

## ТРУБОПРОВОДНЫЙ ТРАНСПОРТ И ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ

УДК 62.681

### ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ КОТЛОВ И ИХ НЕДОСТАТКИ

А.А. КАШКУР, А.О. КОВТУН  
(Представлено: В.А. ЗАФАТАЕВ)

*С целью уменьшения теплового и химического загрязнения атмосферы, а также решения проблем энерго- и ресурсосбережения при эксплуатации котельных установок представлены технические рекомендации по эффективному использованию теплообменников-конденсаторов поверхностного типа в трактах уходящих дымовых газов, за счёт которых полезно используется явная и скрытая теплота дымовых газов, а также улавливаются продукты сгорания топлива.*

Современное развитие энергетики характеризуется значительно возросшей стоимостью топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), а также существенными трудностями охраны окружающей среды от воздействия теплогенерирующих установок (ТГУ) и промышленных предприятий. Большую долю ТЭР страна вынуждена закупать извне по причине малой обеспеченности собственных недр и экономической нецелесообразности переработки их в конечный вид, пригодный для непосредственного использования [1]. Основным сырьём, закупаемым извне для производства тепловой энергии, является природный газ. Его удельный вес по общей стоимости товаров, импортируемых из России, составляет около 16%, и это второй по величине стоимости товар после сырой нефти [2]. В структуре импорта ТЭР доля природного газа составляет 41% [1]. В структуре конечного потребления по всем видам топлива и энергии на долю природного газа приходится 18% [1]. Доля природного газа, направляемого на получение тепловой и электрической энергии, составляет 70% [1].

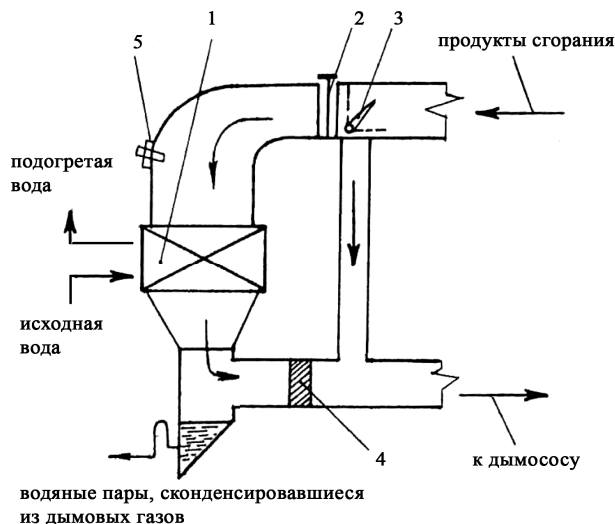
**Постановка задачи.** Совершенствование энерготехнологии, энергосбережение, экономия топлива и других природных ресурсов, охрана окружающей среды являются приоритетными направлениями развития фундаментальных исследований в области энергетики. Анализ работы газифицированных ТГУ показывает, что одним из путей существенного повышения коэффициента использования топлива (КИТ) является глубокое охлаждение (ниже точки росы) продуктов сгорания в конденсационных теплоутилизаторах (КТ). В КТ наряду с охлаждением продуктов сгорания происходит снижение содержания в уходящих газах оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) [3]. Однако широкое внедрение КТ поверхностного типа существенно сдерживается отсутствием теоретических разработок по тепло- и массообмену в условиях конденсации водяных паров из продуктов сгорания. Задачами, которые требуется решать, являются повышение тепловой эффективности, улучшение условий работы и долговечности устройства для утилизации теплоты дымовых газов за счёт более полной утилизации скрытой теплоты конденсации водяных паров, содержащихся в дымовых газах.

**Исследовательская часть.** Охлаждение дымовых газов в КТ ниже точки росы снижает их влагосодержание, но не исключает возможности конденсации остаточных водяных паров в наружных газоходах и в дымовой трубе. Отсутствие фундаментальных исследований в этой области не позволяет принять правильное решение в практике проектирования КТ.

Известны два пути обеспечения надежной работы газового тракта после КТ: покрытие внутренних поверхностей газоходов и дымовой трубы защитной гидроизоляцией и предотвращение конденсатообразования за счет подогрева продуктов сгорания после теплоутилизатора. Например, существует конструктивное решение котельной установки (рисунок 1), содержащей в газоходе котла установленный перед дымососом теплообменник. В теплообменнике утилизируют теплоту дымовых газов котлов путём их охлаждения до температуры ниже точки росы, конденсируя таким образом скрытую теплоту водяных паров, образовавшихся в дымовых газах в результате сжигания топлива. В качестве охлаждающей среды в теплообменнике используют холодную воду, например, водопроводную, идущую на горячее водоснабжение, подпиточную котлов и т.п. [3]. Такой теплообменник является по существу водогазовым поверхностным конденсатором. Уходящие дымовые газы с температурой 120–150 °С попадают на распределительный клапан 3, который делит их на два потока, основной поток газа (70–80%) направляется через сетчатый фильтр 2 в теплообменник 1, второй (около 20–30%) – по обводной линии газохода. Сменный сетчатый фильтр устанавливается для защиты теплообменника от твёрдых отложений, которые могут образоваться при сжигании твёрдого или жидкого топлива. Процесс охлаждения продуктов сгорания в теплообменнике ниже точки росы сопровождается выпадением конденсата. Температура дымовых газов после смешения поддерживается на уровне 65–70 °С (выше температуры точки росы, равной 55–60 °С), что позволяет при всех режимах работы котла исключить выпадение конденсата в газовом тракте.

Главным недостатком вышеописанной установки является то, что дымовые газы, проходя через обводной газоход, уносят часть теплоты конденсации содержащихся в них водяных паров. Таким обра-

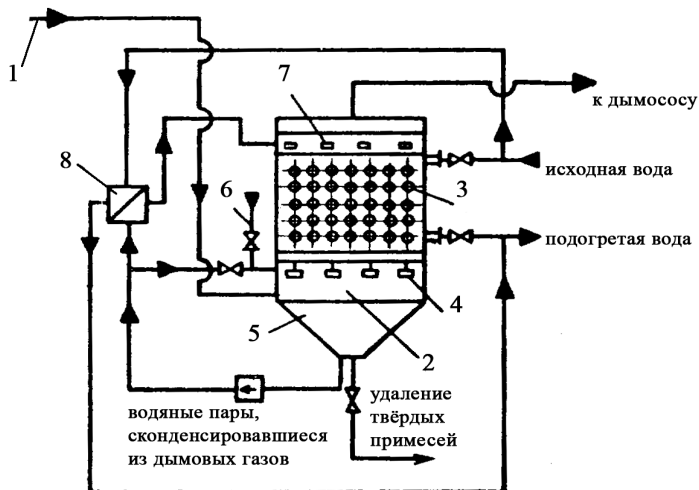
зом, степень утилизации теплоты и КПД котельной установки снижаются. Кроме того, в технологической схеме установки не предусмотрено получение дополнительной теплоты за счёт орошения потока дымовых газов конденсатом, стекающим из теплообменника во влагосборник. То есть нагревание воды в теплообменнике до более высокой температуры за счёт повышения парциального давления водяных паров и температуры мокрого термометра для дымовых газов обеспечить невозможно.



1 – поверхностный теплообменник-утилизатор; 2 – сменный сетчатый фильтр;  
3 – распределительный клапан; 4 – каплеуловитель; 5 – штуцер для пневматической обдувки

Рисунок 1. – Схема утилизации теплоты продуктов сгорания в КТ с использованием байпаса

Также существует устройство для утилизации теплоты дымовых газов (рисунок 2), содержащее подключённый нижней частью к источнику дымовых газов вертикальный газоход.



1 – дымовые газы; 2 – нижняя камера орошения; 3 – теплообменник-экономайзер;  
4 – форсунка; 5 – влагосборник; 6 – подпиточная линия; 7 – верхняя камера орошения;  
8 – промежуточный поверхностный теплообменник

Рисунок 2. – Устройство утилизации теплоты продуктов сгорания с экономайзером

В устройстве утилизации теплоты продуктов сгорания размещены один над другим по ходу газов соответственно влагосборник 5, нижняя камера орошения 2, поверхностный теплообменник-конденсатор 3 и верхняя камера орошения 7, причём теплообменник-конденсатор выполнен в виде экономайзера с горизонтальными трубами по схеме однократного перекрёстного тока, а нижняя и верхняя камеры орошения объединены контуром циркуляции с влагосборником [4].

Дымовые газы увлажняют в нижней камере орошения 2, пропускают в межтрубном пространстве поверхностного теплообменника-конденсатора 3, где охлаждаются и используют скрытую теплоту конденсации содержащихся в дымовых газах водяных паров, подогревая при этом циркулирующую в трубах сете-

вую воду, и увлажняют в верхней камере орошения 7. В результате на поверхности пучка горизонтальных труб образуется конденсат, под действием сил гравитации стекающий во влагоборник 5. Собранный во влагоборнике конденсат контуром циркуляции, образованным между влагоборником и камерами орошения, направляют вновь в нижнюю и верхнюю камеры орошения для увлажнения дымовых газов. При необходимости регулирование температуры подогрева сетевой воды осуществляется за счёт подмешивания части исходной (подогреваемой) воды из контура, включающего промежуточный поверхностный теплообменник 8, в котором источником теплоты служит собранный во влагоборнике 5 конденсат.

Основным недостатком указанного устройства является его низкая тепловая эффективность за счёт неравномерного омывания межтрубного пространства экономайзера по ходу дымовых газов, поскольку ближайшие к входу ряды трубок экономайзера омываются потоком дымовых газов, начиная от лобовой точки, и изначально имеют более выгодные условия по теплоотдаче, чем последующие ряды, находящиеся в слабой вихревой зоне по линии экватора, считая от лобовой точки. Однако свежие порции дымовых газов в ближайших к входу рядах трубок экономайзера на своём пути встречают стекающий с верхних рядов труб на нижние охлаждённый конденсат, отдавший свою теплоту воде, циркулирующей в трубах, выпавший в виде плёнки жидкости. При этом в ближайших по ходу дымовых газов рядах трубок экономайзера ухудшаются условия для интенсификации процесса теплоотдачи из-за отсутствия прямого контакта потока газов с теплообменной поверхностью трубок за счёт сопротивления слоя охлаждённого конденсата. Охлаждённый конденсат, растекающийся плёнкой жидкости на поверхности трубок из нижних рядов, не испаряется в поток дымовых газов и не обеспечивает подогрев воды в экономайзере до более высокой температуры, а уносится потоком дымовых газов в дымовую трубу, что приводит к ухудшению условий её работы в холодный период года по причине образования наледи.

Реализованный в технологической схеме устройства способ увлажнения потока дымовых газов в нижней и верхней камерах орошения малоэффективен, поскольку количество испаряемой в дымовые газы влаги в нижней камере орошения мало из-за низкой температуры конденсата, а в верхней камере орошения – мало из-за низкой температуры дымовых газов. Указанные обстоятельства являются причиной уноса влаги потоком дымовых газов в дымовую трубу. Кроме того, в рассматриваемом устройстве лишь частично решена задача очистки конденсата перед его распылением в камере орошения в потоке дымовых газов. Из собранного во влагоборнике конденсата за счёт действия сил гравитации выпадают твёрдые частицы, однако абсорбированные конденсатом окислы  $SO_x$ ,  $CO_x$  и  $NO_x$  вновь попадают в поток дымовых газов в экономайзере и при контакте с водой образуют серную и азотную кислоту, которые оказывают разрушающее воздействие на металлические элементы устройства.

**Заключение.** Результаты проведённого исследования указывают на то, что требуется разработка технологически простых, малозатратных и эффективных решений для использования теплоты дымовых газов и защиты окружающей среды от негативного воздействия компонентов, содержащихся в продуктах сгорания топлива. В частности, эти решения кроме экономии теплоты (топлива) должны предусматривать устранение или сведение к минимуму уноса влаги в дымовую трубу, улучшение условий её работы и срока службы. Необходимость в рециркуляции – подмешивании части горячих газов к охлажденным или подогретого конденсата к холодному в целях повышения температуры уходящих дымовых газов для предотвращения конденсации в газоходе и дымовой трубе с последующим образованием наледи – должна быть исключена.

Собранный во влагоборнике загрязнённый конденсат перед направлением его в камеру орошения для увлажнения дымовых газов целесообразно последовательно охлаждать, например, использовать его теплоту для целей воздушного отопления, а затем обрабатывать в очистной установке. Таким образом возможно снизить количество вредных выбросов в окружающую среду.

Очищенный в установке очистки конденсат должен направляться в камеру орошения под избыточным давлением, чтобы при омывании поверхности труб теплообменника-конденсатора смывались и коагулировались твёрдые частицы, оседающие из дымовых газов на поверхности труб, при этом возможна и частичная абсорбция содержащиеся в дымовых газах окислов  $SO_x$ ,  $CO_x$  и  $NO_x$ . За счёт очистки теплообменных поверхностей от твёрдых отложений интенсивность теплоотдачи дымовых газов будет выше благодаря лучшему контакту потока дымовых газов с чистой поверхностью.

Сажевые отложения имеют крайне низкий коэффициент теплопроводности и могут служить причиной снижения интенсивности теплопередачи до 60%. Дополнительной интенсификации теплоотдачи можно добиться за счёт организации попутного движения потока дымовых газов и плёнки конденсата, вызывая в последней волновые пульсации, что повлечёт уменьшение её термического сопротивления теплопроводности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетический баланс Республики Беларусь // Стат. сб. / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь / редкол.: И.В. Медведева (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – 153 с.
2. Ковалева, М.В. Беларусь и Россия // Стат. сб. / Нац. стат. комитет Респ. Беларусь / М.В. Ковалева, Г.А. Любова, Е.М. Палковская. – М.: Росстат, 2016. – 215 с.
3. Кудинов, А.А. Энергосбережение в котельных установках / А.А. Кудинов. – Ульяновск: УЛГТУ, 2000. – 139 с.
4. Утилизатор тепла : пат. 1106957 SU / В.И. Моисеев, Л.Г. Семенов, И.З. Аронов, Г.А. Пресич. – Опубл. 07.06.87.