

**АККУМУЛИРОВАНИЕ  
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО  
ПАРА**

Одним из путей сведения балансов ПП является его аккумуляция в периоды избыточного поступления с отдачей пара во время, когда его не хватает.

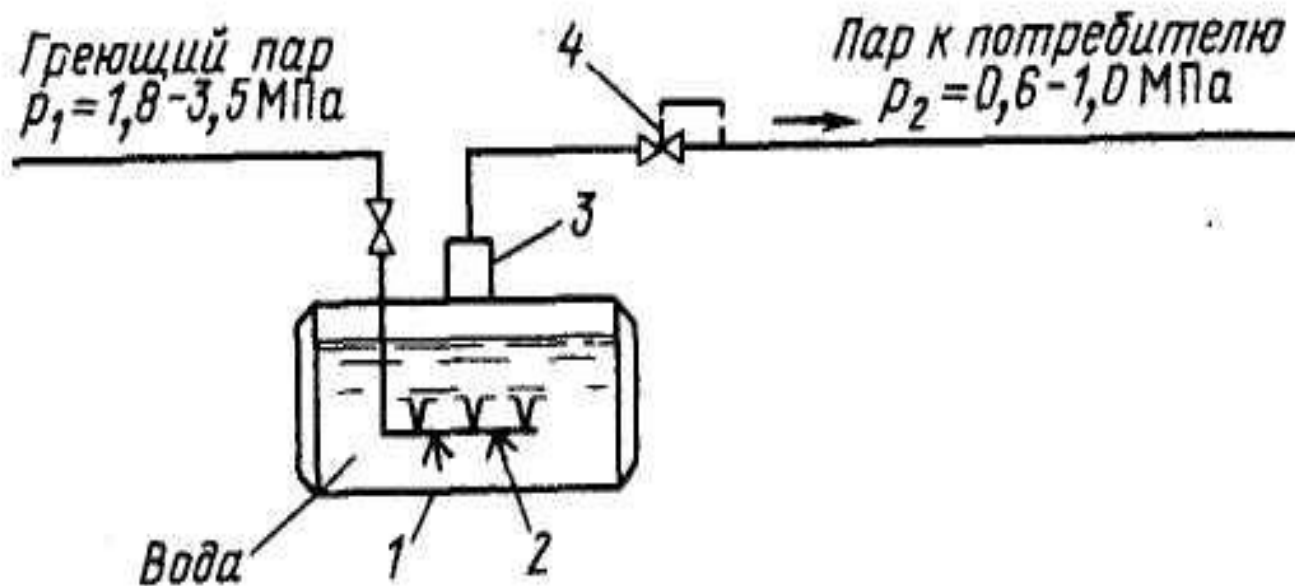


Рис. Принципиальная схема аккумулятора пара:  
1 — бак-аккумулятор; 2 — смешивающий подогреватель; 3 — паросборник-сепаратор; 4 — регулятор давления «после себя»

В цилиндрический сосуд, в котором находится вода, подается пар с давлением более высоким, чем давление отпускаемого потребителю пара, например  $p_1 = 1,8-3,5$  МПа,  $p_2 = 0,6-1,0$  МПа.

Пар подогревает воду до своей температуры насыщения, например  $239,8^\circ \text{C}$  при давлении  $p_1 = 3,4$  МПа и до  $206,1^\circ \text{C}$  при давлении  $p_1 = 1,8$  МПа. При этом в сосуде в конце зарядки устанавливается давление, равное  $p_1$ . Давление отпускаемого потребителям пара поддерживается на заданном уровне автоматическим регулятором давления типа «после себя» (поз. 4 рис.).

На металлургических заводах УУ  
выдают пар в основном с давлением  
**1,8—3,5 МПа**, а **давление** в системе  
**общезаводских паропроводов**  
составляет **0,8—1,2 МПа**.

Соответственно давление  
отпускаемого пара  $p_2$  должно быть  
не ниже **0,8—1,2 МПа** в  
зависимости от месторасположения  
аккумуляторов на территории завода.

При выдаче пара аккумулятором давление в сосуде падает и вода в нем вскипает, образуя так называемый **вторичный пар**. Выделение пара будет идти до тех пор, пока в сосуде не установится давление, равное давлению отпускаемого пара  $p_2$ .

Соответственно максимальный выход вторичного пара определяется его энтальпией и разностью энтальпий воды в момент начала разрядки аккумулятора (А) и в ее конце.

**Количество теплоты, за счет которой может образоваться пар, равно разности энтальпий воды при ее начальном и конечном давлениях.**

Так, при давлении  $p_1=3,4$  МПа  
энтальпия воды  $h_1^в = 1040$  кДж/кг;

при давлении  $p_2=1,0$  МПа  
энтальпия воды  $h_2^в = 750$  кДж/кг.

Энтальпия насыщенного  
вторичного пара давлением 1,0 МПа  
 $h_{2к}^п = 2780$  кДж/кг.

В начале разрядки в паровом пространстве (А) находится пар с давлением  $\sim p_1$  (давление пара, которым производится зарядка). В регуляторе 4 он будет дросселироваться до  $p_2$  и при этом несколько перегреваться.

Энтальпия пара, идущего к потребителям, будет соответствовать энтальпии насыщенного пара при давлении  $p_1$ , а не  $p_2$ .

По мере разрядки давление пара в (А) будет снижаться, соответственно будет уменьшаться энтальпия пара до значения, соответствующего давлению  $p_2$ , отдаваемому потребителям.

Т.о. в начале разрядки (А) отдает больше теплоты, чем нужно для получения потребителем 1 кг насыщенного пара.

Поэтому определять, сколько пара может быть получено от (А) при его разрядке исходя только из разности энтальпий пара при давлениях  $p_1$  и  $p_2$ , нельзя, так как при этом будет завышена его аккумулирующая способность по вторичному пару.

Расчет надо вести по ступенчатым средним энтальпиям выделяющегося в (А) пара при его разрядке.



С достаточной точностью можно принять среднюю энтальпию пара, выходящего из (А) в период разрядки  $h_{\text{ср}}^{\text{п}}$ , равной среднеарифметической между энтальпией пара в самом начале разрядки  $h_{2\text{н}}^{\text{п}}$  и в конце разрядки  $h_{2\text{к}}^{\text{п}}$ .

В рассматриваемом примере  $h_{2\text{н}}^{\text{п}} = 2800$ ,  $h_{2\text{к}}^{\text{п}} = 2780$  кДж/кг. Соответственно

$$h_{\text{ср}}^{\text{п}} = (2800 + 2780) / 2 = 2790$$

Количество выделившегося вторичного пара  $G_{\text{п}} = G_{1\text{н}} - G_{1\text{к}}$ , где  $G_{1\text{н}}$ ,  $G_{1\text{к}}$  — масса воды в (А) в начале и в конце разрядки.

Количество теплоты, унесенной  
вторичным паром,

$$Q_{\Pi} = G_{\Pi} \cdot h_{\text{ср}}^{\Pi} = G_{1\text{Н}} h_{1\text{Н}}^{\text{В}} - G_{1\text{К}} h_{1\text{К}}^{\text{В}} \cdot$$

Откуда получаем

$$G_{\Pi} / G_{1\text{Н}} = \left( h_{1\text{Н}}^{\text{В}} - h_{1\text{К}}^{\text{В}} \right) / \left( h_{\text{ср}}^{\Pi} - h_{1\text{К}}^{\text{В}} \right) \quad (5.3)$$

где,  $h_{1\text{Н}}^{\text{В}}$   $h_{1\text{К}}^{\text{В}}$  — энтальпия воды в (А) в  
начале и конце разрядки соответственно.

Из (5.3) следует, что при начальном давлении пара  $p_1 = 3,5$  МПа и конечном  $p_2 = 1$  МПа для получения 1 кг вторичного пара необходима масса воды в (А) примерно 7 кг, чему соответствует удельный объем (А)  $v_{ак}^{уд} \sim 7$  м<sup>3</sup>/т пара.

Если  $p_1 = 1,8$  МПа, а  $p_2 = 1,0$  МПа, то  $v_{ак}^{уд} \sim 15$  м<sup>3</sup>/т пара.

Т.е. удельная вместимость (А) сильно зависит от начального и конечного давлений пара.

Так как баки-аккумуляторы находятся под значительным давлением до 3,5 МПа, их выполняют **цилиндрическими** с полезным объемом воды  $V_{\text{п}}$ , равным **50-100 м<sup>3</sup>**.

Максимальная отдача одного сосуда с  $V = 100 \text{ м}^3$  составит при  $p_1^{\text{п}} = 3,4 \text{ МПа}$  до 14,3 т пара давлением 1,0 МПа,  
а при  $p_1 = 1,8 \text{ МПа}$  — ~ 3,3 т пара давлением 1,0 МПа.

Характерными особенностями таких (А) являются:

- **сравнительно** малая удельная ( $\text{т/м}^3$ ) аккумулирующая способность по пару, которая сильно зависит от соотношения давлений первичного и вторичного пара;

- **большая** безвозвратная потеря давления пара, например от 3,5 до 1,0 МПа и т. п.;

- **ВОЗМОЖНОСТЬ** выдачи аккумулированного количества пара за короткое время, определяемое в основном пропускной способностью паросепарационных устройств.

# Области возможного экономического применения (А) пара данного типа

**1 вариант.** При малых дефицитах ПП по абсолютным размерам (несколько десятков тонн в час) и малой длительности (доли часа).

Так, если временный дефицит ПП равен 50 т/ч и длится 0,5 ч, то (А) должен выдать  $G_{\text{п}} = 50 \cdot 0,5 = 25$  т пара. Если зарядка А ведется паром давлением 3,4 МПа, а требуемое давление ПП составляет 1,0 МПа, то потребный суммарный полезный объем сосудов (А) при  $v_{\text{ак}}^{\text{уд}} = 7$  м<sup>3</sup>/т пара составит

$$\sum V_{\Pi} = G_{\Pi} v_{ак}^{уд} = 25 \cdot 10^3 \cdot 7 = 175 \quad 3$$

Такие размеры технически осуществимы и приемлемы. Установка будет состоять из двух—четырёх корпусов.

Экономическая целесообразность установки пароводяного (А) должна обосновываться соответствующим расчетом применительно к данным конкретным условиям с учетом альтернативных вариантов покрытия дефицита ГП, наличия ГП давлением 1,8—1,0 МПа и 3,5 МПа и др.

**2 вариант.** В ряде производств (например, на металлургических заводах) дефициты ПП могут составлять сотни тонн в час и длиться многие часы и даже несколько суток.

В этих случаях (А) достигают неприемлемых размеров, требуют больших капиталовложений и расходов металла.

Поэтому применение только (А) задачу балансирования расходов и доходов ПП для крупного завода решить не может.



**Аккумулятор данного типа может**

**применяться как вспомогательное устройство для покрытия больших кратковременных дефицитов пара в сочетании с другими компенсирующими установками.**

Поэтому на металлургических заводах (А) такого типа получили ограниченное распространение, в основном для выравнивания приходов пара от КОВов конвертеров, у которых перерывы между продувками составляют обычно 30—15 мин.

**ВЫРАВНИВАНИЕ  
ПАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ  
УТИЛИЗАЦИОННЫХ  
УСТАНОВОК**

значительной мере из-за неравномерности выдачи пара утилизационными установками (УУ), поэтому одним из путей поддержания баланса ПП по заводу является выравнивание паропроизводительности УУ.

**Для большинства УУ это может быть достигнуто путем подтопки, т. е. сжиганием в УУ топлива.**

Схема подтопки котла-утилизатора (КУ), установленного за ТА (нагревательной печью) и обогреваемого отходящими газами нагревательной печи, показана на рис. 5.4.

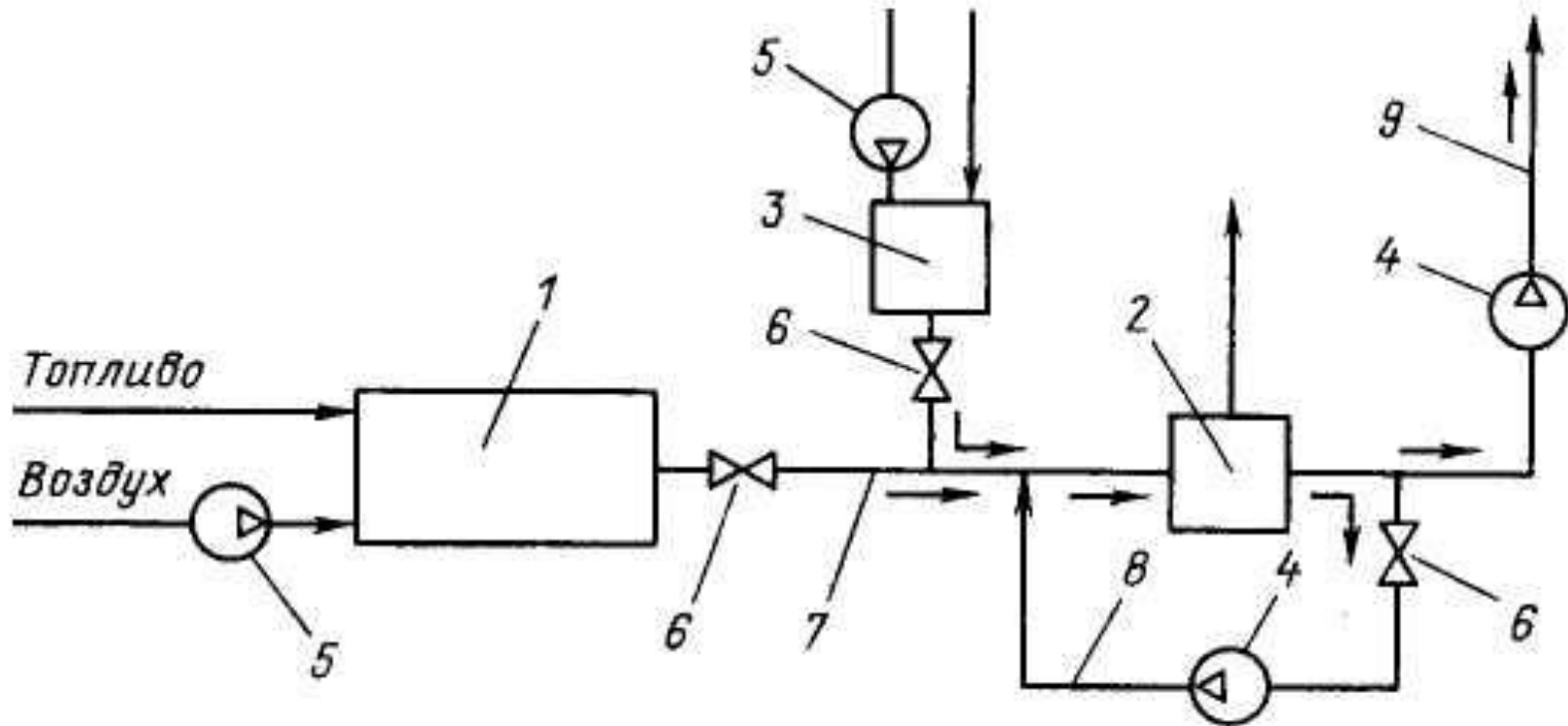


Рис. 5.4. Схема установки КУ за нагревательной печью с подтопкой и рециркуляцией газов:

1—ТА; 2—КУ; 3 — выносная топка; 4 — дымосос; 5 — вентилятор; 6 — запорный орган; 7—9 — газоходы

## **ПОДТОПКИ.**

Когда расход и температура отходящих газов по тем или иным причинам уменьшаются, паропроизводительность КУ снижается.

Повысить ее до прежнего значения можно сжиганием топлива в подтопочном устройстве и подмешиванием горячих газов из подтопочного устройства к отходящим газам из печи.

Подтопкой можно обеспечить и даже превысить номинальную паропроизводительность КУ и при остановленной печи. В обоих случаях дополнительный пар получается за счет сжигания топлива, как в обычных производственных или пиковых котельных.

Соответственно экономичность  
применения подтопки определяется  
КПД, с которым используется  
дополнительное топливо, а также  
годовым числом часов работы  
подтопочного устройства.

Наиболее распространены КУ  
змеевикового типа с многократной  
принудительной циркуляцией  
(МЩЦ), что объясняется  
следующими их особенностями и  
преимуществами:

**Коэффициент теплоотдачи конвекцией от греющих газов к стенке трубы почти обратно пропорционален ее диаметру, а при температурах отходящих газов 400—500° С теплоотдача конвекцией доминирует;**

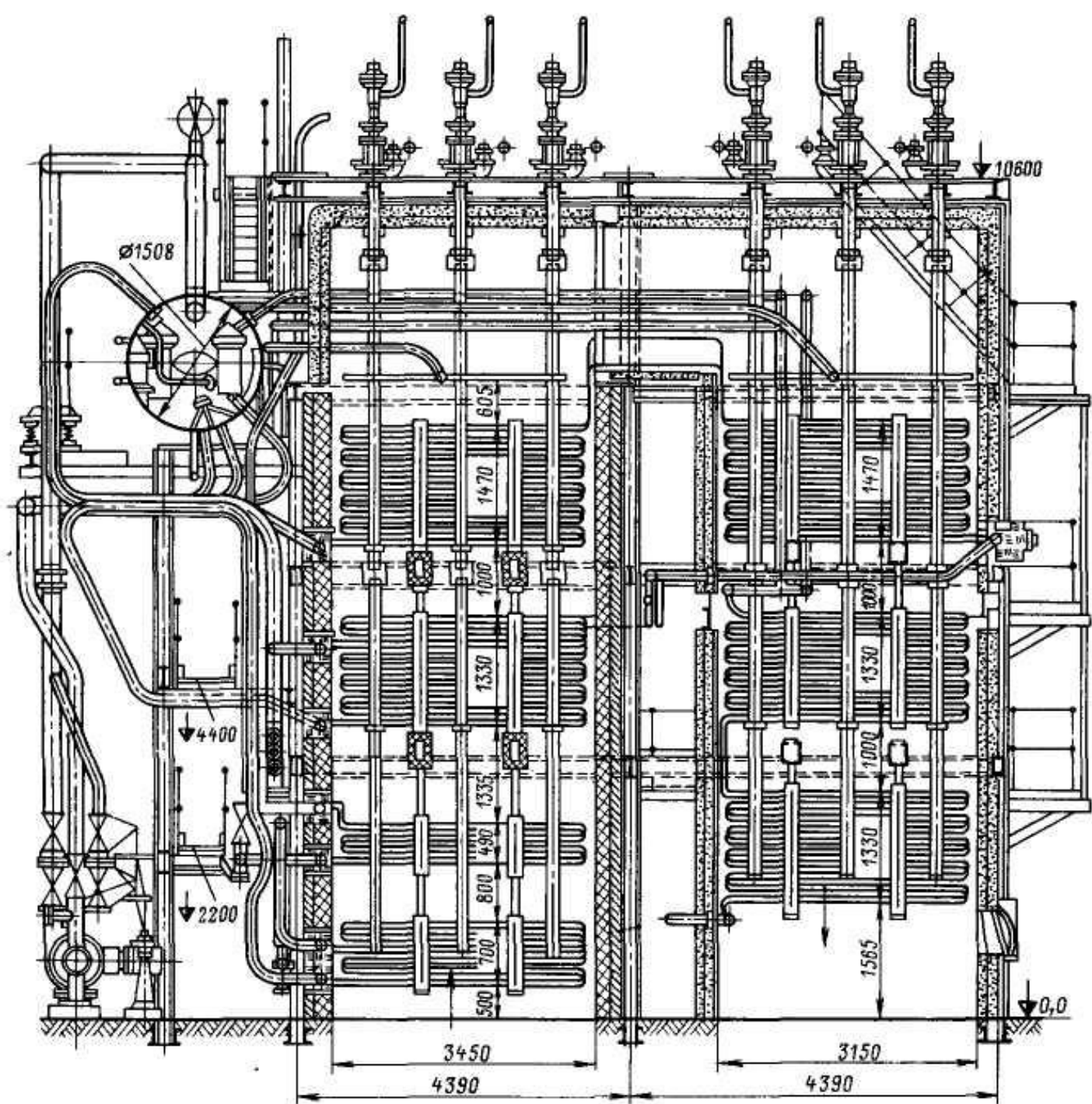
**Из труб малого диаметра (обычно до 38 мм) можно создавать компактные пакеты (при стандартизации шагов труб, радиусов гибов змеевиков и др., а также кратности длин змеевиков и ширин пакетов из них это позволяет в значительной степени механизировать и удешевить производство КУ, а также их монтаж):**

**при малых диаметрах труб целесообразно применение принудительной циркуляции, что повышает надежность КУ.**

Кроме того, **при МПЦ снижаются требования к качеству котловой воды** (КУ могут питаться катионированной на 100% водой, а конденсат пара от заводских его потребителей может при этом полностью поступать на ТЭЦ высокого давления).

Применение МПЦ позволяет располагать барабан-сепаратор любым образом по отношению к испарительным змеевикам, что облегчает компоновку КУ. Общий вид КУ с МПЦ типа КУ-100 показан на рис.





КУ с МПЦ рассчитаны на температуру греющих газов не выше 850° С.

Обеспечить такую температуру перед КУ при значительных размерах подтопки (особенно при остановленной печи или работе в горячем резерве) можно сжиганием топлива в подтопочном устройстве с увеличенным избытком воздуха  $\alpha > 2$ , но это приводит к снижению КПД УУ из-за роста потерь теплоты с уходящими газами (при номинальной паропроизводительности КУ за счет подтопки КПД использования теплоты дополнительно сжигаемого топлива при остановленной печи или работе в горячем резерве составляет 0,65-0,70).

**Повысить КПД** можно применением рециркуляции газов (см. рис. 5.4). При этом **топливо сжигается** в специальном **подтопочном устройстве** (это может быть вынесенная топка горелки в газоходах и др.) с минимальным  $\alpha$ , обеспечивающим полное его сгорание.

Необходимое снижение температуры газов из подтопочного устройства примерно до  $850^{\circ}\text{C}$  достигается подмешиванием рециркулирующих газов, подаваемых дымососом и забираемых из газохода после КУ.

При этом использование теплоты сжигаемого в подтопочном устройстве топлива **повышается до 0,8—0,87 при остановленной печи. Почему?**

Расход газов, сбрасываемых после КУ в атмосферу, равен расходу их из подтопки, где топливо сжигается с минимальным  $\alpha$ , и потеря теплоты с уходящими газами примерно такая же, как у обычных котлов на топливе. При этом расход сбрасываемых газов не зависит от расхода газов на рециркуляцию, так как те циркулируют по замкнутому контуру, иными словами, температура продуктов сгорания на выходе из подтопки может быть любой.

Поверхность нагрева КУ рассчитана на получение номинальной паропроизводительности при начальной температуре греющих газов не выше  $800—850^{\circ}\text{C}$  и определенном их расходе.

По расчетам при сжигании в подтопке того же топлива, на котором работала печь (например, коксо доменного газа с теплотой сгорания  $\sim 8500 \text{ кДж/м}^3$ ), суммарный расход греющих газов через КУ практически равен расчетному, соответственно температура газов на выходе из КУ составляет  $210—220^{\circ}\text{C}$ .

Если печь работает с пониженной  
против расчетной производительностью,  
а номинальная паропроизводительность  
КУ поддерживается подтопкой, то  
коэффициент использования сжигаемого  
в подтопочном устройстве топлива  
несколько ниже, чем при остановленной  
печи.

## **Почему?**

При пониженной производительности  
печи уменьшается и температура  
отходящих газов  $t_{0.2}$ , а следовательно, и  
коэффициент использования теплоты  
этих газов в КУ, который определяется  
по формуле

$$\eta_{\text{КУ}} = \frac{c_p t_{\text{о.г}} - c_p t_{\text{у.г}}}{c_p t_{\text{о.г}}} = 1 - \frac{t_{\text{у.г}}}{t_{\text{о.г}}}, \quad (5.4)$$

где  $t_{\text{у.г}}$  - температура уходящих газов за КОТЛОМ.

Коэффициент использования теплоты дополнительно сжигаемого топлива определяется по формуле

$$\eta_{\text{н.т}} = \Delta D \Delta h_{\text{п}} / Q_{\text{топ}}, \quad (5.5)$$

где  $\Delta D$  - дополнительное количество пара, получаемого за счет подтопки;  $\Delta h_{\text{п}} = h_{\text{п}} - h_{\text{п.в}}$  - приращение энтальпии дополнительного пара в КУ;  $Q_{\text{топ}}$  - теплота сгорания топлива, сжигаемого в подтопочном устройстве.

При оценке приведенных ранее значений КПД необходимо учитывать, что они в значительной степени определяются довольно высокой номинальной температурой уходящих газов у серийных КУ, которая составляет **210—220° С.**

Так как подтопка производится только небольшое число часов в году, устанавливать дополнительные поверхности нагрева для снижения температуры уходящих газов экономически не оправдано.



выравнивать  
паропроизводительности **УУ** с  
достаточно **хорошими**  
энергетическими показателями.

**Экономические показатели**  
**подтопки высокие**, так как  
себестоимость дополнительно  
получаемого за ее счет пара  
определяется в основном только  
стоимостью топлива и питательной  
воды.

Дополнительные капитальные затраты  
на подтопочное устройство и систему  
рециркуляции составляют всего

Сам комплекс УУ, включающий в себя котел-утилизатор, деаэратор, насос, дымосос, дымовую трубу, систему КИПиА и вспомогательные устройства, остается без изменений.

Не требуется дополнительного обслуживающего персонала. Лучше используется в течение года установленная тепловая мощность УУ.

Поэтому себестоимость пара, дополнительно получаемого на УУ за счет подтопки, значительно ниже, чем себестоимость пара от специальных пиковых паровых котлов.

## Применение подтопки (по расчетам)

повышает паропроизводительность установленных КУ  $\sim$  **на 20%** сверх номинальной, что способствует покрытию пиков расходов ПП на заводе.

Если отходящие газы от печи не обеспечивают номинальной паропроизводительности установленного КУ, то подтопкой можно ее обеспечить.

При подтопке повышение паропроизводительности КУ лимитируют паросепараторные устройства, циркуляционные насосы и

В подтопке целесообразно сжигать то топливо, на котором работает данная печь (ТА), при этом суммарный расход топлива не увеличивается. **Почему ?**

Печь, **работая с полной производительностью**, сжигает  $V^0$  топлива, и на выработку пара в КУ используется только часть теплоты этого топлива — 25-30%. **Если печь не работает**, то вся теплота сожженного в подтопке топлива используется в КУ с учетом его КПД.

**Так как КПД КУ гораздо больше КПД печи** ( $\eta_{\text{п}} = 0,25-0,35$ ), то в подтопке достаточно сжечь гораздо меньше топлива, чем  $V^0$  при одинаковых паропроизводительностях КУ.

Подтапливать можно практически все УУ, в том числе и УСТК, хотя на них подтопка значительно сложнее.

**Таким образом, подтопка УУ с целью выравнивания их паропроизводительности эффективна и может широко использоваться.**

При этом в первую очередь целесообразно оборудовать подтопкой наиболее крупные УУ, на которых можно дополнительно получать сотни тонн в час пара и помогать ликвидации его периодических дефицитов.

**Ценным качеством подтопки** является автоматический ввод в действие в считанные минуты и покрытие благодаря этому резких и больших провалов в паровом балансе завода (создание системы полной автоматизации установки не представляет технической проблемы).

**Отрицательное влияние** на КПД использования теплоты топлива, сжигаемого в подтопке, **оказывают подсосы через неплотности запорных органов.** Эти подсосы могут быть ликвидированы гидрозатвором **(ГЗ)**

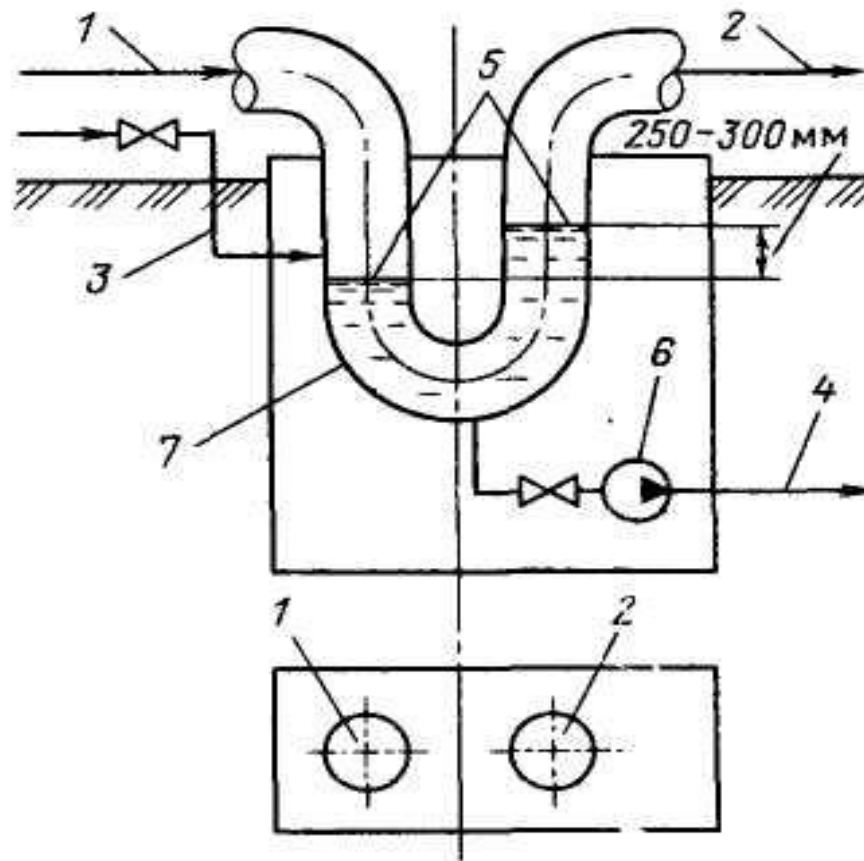


Рис. 5.6. Схема ГЗ для нетоксичных газов с низким давлением: 1 - дымовые газы от печи; 2 - выход газов из ГЗ; 3 - вода для заливки ГЗ; 4 - слив воды; 5 - уровень воды в ГЗ при остановленной печи; 6 - насос; 7 - газопровод ГЗ

ГЗ устанавливаются как дополнительно к обычным шиберам, так и взамен их.

Отключение печи от КУ производится заполнением водой, а отключение ГЗ - спуском (откачкой) воды.

ГЗ может устанавливаться как на уровне земли или выше, так и заглубленным в землю. Когда печь работает, ГЗ открыт, так как через него идут уходящие газы печи. При остановленной печи разрежение газов перед дымососом равно сумме падений давления в КУ и в газоходах до и после него. При этом разрежение в начале выходного газопровода из ГЗ равно разрежению



Обычно разность уровней воды во входном и выходном газопроводах не превышает 250-300 мм, с запасом можно принимать 500 мм. Небольшая разность уровней воды в газопроводах позволяет делать их компактными.

Через ГЗ идут продукты сгорания, которые не являются токсичными (как, например, доменный газ и др.) или взрывоопасными, поэтому по технике безопасности установка ГЗ вполне допустима.