

УДК 62.681

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ  
В ПОВЕРХНОСТНЫХ КОНДЕНСАЦИОННЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРАХ****А.А. КАШКУР, А.О. КОВТУН**  
(Представлено: В.А. ЗАФАТАЕВ)

*Проанализированы термодинамические параметры работы поверхностных конденсационных теплоутилизаторов на базе кожухотрубных теплообменников. Предложен вариант их оптимизации с целью уменьшения теплового и химического загрязнения атмосферы, а также повышения эффективности использования топлива.*

**Введение.** Несоввершенство технологии использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в коммунальной сфере негативным образом сказывается на экономическом развитии страны, повышает энергоёмкость ВВП, снижает конкурентоспособность продукции и услуг. При этом для компенсации необратимых потерь возникает необходимость в увеличении потребления ТЭР, что прямым образом отражается на росте себестоимости выработки тепловой и электрической энергии, увеличении выбросов парниковых газов, приводит к тепловому и химическому загрязнению атмосферы. Охлаждение уходящих дымовых газов и, соответственно, полезное использование их теплового потенциала в существующих технологиях получения тепловой и электрической энергии позволяет снизить себестоимость выработки энергии, повысить тепловую эффективность процессов преобразования энергии и ослабить антропогенное воздействие на атмосферу продуктами горения топлива.

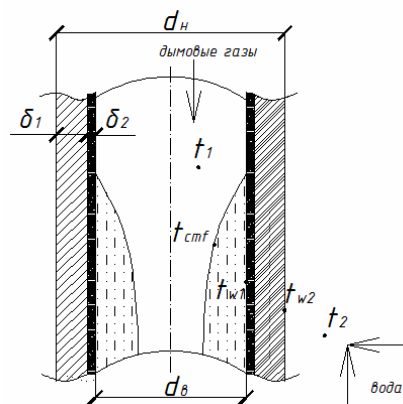
Анализ работы газифицированных ТГУ показывает, что одним из путей существенного повышения коэффициента использования топлива (КИТ) является глубокое охлаждение (ниже точки росы) продуктов сгорания в конденсационных теплоутилизаторах (КТ). Широкое применение контактных и поверхностных КТ в газовых трактах котлов обусловлено наряду с энергосбережением также и уменьшением вредных выбросов в атмосферу за счёт растворения в конденсате продуктов сгорания некоторого количества оксидов углерода ( $\text{CO}_x$ ), азота ( $\text{NO}_x$ ) и серы ( $\text{SO}_x$ ) (если она содержится в топливе). Благодаря этому снижается рН конденсата. Снижение вредных выбросов достигается также и за счёт уменьшения расхода топлива.

Для глубокого охлаждения дымовых газов ниже точки росы ранее использовались теплообменники контактного типа (насадочные, пенные, барботажные, форсуночные и тарельчатые). Контактные теплообменники обеспечивают развитую поверхность и высокую интенсивность теплообмена, превышающую на порядок теплоотдачу при конвективном теплообмене. Однако нагреваемая контактным способом вода поглощает из продуктов сгорания углекислоту и кислород и приобретает коррозионно-активные свойства. Последние 10–15 лет внедряются и получают распространение конструкции КТ поверхностного типа [1]. Для изготовления конденсационных теплообменников применяют нержавеющую сталь, чугун, медь, биметаллические трубы (сталь-алюминий), полимерные материалы и даже керамику. В России положительный опыт внедрения КТ поверхностного типа получен институтом «Сантехпроект» (г. Горький) и Ульяновским государственным техническим университетом, которые разработали установки утилизации теплоты уходящих газов паровых котлов типа ДЕ-10-14 ГМ при работе котельной на природном газе. Теплоутилизаторы изготовлены на базе калориферов КСк-4-11 Костромского калориферного завода [1]. Отличительными особенностями таких аппаратов является их компактность и высокая степень оребрения поверхности теплообмена, способствующая наращиванию тепловой производительности КТ. Однако при сжигании твёрдых и жидких видов топлива (например, угля, торфа, древесины, мазута) в дымовых газах содержится значительное количество твёрдых компонентов неполного сгорания топлива (зольных и сажевых частиц), которые имеют способность к коагуляции и оседанию на внутренних поверхностях газохода, в том числе и на теплообменной поверхности КТ, что для оребренных поверхностей чревато закупоркой проходного сечения, резким снижением интенсивности теплопередачи и огромными трудностями очистки межрёберного пространства. Проблема очистки зачастую усложняется спеканием и переходом в жидкостно-вязкое состояние поверхностных отложений при высокой температуре дымовых газов и присутствии в их объёме водяных паров. Поэтому в конструкциях КТ для котлов, сжигающих твёрдые и жидкие виды топлив, должны использоваться гладкие поверхности, допускающие относительно лёгкую очистку.

В Республике Беларусь находят применение КТ поверхностного типа с кожухотрубными теплообменниками для утилизации теплоты продуктов сгорания котлов, работающих на древесной щепе и торфе. Дымососы подают дымовые газы в трубное пространство теплообменников по схеме «сверху-вниз», а в межтрубном пространстве, огибая сегментные перегородки, проходит подогреваемая сетевая вода.

Для изготовления кожухотрубных теплообменников металлургическая отрасль Республики Беларусь выпускает цельнотянутые стальные трубы с максимальной длиной 7 метров.

Схема теплообмена дымовых газов и сетевой воды показана на рисунке 1.



- $d_b, d_n$  – соответственно внутренний и наружный диаметр трубок теплообменника, мм;
- $\delta_1, \delta_2$  – соответственно толщина стальной стенки трубы и сажевых отложений, мм;
- $t_1, t_2$  – соответственно определяющие температуры дымовых газов и сетевой воды, °С;
- $t_{ctf}$  – температура на границе раздела «газ – конденсат», °С;
- $t_{w1}, t_{w2}$  – соответственно температуры на внутренней и на наружной поверхностях трубок, °С

Рисунок 1. – Схема теплообмена дымовых газов и сетевой воды

**Исследовательская часть.** Если в теплообменнике нагревается вода, то для конденсации водяных паров из дымовых газов необходимо, чтобы температура стенки теплообменника была ниже точки росы. Предполагается, что коэффициент теплоотдачи от стенки теплообменника к протекающей внутри него жидкости (воде) на порядок выше коэффициента теплоотдачи с газовой стороны, а температура наружной поверхности нагрева мало отличается от температуры воды.

Произведён тепловой расчёт КТ на базе кожухотрубного теплообменника с 7-метровыми трубами. Характерной зоной (интервалом) КТ является микротеплообменник, ограниченный двумя сегментными перегородками. Температуры теплоносителей усреднены по характерным зонам. Коэффициенты теплоотдачи, теплопередачи усреднены в зонах без выпадения конденсата и в зонах с выпадением конденсата из потока дымовых газов.

Тепловой расчёт КТ заключался в нахождении конечных температур дымовых газов  $t_1''$  и воды  $t_2''$  и сравнении их с температурами согласно данных режимной карты котлоагрегата при четырёх вариантах его нагрузки. В ходе расчёта методом последовательных приближений [2–4] определялись температуры  $t_{ctf}, t_{w1}, t_{w2}$ , а также местоположение интервала с началом конденсации водяного пара из дымовых газов.

На рисунке 2 представлено сравнение температур  $t_1''$  и  $t_2''$  для установки с 7-метровым теплообменником в зависимости от тепловой нагрузки котлоагрегата.

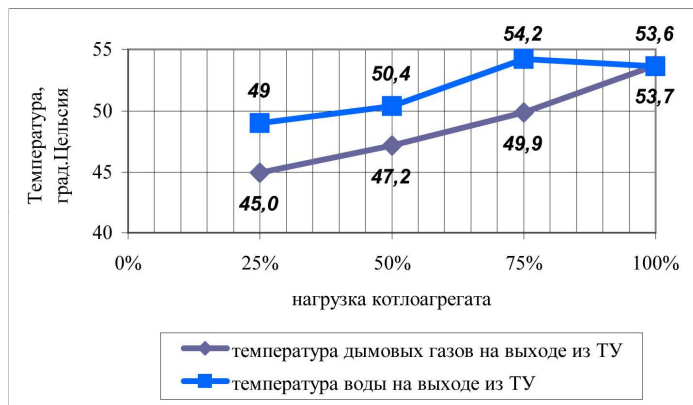
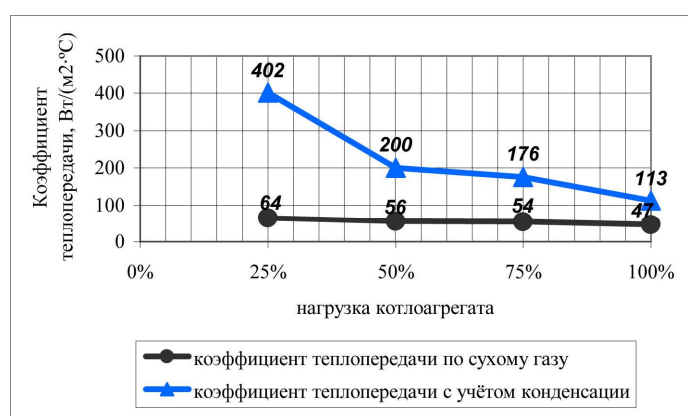


Рисунок 2. – Конечные температуры дымовых газов и сетевой воды на выходе из конденсационного теплоутилизатора

Коэффициенты теплоотдачи от дымовых газов к поверхностям нагрева при глубоком охлаждении, сопровождающимся конденсацией водяных паров из газов, существенно выше коэффициентов конвективной теплоотдачи и соизмеримы с коэффициентами теплообмена для контактных аппаратов.

Из рисунка 2 видно, что при увеличении тепловой нагрузки котлоагрегата температура дымовых газов на выходе из теплообменника повышается и может стать выше температуры точки росы. Очевидно, что это обстоятельство будет негативно сказываться на величине теплопроизводительности КТ по причине недоиспользования части скрытой теплоты конденсации. В режиме максимальной нагрузки котлоагрегата тепловой эффект от конденсации минимален по причине того, что проходящие в трубах теплообменника дымовые газы, имеющие на входе температуру 120–150 °С не успевают охладиться до температуры точки росы, и конденсация, с высокой степенью вероятности, происходит при выходе газов из трубного пространства в расширяющуюся часть влагосборника. Чем выше тепловая нагрузка котлоагрегата, тем выше начальная температура дымовых газов и тем меньше длина конденсационной части в кожухотрубном теплообменнике.

На рисунке 3 представлено изменение коэффициента теплопередачи КТ в зависимости от режима нагрузки котлоагрегата.



**Рисунок 3. – Коэффициент теплопередачи по интервалам без выпадения конденсата и с выпадением конденсата в трубах теплообменника**

Коэффициенты теплопередачи для установок с разной длиной трубок теплообменника при их сравнении в соответствующем режиме нагрузки котлоагрегата существенно не изменяются и могут быть приняты постоянными. Коэффициент теплопередачи для интервалов КТ с выпадением конденсата в 2,4–6,3 °С больше, чем для интервалов без выпадения конденсата. При максимальной нагрузке котлоагрегата интенсивность теплопередачи снижается в 1,6–3,6 раз относительно остальных режимов загрузки.

**Заключение.** За счёт наращивания длины труб свыше освоенных в производстве Республики Беларусь 7 метров для последующего изготовления из них кожухотрубных теплообменников появляется возможность получения более высоких температурных перепадов по тракту дымовых газов котлоагрегатов. В результате полезно будет использоваться теплота конденсации, в том числе и в максимальных режимах нагрузки котлоагрегатов при начальной температуре дымовых газов, превышающей 120 °С. Образующийся конденсат омывает поверхность труб КТ и способствует лучшей очистке поверхности теплообмена от твёрдых частиц, оседающих из дымовых газов на поверхности труб, особенно при сжигании твёрдого топлива, при этом возможна и частичная абсорбция содержащихся в дымовых газах окислов SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> и NO<sub>x</sub>. Отложения твёрдых частиц неполного сгорания топлива имеют крайне низкий коэффициент теплопроводности и могут служить причиной снижения интенсивности теплопередачи до 60%.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов, А.А. Энергосбережение в котельных установках / А.А. Кудинов. – Ульяновск : УлГТУ, 2000. – 139 с.
2. Бессонный, А.Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. Справочник / А.Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.
3. Лебедев, П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев. – М. : Энергия, 1972. – 320 с.
4. Маньковский, О.Н. Теплообменная аппаратура химических производств / О.Н. Маньковский, А.Р. Толчинский, М.В. Александров. – Л. : Химия, 1976. – 369 с.