостей (остывшей котловой воды в водяной линии и конденсата пара в паровой линии).

Импульсные линии должны быть проложены с уклоном по всей трассе во избежание образования в них паровых и водяных "мешков" – застойных участков. С этой целью при необходимости размещения вентилей на участках, близких к горизонтальным, они должны быть установлены маховичками вбок.

Для удобства вычисления посадки уровня в выносном циклоне по отношению к уровню воды в барабане рекомендуется паровой штуцер измерительного прибора устанавливать на отметке оси барабана или принятого среднего (эксплуатационного) уровня воды.

Расстояние А между паровым и водяным штуцерами выбирается в зависимости от ожидаемого диапазона изменения уровня воды в циклоне и перепада на устанавливаемом дифференциальном манометре таким образом, чтобы прибор был достаточно чувствительным к небольшим посадкам уровня в циклоне и перепады в нем не слишком велики при больших посадках уровня.

На основании составления уравнения Бернулли для дифференциального манометра положение массового уровня в циклоне можно вычислить по формуле

$$\Delta H_{ц} = \frac{\Delta P}{\rho' - \rho''} - A \cdot \frac{\rho_{в} - \rho'}{\rho' - \rho''}, \qquad (17)$$

где $\Delta H_{ц}$ – величина снижения уровня воды в циклоне по отношению к принятой за ноль отметке, м;

$\rho_{в}$ – плотность воды при температуре в импульсных трубках, кг/м^3;

ρ', ρ'' – соответственно плотности котловой воды и пара при температуре насыщения, кг/м^3;

ΔP – перепад давления в дифференциальном манометре, кгс/м^2.

При измерении уровня воды жидкостным дифференциальным манометром

перепад давления будет определяться:

$$\Delta P = \Delta h \, (\rho_{ж} - \rho_{в}), \qquad (18)$$

где Δh – перепад давления запирающей жидкости, м;

$\rho_{ж}$ – плотность запирающей жидкости, кг/м^3.

Для быстрого определения уровня воды в циклоне при проведении испытаний рекомендуется заранее построить график зависимости $\Delta P = f(H_{ц})$, задав 2 – 3 значения $H_{ц}$, и определение производить по этому графику.

При измерении уровней воды жидкостными дифференциальными манометрами в качестве запирающих жидкостей применяют ртуть – $\rho_{20°C} = 13522$ кг/м^3 либо бромоформ – $\rho_{20°C} = 2890$ кг/м^3.

3.5. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ВЫНОСНЫХ ЦИКЛОНОВ

Установка измерительных диафрагм и расходомеров должна производиться в соответствии с ГОСТ [23]. По опыту АО "Фирма ОРГРЭС" диаметр отверстия диафрагмы выбирается с таким расчетом, чтобы дополнительная посадка уровня воды в выносном циклоне из-за ее установки не превышала 200 – 300 мм вод.ст., а общая посадка уровня не должна превышать 1000 мм.

Если пар из выносного циклона отводится в барабан несколькими трубами через промежуточный коллектор, измерение расхода пара лучше всего организовать в этом коллекторе.

При отводе пара из выносного циклона в барабан несколькими самостоятельными трубами измерение расхода пара организуется в одной из труб. В этом случае для исключения неравномерного распределения пара по трубам из-за появления дополнительного местного сопротивления в одной из них, в остальные трубы устанавливаются диафрагмы-шайбы (упрощенные), с таким же диаметром отверстия, что и у измерительной диафрагмы.

Если посадка уровня в циклоне велика и без измерительной диафрагмы (большое гидравлическое сопротивление труб отвода пара из циклона или подвода воды в него), для измерения паропроизводительности можно применять скоростные трубки ВТИ или ЦКТИ [24], [25], которые устанавливаются в трубе питания выносного циклона.

3.6. ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПАРА КОТЛОВ

В практике эксплуатации котлов встречаются случаи ухудшения качества пара из-за следующих основных причин.

3.6.1. Перевод котла с сжигания одного вида топлива на другой. При этом возможно изменение тепловосприятия различных поверхностей нагрева, например недогрузка (по пару) одних и перегрузка других. Перегрузка поверхности нагрева приводит и к перегрузке сепарационных устройств, замкнутых на эту поверхность и, как следствие, к ухудшению качества пара выдаваемого этими устройствами (или повышению гидравлического сопротивления).

3.6.2. Ухудшение качества питательной воды (соле – и кремнесодержания). Из-за этого происходит возрастание концентрации солей в промывочном слое паропромывочных устройств, в ступенях испарения и, как следствие, повышенный вынос солей с паром котла.

У котлов без промывки пара возрастание солесодержания питательной воды приводит к увеличению солесодержания котловой воды в ступенях испарения и, как следствие, к повышенному выносу солей из котла. Увеличение солесодержания питательной воды, как правило, приводит к повышению величины непрерывной продувки (для поддержания качества пара требованиям норм).

3.6.3. Перевод котла из базисного режима работы в регулировочный. При неприспособленности конструкции сепарационных устройств к этим режимам возможно появление бросков из-за набухания (вскипания) слоя воды.

Поэтому при работе котлов в регулировочном режиме или с резко переменными нагрузками (давлением) в сепарационной схеме котлов должны отсутствовать элементы, способствующие развитию бросков, как например, жалюзийные сепараторы пара.

3.6.4. Работа котла с параметрами пара отличными от расчетных. Так например, при работе котла на пониженном рабочем давлении в барабане возможно ухудшение качества пара котла из-за перегрузки сепарационных устройств. При снижении рабочего давления в котле за счет изменения теплофизических характеристик воды и пара фактическая скорость пара в элементах сепарационных устройств за счет снижения его плотности растет быстрее, чем допустимая скорость. Поэтому допустимая весовая нагрузка сепарационных устройств и котла в целом снижается [26].

3.6.5. Дефекты в сборке сепарационных устройств после ремонта, реконструкции или монтажа. Как правило, эти дефекты должны быть выявлены при осмотре, но если этот осмотр или приемка были выполнены недостаточно квалифицированно, то котел может начать работать с паром повышенной влажности (солесодержанием).

3.6.6. Работа котла с повышенным уровнем воды в барабане (или отсеке) по сравнению с уровнем, установленным заводом. Здесь возможны два случая. Первый — это когда из-за боязни срыва циркуляции (захвата пара) в ненадежных контурах или упуска воды эксплуатационный персонал преднамеренно переводит работу котла на повышенный уровень воды в барабане. Во втором случае уровень воды в барабане по водоуказательным приборам соответствует норме, а на самом деле действительный уровень воды в барабане гораздо выше, чем видимый уровень в колонках. Это может быть, например, из-за плохой защиты импульсных штуцеров водоуказательных колонок от динамического влияния потоков пара и воды или насыщение водяного объема барабана пузырьками пара (набухание) из-за прорыва пара через неплотности, минуя сепарационные устройства.

Ухудшение качества пара котла в этом случае происходит за счет снижения сепарационно-активной паровой высоты барабана, а также за счет подтопления внутрибарабанных циклонов и их фонтанирования.

3.6.7. Работа котла с пониженным уровнем воды в барабане по сравнению с уровнем, установленным заводом. В практике эксплуатации котлов такой случай возможен из-за утрирования показаний уровня воды в колонке по сравнению с уровнем воды в барабане п. 3.6.6, а также из-за преднамеренного опускания уровня воды эксплуатационным персоналом ниже установленного заводом. В этом случае также возможно ухудшение качества пара из-за вероятности пробулькивания через гидрозатворы элементов сепарационных устройств. Например, при нормальном уровне воды перегородка, разделяющая отсеки с разным давлением (ΔP = 200 кгс/м^2), заглублена на 400 мм под уровень воды. Для котла с давлением 110 кгс/см^2 этому перепаду соответствует столб воды, равный

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho' - \rho''} = \frac{200}{614{,}1} = 326\,\text{мм вод.ст.}$$

При опускании уровня воды в барабане, например на 100 мм, произойдет прорыв (пробулькивание) пара из одного отсека в другой за счет того, что высота заглубления будет меньше, чем столб воды, соответствующий данному перепаду давления (пьезометрический напор).

Ухудшение качества пара котлов возможно также и по другим причинам.

3.7. ДОПУСТИМЫЕ ПАРОВЫЕ НАГРУЗКИ И СКОРОСТИ ПАРА И ВОДЫ В ЭЛЕМЕНТАХ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ КОТЛОВ [9], [11], [12], [27]– [30]

При плохом качестве пара котлов по причинам, подробно рассмотренным в разд. 3.6, иногда возникает необходимость расчетной проверки уровня удельных паровых нагрузок сепарационных устройств. Для этих целей необходимо знать значения допустимых паровых нагрузок, а также скоростей пара и воды в основных элементах сепарационных устройств.

3.7.1. Внутрибарабанные циклоны

Приведенная к диаметральному сечению циклона скорость пара должна быть не выше:

для котлов с $P_б$ = 14 кгс/см^2 1,25 м/с;

$P_б$ = 40 кгс/см^2 0,9 м/с;

$P_б$ = 115 кгс/см^2 0,45 м/с;

$P_б$ = 155 кгс/см^2 0,3 м/с.

Для обеспечения нормальной работы циклонов необходимо устанавливать их по высоте таким образом, чтобы максимальный уровень воды в барабане не поднимался выше середины входного патрубка циклона, а минимальный уровень воды не опускался ниже отметки уровня, при котором создается гидрозатвор не менее 100 мм.

3.7.2. Паропромывочные устройства

Минимальная скорость пара в отверстиях листов:

для котлов с $P_б$ = 115 кгс/см^2 – 1,14 (0,9) м/с;

$P_б$ = 155 кгс/см^2 – 0,73 м/с.

Максимальная скорость пара в отверстиях листов:

для котлов с $P_б$ = 115 кгс/см^2 – 2,3 м/с;

$P_б$ = 155 кгс/см^2 – 1,9 м/с

Максимальная скорость воды в сливных коробах:

для котлов с $P_б$ = 115 кгс/см^2 – 0,10 м/с;

$P_б$ = 155 кгс/см^2 – 0,09 м/с.

3.7.3. Дырчатые пароприемные листы

Рекомендуемые скорости пара в отверстиях листов:

для котлов с $P_б$ = 14 кгс/см^2 – 10–23 м/с;

$P_б$ = 40 кгс/см^2 – 6–15 м/с;

$P_б$ = 115 кгс/см^2 – 4–7 м/с;

$P_б$ = 155 кгс/см^2 – 3–6 м/с.

3.7.4. Выносные центробежные сепараторы пара (циклоны) с внутренним улиточным вводом

Допустимая осевая подъемная скорость пара в корпусе циклона:

для котлов с $P_б$ = 14 кгс/см^2 – 1,3 м/с;

(с тангенциальными сплющенными патрубками – 2,3 м/с);

$P_б$ = 40 кгс/см^2 – 0,8 м/с;

(с тангенциальными сплющенными патрубками – 1,3 м/с);

$P_б$ = 115 кгс/см^2 – 0,5 м/с;

$P_б$ = 155 кгс/см^2 – 0,4 м/с.

Для получения качественного пара отметка ввода в циклон должна быть на 200-500 мм выше уровня воды в барабане.

К приведенным данным для циклонов низкого и среднего давления следует сделать следующие пояснения:

1. Допустимые скорости пара, указанные выше, приведены для циклонов, имеющих паровую высоту $\left(\frac{H_п}{d_ц}\right) = 9{,}0$. Для типовых циклонов, имеющих паровую высоту, равную приблизительно 3-4 диаметрам циклона, паровая нагрузка будет составлять около 70% указанных выше скоростей.

2. На работу циклона влияет уровень солесодержания котловой воды на которой работает контур, замкнутый на циклон. При $S_{кв} \le 10000$ мг/кг осевая скорость принимается согласно приведенным выше цифрам. При $S_{кв} > 10000$ мг/кг допустимая осевая скорость пара уменьшается в пропорции $10000 / S_{кв}$.

3.7.5. Скорости воды в трубах (коробах) питания солевых отсеков

В трубах (коробах) питания внутрибарабанных солевых отсеков – не более 0,5–0,6 м/с.

В трубах питания выносных солевых отсеков не более – 0,2–0,5 м/с.

3.8. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ДОПУСКИ ПО СБОРКЕ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Сепарационные устройства паровых котлов должны быть смонтированы, собраны и поддерживаться в процессе эксплуатации в таком состоянии, чтобы различные отклонения (допуски) от проектных условий не превышали допустимых значений, влияющих на качество пара котла.

3.8.1. По внутрибарабанным циклонам

Фланцевое соединение между циклоном и встречным патрубком может выполняться с паронитовой прокладкой и без нее. Паронитовая прокладка должна устанавливаться таких размеров, чтобы она не выступала внутрь патрубков. При этом конструкция фланцевого соединения не должна допускать перетечек рабочей среды. При использовании клинового соединения клинья должны быть зафиксированы сваркой. На внутренней поверхности корпусов циклонов не должно быть уступов и переломов. Сварные швы зачищаются заподлицо с внутренней поверхностью циклона. Допуск эллиптичности корпусов циклонов должен быть не более 2 мм. Допуск по высоте ввода пароводяной смеси в циклон должен быть в пределах от +20 до −5 мм. Отклонение оси циклона от вертикали должно быть не более 5 мм.

3.8.2. По паропромывочным и потолочным листам

Допуск прямолинейности паропромывочных листов вдоль оси барабана по всей его длине должен быть до 8 мм, а по ширине — 4 мм.

Допуск плоскостности паропромывочных листов должен быть до 4 мм.

При применении клиновых соединений, клинья должны быть забиты не менее, чем наполовину всей длины и зафиксированы сваркой.

Зазоры между соседними паропромывочными дырчатыми листами, а также между этими листами и приварными деталями не должны превышать 1 мм. Для потолочных дырчатых листов эти зазоры не должны превышать 2 мм.

Допуск диаметра отверстий не более ±5%.

При негоризонтальности барабана пороги на переливе проверяются по отношению к горизонтали, а не по отношению к оси барабана, при длине порога более 0,5 м он секционируется.

Отклонение отметки кромок перегородок между отсеками допускается не более ±20 мм.

Водоперепускные трубы между отсеками: отклонение отметки по высоте ±10 мм; отклонение по диаметру (уменьшение не допускается) +10%.

Отклонение отметки по высоте коробов подвода питательной воды допускается не более ±10 мм.

3.9. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СХЕМ СТУПЕНЧАТОГО ИСПАРЕНИЯ

От наложения уровней воды в ступенях испарения во многом зависит эффективность работы сепарационных устройств, а также надежная циркуляция котла. Рассмотрим основные варианты включения ступеней испарения, которые встречаются в котельной практике.

3.9.1. Двухступенчатая схема испарения котловой воды при размещении 2-й ступени внутри барабана

3.9.1.1. При отводе пара из барабана равномерно по всей его длине (рис. 16-1), разность уровней воды между чистым и солевым отсеками будет определяться только сопротивлением водоперепускной трубы ($\Delta P_{вп}$)

$$\Delta H = \frac{\Delta P_{вп}}{\rho' - \rho''}. \qquad (19)$$

Во избежание значительных перебросов котловой воды из солевого в чистый отсек высота перегородки, разделяющая водяные объемы, должна быть на 100 − 150 мм выше, чем максимально допустимый уровень воды в барабане. Разность уровней воды между чистым и солевым отсеками, как правило, должна находиться в пределах 20 − 50 мм, а скорость воды в водоперепускной трубе принимается не более 0,5 − 0,6 м/с. Сопротивление водоперепускной трубы определяется по формуле

$$\Delta P_{вп} = \sum\zeta \frac{(W'_{вп})^2}{2g}\rho', \qquad (20)$$

где $\sum\zeta$ — суммарный коэффициент сопротивлений входа, трения, поворотов и выхода из водоперепускной трубы (короба).

Расход воды через водоперепускную трубу определяется по формуле

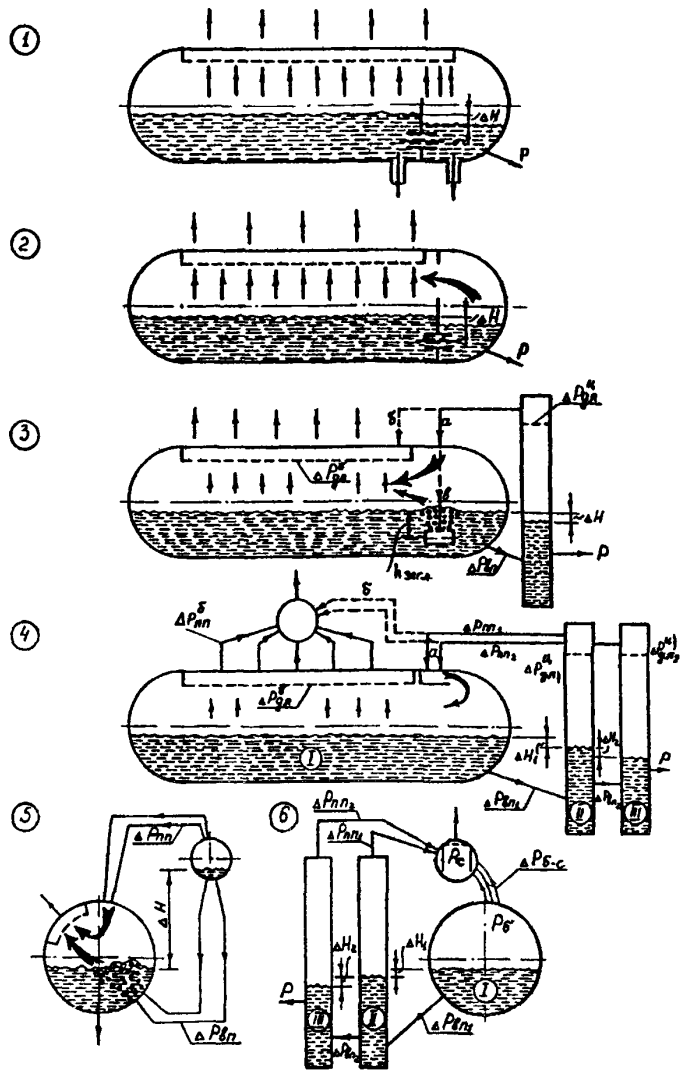


Рис. 16. Основные гидравлические схемы барабанных котлов

$$G = K(D_{п} + D_{пр}), \qquad (21)$$

где коэффициент K принимается равным 1,0 – 1,5 и определяет неравномерность перетекания воды из чистого в солевой отсек.

Большая посадка уровня воды в солевом отсеке, чем рекомендуется выше, недопустима из-за возможности возникновения воронок (захват пара) над опускными трубами и прежде всего теми, которые находятся на боковых образующих барабана. Для исключения вероятности возникновения вихревых воронок над опускными трубами минимальный слой воды над опускными трубами (приблизительно) должен быть не менее, чем

$$H_{оп} \geq 1{,}5\frac{W_{оп}^2}{2g}, \qquad (22)$$

где $W_{оп}$ — скорость воды в опускной трубе.

При близком расположении опускных труб к входному (или выходному) отверстию водоперепускной трубы возможно подсасывающее (эжектирующее) влияние опускных труб на уровень воды в солевом отсеке [11], [31]. Подсасывающее действие опускных труб чистого отсека $(\Delta P_{эж}^{ч})$препятствует входу воды в водоперепускную трубу и тем самым ведет к увеличению разности уровней между чистым и солевым отсеками. Подсасывающее действие опускных труб солевого отсека $(\Delta P_{эж}^{с})$ способствует перетеканию воды из чистого в солевой отсек, и тем самым ведет к уменьшению разностей уровней между чистым и солевым отсеками. В связи со сказанным разность уровней воды между отсеками будет определяться по формуле

$$\Delta H' = \frac{\Delta P_{вп} + \Delta P_{эж}^{ч} - \Delta P_{эж}^{с}}{\rho' - \rho''}. \qquad (23)$$

Для исключения влияния эжектирующего действия опускных труб на уровень воды в солевом отсеке необходимо располагать входные и выходные отверстия водоперепускных труб на достаточном расстоянии от опускных труб. Например, по данным [32] при расположении входных и выходных отверстий водоперепускных труб от опускных труб на расстоянии, равном диаметру опускной трубы ($d_{оп}$), скорость подтекания будет составлять 5 — 6% от скорости на входе в опускную трубу и подсасывающим воздействием можно пренебречь.

Данная схема включения ступеней испарения применяется как на котлах высокого, так среднего и низкого давлений.

3.9.1.2. При отводе пара котла только из чистого отсека (рис. 16-2), разность уровней воды между чистым и солевым отсеками следует определять по формуле

$$\Delta H = \frac{\Delta P_{вп} + \Delta P_{пп}}{\rho' - \rho''}. \qquad (24)$$

Сопротивление пароперепускного окна между чистым и солевым отсеками

$$\Delta P_{пп} = 1{,}5\frac{W_{пп}''^2}{2g}\rho'', \qquad (25)$$

где $W_{пп}''$ — приведенная скорость пара в пароперепускном окне, принимается не более 1,0 — 1,5 м/с.

Как видно из формулы, разность уровней между отсеками в схеме рис. 16-2 будет больше, чем в схеме рис. 16-1.

При значительном перебросе котловой воды из солевого отсека в чистый (например, из-за вспенивания котловой воды солевого отсека), за счет перекрытия части сечения пароперепускного окна водой или пароводяной смесью, может увеличиться приведенная скорость пара, а значит и гидравлическое сопротивление окна. Кроме того, за счет большего расхода воды по водоперепускной трубе (на величину перебpoса) увеличивается ее сопротивление. Эти два фактора могут приводить к дополнительной посадке уровня воды между отсеками и их необходимо учитывать при работе солевого отсека на воде закритического солесодержания (по вспениваемости).

Данная схема также широко применяется в котельной практике, причем в настоящее время в качестве сепараторов пара как солевого, так и чистого отсеков применяются внутрибарабанные циклоны. Циклоны позволяют исключить барботаж пара через воду и тем самым уменьшить влияние набухания и вспенивания котловой воды на качество пара.

3.9.2. Двухступенчатая схема испарения котловой воды при размещении второй ступени в контурах, замкнутых на выносные циклоны

Разность уровней воды между барабаном и выносным циклоном необходимо определять по следующей формуле (рис. 16-3-*а*)

$$\Delta H = \frac{\Delta P_{вп} + \Delta P_{дл}^{ц} + \Delta P_{пп}}{\rho' - \rho''}, \qquad (26)$$

где $\Delta P_{вп}$ — сопротивление трубы питания выносного циклона;

$\Delta P^{ц}_{дл}$ – сопротивление дырчатого листа (потолка) циклона;

$\Delta P_{пп}$ – сопротивление трубы отвода пара из циклона в барабан.

Выполнение 2-й ступени испарения в виде контура, замкнутого на выносные циклоны, является методом борьбы со вспениванием котловой воды при высоком солесодержании, а также методом увеличения эффективности ступенчатого испарения за счет ликвидации перебросов котловой воды через внутрибарабанные перегородки между отсеками и перетоков через водоперепускные трубы.

Сопротивление труб питания выносных циклонов определяется с учетом расхода воды на непрерывную продувку котла. Сечение этой трубы выбирается исходя из рекомендованных скоростей в ней (0,2 – 0,5 м/с).

Для обеспечения выдачи циклоном качественного пара подвод пароводяной смеси должен находиться на 200 – 500 мм выше уровня воды в барабане, считая от оси нижнего штуцера. Схема, показанная на рис. 16-3-*а*, широко применяется на котлах низкого, среднего и высокого давлений. (Самая распространенная схема в котлостроении).

При отводе пара из циклона в барабан минуя дырчатый лист разность уровней воды определяется следующей формулой (рис. 16-3-*б*):

$$\Delta H = \frac{\Delta P_{вп} + \Delta P^{ц}_{дл} + \Delta P_{пп} - \Delta P^{б}_{дл}}{\rho' - \rho''}. \qquad (27)$$

Как видно из этой формулы, все члены со знаком "плюс" ведут к опусканию уровня воды в циклоне, а сопротивление дырчатого листа барабана $\left(\Delta P^{б}_{дл}\right)$ ведет к подъему уровня. При значительном сопротивлении дырчатого листа барабана, при некоторых режимах работы котлов, возможно подтопление ввода пароводяной смеси в циклон. Схема, показанная на рис. 16-3-*б*, в котлостроении применяется в основном на котлах низкого и среднего давлений.

При отводе пара из выносных циклонов в барабан котла под уровень воды (рис. 16-3-*г*) разность уровней воды определяется следующей формулой

$$\Delta H = \frac{\Delta P_{вп} + \Delta P^{ц}_{дл} + \Delta P_{пп}}{\rho' - \rho''} + h_{загл}, \qquad (28)$$

где $h_{загл}$ – расстояние по высоте от уровня воды в барабане до выходного сечения пароотводящих труб (величина заглубления).

Данная схема применяется, как на котлах среднего, так и высокого давлений (котлы ПК-20). Подвод пара солевого отсека под уровень воды был обоснован приспособлением котлов на питательную воду повышенного соле- и кремнесодержания (дополнительная промывка пара солевого отсека).

3.9.3. Трехступенчатая схема испарения котловой воды при размещении 2-й и 3-й ступеней испарения в контурах, замкнутых на выносные циклоны

Рассмотрим сначала схему когда пар циклонов заводится в барабан котла (схема 16-4-*а*). Для упрощения написания формул принимаем

$$\Delta P_{пп} = \Delta P^{ц}_{дл} + \Delta P^{тр}_{пп}, \qquad (29)$$

где $\Delta P_{пп}$ – сопротивление всего пароперепускного участка, включая сопротивление дырчатого листа циклона $\left(\Delta P^{ц}_{дл}\right)$ и сопротивление пароперепускных труб $\left(\Delta P^{тр}_{пп}\right)$.

Тогда разность уровней между барабаном и циклонами 2-й ступени испарения будет равна

$$\Delta H_1 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{пп1}}{\rho' - \rho''}. \qquad (30)$$

Разность уровней между циклонами 2-й и 3-й ступеней испарения

$$\Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2} - \Delta P_{пп1}}{\rho' - \rho''}. \qquad (31)$$

Разность уровней между уровнем воды в барабане и циклонами 3-й ступени испарения

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2}}{\rho' - \rho''}. \quad (32)$$

Данная схема применялась и применяется на котлах всех давлений при питании котлов водой повышенного соле- и кремнесодержания.

Рассмотрим схему рис. 16-4-*б*. Положение уровней воды в циклоне 2-й ступени относительно уровня воды в барабане

$$\Delta H_1 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{пп1} - \Delta P^{б}_{пп} - \Delta P^{б}_{дл}}{\rho' - \rho''}. \quad (33)$$

Положение уровней воды в циклоне 3-й ступени относительно уровня воды в циклонах 2-й ступени

$$\Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2} - \Delta P_{пп1}}{\rho' - \rho''}. \quad (34)$$

Положение уровней воды в циклоне 3-й ступени относительно уровня воды в барабане

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2} - \Delta P^{б}_{пп} - \Delta P^{б}_{дл}}{\rho' - \rho''}. \quad (35)$$

Данная сепарационная схема применяется на котлах низкого давления, а иногда и на котлах среднего давления. Качество пара выносных циклонов при этой схеме включения должно удовлетворять требованиям норм для этих котлов. В качестве выносных циклонов можно применять циклоны повышенной паропроизводительности [33], [34]. Данная схема включения позволяет разгрузить сепарационные устройства барабана на величину выработки пара солевыми отсеками, она позволяет увеличить паровые нагрузки котлов выше номинальных на величину выработки пара выносными солевыми отсеками. Однако гидродинамика этой схемы наиболее сложная, так как положение уровней воды в отсеках зависит от множества факторов (см. формулы 33, 34, 35).

Если схема 16-4-*б* не обеспечивает качества пара требованиям норм, то иногда применяют схему, когда пар выносных циклонов 2-й ступени подается в коллектор ПП, а пар циклонов 3-й ступени подается в барабан для дополнительной осушки (например, котлы Ла-Монт и др.). У данной схемы циклоны 2-й ступени включены по схеме 16-4-*б*, а циклоны 3-й ступени по схеме 16-4-*а*.

Уровни воды в циклоне 2-й ступени будут определяться формулой

$$\Delta H_1 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{пп1} - \Delta P^{б}_{пп} - \Delta P^{б}_{дл}}{\rho' - \rho''}. \quad (36)$$

Положение уровней воды в циклоне 3-й ступени относительно уровня воды в циклоне 2-й ступени

$$\Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2} + \Delta P^{б}_{дл} + \Delta P^{б}_{пп} - \Delta P_{пп1}}{\rho' - \rho''}. \quad (37)$$

Положение уровней воды в циклоне 3-й ступени относительно уровня воды в барабане

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2}}{\rho' - \rho''}. \quad (38)$$

3.9.4. Двухбарабанные котлы с разделительным барабаном (рис. 16-5)

Первые отечественные котлы высокого давления были спроектированы по двухбарабанной схеме (котлы ТП-170, ТП-230-2, ПК-14 и ПК-10). Кратко рассмотрим особенности этой схемы.

При создании этих котлов предполагалось, что в разделительном барабане, на который замкнуты все циркуляционные контуры котла, будет осуществляться предварительное разделение пароводяной смеси. Поэтому предполагалось, что по пароперепускным трубам (расположенным по верхней образующей барабана) будет в основном идти пар, а по водоперепускным трубам (расположенным по нижней образующей) — вода. Однако результаты исследований [35] и опыт эксплуатации таких котлов [12] показали, что разделительный барабан практически весь заполнен пароводяной смесью, т.е. предварительного (грубого) разделения пара от воды в этом барабане не происходит. В связи с этим как по пароперепускным трубам, так и по

водоперепускным трубам в сепарационный барабан может поступать пароводяная смесь. Поэтому в местах ввода водоперепускных и пароперепускных труб в основной барабан (из разделительного) необходимо устанавливать сепарационные устройства. Разделительный барабан в этой схеме располагается выше сепарационного. Положение уровня воды в котлах контролируется по основному барабану. Разность уровней воды между разделительным и основным барабаном определяется по формуле

$$\Delta H = \frac{\Delta P_{вп} - \Delta P_{пп}}{\rho' - \rho''}. \qquad (39)$$

В связи с тем, что уровень воды в разделительном барабане выше, чем в основном, то вода самотеком по водоперепускным трубам поступает в основной барабан котла. При нормальном режиме уровень воды в разделительном барабане не должен повышаться выше отметки устья водоперепускных труб. Если расчет дает более высокое положение уровня воды в разделительном барабане, то необходимо его понизить за счет шайбования пароперепускных труб.

3.9.5. Котлы с сухопарниками

В настоящее время котлы с сухопарниками не выпускаются, но в эксплуатации еще находится значительное количество таких котлов. В основном это котлы среднего давления типа НЗЛ, ЛМЗ и др. На рис. 16-6 показана гидравлическая схема котла, выполненного по трехступенчатой схеме испарения котловой воды. Это так называемая "параллельная" (независимая) схема включения выносных циклонов (помимо основного барабана). Уровень воды в циклонах 2-й ступени определялся по следующей формуле

$$\Delta H_1 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{пп1} - \Delta P_{б-с}}{\rho' - \rho''}. \qquad (40)$$

Уровень воды в циклонах 3-й ступени относительно уровня воды в циклонах 2-й ступени

$$\Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2} - \Delta P_{пп1}}{\rho' - \rho''}. \qquad (41)$$

Уровень воды в циклонах 3-й ступени относительно уровня воды в барабане котла

$$\Delta H_1 + \Delta H_2 = \frac{\Delta P_{вп1} + \Delta P_{вп2} + \Delta P_{пп2} - \Delta P_{б-с}}{\rho' - \rho''}. \qquad (42)$$

где $\Delta P_{б-с}$ — сопротивление пучка труб между барабаном и сухопарником.

Как видно, данные расчетные формулы похожи на формулы, описывающие положение уровней воды в схеме рис. 16-4-*б*.

Следует отметить, что в этой схеме рост $\Delta P_{б-с}$ приводит к подъему уровней воды в выносных циклонах, вероятности подтопления вводов в циклоны и потере устойчивости гидродинамики этой схемы (периодические броски влаги из циклонов). Такое явление может наблюдаться, например, при увеличении влажности пара, отпускаемого барабаном из-за подъема уровня воды в барабане, за счет увеличения тепловосприятия экранов (паропроизводительности), замкнутых на барабан, а также и по другим причинам.

Сопротивление пучка труб $\Delta P_{б-с}$ в общем случае определяется по формуле

$$\Delta P_{б-с} = \sum \zeta_{тр} \frac{W_{см}^2}{2g} \rho_{см}. \qquad (43)$$

По определению скорость пароводяной смеси равняется сумме приведенных скоростей пара и воды

$$W_{см} = W_п'' + W_в' = \frac{G_п}{f_{б-с}\,\rho''} + \frac{G_в}{f_{б-с}\,\rho'}. \qquad (44)$$

Покажем, например, что при увеличении влажности пара растет сопротивление $\Delta P_{б-с}$. Удельный объем смеси определяется формулой

$$v_{см} = v''x + v'(1-x) = \frac{x}{\rho''} + \frac{1-x}{\rho'} = \frac{x\,\rho' + (1-x)\rho''}{\rho'\,\rho''}. \qquad (45)$$

Плотность пароводяной смеси определяется

$$\rho_{см} = \frac{1}{v_{см}} = \frac{\rho'' \rho'}{x\,\rho' + (1-x)\rho''} = \\ = \frac{\rho'}{x\frac{\rho'}{\rho''} + (1-x)} = \frac{\rho'}{\left[1 + x\left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1\right)\right]} \qquad (46)$$

С увеличением влажности пара (1-х) снижается сухость пара (x) и, как следует из формулы (46), увеличивается $\rho_{см}$. Как следует из формулы (44), с увеличением влажности пара $W_o'' = \text{const}$, а W_o' увеличивается, а значит и $W_{см}$ растет. Следовательно при увеличении влажности пара после барабана увеличивается $W_{см}$ и $\rho_{см}$, а значит увеличивается и сопротивление пучка труб $\Delta P_{б-с}$.

Указанные обстоятельства роста сопротивлений паровых линий ($\Delta P^{ц}_{пп}$, $\Delta P^{ц}_{дл}$, $\Delta P^{б}_{пп}$, $\Delta P^{б}_{дл}$) при увеличении влажности пара, отпускаемого СУ, необходимо учитывать при анализе гидродинамики рассмотренных выше схем.

3.9.6. Безбарабанные котлы (рис. 17) [36]-[38]

В котельной практике нашли некоторое распространение безбарабанные котлы, т.е. котлы, у которых функции барабана выполняют выносные центробежные сепараторы пара, соединенные с помощью труб с горизонтальными коллекторами большого диаметра (уравнительные емкости), предназначенными для создания запаса воды в котле, достаточного для предотвращения значительных колебаний уровня при неустоявшихся режимах работы.

По безбарабанной схеме были выполнены паровые контуры пароводогрейных котлов, созданных на базе водогрейных котлов ПТВМ и КВГМ.

У барабанных котлов, выполненных с применением выносных солевых отсеков, при значительных колебаниях уровней в циклонах (например, при работе котла с

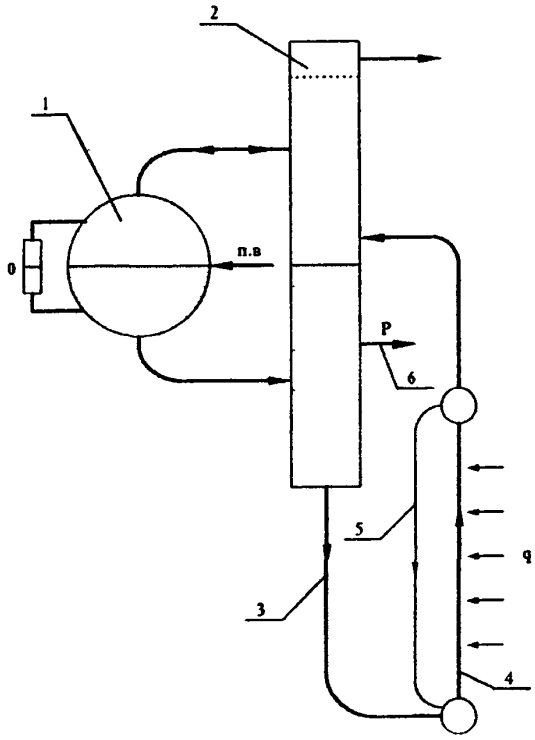


Рис. 17. Схема безбарабанного котла (контура):
1 – уравнительная емкость, 2 – выносной циклон, 3 – опускная система; 4 – экранные трубы, 5 – рециркуляционные трубы, 6 – непрерывная продувка

резкопеременными нагрузками) возможно применение уравнительных емкостей, подключенных к циклонам. Применение уравнительных емкостей позволяет стабилизировать уровни воды в циклонах.

При реконструкции действующих котлов для увеличения паропроизводительности установка нового барабана иногда практически невозможна или представляет значительные технические сложности. В этом случае "старый" барабан загружают до допустимой паровой нагрузки, а всю дополнительную выработку пара осуществляют из вновь установленных выносных циклонов, которые могут быть установлены вместе с уравнительными емкостями.

4. ПРИМЕРЫ ДЕФЕКТОВ СЕПАРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ [39]–[41]

Котлы ЦКТИ-75-39 (рис. 18)

На одной из ТЭЦ на котле паропроизводительностью 90 т/ч резко ухудшилось качество "левого" насыщенного пара барабана и стало составлять 2500 – 4000 мкг/кг (по Na). За два года эксплуатации произошло два повреждения трубок пароперегревателя с левой стороны. Был выполнен внутренний осмотр сепарационных устройств, который не выявил никаких дефектов сборки. Дефекты сборки сепарационных устройств были обнаружены только после их частичной разборки и опрессовки водой. Было установлено, что короб приема пароводяной смеси к левым торцевым циклонам (по 3 циклона с каждой стороны) заходит (частично) за дырчатый пароприемный потолок (на рис. 18 показано пунктиром). В торце этого короба была обнаружена щель (трещина или непровар) размером 2×20 мм, через которую и поступала котловая вода (на рис. 18 показано стрелкой), так как котловая вода имеет солесодержание приблизительно в 10000 раз более высокое, чем пар, то попадание даже небольшого количества воды в пар приводило к резкому ухудшению качества пара котла. После заварки этой щели котел был растоплен и проверено качество пара котла, которое стало гораздо ниже норм ПТЭ (100 мкг/кг по Na).

На другой ТЭЦ, также с котлами ЦКТИ было установлено, что качество пара одного из котлов превышает нормы ПТЭ. В результате внутреннего осмотра сепарационных устройств были обнаружены следующие дефекты.

В средней части барабана, сквозь короб приема питательной воды проходил паровой импульс (трубка) на сниженные указатели уровня. Между коробом питатель-

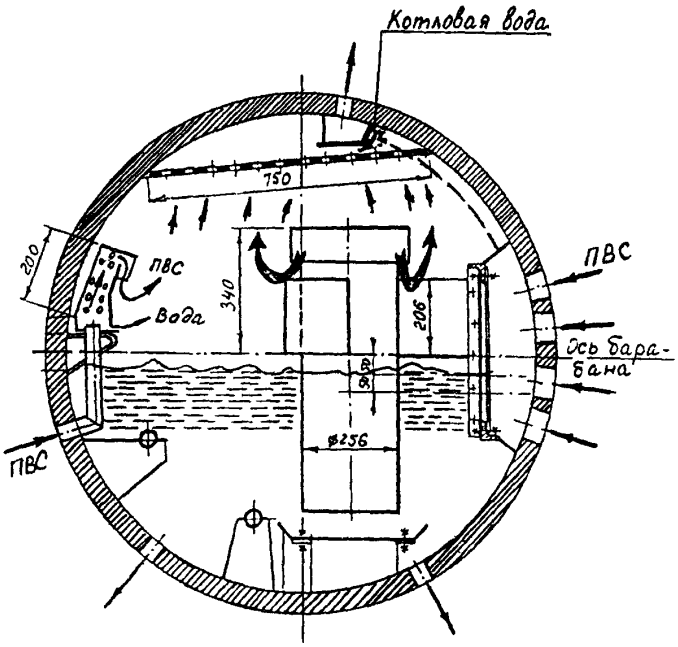


Рис. 18. Сепарационная схема котла ЦКТИ-75-39

ной воды и этой трубкой по периметру имеется щель шириной от 10 до 40 мм. Все это приводило к тому, что через эту щель со скоростью 0,5-1,0 м/с в паровой объем (на потолок) вытекала струя питательной воды.

По внутрибарабанным циклонам были обнаружены следующие дефекты:

а) у всех циклонов чистого отсека крестовины имели высоту 35 мм, а не 50 мм, как должно быть по проекту. Это приводило к тому, что недостаточно эффективно гасилась закрутка водяного объема и вследствие этого возникала возможность образования воронок, пробулькивания сквозь толщу воды барабана (H = 370 мм) и выброса в паровой объем дополнительного количества капель;

б) на многих циклонах между дырчатой крышкой и корпусом отсутствовал зазор, который создается за счет установки дистанцирующих планок (зазор не менее 5 мм). За счет этого зазора (так называемый "замок") организуется отвод пленки влаги из циклона (минуя дырчатую крышку) на наружную поверхность корпуса циклона;

в) у двух циклонов отсутствовали крестовины в водяном объеме, что приводило к последствиям, приведенным в п. а, но еще в более сильной степени.

После устранения указанных выше дефектов, испытания котлов до паровых нагрузок 100 т/ч показали, что качество пара котла не превышает нормы ПТЭ.

Котлы БКЗ-75-39 ГМА (рис. 19)

На одной из ТЭЦ котел по качеству пара не мог брать номинальную нагрузку. Нагрузка котла ограничивалась величиной 50 т/ч, но и при этой нагрузке концентрация солей натрия в паре котла доходила до 3000-5000 мкг/кг (при норме 100 мкг/кг). Котел был аварийно остановлен. Внутренний осмотр сепарационных устройств, а также частичная их разборка и опрессовка водой показала следующее:

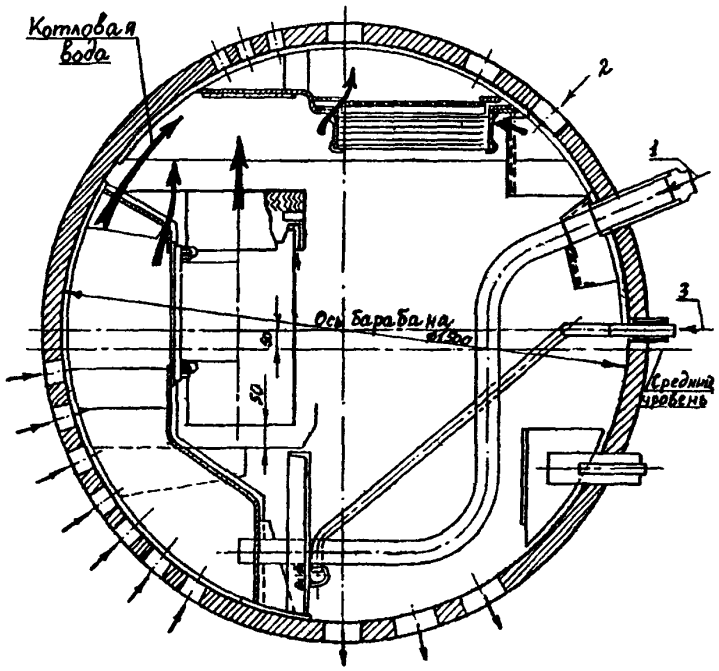


Рис. 19. Сепарационная схема котла БКЗ-75-39 ГМА:
1 – подвод питательной воды; 2 – подвод пара из выносных циклонов; 3 – подвод фосфатов

1. В средней части барабана между листом короба отвода пара из барабана и уголком короба жалюзи имеется щель длиной около 450 мм и шириной 5-10 мм. В правой части барабана между теми же элементами имеется щель длиной 350 мм и шириной до 10 мм. Указанные неплотности приводили к тому, что пар вместе с каплями влаги (после циклонов) непосредственно поступал к отводящим трубам, минуя осушку в сепарационно-активной части барабана.

2. Внутрибарабанные циклоны котла выполнены таким образом, что отсутствует зазор ("замок") (приблизительно 6 мм) между корпусом циклона и воротником, из-за чего пленка влаги, образующаяся и поднимающаяся вверх, не удаляется, а выносится из циклонов. Из-за этого циклоны работают с выдачей (в паровой объем барабана) пара повышенной влажности и тем самым ухудшают пар котла.

3. Жалюзийные сепараторы над циклонами и жалюзи перед дырчатыми потолочными листами находились в неудовлетворительном состоянии (частичное зашламление каналов жалюзи, коррозия пластин и т.д.). Это приводило к заужению каналов (большие скорости) и, как следствие, к невозможности сепарации влаги из пара (прострел).

4. В коробе приема пароводяной смеси от экранов к циклонам в большом количестве имеются щели, неплотности и непровары, а также некоторые другие дефекты.

После устранения указанных дефектов и частичной реконструкции сепарационных устройств качество пара котла по результатам испытаний до паровых нагрузок 75 т/ч не превышало нормы ПТЭ.

Котлы ТП-170 (Е-170-100-510) (рис. 20)

На одной из ТЭЦ качество пара котла резко ухудшилось, концентрация солей натрия в паре котла при некоторых ре-

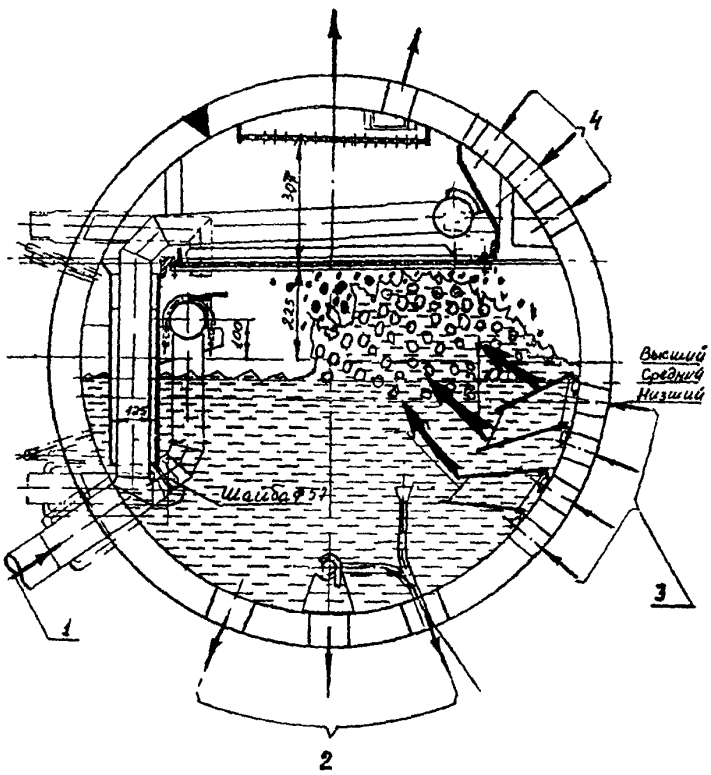


Рис. 20. Сепарационная схема котла ТП-170:
1 – подвод питательной воды, 2 – опускные трубы, 3 – вода из малого барабана, 4 – пар из малого барабана

жимах доходила до 1 – 2 мг/кг (при норме 25 мкг/кг). Котел был аварийно остановлен и выполнен внутренний осмотр сепарационных устройств. Осмотр показал, что были сорваны с петель несколько отбойных щитков, которые стоят на выходе воды из малого барабана в основной. Отбойные щитки предназначены для гашения кинетической энергии струй пароводяной смеси, выходящей из водоперепускных труб. При срыве отбойных щитков (при недостаточной надежности их крепления) возможен заброс котловой воды на промывочный лист и, вследствие этого резкое ухудшение качества пара.

Для устранения указанного дефекта и надежности крепления отбойных щитков было рекомендовано на каждой его секции точечной сваркой приварить к петлям не менее двух скоб. (До этого скобы щитков просто вставлялись в петли). После выполнения указанных работ котел длительно и надежно работает с отпуском качественного пара, такие же работы были выполнены и на остальных котлах ТЭЦ.

Котлы ТП-230-2

На одной из ТЭЦ с данными котлами (D = 230 т/ч, $P_б$ = 110 кгс/см^2, $t_{пп}$ = 510°С), выполненными по трехступенчатой схеме испарения котловой воды было замечено, что солесодержание котловой воды 1-й ступени имеет повышенное значение. Для получения пара, удовлетворяющего нормам ПТЭ, приходилось либо ограничивать паропроизводительность котла ниже номинальной, либо поддерживать повышенное значение непрерывной продувки (вместо 2 – 3% – 4-6%). В диапазоне нагрузок котла 143 – 230 т/ч влажность пара циклонов составляла 0,1 – 90%. Из-за значительного выноса воды из циклонов (3-я ступень испарения) происходило засоление 1-й ступени. Солесодержание котловой воды в 1-й ступени было приблизительно в 1,83 раза выше, чем при нормальной работе циклонов (более подробно см. приложение). Одной из причин значительного выноса влаги из циклонов является близкое расположение уровней воды к вводам, где-то на 170 – 250 мм ниже штуцеров подвода. Другой причиной являются конструктивные дефекты улиток циклонов (завышенная ширина выходной щели равная 30 мм, вместо 20 мм), а также большой угол разворота улитки, равный 268°, вместо не более 120° (по ОСТ [29] см. рис. 21).

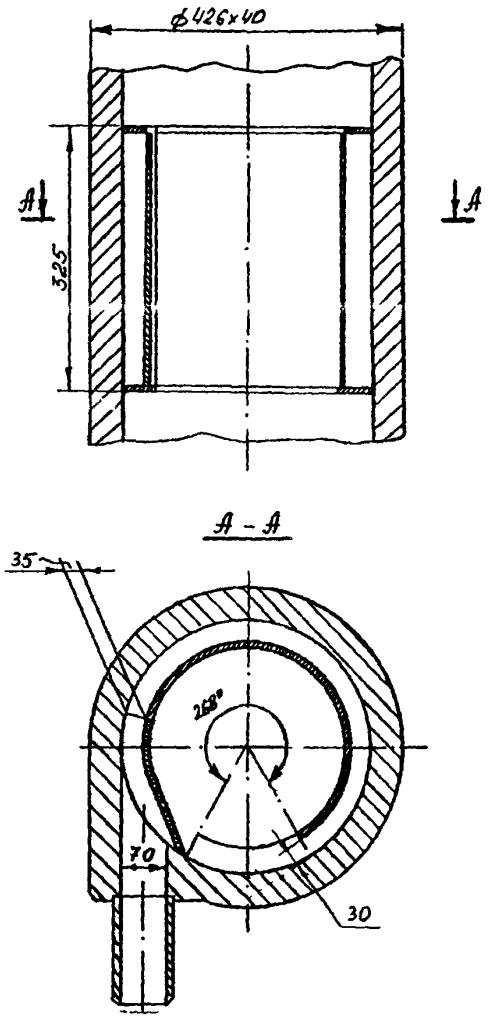


Рис. 21. Улитка выносных циклонов котла ТП-230-2

После ревизии улиток циклонов и снижения уровней воды в циклонах на 300 мм качество пара циклонов стало удовлетворительным и прекратилось засоление 1-й ступени испарения.

Котлы БКЗ-220-100Ф

На одном из котлов ТЭЦ было замечено, что при нагрузках выше $0{,}8D_н$ качество пара котла по кремнесодержанию превышало нормы ПТЭ почти в 2 раза, хотя на других котлах того же типа качество пара было в норме. Были произведены внутренний осмотр и разборка сепарационных устройств, которые выявили, что пар выносных циклонов (вместе с каплями влаги) подается в паровой объем за промывочным листом, а не до него, как положено по технологии. Из-за того, что кремнесодержание котловой воды контура, замкнутого на циклон, существенно выше, чем чистого отсека, кремнесодержание пара циклонов значительно, и увеличивалось еще и при бросках влаги из циклонов (котловая вода). На рис. 22 пунктирной стрелкой показано движение непромытого пара. Были разработаны специальные короба, которые отводили пар от циклонов под промывочный лист (обычная стрелка), после этого качество пара котла по кремнесодержанию стало соответствовать нормам ПТЭ (SiO_2 < 25 мкг/кг).

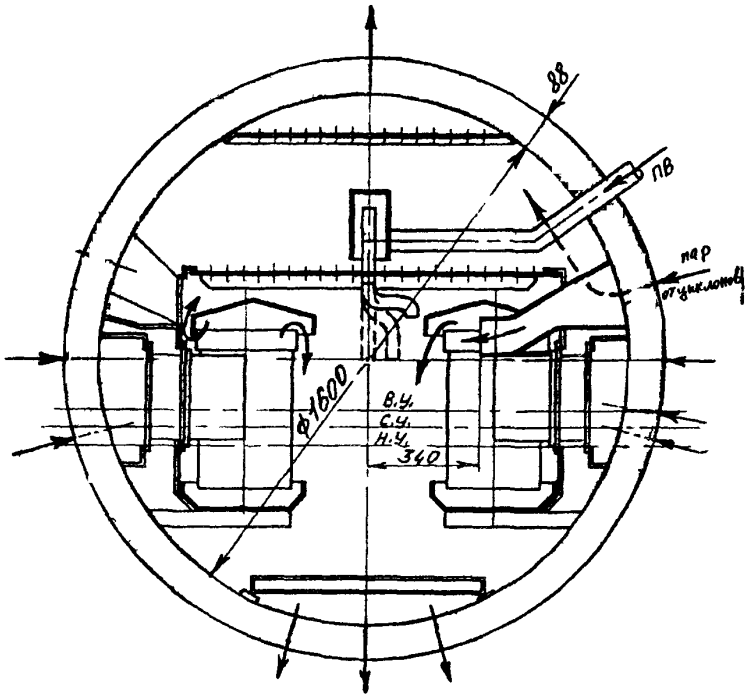


Рис. 22. Сепарационная схема котла БКЗ-220-100

Котлы БКЗ-160-110 (рис. 23)

На одной из ТЭЦ был пущен в работу новый котел БКЗ-160-110. На основании пусконаладочных работ было установлено, что вынос солей натрия в насыщенном паре котла (слева, справа и в центре барабана) составляет 2000-3000 мкг/кг (при норме ПТЭ — 25 мкг/кг). В связи с этим нагрузку котла временно ограничили до 80 т/ч, но и при этой нагрузке вынос солей натрия составлял от 80 до 3000 мкг/кг. Повышенный вынос солей натрия приводил к заносу пароперегревателя котла и турбины.

Был осуществлен тщательный внутренний осмотр, разборка и опрессовка водой сепарационных устройств котла, в результате чего было выявлено следующее. В ко-

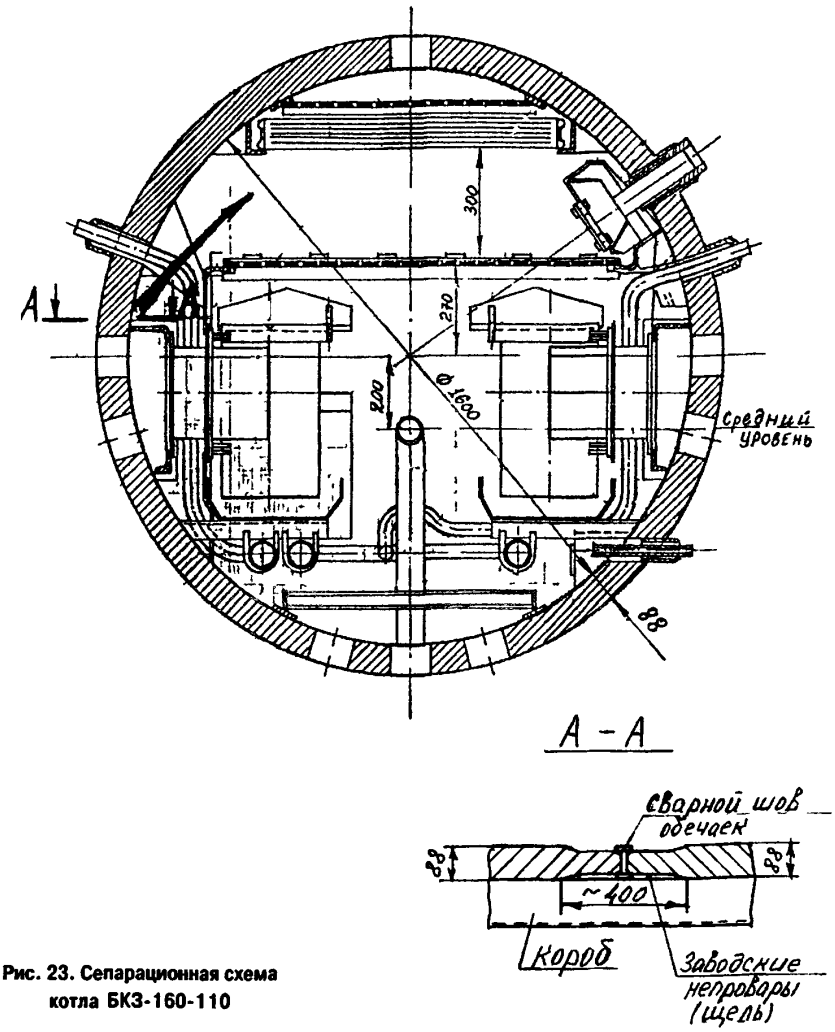


Рис. 23. Сепарационная схема котла БКЗ-160-110

робах приема пароводяной смеси (в верхней части) имеются щели (заводские непровары в месте стыковки обечаек барабана) длиной от 120 до 400 мм и шириной 1+7 мм (Количество щелей – 6 шт) На рис 23 стрелкой показан прорыв пароводяной смеси (котловой воды) из указанных щелей После заварки щелей, а также устранения ряда других дефектов сепарационных устройств, котел был растоплен Испытания показали, что при работе котла с нагрузками до 160 т/ч качество пара удовлетворяет нормам ПТЭ

Котлы ПК-19 (Е-120-100) (рис. 24, 25)

На некоторых режимах работы котлов одной ТЭЦ при регулировании температуры перегретого пара впрыском большого количества собственного конденсата происходило значительное ухудшение качества перегретого пара.

При осмотре внутрикотловых устройств барабана было обнаружено, что трубы перелива конденсатосборников заведены в сливные короба паропромывочного устройства. При таком расположении этих труб они почти всегда омываются промывочной водой. При опорожнении конденсатосборников (большой впрыск) возможен подсос промывочной воды (повышенного солее— и кремнесодержания), из-за чего и происходило ухудшение качества перегретого пара. Для исключения ухудшения качества пара котла был разработан вариант реконструкции (см. рис. 25). Испытание котла после реконструкции показало, что качество пара котла соответствует нормам ПТЭ даже при максимальном впрыске.

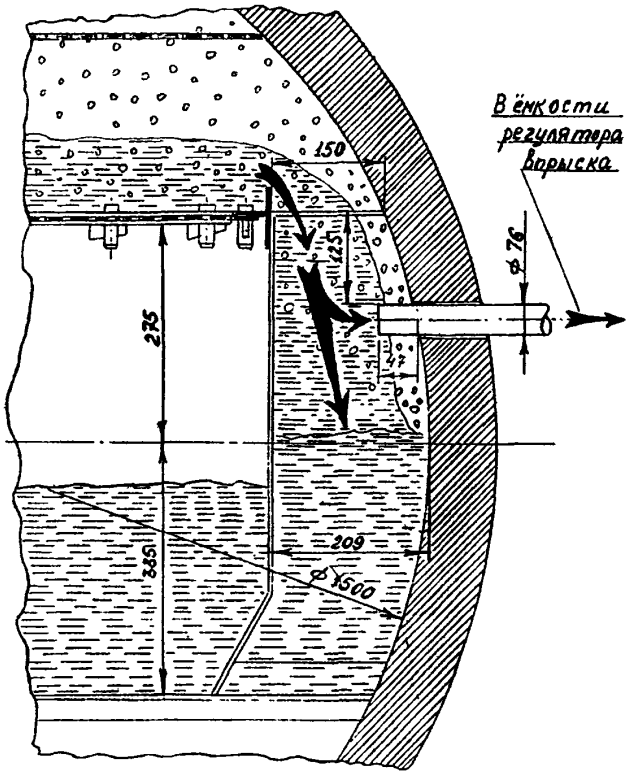


Рис. 24. Существующая схема подключения трубы перелива в емкости регулятора впрыска котла ПК-19

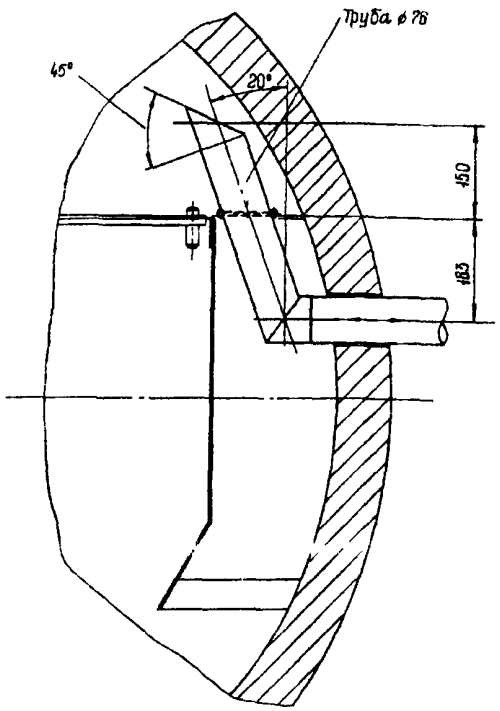


Рис. 25. Рекомендуемая схема подключения трубы перелива из емкости регулятора впрыска котла ПК-19

Котлы БКЗ-420-140 (рис. 26)

На одной из ТЭЦ было установлено, что при увеличении нагрузки котла с 360 до 420 т/ч температура перегретого пара снижалась с 560 до 525°С [42]. При полностью закрытых впрысках снижение температуры перегретого пара котла можно объяснить значительным выносом промывочной воды из барабана котла (по расчетам около 24 т/ч) из-за завышенного уровня на промывочных листах. Завышение уровня происходило по двум причинам:

из-за заниженной площади сечения сливных каналов. (При рекомендуемой скорости слива не более 0,09 м/с в действительности она была 0,15 м/с);

из-за подачи на промывочные листы 100% питательной воды. (Хотя для целей промывки по данным АО "Фирма ОРГРЭС" достаточна подача только 50%).

Для устранения указанных причин на котле были выполнены следующие работы:

дополнительно в защитном листе были прорезаны окна размером 300×1000 мм в количестве 15 шт. по всей длине барабана;

на промывку подавалось 50% питательной воды, при сбросе остального коли-

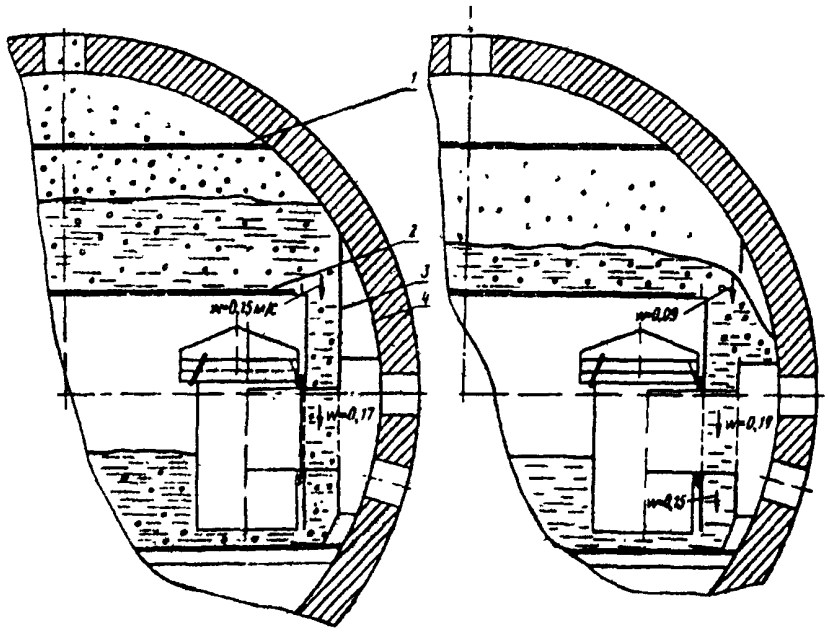


Рис. 26. Схема процесса на паропромывочном устройстве и в сливном канале котла БКЗ-420-140:
а – до реконструкции; *б* – после реконструкции; 1 – потолочный дырчатый лист; 2 – паропромывочное устройство; 3 – защитный лист; 4 – колпак циклопа

чества непосредственно в водяной объем барабана.

В результате температура перегретого пара на котле при номинальной нагрузке достигла 560°С, а качество пара стало соответствовать нормам ПТЭ.

Котлы ТГМЕ-464 (Е-500-140-560) (рис. 27)

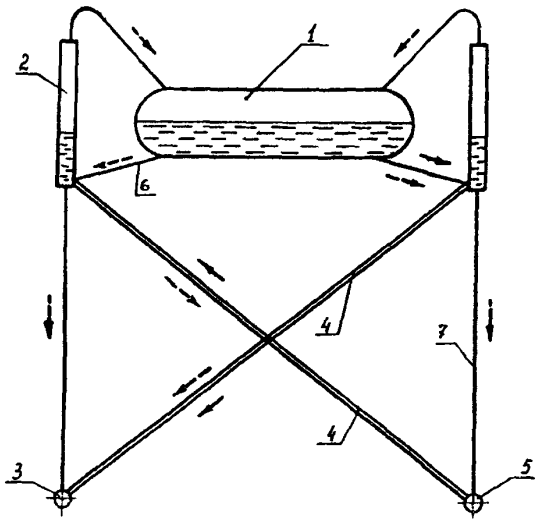


Рис. 27. Схема выполнения линии выравнивания кратности концентраций котла ТГМЕ-464:
1 – барабан; 2 – выносной циклон; 3 – коллектор левого среднего бокового экрана; 4 – линия выравнивания кратности концентраций; 5 – коллектор правого среднего бокового экрана; 6 – питательная труба; 7 – опускная труба

На одной из ТЭЦ на котле, выполненном по двухступенчатой схеме испарения котловой воды постоянно наблюдался перекос по солям в два раза и более, между правым и левым выносными отсеками. Наладка режима горения (устранение перекоса по горелкам) не привела к устранению перекоса по солям.

Ревизия выносных ступеней испарения показала, что была полностью забита шламом и окалиной левая труба питания циклонов. Экранные трубы, замкнутые на левый циклон не сгорели, так как питание этого контура осуществлялось из барабана сначала в правый циклон (по трубе питания), а затем по линиям выравнивания солевой кратности вода поступала и в левый циклон. (На схеме движение воды показано жирными стрелками). По сути дела в котле искусственно существовала как бы трехступенчатая схема испарения котловой воды (барабан – 1-я ступень испарения, правый циклон – 2-я и левый циклон – 3-я ступени испарения). Поэтому в контурах, замкнутых на левый и правый выносные циклоны существовали разные концентрации котловой воды, как в контурах 2-й и 3-й ступеней испарения. После ревизии трубы питания левого циклона перекос по солям между правым и левым солевыми отсеками был устранен. (Движение воды показано пунктирными стрелками).

Котлы ТПЕ-208 (Еп-670-140-545)

В результате внутреннего осмотра, разборки сепарационных устройств и ревизии выносных циклонов одного из корпусов энергоблока мощностью 210 МВт было обнаружено:

1. По внутрибарабанным циклонам

В коробах подвода пароводяной смеси к внутрибарабанным циклонам в месте стыковки тангенциальных патрубков циклонов и патрубков коробов, имеющих внутреннее сечение 49×198 мм стояли паронитовые прокладки, которые выступали внутрь патрубков. Разборка четырех крайних циклонов показала, что внутреннее сечение паронитовых прокладок составляло: 41×170 мм (72%), 41×175 мм (74%), 42×172 мм (75%), 35×167 мм (60%), где в скобках дано отношение внутренних сечений паронитовых прокладок к внутреннему сечению тангенциальных патрубков циклонов. Заужение внутренних сечений патрубков на 25–40% приводило к увеличению скорости п.в.с. в 1,33–1,67 раза и увеличению сопротивления циклонов (в квадрате) в 1,78–2,8 раза. Дополнительное гидравлическое сопротивление внутрибарабанных циклонов приводило к снижению циркуляционной надежности контуров замкнутых на них (снижение скоростей циркуляции в экранах, а значит и снижению кратности циркуляции).

Было принято решение демонтировать все внутрибарабанные циклоны (48 шт.) и установить новые паронитовые прокладки с внутренним сечением окна строго 49×198 мм.

2. По дырчатым пароприемным листам (рис. 28)

щей трубы (h = 80 мм). $F_{у.к.} = d_{отв} \times h$ = 95×80 = 7600 мм^2. По проекту на котле ТПЕ-208 равномерность раздачи по отводящим трубам была еще улучшена за счет установки напротив отводящих труб глухих дисков диаметром 180 мм, при этом

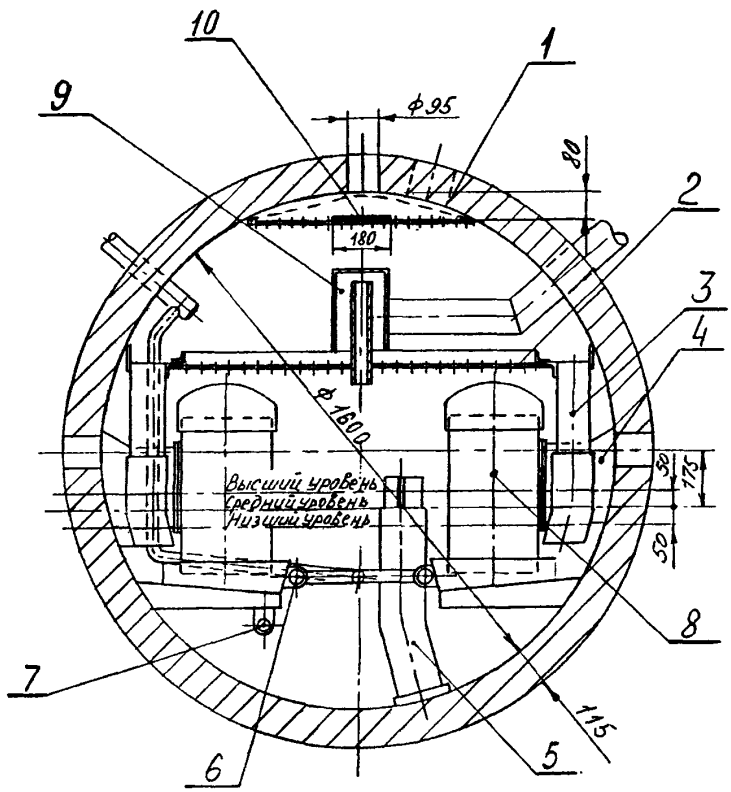


Рис. 28. Сепарационная схема котла ТПЕ-208:
1 – потолочный лист; 2 – барботажный лист; 3 – сливной короб; 4 – короб циклона; 5 – труба аварийного слива; 6 – коллектор парового разогрева; 7 – коллектор фосфатирования; 8 – циклон; 9 – короб подвода питательной воды; 10 – диск

Равномерность раздачи пара по отводящим трубам достигается тогда, когда скорость пара в отверстиях дырчатых листов в два и более раза превышает скорость в условном коллекторе. Условным коллектором называется поверхность цилиндра, диаметр которого равен диаметру отводящей трубы (95 мм), а высота – расстояние от потолочного листа до отводящей трубы. Площадь условного коллектора увеличилась до $F_{у.к.}$ = 180×80 = 14400 мм^2, а скорость пара в условном коллекторе снизилась приблизительно в два раза.

Разборкой и осмотром сепарационных устройств котла было установлено, что часть дырчатых листов в центральной части барабана были выгнуты в сторону обечайки приблизительно на 70 мм (при вы-

соте парового объема за листом 80 мм). Поджатие дырчатых листов к очкам отводящих труб (на рис. 28 показано пунктиром) приводило к значительному снижению поверхности условного коллектора, а значит и увеличению скорости пара в нем, что как следует из приведенных выше рассуждений ведет к снижению расхода пара через центральные трубы барабана. Гидравлическая разверка по отводящим трубам, возникающая из-за этого, приводила к снижению надежности труб центральных панелей радиационного п.п. Подтверждение этому — неоднократные повреждения труб центральной части радиационного п.п. Для устранения гидравлических разверок в отводящих трубах все выгнутые листы пароприемных потолков были выправлены и установлены строго горизонтально.

3. По выносным циклонам (рис. 29)

Котлы блока имеют наработку более 140000 ч, кроме того были случаи повреждения экранных труб одностороннего солевого отсека (32 трубы диаметром 60×6 мм 2-й панели правого бокового экрана). Поэтому для проверки соответствия конструкции выносных циклонов проекту было принято решение об их ревизии. Цикло-

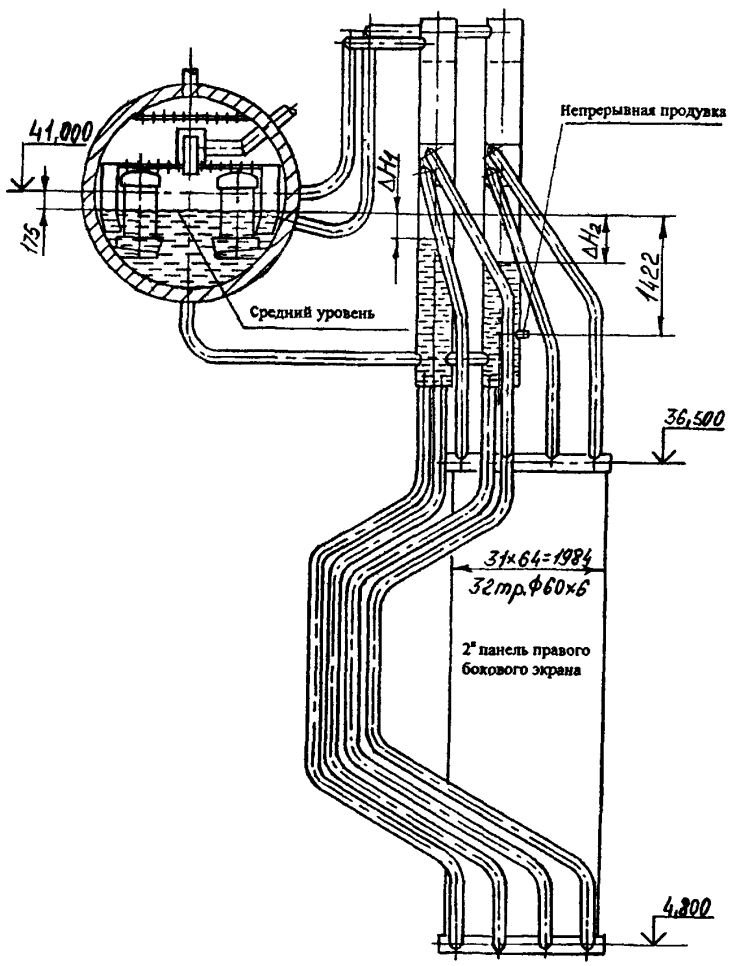


Рис. 29. Выносной солевой отсек котла ТПЕ-208

ны были демонтированы и разрезаны по нижнему сварному шву улиток. Осмотр циклонов диаметром 426×36 мм показал, что в основном конструкция циклонов соответствует проекту. Но при осмотре дырчатых пароприемных листов (145 отверстий диаметром 10 мм) было обнаружено, что у ближнего циклона (первого по ходу воды) приблизительно 10 – 15% от общего количества отверстий забита, а у дальнего циклона приблизительно 30%. На рис. 30 показано состояние дырчатого потолка дальнего циклона.

По расчетам, дополнительная посадка уровня воды из-за уменьшения проходного сечения потолка у ближнего циклона составила около 250 мм, а у дальнего – 540 мм вод.ст. Экспериментальное измерение уровней воды в циклонах при номинальной нагрузке и после прочистки отверстий дырчатых потолков показало, что уровень воды в ближнем циклоне находится приблизительно на 700 мм, а в дальнем циклоне на 900 мм ниже среднего уровня воды в барабане. Соответствующие уровни воды в циклонах до прочистки отверстий потолков находилось ориентировочно на отметках – 950 мм и – 1440 мм (при допустимом снижении не более 1000 мм). Следует отметить, что при снижении уровня воды в дальнем циклоне ниже – 1422 мм происходит выключение непрерывной продувки котла. Из приведенных цифровых материалов следует, что при номинальной нагрузке котла уровень воды в дальнем циклоне опускается ниже отметки непрерывной продувки и она выключается. Через линию непрерывной продувки начинал идти пар. Затем из-за нарушения материального баланса солевого отсека (приход был больше расхода) уровень воды в циклоне поднимался до отметки непрерывной продувки и

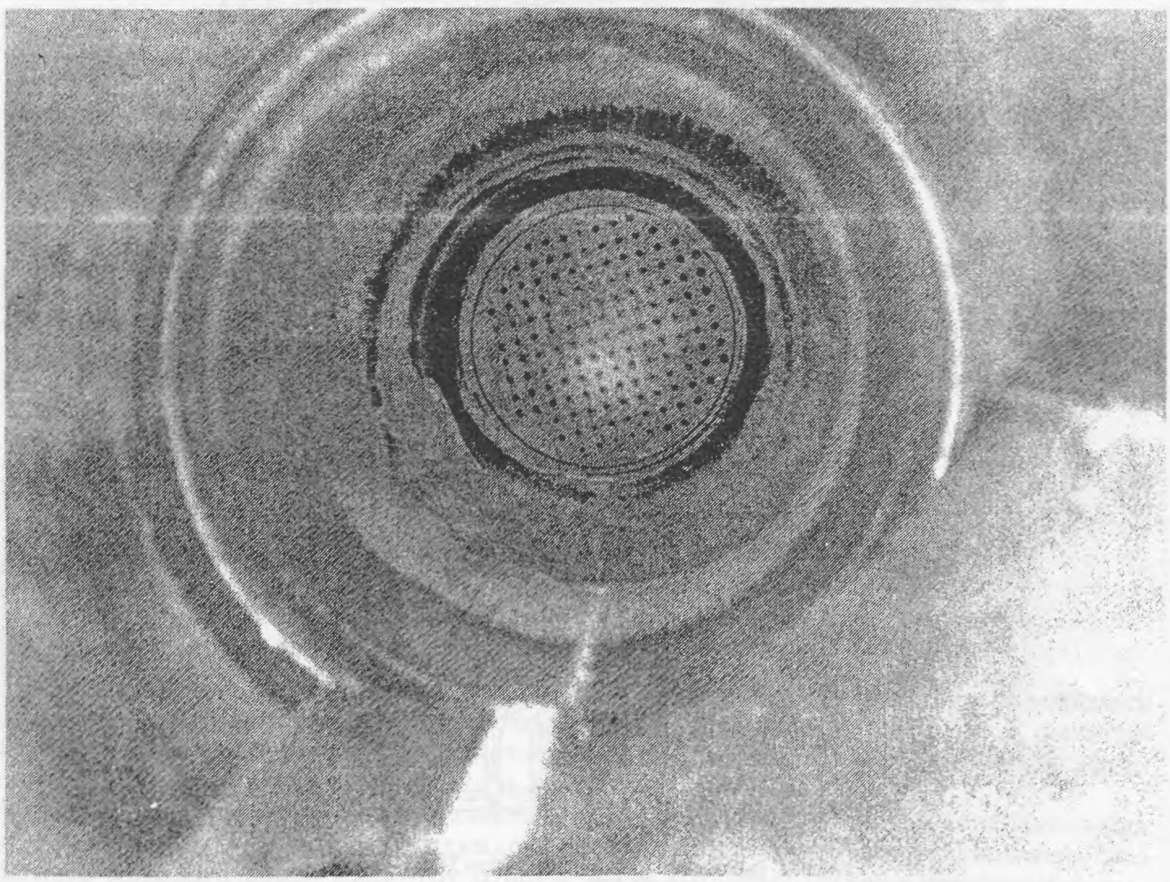


Рис. 30. Паровая часть дальнего выносного циклона

она снова включалась в работу. Весь цикл колебания уровня воды в циклоне ниже отметки непрерывной продувки повторялся. Периодическое выключение непрерывной продувки котла приводило к накоплению солей (щелочей) в солевом отсеке, увеличению pH котловой воды более нормируемого значения 10,5 и возможности возникновения щелочной коррозии экранных труб котла.

Прочистка отверстий дырчатого листа позволила поднять уровень воды в ближнем и дальнем циклонах. Гидродинамика контура солевого отсека стала надежной и ликвидировались режимы с накоплением солей при самопроизвольном отключении непрерывной продувки. Подобная ревизия выносных циклонов была проведена и на других энергоблоках ГРЭС.

5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

5.1. При проведении работ по наладке сепарационных устройств следует руководствоваться и строго соблюдать требования действующих ПТБ [46].

5.2. Перед проведением на котле вышеназванных работ необходимо выполнить осмотр внутрибарабанных сепарационных устройств с устранением всех обнаруженных дефектов.

5.3. Перед проведением осмотра, в соответствии с ПТБ необходимо произвести все отключения, обеспечивающие безопасные условия для его проведения: котел должен быть отсоединен от действующих паропроводов, питательной линии, продувочных точек, линий аварийных сбросов заглушками.

5.4. Персонал, производящий осмотр сепарационных устройств, должен пройти соответствующий инструктаж. Осмотр внутрибарабанных сепарационных устройств должен производиться с ведома начальника смены котлотурбинного цеха.

5.5. Для работы внутри барабана котла должны быть открыты оба люка. Перед допуском кого-либо в барабан котла после его кислотной промывки должны быть проведены вентиляция и проверка воздуха в барабане на достаточность кислорода (не менее 20% по объему), содержание водорода и, при необходимости, сернистого газа. Концентрация водорода в барабане не должна превышать 1/5 нижнего предела его воспламеняемости (4% по объему), а сернистого газа — значения предельно допустимой концентрации его в воздухе (10 мг/м^3).

5.6. Вентиляция барабана должна обеспечиваться переносным вентилятором (желательно осевым), размещенным вне барабана с более холодной стороны котла у открытого люка барабана. Подача шлангом сжатого воздуха в барабан менее эффективна.

5.7. Для предотвращения засорения опускных труб в нижней части барабана необходимо положить резиновый, либо паронитовый коврик, который, кроме того, повышает безопасность проведения работ внутри барабана.

5.8. Переносные электрические светильники должны иметь рефлектор, защитную сетку, крючок для подвески и шланговый провод с вилкой.

5.9. Особое внимание следует обращать на исключение возможности подачи на переносные светильники напряжения выше 12 В. Переносные понижающие трансформаторы, к которым присоединяются переносные ручные светильники, должны быть установлены снаружи барабана, около лаза. Вносить внутрь барабана понижающий трансформатор запрещается. Корпус и вторичные обмотки понижающих трансформаторов должны быть заземлены.

5.10. Требуется обеспечить при проведении работ по осмотру сепарационных устройств внутри барабана наличие снаружи, около лаза дежурного, на случай оказания срочной помощи работающим внутри барабана.

Приложение

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРЕХСТУПЕНЧАТОЙ СХЕМЫ ИСПАРЕНИЯ КОТЛОВОЙ ВОДЫ БАРАБАННЫХ КОТЛОВ ПРИ ПЕРЕБРОСЕ ИЗ 3-Й СТУПЕНИ (ВЫНОСНОЙ) В 1-Ю

На тепловых электростанциях и в котельных применяются барабанные котлы с трехступенчатой схемой испарения котловой воды, причем, как правило, 1-я и 2-я ступени испарения внутрибарабанные, а 3-я ступень испарения – выносная. При этом пар после выносных циклонов направляется чаще всего в сепарационно-активную часть 1-й ступени испарения. По трехступенчатой схеме испарения котловой воды могут быть выполнены котлы ТП-87 (Е-420/140), ТГМ-84 (Е-420/140ГМ), ТП-230-2 (Е-230/100), БКЗ-220-100, ПК-20 (Е-110/100), БКЗ-75-39 и др.

В основополагающих работах по расчету водного режима в отношении чистоты пара схем ступенчатого испарения барабанных котлов [6], [7], [47] – [49] приведена методика расчета трехступенчатых схем испарения котловой воды, но только с учетом переброса котловой воды из 2-й ступени в 1-ю. В работах [7], [48] указывается, что переброс котловой воды из 3-й ступени испарения (выносной) маловероятен, поэтому методика расчета трехступенчатой схемы испарения котловой воды с перебросом из 3-й в 1-ю ступень отсутствует. Как известно, загрязненность пара солями обуславливается капельным и избирательным уносом.

На основании опыта теплохимических испытаний барабанных котлов высокого и среднего давления, выполненных АО "Фирма ОРГРЭС", установлено, что солевые отсеки с выносными циклонами с внутренней улиткой часто выдают пар повышенной влажности, иногда доходящей до нескольких процентов (в отдельных случаях и до десятка процентов), т.е. из циклона происходит интенсивный вынос котловой воды (капельный унос).

При написании солевых балансов для схемы, показанной на рис. 31, были приняты следующие допущения:

1. Избирательным выносом солей из ступеней испарения пренебрегаем.

2. Капельным уносом из 1-й и 2-й ступеней испарения в связи с незначительностью – пренебрегаем.

3. Повышенный капельный унос из 3-й ступени в 1-ю принимаем как переброс котловой воды.

На основании этих допущений уравнения солевого баланса котла:

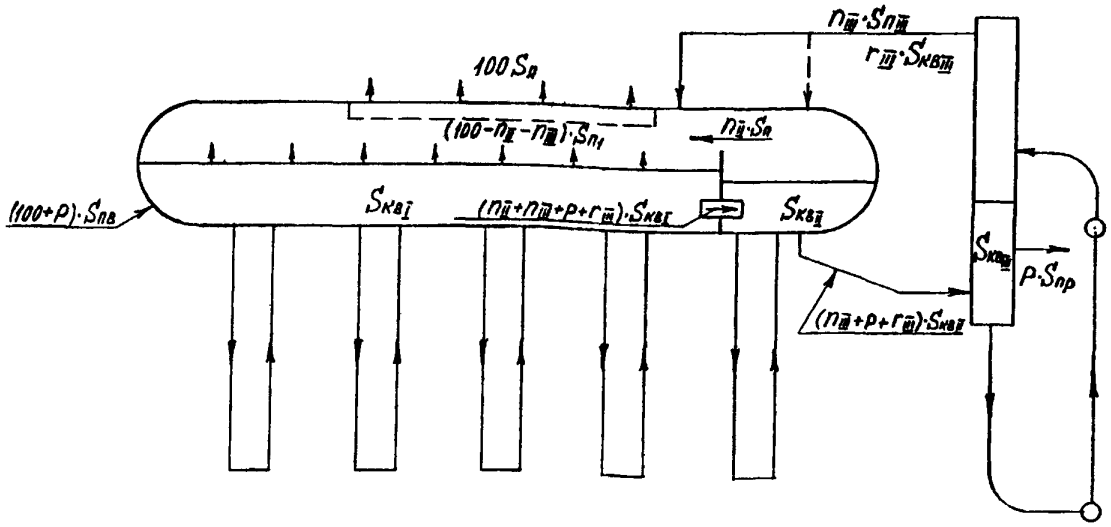


Рис. 31. Принципиальная схема котла с трехступенчаты испарением котловой воды

$$(100 + P)\, S_{пв} + r_{III}\, S_{квIII} = (n_{II} + n_{III} + r_{III} + P)\, S_{квI}; \quad (1)$$

$$(n_{II} + n_{III} + r_{III} + P)\, S_{квI} = (n_{III} + r_{III} + P)\, S_{квII}; \quad (2)$$

$$(n_{III} + r_{III} + P)\, S_{квII} = (r_{III} + P)\, S_{квIII}, \quad (3)$$

где $S_{пв}$, $S_{квI}$, $S_{квII}$, $S_{квIII}$ – соответственно солесодержание питательной, котловой воды 1-й, 2-й и 3-й ступеней испарения;

n_{II}, n_{III} – относительные паропроизводительности 2-й и 3-й ступеней испарения в % от паропроизводительности котла;

r_{III} – абсолютный переброс котловой воды из 3-й ступени в 1-ю в % от паропроизводительности котла;

P – величина непрерывной продувки котла, %.

Из уравнения (3) определяем

$$S_{квIII} = \frac{n_{III} + r_{III} + P}{r_{III} + P} S_{квII}, \quad (4)$$

подставляя в уравнение (4) уравнение (2), получим

$$S_{квIII} = \frac{n_{II} + n_{III} + r_{III} + P}{r_{III} + P} S_{квI} \quad (5)$$

подставляя уравнение (5) в уравнение (1) получим

$$(100 + P) S_{пв} + r_{III}\left[\frac{n_{II} + n_{III} + r_{III} + P}{r_{III} + P}\right] S_{квI} = (n_{II} + n_{III} + r_{III} + P) S_{квI}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) путем несложных преобразований получаем

$$K = \frac{S_{квI}}{S_{пв}} = \frac{100 + P}{n_{II} + n_{III} + P - \frac{r_{III}(n_{II} + n_{III})}{r_{III} + P}}. \quad (7)$$

При отсутствии переброса (или его незначительности), когда $r_{III} = 0$, уравнение (7) упрощается

$$\frac{S_{квI}}{S_{пв}} = \frac{100 + P}{n_{II} + n_{III} + P}. \quad (7')$$

Если решить уравнение (7) относительно величины переброса, то получим

$$r_{III} = \frac{P}{\frac{n_{II} + n_{III}}{n_{II} + n_{III} + P - (100 + P)\cdot \frac{S_{пв}}{S_{квI}}} - 1}. \quad (8)$$

При помощи уравнений (7) и (8), зная величину $S_{квI}$ и $S_{пв}$ можно определить величину переброса r_{III} или влажность пара, который выдает циклон. Величина абсолютного переброса будет равна

$$r_{III} = \frac{D_{перебр}}{D_к} \cdot 100\,\%. \quad (9)$$

Влажность пара, отпускаемого циклонами (при $D_{перебр} = D_{вл}$)

$$w = \frac{D_{вл}}{D_{вл} + D_{III}} \cdot 100\,\%. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (10) уравнение (9) получим

$$w = \frac{r_{III} D_к}{D_{III} + r_{III} D_к} \cdot 100 = \frac{100}{\frac{n_{III}}{r_{III}} + 1}. \quad (11)$$

Из уравнения (11), зная n_{III} и r_{III} можно найти влажность пара выносного циклона.

Анализ трехступенчатой схемы испарения котловой воды при перебросе из 3-й в 1-ю ступень испарения:

1. Путем несложных математических выкладок можно показать, что солесодержание котловой воды 3-й ступени испарения не зависит от величины переброса (r_{III}) из 3-й ступени в 1-ю.

2. Переброс котловой воды из 3-й ступени испарения в 1-ю приводит к увеличению солесодержания котловой воды в 1-й ступени испарения и, как следствие, к увеличению влажности (коэффициента выноса) пара этой ступени испарения.

3. Для уменьшения отрицательного влияния переброса необходимо (как это показано на рис. 31 пунктирной линией) пар 3-й ступени испарения заводить во 2-ю ступень испарения, в торец барабана. Тогда солесодержание котловой воды чистого отсека не будет зависеть от переброса из 3-й ступени испарения.

На конкретном примере рассмотрим применимость указанной методики. На котле ТП-230-2 одной из станций ($D_к$ = 230 т/ч, $P_б$ = 110 кгс/см^2, $t_{пп}$ = 510°С), выполненном по трехступенчатой схеме испарения котловой воды (4 выносных циклона диаметром 426×35 мм), было замечено, что солесодержание котловой воды 1-й ступени испарения имеет повышенное значение. Для получения пара котла, удовлетворяющего нормам ПТЭ, эксплуатационный персонал был вынужден поддерживать завышенное значение непрерывной продувки 4 – 6%, а не 2 – 3%, как рекомендует ПТЭ.

Выполненные теплохимические испытания котла показали:

1. В диапазоне паровых нагрузок 143 – 230 т/ч из выносных циклонов вместо пара идет пароводяная смесь (в 1-ю ступень испарения) с влажностью от 0,1 до 90%.

2. Из-за значительного выноса воды из циклонов (3-я ступень испарения) происходит засоление 1-й ступени испарения. Например, при паровой нагрузке 230 т/ч действительная кратность упаривания равна: $K_1 = \frac{S_{кв1}}{S_{пв}} = 5,5$, в то время как при отсутствии переброса кратность была бы равна 3,0. Солесодержание котловой воды чистого отсека приблизительно в 1,83 раза выше, чем при работе котла с отсутствием переброса.

3. Основной причиной значительного выноса влаги циклонами являлись конструктивные недостатки установленных циклонов, а также близкое расположение уровней воды в циклонах к вводам пароводяной смеси. Уровни воды в циклонах в диапазоне паровых нагрузок 143 – 230 т/ч находились на 24 – 155 мм ниже среднего уровня воды в барабане. Согласно исследованиям НПО ЦКТИ [29], [30] и АО "Фирма ОРГРЭС" [39], [50] для нормальной работы выносных циклонов уровень воды в них должен быть ниже уровня воды в барабане не менее, чем на 300 – 500 мм.

4. Измеренная паропроизводительность 3-й ступени испарения составила 24,2 т/ч (n_{III} = 10,52%). Согласно тепловому расчету котла паропроизводительность 3-й ступени должна быть 11%. Практически экспериментальные и расчетные значения паропроизводительности 3-й ступени испарения совпали.

5. В диапазоне паровых нагрузок котла 143 – 230 т/ч влажность пара (%) циклонов составила:

	Левого переднего	Левого заднего	Правого переднего	Правого заднего
$D_к$ = 143 т/ч	90%	0,1%	80%	0,1%
$D_к$ = 230 т/ч	72%	6%	56%	0,2%,

где влажность пара определялась по солевой методике, как

$$w = \frac{Na_п}{Na_{кв}} 100\,\%,$$

$Na_п$, $Na_{кв}$ – концентрация натрия в паре и в котловой воде, из которой вырабатывается пар.

Подсчитаем по формуле (8) значение переброса, приняв для расчета n_{II} = 16%, P = 5%:

$$r_{III} = \frac{5}{\dfrac{16 + 10,52}{16 + 10,52 + 5 - (100 + 5)\dfrac{1}{5,5}} - 1} = 4,41\,\%.$$

Влажность пара отпускаемого циклонами подсчитаем по формуле (11):

$$w = \frac{100}{\dfrac{10,52}{4,41} + 1} = 29,54\,\%.$$

Экспериментально полученная влажность пара циклонов, например, при нагрузке 230 т/ч, будет равна:

$$w_{ср} = \frac{w_ц^{л(п)} + w_ц^{л(5)} + w_ц^{пр(п)} + w_ц^{пр(з)}}{4} = \frac{72 + 6 + 56 + 0,2}{4} = 33,55\,\%,$$

т.е. совпадение расчетных и экспериментальных данных вполне удовлетворительное.

Опыт применения отвода пара выносных циклонов не в 1-ю ступень испарения, а во 2-ю (торцы барабана) на котлах среднего давления освещен также в работе [41], [51], [52].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: РД 34.20.501-95.— М.: СПО ОРГРЭС, 1996.
2. *Кутателадзе С.С., Стырикович М.А.* Гидродинамика газожидкостных систем.— М.: Энергия, 1976.
3. *Сорокин Ю.Л., Демидова Л.Н.* Скорость витания крупных капель жидкости в потоке газа или пара.— Энергомашиностроение, 1981, № 1.
4. *Стырикович М.А., Мартынова О.И., Миропольский З.Л.* Процессы генерации пара на электростанциях.— М.: Энергия, 1969.
5. *Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г.* Гидродинамика и теплообмен при парообразовании.— М.: Высшая школа, 1983.
6. *Маргулова Т.Х.* Методы получения чистого пара.— М.-Л.: ГЭИ, 1955.
7. Водный режим тепловых электростанций / Под ред. Т.Х. Маргуловой.— М.-Л.: Энергия, 1965.
8. *Стырикович М.А.* Внутрикотловые процессы.— М.-Л.: ГЭИ, 1954.
9. РТМ 108.030.05-75. Расчет и проектирование внутрикотловых схем и сепарационных устройств барабанных котлов высокого давления.— М.: НПО ЦКТИ, 1975.
10. РД 24.031.121-91. Оснащение паровых стационарных котлов устройствами для отбора проб пара и воды. (Методические указания).— М.: НПО ЦКТИ.
11. *Ноев В.Н.* Руководящие указания по осмотру и приемке внутрикотловых устройств.— М.-Л.: ГЭИ, 1955.
12. *Ноев В.Н.* Внутрикотловые устройства энергетических паровых котлов с естественной циркуляцией. (Обзор).— М.: Информэнерго, 1973.
13. *Белов Н.В., Ноев В.Н., Образцова Н.В., Ялышев З.С.* Методика эксплуатационных теплохимических испытаний барабанных котлов.— М.-Л.: Энергия, 1964.
14. *Четвериков А.В., Лившиц С.И.* Схемы и устройства химического контроля водного режима барабанных котлов 110 и155 ат.— М.: Информэнерго, 1971.
15. *Можаров Н.А., Панасенко М.Д.* Результаты тарировки устройств по отбору проб пара.— Электрические станции, 1959, № 3.
16. *Можаров Н.А.* Исследование критической скорости срыва пленки влаги со стенки паропровода.— Теплоэнергетика, 1959, № 2.
17. *Аленчиков С.И., Евзерова Ф.Н., Кемельман М.Н.* Методика отбора представительной пробы влажного пара.— Электрические станции, 1956, № 7.
18. *Кемельман М.Н.* и др. Об отборе средней пробы влажного пара.— Электрические станции, 1964, № 7.
19. *Козлов Ю.В., Толчанов В.П.* О контроле влажности пара на АЭС.— Энергетик, 1976, № 5.
20. *Агеев А.Г., Карасев Б.Б.* и др. Сепарационные устройства АЭС.— М.: Энергоиздат, 1982.
21. *Панасенко М.Д.* Водный режим котла и сепарация пара. (Конспект лекций).— М.: МЭИ, 1960.

00-149

22. *Козлов Ю.В.* Об усовершенствовании и расчете промывочно-сепарационных устройств мощных барабанных котлов высокого давления. Автореферат канд. диссертации.— М.: ВТИ, 1963.
23. ГОСТ 8.563.1-97. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла ИСА 1932 и трубы Вентури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия.
ГОСТ 8.563.2-97. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Методика выполнения измерений с помощью сужающих устройств.
24. Локшин В.А. Технические характеристики трубок для измерения расхода жидкости.— Теплоэнергетика, 1954, № 4.
25. *Пржиялковский М.М.* Циркуляция воды в паровых котлах и методы ее исследования.— М.: Энергия, 1967.
26. *Федоров А.И.* Рекомендации (технические предложения) по переводу барабанных котлов на пониженные параметры пара.— М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
27. РД 24.130.04-88. Проектирование паропромывочных устройств паровых стационарных котлов. (Методические указания).— М.: НПО ЦКТИ, 1988.
28. РД 24.130.03-88. Проектирование внутрибарабанных циклонов паровых стационарных котлов. (Методические указания).— М.: НПО ЦКТИ, 1988.
29. ОСТ 108.030.03-83. Циклоны выносные паровых стационарных котлов. (Типы. Основные параметры. Конструкция и размеры. Технические требования).
30. ОСТ 108.838.10-80. Циклоны выносные котлов низкого и среднего давления. Общие технические требования.
31. *Мынкин К.П.* Сепарационные устройства паровых котлов.— М.: Энергия, 1971.
32. *Идельчик И.Е.* Расчет отвода газа из газоочистных, теплообменных и других аппаратов.— Теплоэнергетика, 1954, № 4.
33. *Федоров А.И., Белоусов Н.П.* Опыт применения выносных циклонов с повышенной единичной паропроизводительностью: Информационное письмо № 4-89.— М.: СПО Союзтехэнерго, 1989.
34. *Федоров А.И., Бузников Е.Ф., Масловский Г.В.* Результаты исследования двухступенчатого выносного циклона со сферической вставкой.— Теплоэнергетика, 1988, № 9.
35. *Филимонов А.И.* Работа разделительного барабана котла высокого давления: Сб.: Пар высокого давления в энергетике.— М.-Л.: ГЭИ, 1950.
36. *Бузников Е.Ф.* Циклонные сепараторы в паровых котлах.— М.: Энергия, 1969.
37. *Федоров А.И., Овчинников В.А.* Опыт перевода водогрейных котлов типа ПТВМ-30 М и КВГМ в пароводогрейный режим с выработкой пара и горячей воды в одном агрегате.— Промышленная энергетика, 1999, № 1.
38. *Федоров А.И.* О применении безбарабанных котлов.— Промышленная энергетика, 1999, № 8.
39. *Федоров А.И.* Работа внутрикотловых сепарационных устройств и надежность паровых барабанных котлов: Обзор повреждений тепломеханического оборудования электростанций с поперечными связями и тепловых сетей за 1996 год.— М.: СПО ОРГРЭС, 1997.
40. *Федоров А.И.* Совершенствование сепарационных устройств барабанных котлов.— Электрические станции, 1997, № 8.
41. *Федоров А.И.* Методика расчета трехступенчатой схемы испарения котловой воды барабанных котлов.— Электрические станции, 1997, № 11.

42. *Щеткин В.С., Булкин Ю.П.* Результаты наладки и испытаний котла Бобруйской ТЭЦ-2 при работе его на мазуте: Труды ЦКТИ, вып. 171.— Л.: 1979.
43. Гидравлический расчет котельных агрегатов. (Нормативный метод) / Под ред. В.А. Локшина и др.— М.: Энергия, 1978.
44. ОСТ 24.838.18-74. Устройства паропромывочные паровых стационарных котлов. (Типы. Конструкция и параметры. Технические требования).
45. *Федоров А.И.* Рекомендации (технические предложения) по повышению паропроизводительности барабанных котлов различных типов.— М.: СПО ОРГРЭС, 2000.
46. Правила техники безопасности при эксплуатации тепломеханического оборудования электростанций и тепловых сетей.— М.: ЭНАС, 1997.
47. *Холодовский Г.Е.* Расчет схем ступенчатого испарения в котлах с естественной циркуляцией.— М.-Л.: АН СССР, 1948.
48. *Маргулова Т.Х.* Рациональное конструктивное оформление, методика расчета и перспективы применения схем ступенчатого испарения с выносными циклонами. (Техническая информация).— М.: МЭИ, 1953.
49. *Маргулова Т.Х.* О расчетах водного режима в отношении чистоты пара.— Теплоэнергетика, 1953, № 3.
50. *Федоров А.И., Бузников Е.Ф.* К гидродинамике паровых безбарабанных контуров.— Теплоэнергетика, 1989, № 1.
51. *Федоров А.И.* Способ повышения надежности барабанных котлов с выносными ступенями испарения: Обзор повреждений тепломеханического оборудования электростанций с поперечными связями и тепловых сетей за 1998 год.— М.: СПО ОРГРЭС, 1999.
52. *Федоров А.И., Бердин С.В.* Опыт наладки, испытания и реконструкции внутрикотловых устройств котла БКЗ-75-39 при работе на питательной воде солесодержанием до 500 мг/кг. Промышленная энергетика 2001, №1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3
1. Общие сведения о внутрикотловых сепарационных устройствах. Основные термины и определения 5
2. Основные конструкции сепарационных устройств барабанных котлов среднего и высокого давления 10
3. Методика наладки сепарационных устройств 13
3.1. Осмотр сепарационных устройств 13
3.2. Проверка плотности сборки сепарационных устройств опрессовкой водой 15
3.3. Методика и устройства отбора представительной пробы пара и воды 15
3.4. Измерение уровней воды в барабанах и выносных циклонах 23
3.5. Особенности измерения паропроизводительности выносных циклонов 27
3.6. Основные причины ухудшения качества пара котлов 27
3.7. Допустимые паровые нагрузки и скорости пара и воды в элементах сепарационных устройств котлов 28
3.8. Технические условия и допуски по сборке сепарационных устройств 29
3.9. Гидравлические расчеты схем ступенчатого испарения 30
4. Примеры дефектов сепарационных устройств 37
5. Техника безопасности 49
Приложение. Методика расчета трехступенчатой схемы испарения котловой воды барабанных котлов при перебросе из 3-й ступени (выносной) в 1-ю 50
Список использованной литературы 53

gost.e-ecolog.ru