

## Лекция ■. Вторичные энергетические ресурсы

В энергетических балансах предприятий особенно энергоемких отраслей значительное место занимают вторичные энергетические ресурсы (ВЭР).

Экономия топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) может быть реализована в двух направлениях. Во-первых, за счет усовершенствования технологических процессов и аппаратов (новых энергосберегающих технологий), благодаря чему достигается повышение КПД и снижается расход топлива и энергии. Во-вторых, посредством утилизации ВЭР, которые неизбежно возникают в больших объемах особенно в энергоемких производствах, и за счет которых можно получить 30 – 35% сбережения ТЭР.

Под вторичными энергоресурсами понимают энергетический потенциал отходов продукции, побочных и промежуточных продуктов, образующихся в теплотехнологических агрегатах (установках), который может быть частично или полностью использован для энергоснабжения других агрегатов или в самом аппарате.

Энергетические отходы, которые возвращаются обратно на вход в технологический агрегат, называются ВЭР внутреннего использования, а ВЭР, утилизируемые в других установках – внешнего использования. Сам технологический агрегат, который является источником энергетических отходов, называется источником ВЭР.

Все ВЭР подразделяют на три основные группы.

**Горючие (топливные) ВЭР** – химическая энергия отходов от огнетехнического оборудования. Это горючие газы плавильных печей, вагранок и т.д., горючие отходы процессов химической и нефтехимической промышленности, горючие отходы черной и цветной металлургии, газовой промышленности. Источником горючих ВЭР являются также лесная и деревообрабатывающая промышленность.

**Тепловые ВЭР** – физическая теплота отходящих дымовых газов и тепловых отходов от теплотехнологических аппаратов в виде теплоты горячей воды, пара, паровоздушной смеси, тепла конденсата пара и т.д.

**ВЭР избыточного давления** – энергия газов, жидкостей, пара, покидающие агрегаты с избыточным давлением ( $P > P_{ам}$ ), которое необходимо снижать при выбросе в атмосферу. Все виды ВЭР в зависимости от их свойств могут использоваться потребителем как в виде топлива или для выработки теплоты, холода, электроэнергии и механической работы посредством специализированных утилизационных установок.

На каждом этапе технического развития существуют экономические пределы повышения КПД энергоиспользования. Но практика использования ВЭР в различных отраслях промышленности, особенно в энергоемких производствах, показывает, что резервы повышения коэффициента полезного использования (КПИ) очень велики. Современный уровень развития производства и техники позволяет свести потери энергии до 10 – 15 % от расхода первичных ТЭР. Только применение новейших энергосберегающих технологий позволит дополнительно уменьшить расход энергоресурсов в 2 – 4 раза.

Особенно значительные энергетические потери в доменном производстве, на машиностроительных предприятиях, нефтеперерабатывающих заводах, в производстве строительных материалов, в химической промышленности. В данных отраслях промышленности КПИ не превышает 10 – 20 %, а потенциал энергосбережения даже без внедрения новейших технологий, а только за счет использования ВЭР очень велик и может составлять 35 – 40 % от расхода первичных ТЭР.

Применительно к ВЭР используются следующие понятия и термины:

Общие энергетические отходы – это энергетический потенциал всех материальных потоков на выходе из теплотехнологического агрегата (аппарата) и все потери энергии в агрегате.

Общие энергетические отходы подразделяются на три потока:

1. неизбежные потери энергии в технологическом аппарате;
2. энергетические отходы внутреннего использования, - которые возвращаются обратно в агрегат за счет регенерации или рециркуляции;

3. энергетические отходы внешнего использования, - которые используются в других агрегатах.

Полный выход ВЭР – масса вторичных энергоресурсов, которые образуются в данной установке за определенный период времени.

Возможный выход ВЭР – возможное (максимальное) количество энергии, которое экономически целесообразно можно использовать в утилизационных установках.

Коэффициент использования (выработки) энергии за счет ВЭР – отношение фактического использования энергии, полученной за счет ВЭР, к планируемой выработке.

Резерв утилизации ВЭР – количество энергии, которое может быть дополнительно вовлечено в производство.

Возможная экономия топлива за счет ВЭР – количество энергии, которое было бы получено при полном использовании всего выхода ВЭР.

Коэффициент утилизации ВЭР – отношение фактической экономии топлива за счет ВЭР к возможной. Определяется как для одного агрегата-источника ВЭР, так и группы агрегатов, так и суммарно для всех видов ВЭР.

Для характеристики состояния использования ВЭР, пригодных для непосредственного использования без преобразования энергоносителей, применяют следующие показатели: выход ВЭР; фактическое использование ВЭР; резерв утилизации ВЭР; экономия топлива за счет ВЭР; коэффициент утилизации ВЭР.

### **Вторичные энергетические ресурсы на предприятиях текстильной промышленности**

Для теплоиспользующих установок текстильной промышленности главными являются тепловые ВЭР. Тепловые ВЭР – это тепловые отходы, представляющие собой энтальпию основной, побочной, промежуточной продукции, отходов производства, рабочих тел систем охлаждения технологических агрегатов, теплоносителей, отработавших в технологических установках, тепла отходящих газов от огнетехнических аппаратов, тепла горячей воды и вторичного пара и др., которые могут использоваться для теплоснабжения других потребителей.

К основным видам тепловых ВЭР текстильной промышленности относятся теплота сбросных растворов от красильных и промывных аппаратов, теплота паровоздушной смеси от сушильных, запарных установок, теплота конденсата «глухого» пара от установок, использующих водяной пар как теплоноситель, отходящие топочные газы от котельных агрегатов и опальных машин, физическая теплота различных материалов, выходящих из теплоиспользующих машин.

Общие энергетические отходы – это энергетический потенциал всех материальных потоков на выходе из технологического агрегата и все потери энергии в агрегате. Количественно общие энергетические отходы равны разности между энергией, поступающей в технологический аппарат, и полезно используемой энергией. Общие энергетические отходы делятся на три потока: неизбежные потери энергии в технологическом агрегате (потери в окружающую среду), энергетические отходы внутреннего использования, т.е. те отходы, которые возвращаются обратно в технологический агрегат за счет регенерации или рециркуляции, энергетические отходы внешнего использования.

Степень утилизации ВЭР зависит от величины, структуры и режима энергопотребления предприятия, а также от вида параметров и количества образующихся ВЭР. Для расчета выхода тепловых ВЭР необходимо знать характеристики оборудования – источников тепловых ВЭР, к которым относятся в текстильной промышленности разные виды теплоиспользующего оборудования. При анализе видов ВЭР, расчете возможного выхода ВЭР и путей применения их, особое внимание следует обращать не только на их выход, но и показатели качества ВЭР. Под показателями качества ВЭР понимают совокупность свойств, определяющих технико-экономическую целесообразность наиболее полного использования данного вида ВЭР. К основным показателям качества ВЭР относятся температурный уровень ВЭР, достижимый коэффициент теплоотдачи, плотность, вязкость, химическая активность, наличие примесей, загрязняющих поверхность теплообмена, рабочее давление и ряд других показателей. Необходимые данные для расчета выхода тепловых ВЭР в текстильной промышленности получают на основе технических паспортов оборудования, а также по результатам балансовых и наладочных испытаний установок – источников ВЭР.

Относительное максимально возможное количество тепловой энергии, передаваемое от одного агрегата к другому, определяется уравнением

$$\theta = \frac{t_{\text{ВХ}} - t_{\text{ВЫХ}}}{t_{\text{ВХ}} - t_0} \quad (1)$$

где  $t_{\text{ВХ}}$ ,  $t_{\text{ВЫХ}}$  – температура ВЭР на входе и выходе утилизационной установки, °С,  $t_0$  – температура окружающей среды.

Коэффициент утилизации тепловых ВЭР представляется выражением

$$\eta_{\text{УТ}} = 1 - \frac{t_{\text{ВЫХ}} - t_0}{t_{\text{ВХ}} - t_0} \quad (2)$$

На основании формулы (1) можно записать выражение для определения теплоты, используемой в утилизационной установке

$$Q = Q_{\text{ВЫХ}} \left[ 1 - \frac{t_{\text{ВЫХ}} - t_0}{t_{\text{ВХ}} - t_0} \right] \quad (3)$$

где  $Q_{\text{ВЫХ}}$  – количество теплоты, которым обладают ВЭР на входе в утилизационный аппарат, (кДж/ч);  $Q$  – количество теплоты, которую можно утилизировать.

Возможная выработка тепловых ВЭР в утилизационной установке определяется по формуле (1), а коэффициент, учитывающий несоответствие режима и числа часов работы утилизационной установки и технологического оборудования можно определить по уравнению

$$\beta = \tau_{\text{УТ.УСТ}} G_{\text{ИСП.}}^{\text{ВЭР}} / (\tau_{\text{ТЕХ.УСТ}} G_{\text{ИСП.}}^{\text{ВЭР}}) \quad (4)$$

где  $t_{\text{УТ.УСТ.}}$ ,  $t_{\text{ТЕХ.УСТ.}}$  – продолжительность работы утилизационной установки и технологического оборудования, (ч),  $G_{\text{ИСП.}}^{\text{ВЭР}}$  – количество ВЭР, используемых в утилизационной установке (кг/ч).

Коэффициент несоответствия режима работы утилизационного оборудования  $\beta$  выбирается по справочным данным в зависимости от типа и технологического цикла работы теплотехнологического оборудования.

При планировании использования тепловых ВЭР и определении возможного выхода ВЭР необходимо:

изучить и проанализировать технологию производства и работу оборудования в технологическом цикле;

выделить основные технологические процессы, связанные с выделением ВЭР;

составить материальные и тепловые балансы агрегатов - источников ВЭР; определить направления использования ВЭР и выбрать тип утилизационного оборудования;

рассчитать возможный выход ВЭР по каждому технологическому оборудованию, экономический эффект от утилизации ВЭР и срок окупаемости капиталовложений от энергосберегающих мероприятий.

К основным видам тепловых ВЭР текстильной промышленности относятся теплота конденсата глухого пара, теплота паровоздушной смеси, теплота сбросных растворов.

1. Конденсат глухого пара как вид ВЭР получается при работе машин для обработки материала в жидкости, сушильных машин, машин для влажно-тепловой обработки материала.

Конденсат глухого пара, выходящий из рекуперативных теплообменников теплоиспользующих установок при нормальной работе конденсатоотводчиков, как правило, имеет давление 0,3–0,8 МПа и массовую долю пролетного пара 0,03–0,05, следовательно, энтальпия конденсата может составлять 600–800 кДж/кг.

При этом уровень температуры конденсата составляет 120–160 °С, а коэффициент теплоотдачи достигает значений порядка 5000–10000 Вт/м<sup>2</sup>·град.

Высокая плотность, сравнительно низкая вязкость, отсутствие загрязняющих примесей, незначительная химическая активность позволяет использовать для утилизации тепла конденсата обычные рекуперативные теплообменные аппараты и трубопроводы из дешевых конструкционных сталей.

Совокупность всех этих показателей дает возможность утилизировать теплоту конденсата, используя простые теплообменники с небольшой поверхностью теплообмена, а следовательно, и при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах. Такой высокий энергетический потенциал конденсата при использовании его в утилизационных установках позволяет экономить расход первичного греющего пара на 10–25 %.

На текстильных предприятиях теплоту конденсата пара применяют для нагрева технологической воды. При этом охлаждение конденсата производится до температуры не ниже 70–80 °С, после чего конденсат возвращают на ТЭЦ или в котельную для использования его в качестве питательной воды котлоагрегатов. Переохлаждение конденсата ниже 70 °С не допустимо, так как приводит к повышению растворимости в нем различных газов и вызывает коррозию поверхностей трубопроводов и теплообменников. Возврат конденсата с температурой 120–160 °С, а тем более с наличием пролетного пара, приводит к увеличению расхода греющего пара для теплоснабжения установок, обработки питательной воды для котлов, увеличению потерь тепла при транспортировке конденсата, вызывает ухудшение гидравлического режима работы насосов и конденсатоотводчиков. Поэтому ТЭЦ и котельные конденсат повышенных параметров не принимают. При загрязнении конденсата в машинах с разогревом жидкостей и растворов глухим паром в красильных аппаратах охлаждение конденсата при утилизации производится до температуры 35–40 °С и затем сбрасывается в канализацию.

Различают открытую и закрытую схемы сбора конденсата. По открытой схеме конденсат от теплоиспользующих установок поступает в конденсатосборный бак, сообщаемой с атмосферой. При снижении давления конденсата образуется пар вторичного вскипания, с которым бесполезно теряется тепло в атмосферу. Прямой контакт воздуха с конденсатом приводит к развитию коррозии теплообменников и трубопроводов.

По закрытой схеме сбора конденсата конденсатосборный бак не сообщается с атмосферой. Используются схемы с предварительным охлаждением конденсата в рекуператоре-утилизаторе и с конденсатором пара вторичного вскипания. С точки зрения простоты изготовления и обслуживания и более полной утилизации тепла предпочтительнее схема с предварительным охлаждением конденсата.

Для схемы с конденсатором пара вторичного вскипания характерно снижение интенсивности теплообмена.

Теплота конденсата пара, как правило, используется для нагрева воды, используемой на технологические нужды или для горячего водоснабжения. При этом в теплоутилизационной схеме применяются секционные или кожухотрубчатые теплообменники. Конденсат как более чистый теплоноситель подается в межтрубное пространство, а нагреваемая вода в полости труб трубного пучка.

2. Одним из наиболее крупных потребителей тепла в текстильной промышленности является отделочное производство. Горячие сбросные растворы являются видом тепловых ВЭР от машин для обработки материала в жидкости. Так, например, для получения 1 кг ткани затрачивается от 5 до 10 кг пара и от 50 до 200 л горячей воды. Около 80% подведенной теплоты теряется с отработанной сбросной водой. Низкотемпературная сбросная вода с температурой порядка 50–90 °С является характерным для текстильных предприятий видом тепловых ВЭР. Такая вода не может использоваться в технологическом процессе и непригодна по энергетическим параметрам, высокой химической активностью, и загрязненностью для систем отопления, горячего водоснабжения и вентиляции. Несмотря на невысокий температурный напор сбросных растворов коэффициенты теплоотдачи имеют порядок  $2000\text{--}4000\text{Вт/м}^2\cdot\text{град}$ , что позволяет использовать теплоту сбросных растворов для подогрева технологической воды с помощью небольших по поверхности теплообмена теплообменников – утилизаторов.

К наиболее сложным вопросам использования тепловых ВЭР сбросных растворов относится выбор конструкции теплообменников, работающих в условиях значительного содержания химически активных веществ (крашение, беление, промывка), значительной загрязненности остатками нитей, волокон, пуха, очесами и др. примесями, которые снижают эффективность работы теплообменников. Наличие механических примесей, агрессивная среда и низкий температурный потенциал сбросных растворов предъявляет высокие требования к

теплообменной аппаратуре. Конструктивные элементы теплообменной аппаратуры должны выполняться из коррозионностойких материалов, стойкими к воздействию кислот и щелочей, с высокими коэффициентами теплопроводности. Теплообменники должны быть легкоразборными, удобными для чистки с наличием сменных фильтров для очистки механических примесей.

Наилучшими свойствами обладают пластинчатые теплообменники. Они просты в изготовлении, легко и быстро монтируются, компактны с небольшим расходом металла, имеют высокий коэффициент теплопередачи, незначительное гидравлическое сопротивление.

В текстильном производстве наибольшее применение получили именно такие конструкции теплообменников, которые позволяют быстро и с минимальными затратами осуществлять сборку и разборку аппаратов при очистке поверхностей от загрязнений. Из конструкций пластинчатых теплообменников широкое применение получили спиральные и пакетно-разборные, которые почти в два раза компактнее обычных кожухотрубчатых теплообменников.

Выбор типа теплообменника для утилизации тепла сбросных растворов определяется технологическим процессом. Например, для красильных цехов и отделке синтетических тканей рекомендуется использовать пластинчатые теплообменники в производствах, где окрашивается натуральное или штапельное волокно лучше применять трубчатые теплообменники. В трубчатых теплообменниках загрязненная вода движется по гладким трубам в горизонтальном направлении, что затрудняет осаждение твердых частиц. Очистка трубчатых теплообменников проще, чем пластинчатых.

Так как сброс растворов из машин для обработки материала в жидкости (автоклавы) осуществляется периодически, имеет залповый характер, то в системе утилизации данного вида тепловых ВЭР необходимо предусматривать наличие бака-аккумулятора, служащего баком-накопителем раствора, обеспечивающим постоянство расхода раствора через теплообменник-утилизатор. Теплообменные аппараты смешивающего типа в таких схемах утилизации тепла ВЭР не применяются, так как прямой контакт нагреваемого теплоносителя со сбросным раствором недопустим.

3. Источником отработавшей паровоздушной смеси являются сушильные машины и машины для влажно-тепловой обработки материала. Удельный вес теплотребования на процессы сушки в текстильной промышленности достигает 30 %, при этом количество тепла, выбрасываемого из сушильного оборудования с паровоздушной смесью составляет 50 ч –

70% от подведенного тепла. Поэтому утилизация теплоты отработанной паровоздушной смеси играет важную роль в экономии топливно-энергетических ресурсов в текстильной промышленности. Паровоздушная смесь, как вид тепловых ВЭР по показателям качества существенно уступает конденсату пара. Для отработавшего воздуха сушильных машин характерны сравнительно высокая температура 90–150 °С, низкий коэффициент теплоотдачи 20–40 Вт/м<sup>2</sup>·град, низкая плотность, наличие примесей, загрязняющих поверхности теплообмена, малые удельные плотности тепловых потоков. Совокупность этих показателей требует использования для утилизации тепла паровоздушной смеси громоздких теплообменников, применение сменных фильтров, создания специальной вентиляционной системы для концентрации тепловых потоков. Особенностью использования теплоты паровоздушной смеси является то, что при ее охлаждении ниже точки росы начинается конденсация, а это приводит к коррозии теплообменников. Перечисленные причины затрудняют использование теплоты паровоздушной смеси. Однако в настоящее время утилизация данного вида тепловых ВЭР необходима, так как выход ВЭР этого вида соизмерим с суммарным выходом всех других видов вторичных энергоресурсов текстильной промышленности.

Теплоту отработавшей паровоздушной смеси можно использовать как для подогрева свежего воздуха, поступающего на вход в сушильную машину, так и для подогрева технологической воды, или воздуха для нужд вентиляции. С точки зрения увеличения коэффициента утилизации ВЭР, экономической эффективности использования капиталовложений и компактности теплообменной аппаратуры вариант подогрева воды паровоздушной смесью предпочтительнее, так как комбинация теплоносителей паровоздушная смесь – вода имеет коэффициент теплопередачи примерно в 2–3 раза выше,

чем при комбинации теплоносителей паровоздушная смесь – воздух. При этом, чем больше массовая доля пара в смеси, тем выше коэффициент теплоотдачи от нее к поверхности теплообменника, и тем выше экономическая целесообразность использовать в качестве нагреваемого теплоносителя воду. Кроме того, при такой комбинации теплоносителей возможно применение в схемах утилизации ВЭР смесительных теплообменников, которые отличаются простотой изготовления и компактностью. Данное утверждение является справедливым для комбинации теплоносителей дымовые газы – вода.

Однако практическое использование теплоты отработавшей паровоздушной смеси для подогрева воды не всегда оказывается возможным. Горячая вода в таком количестве, в котором она может быть получена, оказывается не нужна. Поэтому варианты использования тепла паровоздушной смеси решают не только на основе экономической целесообразности, но и исходя из практических нужд конкретного предприятия. При применении рекуператоров для утилизации ВЭР паровоздушной смеси поверхность теплообмена со стороны смеси обязательно оребряется для увеличения поверхности теплообмена. В качестве теплообменников паровоздушная смесь – вода широко используется калориферы КФС, КФБ, STD и др. При этом более предпочтительнее применение калориферов с пластинчатыми ребрами, которые легко поддаются очистке. Широкое применение для подогрева воды паровоздушной смесью получили барботажные смесительные аппараты, в которых смесь барботируется сквозь слой нагреваемой воды. В нагреваемую воду попадают примеси, содержащиеся в паровоздушной смеси. Для получения горячей воды, удовлетворяющей санитарным нормам, применяют схемы утилизации с промежуточным теплоносителем. В этом случае схема утилизации выглядит так: барботируемая смесь – промежуточная горячая вода; промежуточная горячая вода – горячая вода. Схема утилизации ВЭР будет иметь дополнительный смесительный аппарат.

В случае использования теплоты отработавшей паровоздушной смеси для нагрева воздуха широко используются регенеративные теплообменные аппараты, а также пластинчатые теплообменники, которые имеют по сравнению с рекуператорами других типов наибольшую в единице объема поверхность теплообмена.

Для изготовления поверхности теплообмена пластинчатого рекуператора используются листы из конструкционной стали с коррозионностойким покрытием, используются алюминий, стекла, полимерные пленки и др. материалы. Поверхности теплообмена выполняются плоскими или гофрированными.

Наибольшей тепловой эффективностью при утилизации ВЭР теплоты паровоздушной смеси обладают вращающиеся регенеративные теплообменники и простые, дешевые контактные теплообменники, в которых процессы теплообмена протекают при соприкосновении двух теплоносителей.

Однако необходимо отметить, что перспективным направлением в экономии топливноэнергетических ресурсов в сушильных установках является не утилизация ВЭР паровоздушной смеси в различных установках, а сокращение потерь тепла, за счет применения рециркуляции или многократного использования сушильного агента с осушкой его в специальных аппаратах.

#### **Определение выхода ВЭР и экономия топлива за счет их использования**

Под выходом ВЭР понимают количество вторичных энергоресурсов, которые образуются в агрегате – источнике ВЭР.

Удельный выход ВЭР рассчитывается или в единицу времени (ч) работы агрегата или на единицу продукции. Удельный выход для горючих ВЭР определяется формулой

$$q_{уд}^Г = G_{вых} Q_H^P, \text{ (Дж/ч)} \quad (5)$$

Для тепловых ВЭР

$$q_{уд}^Т = G_{вых} C(t_1 - t_0), \text{ (кДж/ч)} \quad (6)$$

Для ВЭР избыточного давления

$$q_{уд}^P = G_{вых} l, \text{ (кДж/ч)} \quad (7)$$

Здесь –  $G_{вых}$  часовое количество энергоносителя в виде твердых, жидких или газообразных продуктов (кг/ч) или ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );  $C$  – теплоемкость энергоносителя (кДж/кг град. или кДж/ $\text{м}^3$  гр);  $l$  – работа изоэнтروпного расширения (кДж/кг);  $t_1$ , и  $t_0$  – температура энергоносителя на входе в теплообменник – утилизатор и температура окружающей среды.

Общий объем выхода ВЭР

$$Q_{вых} = q_T \tau M, \text{ (ГДж)} \quad (8)$$

где  $M$  – выход энергоносителя за рассматриваемый период (месяц, год), (ГДж);  $\tau$  – число часов работы установки – источника ВЭР;  $q_T$  – удельный выход ВЭР, (кДж/кг).

Обычно определяют годовой выход ВЭР. Однако только часть энергии из общего выхода может быть полезно использована.

Для оценки реального потенциала ВЭР, возможного к использованию, рассчитывается возможная выработка энергии за счет ВЭР. Различают возможную, планируемую экономически целесообразную и фактическую выработку ВЭР.

Возможная выработка ВЭР – это максимальное количество теплоты, электроэнергии или механической работы, которое можно получить практически за счет данного вида ВЭР, с учетом режимов работы агрегата – источника ВЭР и утилизационной установки. Фактическая выработка – действительно полученная энергия за отчетный период. Коэффициент выработки или использования за счет ВЭР отношение фактической ВЭР к возможной выработке

$$\sigma = \frac{Q_{\phi}}{Q_{воз}} \quad (9)$$

Использование ВЭР ставит конечной задачей достижение экономии первичного топлива и сокращение затрат на приобретение топлива. При использовании тепловых ВЭР экономия топлива определяется

$$\Delta B = \frac{0,0342}{\eta_{зам}} Q_{воз} \sigma = \frac{0,0342}{\eta_{зам}} Q_{\phi} \text{ (т у.т)} \quad (10)$$

где 0,0342 – коэффициент эквивалентного перевода 1 ГДж в т.у.т.;  $Q_{\phi}$  – фактическое использование тепловых ВЭР (ГДж/год);  $\eta_{зам}$  – КПД замещаемой энергетической установки, с показателями которой сравнивается эффективность утилизационной установки работы теплоэнергетического агрегата – источника ВЭР. Как правило, в качестве замещаемой установки рассматривается промышленная котельная или ТЭЦ.

**Коэффициент использования выработки  $\sigma$**  зависит от несовпадения режимов работы утилизационной установки и теплоэнергетического агрегата – источников ВЭР, которые определяются потребителем теплоты.

При использовании тепловых ВЭР предприятиями, которые снабжаются теплом централизованно от ТЭЦ экономия топлива за счет ВЭР определяется с учетом увеличения расхода топлива на ТЭЦ

$$\Delta B = Q_{\phi} \left[ \frac{0,0342}{\eta_{ТЭЦ}} - \varepsilon_{уд} (\varepsilon_K - \varepsilon_T) 10^{-6} \right] \quad (11)$$

где  $\eta_{ТЭЦ}$  – КПД котельной ТЭЦ,  $\varepsilon_{уд}$  – удельная выработка электроэнергии на ТЭЦ (кВт·ч/ГДж);  $\varepsilon_K$  – удельный расход топлива на выработку электроэнергии по теплофикационному циклу, грамм условного топлива на 1 кВт/ч;  $\varepsilon_T$  – удельный расход топлива на выработку электроэнергии на замещаемой ТЭЦ, грамм условного топлива на 1 кВт/ч.

При использовании горючих ВЭР экономия топлива определяется по формуле

$$B = 0,0342 Q_{\Phi}^{\Gamma} \frac{\eta_1}{\eta_2} \text{ (т у.т.)} \quad (12)$$

где  $Q_{\Phi}^{\Gamma}$  фактические горючие ВЭР (ГДж/год);  $\eta_1/\eta_2$  – КПД топливоиспользующего агрегата при работе на горючих ВЭР и КПД того же агрегата при работе на первичном топливе.

Отношение  $\eta_1/\eta_2$  – зависит от физических свойств горючих ВЭР. Для высококалорийных горючих ВЭР это отношение равно единице.

### **Экономическая эффективность использования вторичных энергетических ресурсов**

Направление использования ВЭР зависит от величины, структуры и режима энергопотребления предприятия, а также от вида, параметров и количества образующихся ВЭР. В каждом конкретном случае направление использования ВЭР производится на основе разработки оптимального топливно-энергетического баланса предприятия с учетом достижения максимальной экономической эффективности при минимальных капитальных затратах на утилизацию ВЭР.

Необходимые данные для расчета выхода ВЭР, образуемых при работе теплоэнергетических агрегатов, получают на основе технических паспортов оборудования или по результатам балансовых и наладочных испытаний установок – источников ВЭР. Выход ВЭР от установок зависит также от ряда факторов технологического характера, поэтому график выхода ВЭР очень часто может иметь значительную неравномерность.

В расчетах обычно используют возможную выработку ВЭР в утилизационной установке для установившегося технологического режима.

Возможная выработка ВЭР в утилизационной установке определяется по формуле

$$Q_{\text{ВЭР}} = G_{\text{ВЫХ.}}^{\text{ВЭР}} \cdot c \cdot (t_1 - t_2) \cdot b \cdot \eta_{\text{УТ}} \cdot \tau_{\text{д}}, \text{ (кДж)} \quad (13)$$

где  $Q_{\text{ВЭР}}$  – количество теплоты, полученной в утилизационной установке (кДж);  $G_{\text{ВЫХ.}}^{\text{ВЭР}}$  – выход ВЭР (кг/ч);  $c$  – теплоемкость теплоносителя на выходе из теплотехнологического агрегата – источника ВЭР (кДж/кг·град);  $t_1$  – температура на входе и выходе  $t_2$  из утилизационной установки;  $b$  – коэффициент, учитывающий несоответствие режима и числа часов работы утилизационной установки и технологического оборудования – источника ВЭР ( $b = 0,8-0,95$ );  $\eta_{\text{УТ}}$  – К.П.Д. утилизационной установки ( $\eta_{\text{УТ}} = 0,75-0,96$ );  $\tau_{\text{д}}$  – действительное время использования ВЭР (ч).

При разработке мероприятий по повышению эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) или выборе вариантов использования ВЭР необходимо определять приведенные затраты. Приведенные годовые затраты определяются по уравнению

$$z = K E_{\text{Н}} + C_{\text{ЭКС}} \quad (14)$$

где  $z$  – годовые приведенные затраты (у.е.);  $E_{\text{Н}}$  – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капиталовложений ( $E_{\text{Н}} = 0,15$ );  $K$  – капиталовложения (у.е.);  $C_{\text{ЭКС}}$  – годовые эксплуатационные расходы (у.е.).

Экономическая эффективность использования ВЭР или мероприятий связанных с модернизацией оборудования определяется минимумом приведенных годовых затрат при выборе того или иного варианта при условии их сопоставимости.

За наиболее экономически выгодный принимают вариант, соответствующий минимуму приведенных годовых затрат. В соответствии с этим при расчете экономической эффективности использования ВЭР учитывается экономия текущих издержек на топливо. При этом сравнивают два варианта энергоснабжения (теплоснабжения):

1. Обеспечение потребителя энергией с учетом использования ВЭР;
2. Обеспечение потребителя энергией в тех же объемах без использования ВЭР.



Варианты должны сравниваться в одинаковых условиях по объему и режиму подачи энергии потребителю, при одинаковых по техническому совершенству тепловых схем и оборудования, по надежности энергоснабжения.

Если выход ВЭР позволяет обеспечить производство энергии в количестве, превышающем потребности данного предприятия, то в расчете экономической эффективности следует исходить из необходимости использования ВЭР в полном объеме за счет энергоснабжения другого близлежащего промышленного предприятия. В приведенных затратах по варианту с использованием ВЭР учитываются затраты на сооружение и эксплуатацию утилизационной установки.

Экономический эффект от использования ВЭР рассчитывается как разность приведенных годовых затрат по сравниваемым вариантам:

$$\Delta \mathcal{E} = C_{\text{экс}}^{\text{б.ут.}} - C_{\text{экс}}^{\text{ут.}} + E_{\text{н}}(K_{\text{б.ут.}} - K_{\text{ут.}}), \text{ (у.е./год)} \quad (15)$$

Использование ВЭР экономически оправдано в том случае, если величина экономии  $\mathcal{E}$  имеет положительный знак. Индексы “б.ут.” и “ут.” обозначают варианты энергоснабжения без утилизации и с утилизацией ВЭР.

Формулу можно записать в следующем виде:

$$\Delta \mathcal{E} = B_{\text{эк}} C_{\text{топ}} + \Delta C + E_{\text{н}}(K_{\text{б.ут.}} - K_{\text{ут.}}), \text{ (у.е./год)} \quad (16)$$

где  $B_{\text{эк}}$  – экономия условного топлива при использовании ВЭР (т.у.т./год);  $C_{\text{топ}}$  – замыкающие затраты на единицу сэкономленного топлива (у.е./ т.у.т.);  $C$  – разность эксплуатационных затрат в сравниваемых вариантах без учета затрат на топливо. Величина  $C$  учитывает изменение затрат на воду, электроэнергию, текущий ремонт и т.п.

Замыкающие затраты на топливо (природный газ, мазут) можно принимать до 100 у.е. Расчет экономической эффективности капиталовложений в энергосберегающие мероприятия оцениваются сроком окупаемости капитальных затрат по зависимости

$$T = \frac{K}{\Delta \mathcal{E} - C_{\text{экс}}}, \text{ (лет)} \quad (17)$$

где  $K$  – требуемый объем капиталовложений в мероприятия по использованию ВЭР (у.е.);  $\Delta \mathcal{E}$  – годовая экономия, достигаемая в результате мероприятий по использованию ВЭР или модернизации оборудования.

Возможная экономия условного топлива от утилизации ВЭР определяется

$$B_{\text{усл}}^{\text{ВЭР}} = \frac{\sum Q_{\text{ВЭР}}}{Q_{\text{н.усл}}^{\text{р}}} \text{ (кг/год)} \quad (18)$$

где  $Q_{\text{н.усл}} = 29300$  (кДж/кг) - теплота сгорания условного топлива.

Экономический эффект за счет энергосберегающих мероприятий при утилизации ВЭР определяется

$$\Delta \mathcal{E} = B_{\text{усл}}^{\text{ВЭР}} C_{\text{усл.т}} \text{ (у.е.)} \quad (19)$$

где  $C_{\text{усл.т.}}$  – цена 1 тонны условного топлива.

При расчете расхода условного топлива на выработку тепла в замещаемой установке (промышленная котельная, ТЭЦ), расход условного топлива определяется

$$B_{\text{усл}}^{\text{ВЭР}} = \frac{\sum Q_{\text{ВЭР}}}{29300 \eta_{\text{с}} \eta_{\text{к}}}, \text{ (кг/год)} \quad (20)$$

где  $\eta_{\text{с}}$  – К.П.Д. тепловых сетей ( $\eta_{\text{с}} = 0,8-0,96$ );  $\eta_{\text{к}}$  – К.П.Д. котельной ( $\eta_{\text{к}} = 0,75-0,9$ ).

Возможная выработка электроэнергии в утилизационном турбогенераторе за счет использования ВЭР в виде избыточного давления пара определяется формулой

$$W = D_{\Pi}^{\text{ВЭР}} l_{\text{ад}} \tau_d \eta_{oi} \eta_m \eta_{\Gamma} \text{ (кВт-ч/год)} \quad (21)$$

где  $D_{\Pi}^{\text{ВЭР}}$  – секундный расход пара на турбину (кг/с);  $l_{\text{ад}}$  – работа адиабатного расширения пара в турбине (кДж/кг);  $\tau_d$  – действительный фонд времени работы агрегата-источника ВЭР, (ч);  $\eta_{oi}$  – внутренний относительный К.П.Д. турбины;  $\eta_m$  – механический К.П.Д. турбины;  $\eta_{\Gamma}$  – К.П.Д. электрогенератора. При выработке электроэнергии на КЭС или ТЭЦ удельный расход условного топлива  $\epsilon_{\text{усл.}} = 0,36\text{--}0,38$  кг/кВт-ч. Одной из важнейших задач совершенствования теплотехнических процессов является, возможно, более полное выявление резервов ВЭР, и экономически, а также экологически обоснованное их полное использование для целей производства. Экономия ТЭР при использовании резервов ВЭР может составлять 25–30% от первичных энергоресурсов.

В случае использования водяного пара от утилизационной установки выработка электроэнергии

$$W = \frac{D_{\Pi}^{\text{ВЭР}} (i_1 - i_2) \eta_m \eta_{\Gamma}}{3600}, \text{ (кВт-ч/год)} \quad (22)$$

где  $D_{\Pi}^{\text{ВЭР}}$  – расход пара на выработку электроэнергии, тыс.т. в год;  $i_1$  и  $i_2$  – энтальпия пара на входе и выходе из паровой турбины (кДж/кг), определяется по  $i$ - $\zeta$  диаграмме водяного пара.

При силовом направлении использования ВЭР экономия топлива определяется

$$B_{\text{ЭК}} = \epsilon_{\text{эл}} \cdot W, \text{ (т.у.т./год)}, \quad (23)$$

где  $\epsilon_{\text{эл}}$  – удельный расход топлива на выработку электроэнергии в энергетической системе или на замещаемой установке, с показателями которой сравнивается эффективность использования ВЭР, грамм условного топлива на 1 кВт-ч.

Экономический эффект от использования ВЭР может определяться разницей в годовых приведенных затратах за счет сэкономленной при утилизации энергии

$$\mathcal{E}_{\text{УТ}} = \Delta \mathcal{E} - K E_{\text{Н}}, \text{ (у.е.)}, \quad (24)$$

где  $\Delta \mathcal{E}$  – стоимость энергии, сэкономленной в процессе утилизации ВЭР;  
Стоимость сэкономленной энергии находится из выражения

$$\Delta \mathcal{E} = 3600 \Delta Q_{\text{ВЭР}} \tau_d \epsilon_{\text{уд}}, \text{ (у.е.)}, \quad (25)$$

Здесь:  $\Delta Q_{\text{ВЭР}}$  – энергия, полученная за счет утилизации ВЭР (кВт);  $\epsilon_{\text{уд}}$  – удельная стоимость энергии, полученной в утилизационном аппарате. Стоимость единицы энергии за счет утилизации ВЭР определяется по стоимости сэкономленного условного топлива

$$\Delta B_{\text{усл}} = \frac{\Delta Q_{\text{ВЭР}}}{Q_{\text{Н.усл}} + i_{\text{выб}}}, \text{ (кг/с)} \quad (26)$$

где  $i_{\text{выб}}$  – энтальпия выбрасываемого в атмосферу теплоносителя за утилизатором ВЭР, (кДж/кг).

Годовая стоимость сэкономленного условного топлива

$$\mathcal{E}_{\text{ТОП}}^{\text{усл}} = 3600 \Delta B_{\text{усл}} \tau_d C \text{ (у.е.)} \quad (27)$$

где  $C$  – цена 1 тонны условного топлива.

Удельная стоимость энергии, полученной за счет утилизации ВЭР

$$\varepsilon_{уд} = \frac{\varepsilon_{топ}^{усл}}{\Delta Q_{ВЭР}^{год}}, (y.e./кДж) \quad (28)$$

Здесь:  $\Delta Q_{ВЭР}^{год}$  определяется в (кДж) за расчетный период работы утилизационного оборудования

$$\Delta Q_{ВЭР}^{год} = 3600 \Delta Q \tau_d, (кДж/год) \quad (29)$$

Использование ВЭР является экономически целесообразным при положительном значении разности ( $\varepsilon_{ут} > 0$ ) в формуле (24) и сроке окупаемости капиталовложений  $T$  3–4 года.

### Пример расчета экономической эффективности от использования ВЭР.

#### Исходные данные для экономического расчета:

1. теплота, полученная в утилизационной установке  
 $\Delta Q_{ВЭР} = 500$  кВт;
2. действительный фонд времени работы утилизационного оборудования  $\tau_d$  - 6000ч;
3. цена 1 тонны условного топлива  $C = 95$  у.е.,
4. капиталовложения в утилизационное оборудование  
 $K = 40000$  у.е.;
5. эксплуатационные расходы  $C_{экс} = 5000$  у.е.

#### Решение:

Экономия условного топлива за счет утилизации ВЭР

$$\Delta B_{усл} = \frac{\Delta Q_{ВЭР}}{Q_{н.усл}} = \frac{500}{29300} 0,017, (кг/с)$$

Годовая стоимость сэкономленного топлива

$$\varepsilon_{топ}^{усл} = 3600 \Delta B_{усл} \tau_d C = 3600 \cdot 0,017 \cdot 6000 \cdot 10^{-3} = 34884 (y.e.)$$

Удельная стоимость энергии, выработанной в утилизационной установке

$$\varepsilon_{уд} = \frac{\varepsilon_{топ}^{усл}}{\Delta Q_{ВЭР}^{год}} = \frac{34880}{108 \cdot 10^8} = 0,323 \cdot 10^{-5}, (y.e./кДж)$$

Стоимость сэкономленной энергии

$$\varepsilon = 3600 \Delta Q_{ВЭР} \cdot \tau_d \cdot \varepsilon_{уд} = 3600 \cdot 6000 \cdot 0,3238 \cdot 10^{-5} = 34884, (y.e.)$$

Экономический эффект от использования ВЭР

$$\varepsilon_{ут} = \Delta \varepsilon - E_n \cdot K = 34884 - 0,15 \cdot 40000 = 28884, (y.e.).$$

Срок окупаемости капиталовложений в утилизацию ВЭР

$$T = \frac{K}{\Delta \varepsilon - C_{экс}} = \frac{40000}{34884 - 5000} = 1,34 (\text{года})$$

Использование ВЭР является целесообразным так как величина ( $\varepsilon_{ут} > 0$ ) положительна и капиталовложения окупаются за достаточно короткий период.

## Утилизация ВЭР

### Теплообменные аппараты для утилизации вторичных энергоресурсов

Наибольшее распространение при утилизации ВЭР получили рекуперативные теплообменники с поверхностью теплообмена, выполненной из труб. В таких теплообменниках возможны значительные перепады давления между теплоносителями без деформаций и разрушений поверхностей теплообмена. Рекуперативные кожухотрубные теплообменные аппараты могут работать с любой комбинацией теплоносителей: жидкость – жидкость, газ – жидкость, газ – газ. Общим для всех кожухотрубных теплообменников является наличие большого числа труб (трубного пучка), концы которых герметично укреплены в отверстиях досок, и наличие общего кожуха (корпуса), охватывающего трубный пучок.

В промышленных кожухотрубных теплообменниках используются трубы с внутренним не менее 12 и не более 38 мм. Ограничения связаны с возможностью очистки внутренней поверхности труб, и снижением удельной поверхности теплообмена.

Возможная длина трубного пучка может составлять 0,9–6 м, толщина стенок труб 0,5–2,5 мм.

В связи с тем, что температуры греющего и нагреваемого теплоносителей различны, различными являются температура корпуса и трубок в трубном пучке и по этой причине возникают различные температурные удлинения. Для снижения возникающих в трубных досках напряжений в теплообменниках применяют различные методы компенсации температурных деформаций: линзовые компенсаторы, сальниковые уплотнители, плавающие камеры, U-образные трубы и др. По технологическим причинам трубы в трубном пучке кожухотрубного теплообменника не могут быть расположены близко одна от другой, поэтому площадь проходного сечения межтрубного пространства в 2,5–3 раза больше, чем трубного. Соответственно в межтрубном пространстве более низкие скорости движения теплоносителя и интенсивность теплообмена. С целью повышения интенсивности теплообмена скорости теплоносителей увеличивают путем установки поперечных перегородок в межтрубном пространстве и организацией многоходового движения теплоносителя в полости труб.

Теплоносители, способные загрязнять поверхности теплообмена, направляют в полости труб трубного пучка, так как в межтрубном пространстве механическая очистка невозможна.

Секционные теплообменники состоят из последовательно соединенных секций, каждая из которых является кожухотрубным теплообменником с небольшим количеством труб в пучке и представляют собой многоходовой аппарат с наиболее выгодной схемой движения теплоносителей – противоточной. Секционные теплообменники эффективны, когда теплоносители движутся с соизмеримыми скоростями и без изменения агрегатного состояния теплоносителя.

В связи с отсутствием перегородок характерно низкое гидравлическое сопротивление и меньшая степень загрязнения межтрубного пространства. Поверхности теплообмена одной секции составляет  $0,75\text{--}30\text{ м}^2$ , а число труб от 4 до 140.

Основой теплообменников типа труба в трубе являются две сооснорасположенные трубы, в кольцевом зазоре которых движутся теплоносители. Как правило, теплообменники этого типа состоят из ряда последовательно соединенных коленами («калачами») секций. Необходимые скорости движения теплоносителей обеспечиваются выбором соответствующих диаметров внутренней и наружной труб. Преимуществом таких теплообменников является простота изготовления, возможность работы при высоких перепадах давлений теплоносителей, высокие коэффициенты теплоотдачи. Недостатки – высокая металлоемкость, низкая компактность, сложность механической очистки кольцевого зазора между трубами.

Погружные змеевиковые теплообменники состоят из плоских или витых змеевиков, погруженных в емкость с нагреваемой жидкостью. Такие теплообменники широко применяются в различных отраслях промышленности, в том числе в схемах утилизации ВЭР. Нагрев может осуществляться за счет конденсации пара в трубах, или горячей водой. Основное преимущество таких теплообменников простота конструкции, недостатки – низкая

интенсивность теплообмена, для повышения которой прибегают к установке различных мешалок в емкости с нагреваемой жидкостью.

Широкое применение получили теплообменники из оребренных труб для увеличения поверхности теплообмена со стороны малых значений коэффициента теплоотдачи. Такие теплообменники (калориферы) используются в сушильных установках для нагревания воздуха и при утилизации ВЭР от паровоздушной смеси. Важным условием работы таких теплообменником является рациональное расположение ребер, а также их плотный контакт с трубой. Конструкции ребер труб разнообразны и связаны с технологией их изготовления. Коэффициенты оребрения ( $F_2/F_1$ )= для калориферов, применяемых в системах нагрева воздуха 3–4, а для теплообменных аппаратов холодильной техники 8–12. Ребра, как правило, выполняются из материалов с большей теплопроводностью, чем материал основной трубы.

Другой разновидностью рекуперативных аппаратов являются теплообменники рубашечного типа, спиральные и пластинчатые. Рубашечные теплообменники обычно используют для нагревания или охлаждения жидкости в емкости. Теплоноситель подается в зазор, образованный двумя листами, один из которых омывается нагреваемой или охлаждаемой жидкостью. Преимущество: не загромождается объем бака, облегчена очистка поверхности теплообмена, простота конструкции аппарата. Недостаток: малая площадь поверхности теплообмена, низкие значения коэффициента теплообмена.

В пластинчатых теплообменниках поверхность теплообмена образуется пакетом пластин, каждая из которых по периметру снабжена уплотнителями. Теплоносители движутся в зазорах, образованных соседними пластинами. С целью интенсификации теплообмена и увеличения площади поверхности пластины выполняются гофрированными. Комбинация теплоносителей может быть разнообразной: жидкость-жидкость, газ-жидкость, газ-газ. Недостатком является недостаточная герметичность и ограниченный перепад давлений между теплоносителями.

Наиболее эффективными утилизационными установками для использования ВЭР высокотемпературных дымовых газов с  $t > 600$  °С являются котлы-утилизаторы, а также водяные экономайзеры для нагрева питательной воды котлов и воздухоподогреватели для нагрева дутьевого воздуха, использующие дымовые газы среднего потенциала с температурой 500– 600°С. Котлы-утилизаторы обеспечивают большую экономию топлива за счет генерирования энергетического или технологического пара, а также нагрева сетевой воды для теплоснабжения и горячего водоснабжения.

В тех случаях, когда допустимо смешение нагреваемой среды с паровым конденсатом, широко используется нагревание острым паром, который вводится в нагреваемую жидкость через перфорированную трубу или сопловой смешивающий диффузор (барботаж). Преимуществом таких смесительных аппаратов является простота конструкции и высокая интенсивность теплообмена. Главным недостатком смесительных теплообменников является контакт теплоносителей. Может применяться комбинация газ-жидкость, когда газ барботируется через жидкость. Такая комбинация позволяет более эффективно утилизировать тепловые ВЭР, применяя схемы с промежуточным теплоносителем. При утилизации тепловых ВЭР с точки зрения увеличения коэффициента утилизации ВЭР и компактности теплообменников и их стоимости вариант нагрева воды предпочтительней, чем нагрев воздуха. При равных условиях при нагреве воды теплообменник будет примерно в 2–2,5 раза меньше по поверхности теплообмена. Некоторые типы кожухотрубных рекуперативных аппаратов изображены на рис. 1 и 2. Для проведения технологических процессов, связанных с подводом тепла, используются разнообразные теплотехнологические установки, в которых применяются один или несколько теплоносителей.

### **Теплообменные аппараты для утилизации высокотемпературных ВЭР**

К высокотемпературным ВЭР в промышленности относят дымовые газы с температурой выше 600 °С, которые покидают рабочее пространство огнетехнических агрегатов и по- этому уносят с собой значительное количество тепла. Основными источниками данных ВЭР являются черная и цветная металлургия, химическая и нефтехимическая промышленность, промышленность строительных материалов, стекловаренная промышленность и т.д.

Потери тепла с уходящими газами таких агрегатов могут составлять 20 – 80%. Утилизация теплоты уходящих газов принципиально может выполняться двумя способами: с возвратом отобранного тепла у газов на вход в данный агрегат (ВЭР внутреннего использования) и без возврата (ВЭР внешнего использования). Для утилизации этих ВЭР широко используются разнообразные теплообменники рекуперативного и регенеративного типа, использование которых позволяет повысить КПД агрегатов на 15 – 20%, увеличить температуру горения и сэкономить топливо.

Теплота ВЭР дымовых газов с возвратом на вход в агрегат оказывается значительно ценнее тепла, полученного в результате сгорания топлива, так как вносимое тепло не влечет потерь тепла с дымовыми газами и повышает температуру сгорания топлива.

Практически утилизировать все тепло отходящих газов невозможно, из-за значительного нецелесообразного увеличения поверхности нагрева теплообменников. Утилизация тепла отходящих газов осуществляется в теплообменниках регенеративного и рекуперативного типов. Регенеративные работают при нестационарном тепловом режиме, рекуперативные при стационарном.

Теплообменники регенеративного типа имеют следующие недостатки: не обеспечивают постоянную температуру подогреваемого теплоносителя (воздуха); на время переключения клапанов прекращается питание агрегата теплом; потери тепла через дымовую трубу; смешение теплоносителей из-за неплотностей; большие размеры и масса регенераторов. Однако, несмотря на недостатки регенеративные теплообменники широко используются на высокотемпературных агрегатах, так как они могут работать при высокой температуре дымовых газов (1300 – 1500 С). При такой высокой температуре рекуператоры не могут работать устойчиво.

Рекуперативный принцип утилизации тепла отходящих газов обеспечивает постоянную температуру подогрева нагреваемого теплоносителя, не требуются переключающие клапаны, отсутствует унос тепла в дымовую трубу, меньшая металлоемкость и размеры по сравнению с регенераторами. Основным недостатком рекуператоров является низкая огнестойкость металлических теплообменников и низкая газоплотность керамических рекуператоров, а также утечки через неплотности между двумя сторонами теплоносителей из-за перепада давлений.

К рекуператорам предъявляются следующие требования: обеспечение максимальной степени утилизации тепла дымовых газов с высокой температурой; максимальная компактность конструкции; максимальная интенсивность теплопередачи; наименьшее гидравлическое сопротивление; достаточная герметичность.

Рекуператоры изготавливаются из металла и керамических материалов. Керамические рекуператоры более громоздки, занимают много места, однако могут устойчиво работать при высоких температурах 1200 – 1350 С и обеспечивают подогрев теплоносителя до 800 С.

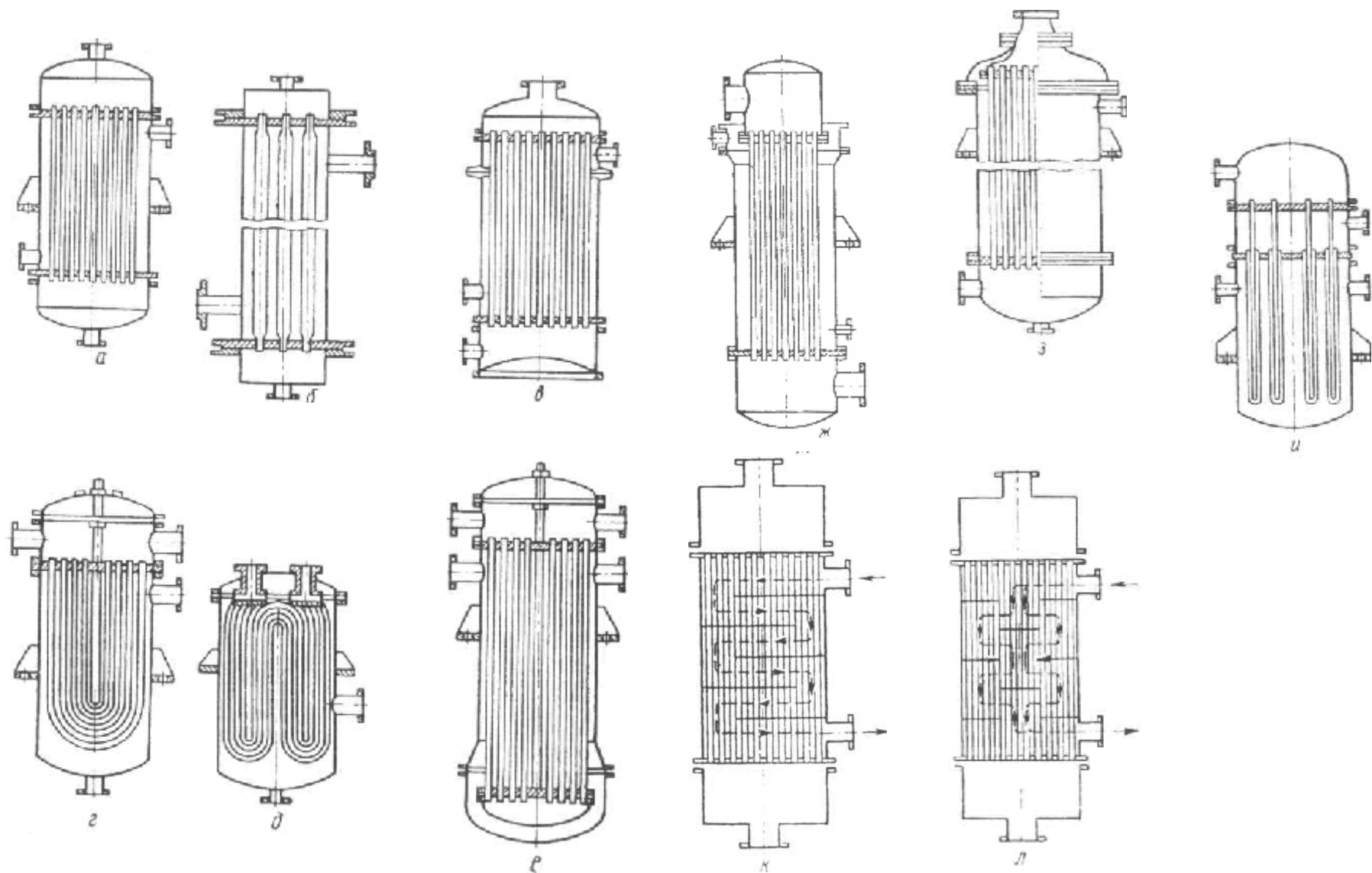


Рис. 1. Кожухотрубные рекуперативные теплообменники:

*а, б* - с жестким креплением труб; *в* - с линзовым компенсатором; *г, д* - с U и W-образными трубами; *е* - с нижней плавающей камерой; *ж* - с верхней плавающей камерой; *з* - с сальниковым уплотнителем; *и* - с трубами Фильда; *к, л* - с сегментными поперечными перегородками

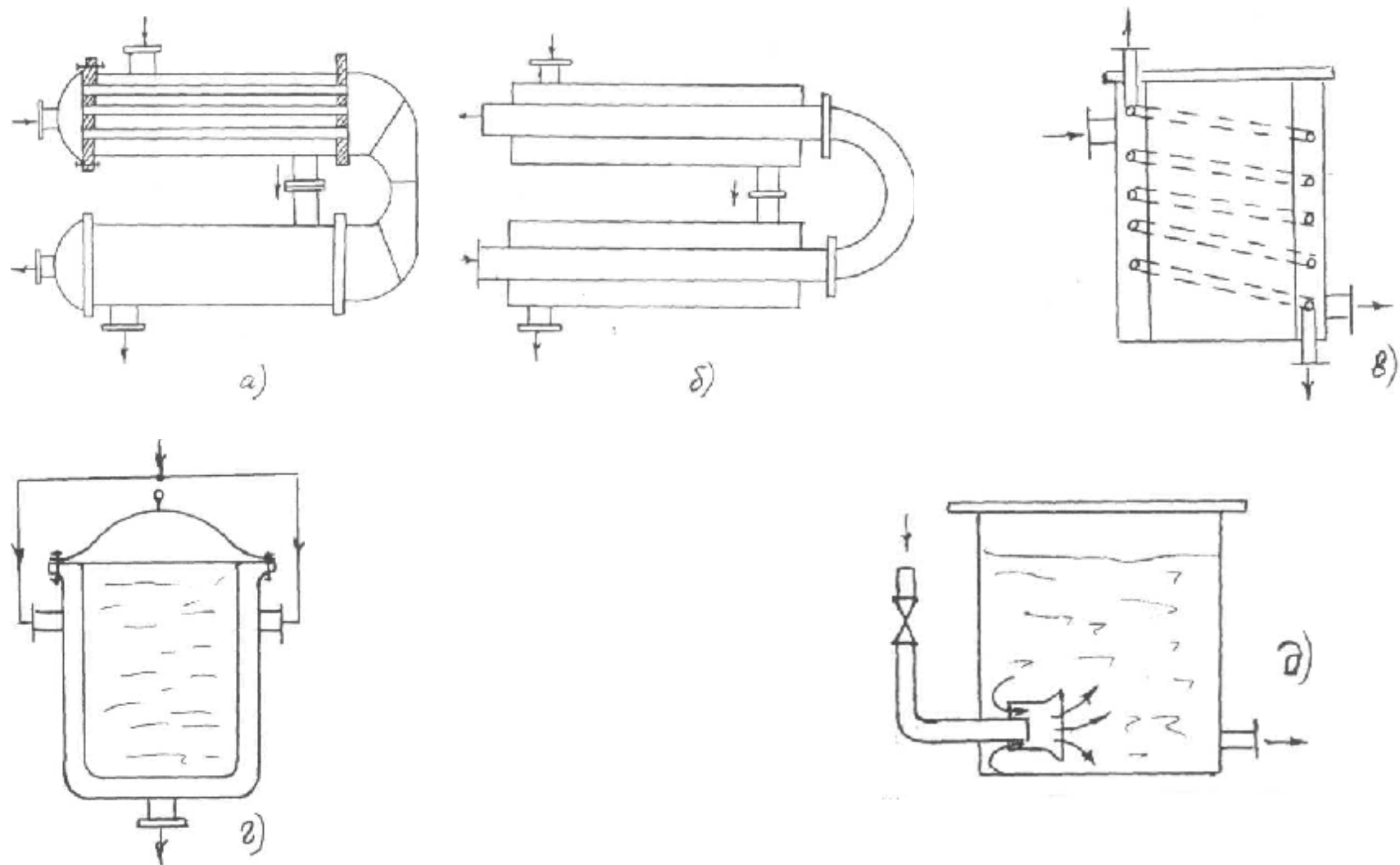


Рис. 2. Некоторые типы теплообменников:

*а.* - секционный теплообменник; *б* - теплообменник типа труба в трубе; *в* - погружной теплообменник; *г* - рубашечный теплообменник; *д* -смесительный теплообменник с сопловым смешивающим диффузором



Целью расчета рекуператоров является определение размеров теплообменника для обеспечения подогрева необходимого количества нагреваемого теплоносителя (воздуха) до необходимой температуры.

Для утилизации теплоты дымовых газов с температурой 800 – 900С часто используются игольчатые рекуператоры, которые собирают из отдельных труб, на которых имеются иглы. Иглы могут быть как на внутренней, так и на наружной стороне трубы.

Иглы увеличивают действительную поверхность нагрева, турбулизируют поток газов, что приводит к существенному увеличению интенсивности теплопередачи и уменьшает габариты теплообменника. Игольчатый рекуператор собирают из отдельных труб с фланцами, соединяемых при помощи болтов. Число ходов рекуператора зависит от температуры подогрева нагреваемого теплоносителя (воздуха). Чаще всего применяются двухходовые рекуператоры с подогревом воздуха до 300 – 400 С при температурах дымовых газов 800–900 С.

Скорости движения дымовых газов и воздуха принимаются: для металлических рекуператоров скорость движения газов 3 – 5 м/с, скорость воздуха 7 – 10 м/с, для керамических

рекуператоров из-за низкой газоплотности скорость газов 0,8–1 м/с, скорость воздуха 0,8–2 м/с для игольчатых рекуператоров скорость дымовых газов 5 – 14 м/с, скорость воздуха 6–10 м/с, что диктуется гидравлическими сопротивлениями по газовой и воздушной стороне теплообменников.

Регенеративные теплообменники применяются в нагревательных печах. Они представляют собой цилиндрические камеры, заполненные кирпичной многорядной насадкой, выложенные из огнеупорного кирпича. Сначала через регенератор пропускают дымовые газы, а затем в обратном направлении нагретая добела насадка отдает аккумулированное тепло теплоносителю. Переключение осуществляется при помощи клапанов.

Особые требования предъявляют к насадкам регенератора. Они должны обеспечивать эксплуатационные качества, экономичность, минимальное гидравлическое сопротивление,

высокую интенсивность теплообмена, строительную устойчивость.

Материал насадки должен обладать огнеупорностью, термостойкостью, сопротивлением к деформациям под нагрузкой при повышенных температурах.

При внешнем использовании высокотемпературных ВЭР дымовых газов применяются котлы-утилизаторы (КУ), предназначенные для получения водяного пара с давлением от 14 до 45 бар и даже 100 бар с температурой пара 300 – 450 С и даже 550 С (рис. 2.9, III).

Исходя из этого котлы-утилизаторы классифицируют по следующим признакам:

1. По температуре отходящих газов на входе в КУ при 750 – 900 С низкотемпературные, при температуре 1100 – 1200 С высокотемпературные.

Граница температур в 1000 С, разделяющая эти две группы котлов, выбрана по условиям теплоотдачи от газов к стенке трубы. При температурах ниже 900 С преобладает конвективный теплообмен, при температурах выше 1000 С – терморadiационный теплообмен.

2. По способу циркуляции воды КУ делят на котлы с принудительной и с естественной циркуляцией.

3. По конструкции КУ делят на газотрубные, змеевиковые, конвективные и радиационно-конвективные.

По компоновке бывают П – образные, башенные и горизонтальные.

Газотрубные КУ используются в промышленности строительных материалов (стекловаренные печи, печи обжига керамики, мартеновские печи).

Конвективные КУ устанавливают в нефтеперерабатывающей промышленности, в черной металлургии.

Радиационно-конвективные КУ используют в цветной металлургии за отражательными печами, в химической промышленности.

Все котлы-утилизаторы в отличие от традиционных паровых котлов отличаются только тем, что в КУ отсутствует топочная камера, а все остальные испарительные поверхности

нагрева (конвективные пучки труб, пароперегреватели, экономайзеры и т.д.) принципиально не отличаются от обычных котлоагрегатов.

В тех случаях, когда используются горючие ВЭР, в котлах-утилизаторах устанавливаются топочное устройство или камеры дожигания.

### **Теплообменные аппараты для утилизации низкопотенциальных ВЭР**

К низкотемпературным источникам ВЭР относят различные виды тепловых ВЭР от теплотехнологических аппаратов с температурой менее 300 °С (охлаждающая вода от различных печей, влажный воздух от сушильных установок, водяной пар вторичного вскипания, теплота конденсата греющего пара, теплота «мятого» пара от силовых установок и т.д.).

Низкотемпературные тепловые ВЭР могут быть использованы в самых разнообразных технологических процессах, а также для теплоснабжения, системах вентиляции, горячего водоснабжения.

Утилизация теплоты низкопотенциальных ВЭР возможна двумя путями: первый предусматривает трансформацию тепла от более высокого уровня теплоносителя ВЭР к более низкому температурному уровню потребителя; второй – трансформация тепла от источника ВЭР с более низкой температурой к более высокому уровню температуры у потребителя.

Первый путь реализуется при помощи теплообменников рекуперативного, регенеративного или смешительного типа, второй основывается на использовании тепловых насосов.

При утилизации низкотемпературных ВЭР вследствие низких температурных напоров нецелесообразно применять двухступенчатые схемы с промежуточным теплоносителем, так как это приводит к резкому увеличению поверхностей нагрева теплообменников, из-за большого снижения температурного напора в обоих ступенях схемы.

При реализации первого пути использования ВЭР оказываются экономичными теплообменники контактного типа, в которых обеспечивается использование всей теплоты ВЭР, в том числе и теплоты парообразования, если теплоносителем является газ. Особенно экономичны и удобны такие теплообменники для установок при тепловлажностной обработке приточного воздуха в системах вентиляции.

Конструкции контактных теплообменников очень разнообразны и выбираются в зависимости от производительности и назначения.

Например, воздухоподогреватель производительностью по воздуху менее 10000 м<sup>3</sup>/ч используют для местных отопительно-вентиляционных систем, а более 10000 м<sup>3</sup>/ч применяют для централизованных отопительно-вентиляционных установок.

В качестве насадочных материалов в контактных теплообменниках используются кольца Рашига (отопительно-вентиляционные агрегаты), роторные насадки в виде скрученной по спирали ленты из белой жести, волнисто-параллельная насадка в виде пакета асбоцементных листов толщиной 5,5 мм.

Контактные теплообменники для утилизации низкопотенциальных ВЭР многообразны по конструкции и по назначению. Поэтому необходимо привести перечень наиболее широко применяемых контактных теплоутилизаторов.

Отопительно-вентиляционные системы: роторный вентиляционный агрегат (АРВ) (рис. 3), отопительно-вентиляционный агрегат (ОВА), отопительно-вентиляционный агрегат с волнисто-параллельной насадкой (КВП), отопительно-вентиляционный агрегат (ОВА-15), контактно-поверхностный теплоутилизатор (ТКПП – 10), блочный контактный экономайзер (ЭК-БМ) для нагрева воды уходящими газами, контактный теплоутилизатор с промежуточным теплообменником (конструкции НИИСТ) для утилизации теплоты отходящих газов и нагрева воды, контактный водонагреватель утилизационный газовый (ВУГ-1). Некоторые типы контактных теплоутилизаторов представлены на рисунках 3–6.

В текстильной и легкой промышленности применяются регенеративные и смешительные аппараты. В качестве насадки в регенеративных аппаратах используют гофрированную

металлическую ленту. Так как в них процесс передачи тепла от горячего теплоносителя к холодному происходит за два периода, то для обеспечения непрерывной подачи теплоносителей в случае неподвижной насадки совмещают два регенеративных аппарата, с двумя перекидными клапанами (рис. 7, 8).

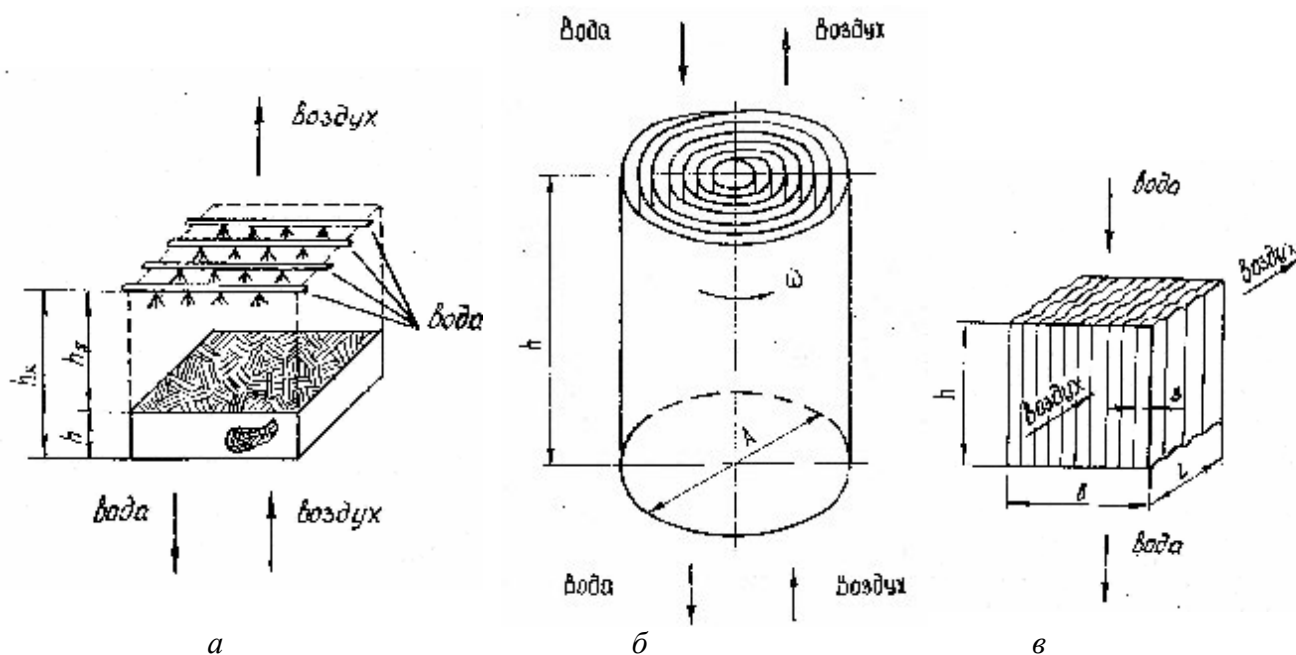


Рис. 2.3. Схемы отопительно-вентиляционных агрегатов

а- контактная камера отопительно-вентиляционного агрегата (ОВА); б- роторный вентиляционный агрегат (АРВ); в- контактная камера с волнисто-параллельной насадкой (КВП)

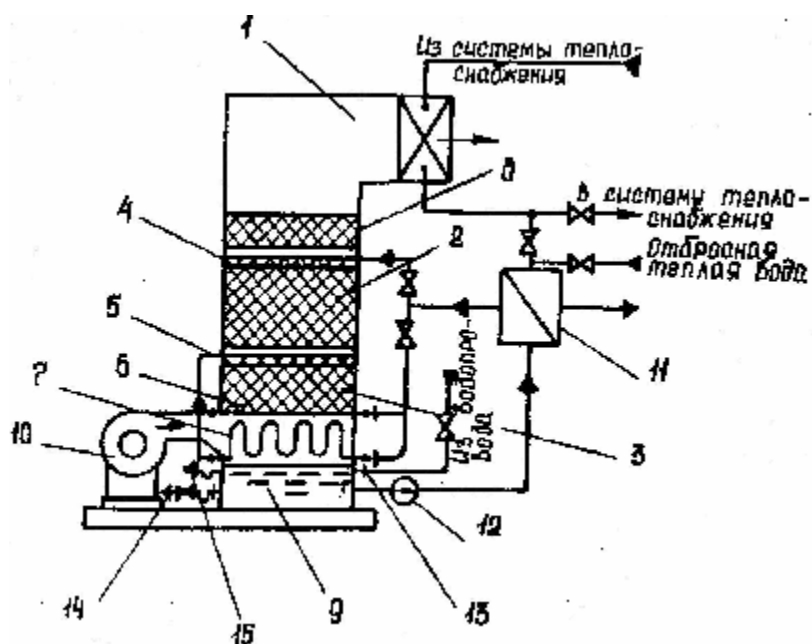


Рис. 8.4. Отопительно- вентиляционный агрегат ОВА-15:

1— калорифер, 2— ступень промежуточного нагрева, 3— ступень предварительного нагрева, 4— водораспределитель, 5— дополнительный водораспределитель, 6— опорная решетка, 7— греющая рубашка, 8— каплеуловитель, 9— поддон, 10— вентилятор, 11— промежуточный теплообменник, 12— насос, 13— патрубок подвода воды, 14— дренажный патрубок, 15— переливной патрубок

Преимущества и недостатки регенеративных теплообменников подробно рассмотрены выше.

В смесительных теплообменных аппаратах теплообмен осуществляется путем непосредственного смешения теплоносителей. В связи с тем, что в этих аппаратах в теплообмене не участвуют твердые поверхности интенсивность теплообмена в них значительно выше, чем в поверхностных теплообменниках. По конструкции различают следующие виды смесительных аппаратов (рис. 8).

Безнасадочные камеры (колонны), в которых жидкость распыляется форсунками в газовую среду и контакт между жидкостью и газом происходит на поверхности капель жидкости.

Насадочные камеры (колонны) – соприкосновение газа с жидкостью происходит на поверхности пленки жидкости, стекающей по насадке (кольца Рашига, куски кокса, деревянные рейки).

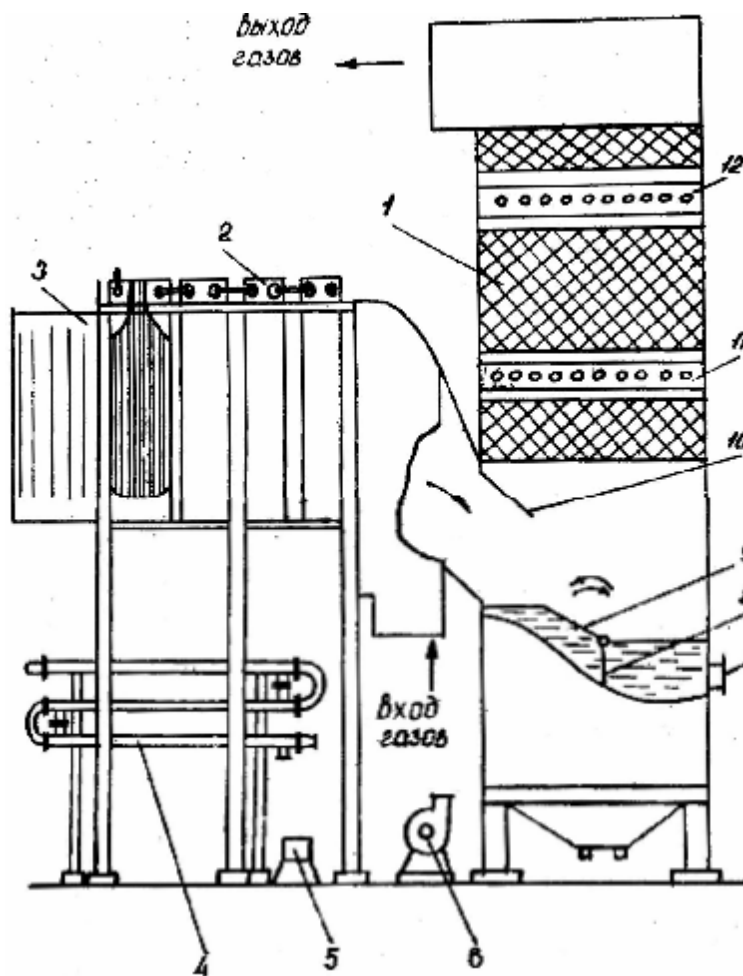


Рис. 5. Контактно-поверхностный теплоутилизатор ТКЛП-10:

- 1– контактная часть, 2– тепловой модуль, 3 – поворотная камера, 4– промежуточный теплообменник, 5– узел очистки, 6– насос, 7– патрубок, 8 – перегородка, 9– заслонка поворотная, 10– козырек (направляющий, 11– водораспределитель дополнительный, 12– водораспределитель основной

Насадочные аппараты более компактны, чем безнасадочные, но имеют повышенное гидравлическое сопротивление.

Каскадные аппараты имеют внутри корпуса горизонтальные и наклонные полки, жидкость стекает с полки на полку сверху вниз, образуя пленку.

Струйные смесительные аппараты – вода нагревается эжектируемым паром.

Пленочные смешивающие теплообменные аппараты – нагрев воды водяным паром.

Преимущества таких подогревателей по сравнению с поверхностными теплообменниками простота конструкции, компактность, меньшая металлоемкость.

Пенные аппараты – применяются для улавливания из газов или запыленных потоков плохо смачиваемой пыли.

Применяется барботаж газа через слой жидкости.

Широко применяется нагрев жидкостей и растворов острым паром барботированием пара через перфорированную трубу (труба с отверстиями). Главным недостатком смесительных аппаратов является загрязнение нагреваемого теплоносителя, преимущество простота конструкции, компактность.

Наиболее целесообразно в системах утилизации низкопотенциальных тепловых ВЭР применять теплообменники на тепловых трубах, которые обладают рядом уникальных свойств. Возможности применения теплообменников на тепловых трубах определяются их технико-экономическими показателями стоимостью.

Тепловая труба (ТТ) (рис. 9, IV)– устройство обладающее очень высокой эффективностью передачи теплоты. Принцип работы – на внутренней стенке трубы укрепляется фитиль, выполненный из тонкой сетки.

Труба заполняется небольшим количеством теплоносителя (рабочая жидкость), откачивается воздух и плотно закрывается. Один конец трубы нагревается, что вызывает испарение жидкости и движение пара к холодному концу трубы. Здесь пар конденсируется и возвращается к горячему концу трубы под воздействием капиллярных сил. Чем больше теплота парообразования рабочего теплоносителя, тем больший тепловой поток может передавать тепловая труба даже при малой разности температур на концах трубы. В ТТ различают три участника: зону подвода тепла, или участок испарения, зону переноса тепла (адиабатный участок), зону отвода тепла (участок конденсации).

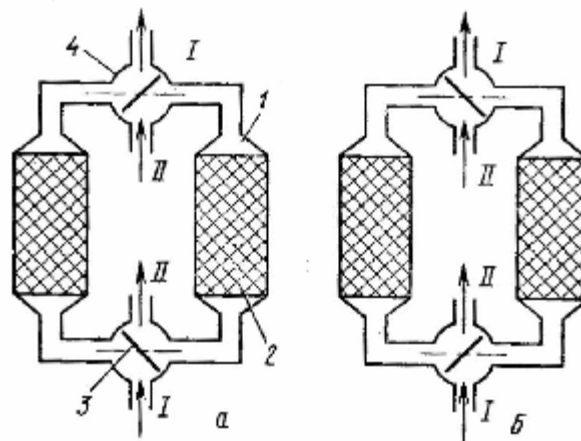


Рис. 8.7. Схемы регенеративных теплообменников:

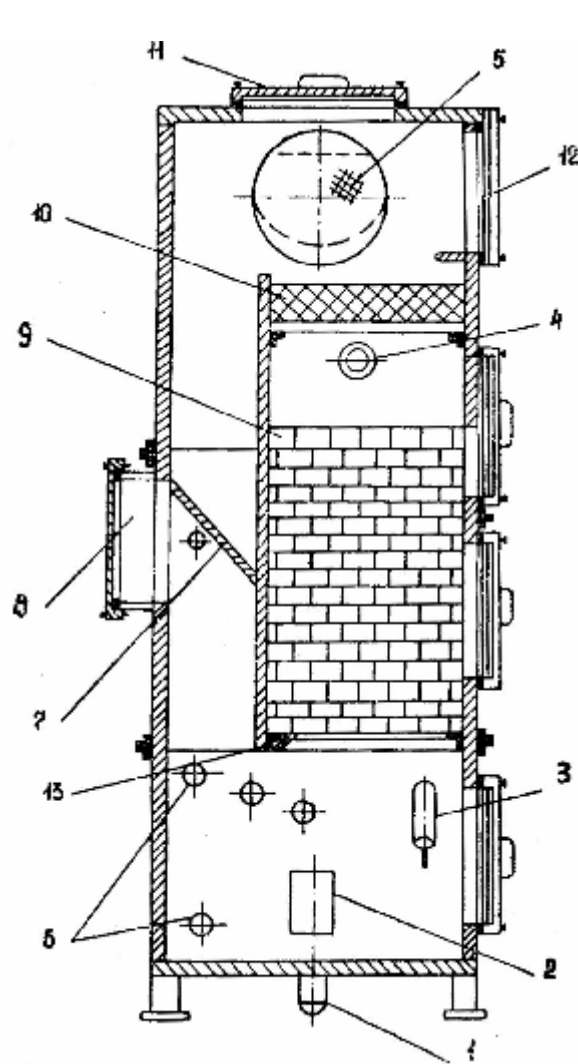
а- левый корпус –период нагрева, б- правый- период охлаждения.

1- корпуса, 2- насадки, 3- перекидные клапана, 4- клапанные коробки

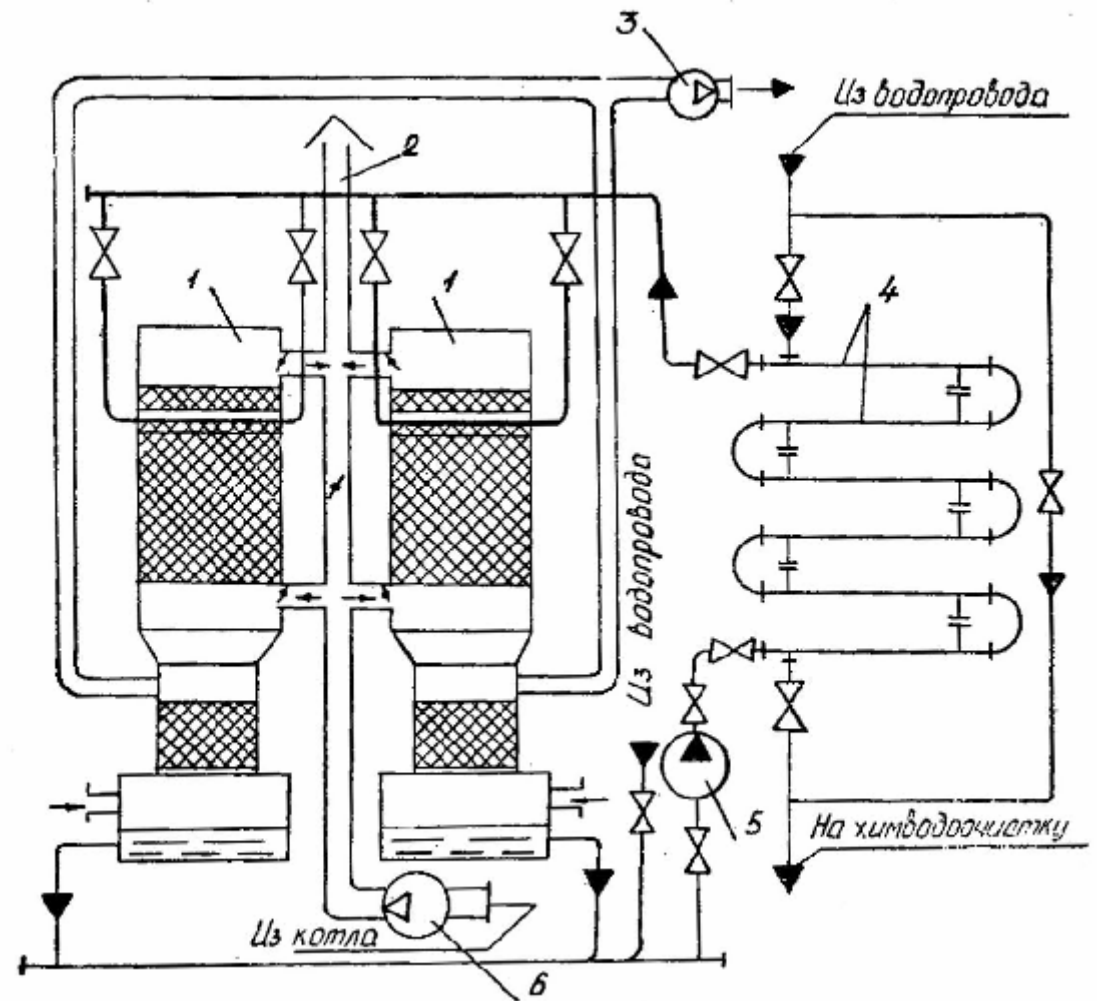
Теплопередающая способность ТТ может быть очень большой. Так, если в ТТ используется в качестве рабочего вещества литий при температуре 1500 С в осевом направлении передается тепловой поток 10–20 кВт/см<sup>2</sup>.

В качестве теплоносителей используются ацетон, аммиак, фреоны, вода, цезий, калий, натрий, литий, свинец, различные неорганические соли.

Наибольшее применение теплообменники на тепловых трубах получили при утилизации низкопотенциальных ВЭР (температурах 50 – 200 С), так как при таких температурах не требуется применения дорогостоящих материалов и теплоносителей



а



б

Рис 6. Схема водонагревателя ВУГ-1 (а): 1- дренажный патрубок, 2- патрубок для отвода воды, 3- узел подпитки, 4- ороситель, 5- взрывной клапан. 6- штуцер водоуказательного прибора, 7- заслонка, 8- патрубок подвода газов, 9- рабочий насадной слой, 10- каплеулавливающий насадочный слой, 11- люк, 12- окно отвода газов, 13- опорная решетка; (б) контактный теплоутилизатор с промежуточным теплообменником: 1- контактные камеры, 2- дымовая труба, 3- вентилятор. 4- промежуточный теплообменник, 5- насос, 6- дымосос.

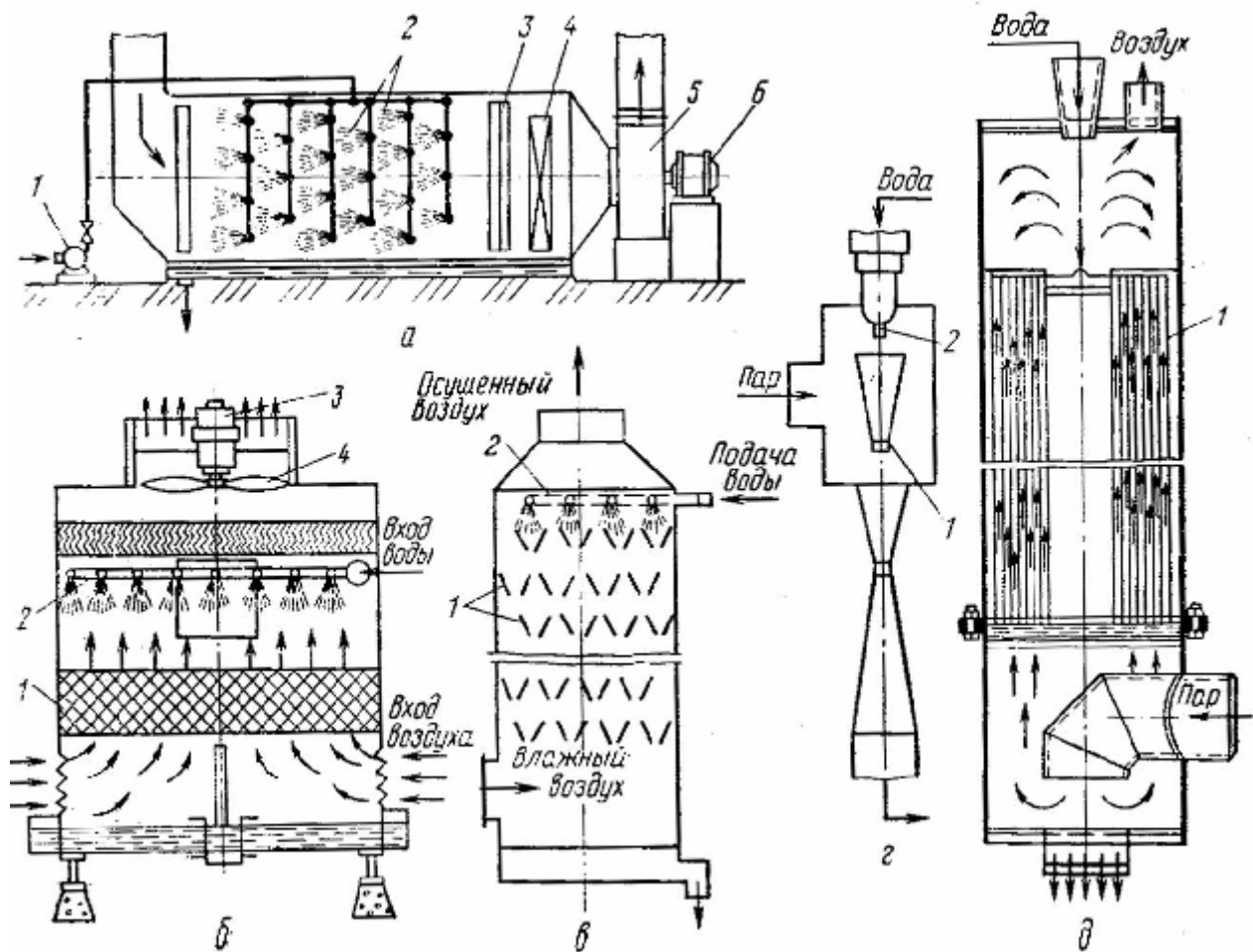
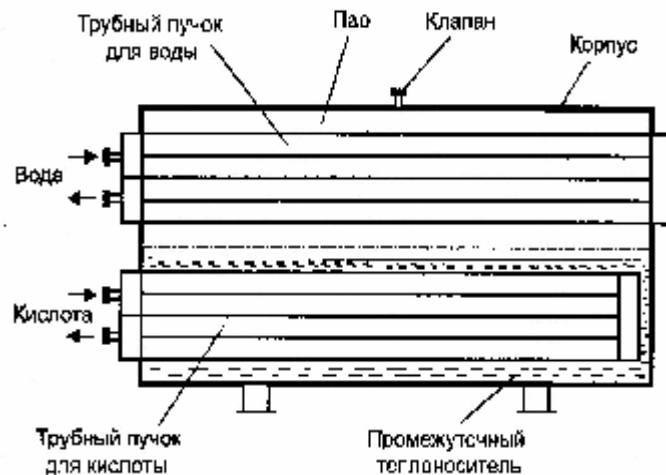


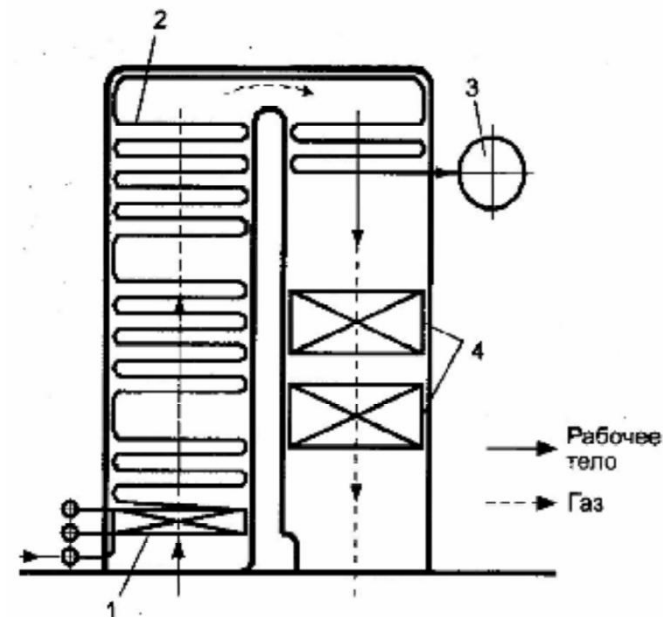
Рис. 8. Типы смешивательных теплообменников:

а- безнасадочный с форсунками: 1- насос, 2- форсунки, 3- иллюминаторы-сепараторы влаги, 4- подогреватель, 5- центробежный вентилятор, 6- электродвигатель; б- насадочный: 1- насадка, 2- распределительная труба, 3- электродвигатель, 4- осевой вентилятор; в- каскадный: 1- каскады, 2- распределительная труба; г- струйный: 1,2- сопла первой и второй ступени струйного смесителя; д- пленочный: 1- коаксиальные трубы.

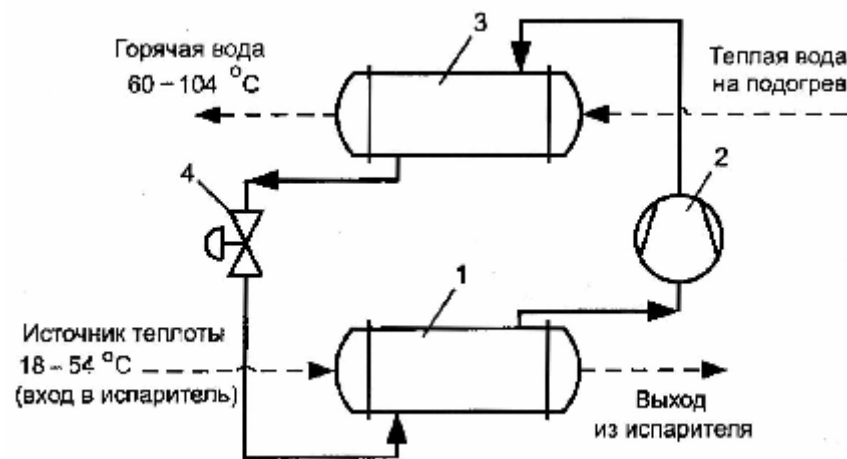
I



III



II



IV

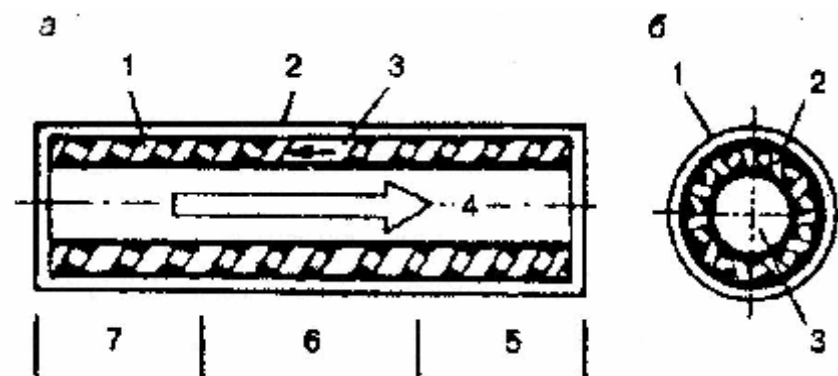


Рис. 8.9. I- теплообменник с промежуточным теплоносителем;

II- тепловой насос для утилизации низкопотенциальной теплоты промышленных сточных вод (1- испаритель, 2- компрессор, 3- конденсатор, 4- дроссель); III- схема котла утилизатора (1-парогенератор, 2- испарительные пакеты, 3- барабан-сепаратор, 4- экономайзер); IV- схема тепловой трубы (а- продольный разрез: 1- фитиль, 2- стенка трубы, 3- возврат жидкости по фитилю, 4- пар, 5- участок конденсации, 6- адиабатный участок, 7- участок испарения; б- поперечное сечение: 1- стенка, 2- фитиль, 3- паровое пространство)



Теплообменники на тепловых трубах (ТТТ) являются разновидностью рекуперативных теплообменников с промежуточным теплоносителем (рис. 8.9, I). Для достижения высокой экономичности и невысокой стоимости ТТТ необходимы дешевые конструкции тепловых труб, малые габариты и рабочие вещества с хорошими теплотехническими характеристиками. К таким ТТТ относятся гладкостенные фитильные и центробежные, но могут применяться и другие виды тепловых труб.

Конструктивно ТТТ выполняются и набора ТТТ. В зависимости от агрегатного состояния теплоносителя ТТТ разделяются на три типа: 1) газ-газ (воздух-воздух); 2) газ-жидкость; 3) жидкость-жидкость.

ТТТ первого типа применяются в качестве воздухоподогревателей для промышленных агрегатов, в системах отопления и вентиляции, в утилизаторах животноводческих ферм.

ТТТ второго типа используются в условиях исключаяющих взаимодействие газа и жидкости. Эти ТТТ применяются как конденсаторы, нагреватели и охладители жидкостей.

ТТТ третьего типа используются в химической промышленности, в атомной энергетике, когда исключается взаимодействия между теплоотдающей и тепловоспринимающей жидкостями в широком диапазоне изменения давлений и температур. Использование ТТТ для утилизации ВЭР дает возможность не только повысить тепловую эффективность энергетических установок, но и уменьшить загрязнение окружающим фактором, препятствующим более широкому использованию ТТТ в промышленности является их стоимость значительно большая, чем стоимость рекуперативных теплообменников.

В настоящее время вопросы использования низкотемпературных источников тепла для отопления, горячего водоснабжения нагрева воды для технологических нужд наиболее успешно решаются с помощью тепловых насосов (ТНУ). Наибольшее распространение получили компрессионные теплонасосные установки (рис. 9, II).

Рабочими телами в ТНУ служат фреоны – вещества, имеющие низкую температуру кипения при давлениях близких к атмосферному. Коэффициент преобразования тепла  $\phi = Q_1/N_э$  при температурах сточных вод или воздуха от вентиляционных систем 20 – 50 °С может быть 3 – 6, а тепловая мощность составлять 50 – 5000 кВт. При затрате электрической мощности  $N_э=1$  кВт потребителю подается через конденсатор тепловая мощность в 3 – 6 кВт. Минимальные значения коэффициента преобразования тепла, при котором достигается экономия энергии 2,3 при электроснабжении от КЭС и 2,8 – от ТЭЦ.

Тепловые насосы предназначены для утилизации низкотемпературных ВЭР с температурой 20 – 50 °С, с подачей горячей воды 60 – 100 °С.

Экономическая эффективность использования ТНУ зависят не только от технического совершенства насосов, но и от соотношения цен (тарифов) на электрическую и тепловую

энергию. Существует критическое соотношение цен, при котором использование ТНУ становится невыгодным. Годовой фонд времени ТНУ должен быть более 3000 часов.

Схемы использования ТНУ для утилизации низкотемпературных ВЭР настолько разнообразны, что рассматривать их даже в ограниченном объеме невозможно.

В странах Западной Европы, Японии, США, Канады серийно выпускаются теплонасосные станции (ТНС) миллионами экземпляров различного назначения и тепловой мощности, которые широко используются в качестве индивидуальных систем обогрева жилых домов, отдельно стоящих зданий.

### **Некоторые примеры экономии тепловой энергии за счет использования ВЭР**

### ***Использование низкопотенциальной тепловой энергии отопительно-вентиляционным агрегатом.***

Предусмотрено использование тепловой энергии охлаждающей воды с температурой 28...35 °С от технологического оборудования для подогрева в специальном агрегате наружного воздуха, поступающего в приточные камеры отопительно-вентиляционных систем.

Отопительно-вентиляционный агрегат (рис. 10) состоит из калорифера 1, насадочной контактной камеры, разделенной на ступени промежуточного 2 и предварительно 3 нагрева, водораспределителя 5, установленного между ступенями 2 и 3. Агрегат имеет систему защиты от обмерзания, состоящую из обогреваемой опорной решетки 6, насадки ступени 3, греющей рубашки 7 нижней части ступени 3, каплеуловителя 8, поддона 9, вентилятора с электродвигателем 10, промежуточного поверхностного теплообменника 11, циркуляционного насоса 12 с регулировочным клапаном 13 для подачи воды в градирню.

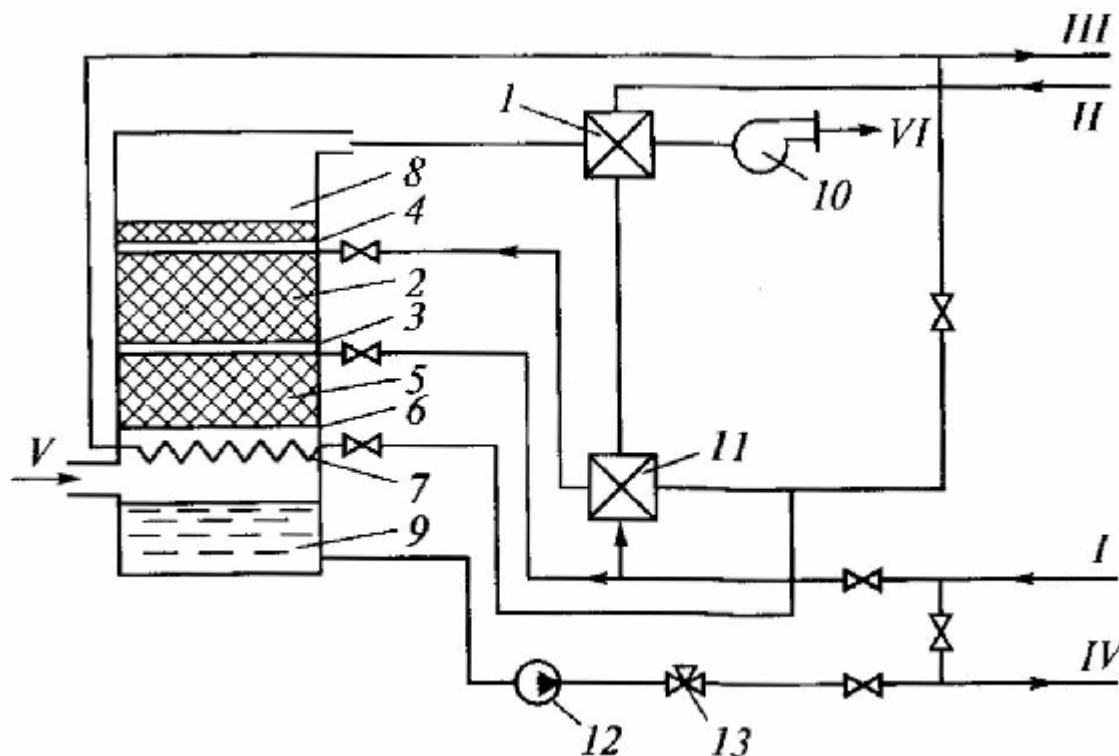


Рис. 10. Принципиальная схема отопительно-вентиляционного агрегата:

1- калорифер; 2 - ступень промежуточного нагрева; 3 - ступень предварительного нагрева; 4 - водораспределитель; 5 - дополнительный водораспределитель; 6 - опорная решетка; 7 - греющая рубашка; 8 - каплеуловитель; 9 - поддон; 10 - вентилятор с электродвигателем; 11- теплообменник; 12 - насос; 13 - клапан; I - линия обратной воды от оборудования; II- линии высокотемпературного теплоносителя (горячая вода из теплотрассы); III - линия обратной воды в теплотрассу; IV- линия воды на градирню; V - линия холодного воздуха; VI - линия нагретого воздуха.

Отопительно-вентиляционный агрегат работает следующим образом.

Наружный воздух с отрицательной температурой подается вентилятором 10 под насадку ступени 3 предварительного нагрева. В насадке воздух контактирует с водой, подаваемой через дополнительный водораспределитель 5, и водой, стекающей с насадки 2 промежуточного нагрева. Нагревание и увлажнение происходят в насадке ступени 2 промежуточного нагрева при контактировании с водой, подаваемой через

водораспределитель 4. После прохождения через каплеуловитель 8 воздух подогревается до требуемой температуры в калорифере 1 и подается в систему приточной вентиляции.

Нагретая охлаждающая вода, поступающая из производственных цехов от охлаждения оборудования, разделяется на два потока: первый поступает в водораспределитель 5, и отдавая тепло холодному воздуху в насадке 3, стекает в поддон 9, а второй - направляется в теплообменник 11, где подогревается обратной водой и направляется в водораспределитель 4.

Вода из поддона насосом 12 направляется по обратному трубопроводу в градирню.

Высокотемпературный теплоноситель из подающей магистрали системы теплоснабжения последовательно проходит калорифер 1 и промежуточный поверхностный теплообменник 11 циркуляционного контура агрегата и при 20...30 °С поступает в обратную магистраль системы теплоснабжения.

Годовая экономия от его использования составляет 14 тыс. ГДж тепловой и 66 тыс. кВт•ч электрической энергии. Срок окупаемости затрат – 2 года. Применяется на предприятиях машиностроения и других отраслей промышленности.

#### ***Использование теплоты уходящих газов в производственной котельной.***

Теплоснабжение одного из цехов ПО Моспроммеханизация осуществляется от котельной, в которой установлены три паровых котла МЗК-7 производительностью 1 т/ч каждый. Котлы оснащены горелочными устройствами для работы на природном газе низкого давления (резервное топливо – мазут). Конструкция котлов предусматривает их работу под наддувом, осуществляемым индивидуальными дутьевыми вентиляторами. Удаление продуктов сгорания из котлов производится за счет давления наддува через индивидуальные металлические дымовые трубы.

С целью использования тепловой энергии уходящих газов для нужд горячего водоснабжения и нагрева воды для котельной была спроектирована и смонтирована за одним из котлов теплоутилизационная установка с контактным экономайзером (см. рис. 11), расположенным над котлом на отметке 3 м. Для подачи газов через экономайзер на выходе их установлен отсасывающий вентилятор Ц13-50 № 3 (n=1440 об/мин). Предусмотрена возможность работы котла как с утилизационной установкой, так и без нее (с помощью переключающих заслонок). При отключенном экономайзере заслонка 3 закрыта, а заслонка 2 открыта. При подключении экономайзера заслонка 2 закрывается, открывается заслонка 3, включается отсасывающий вентилятор 5, и газы из котла 1 направляются в экономайзер 4.

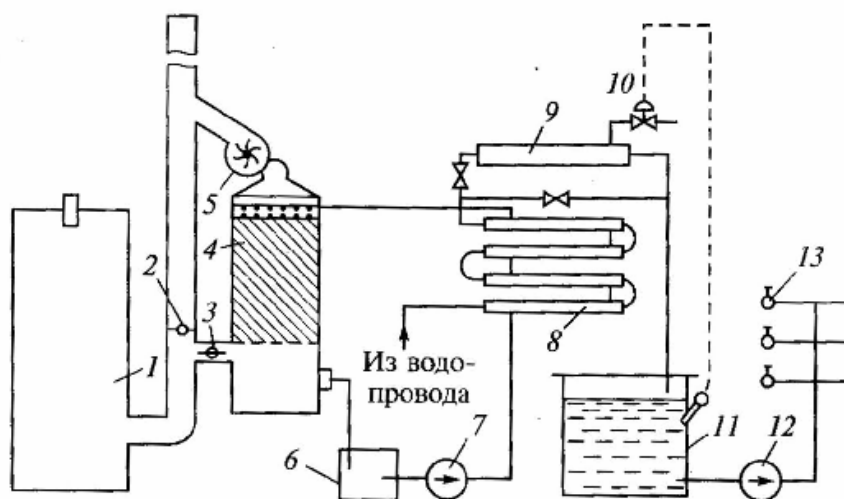


Рис. 8.11. Теплоутилизационная установка с контактным экономайзером:

1- котел; 2, 3 -заслонки; 4 - экономайзер; 5 - вентилятор; 6-бак; 7- насос; 8 – теплообменник; 9 - пароводяной бойлер; 10 - регулирующий клапан; 11 - бак горячей воды; 12 - насос; 13 - душевые

Установка работает следующим образом. Уходящие газы из котла 1 поступают в нижнюю зону экономайзера 4, проходят через слой насадки и выбрасываются в дымовую трубу. Подлежащая нагреву вода из оросителя струями подается на слой насадки, стекает в поддон, из которого по переточной трубе сливается в промежуточный бак б, отсюда циркуляционным насосом 7 направляется в водо-водяной теплообменник 8, затем охлажденная вода через ороситель поступает в экономайзер. Холодная вода из водопровода направляется в теплообменник 8, нагревается в нем и сливается в бак горячей воды 11. Отсюда нагретая вода насосом 12 направляется в душевые 13.

Испытания показали, что при использовании контактного экономайзера КПД МЗК-7 увеличился с 82 до 93 % (по высшей теплоте сгорания топлива). Наряду с этим был выявлен и существенный недостаток установки. При эксплуатации наблюдались крайне низкие скорости движения нагреваемой воды в трубках (0,05...0,09 м/с) и особенно греющей воды в межтрубном пространстве (0,01...0,014 м/с).

В связи с указанным недостатком теплоутилизационная установка была оборудована секционными водо-водяными теплообменниками с требуемыми характеристиками: диаметр трубок секций 57/50 мм, длина - 4 м, площадь поверхности нагрева секций - 0,75 м<sup>2</sup>, число секций - 7. Согласно новой схеме предусмотрен двухступенчатый нагрев водопроводной воды в водо-водяных теплообменниках 8 и пароводяном бойлере 9. При испытании модернизированной схемы было установлено, что в водо-водяных теплообменниках водопроводная вода в количестве 2,4 м<sup>3</sup>/ч нагревалась до 44...45 °С, КПД установки составил 95 % (по высшей теплоте сгорания топлива). Догрев воды до более высокой температуры (50...60 °С) должен производиться в пароводяном бойлере. Изменение давления пара на бойлер производится регулирующим клапаном 10 по импульсному сигналу о температуре воды в баке-аккумуляторе. Для производственных душевых нормативная температура воды составляет 37 °С, т. е. достаточен нагрев воды только в водо-водяных теплообменниках. Если же требуется более горячая вода, то после водо-водяных теплообменников ее следует догревать в пароводяном бойлере. Так, в случае нагрева воды до 50 °С на пар приходится небольшая часть полезной теплопроизводительности.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое энергетические отходы? Назовите их типы и виды.
2. Что такое ВЭР? Приведите классификацию ВЭР.
3. Как рассчитать общий и возможный выход ВЭР?
4. Как оценить экономию топлива за счет использования тепловых или горючих ВЭР?
5. Какие источники и виды тепловых ВЭР имеются в промышленности?
6. Какую роль играют теплообменные аппараты в энергосбережении?
7. Назовите основные типы теплообменных аппаратов для утилизации теплоты низкотемпературных и высокотемпературных ВЭР?
8. Назовите основные тепловые ВЭР текстильной промышленности.
9. Объясните принцип работы компрессионного теплового насоса и тепловой трубы.
10. Приведите примеры использования тепловых ВЭР.
11. Назовите основные схемы использования конденсата пара.
12. Какие виды теплообменников используются в системах утилизации ВЭР?
13. Назовите основные трудности при утилизации теплоты сбросных растворов и паровоздушной смеси.
14. Какие факторы влияют на выбор типа теплообменного аппарата для утилизации ВЭР?

15. Назовите основные теплотехнические установки – источники теплоты сбросных растворов и паровоздушной смеси.

16. Назовите основные преимущества и недостатки обогрева жидкости «глухим» и «острым» паром.

17. Назовите основные преимущества и недостатки смесительных теплообменных аппаратов. Какова область их применения?

18. Назовите основные преимущества и недостатки регенеративных теплообменных аппаратов.