

Повышение эффективности топливоиспользования в котельных установках с применением охладителей дымовых газов

Ведрученко В. Р., доктор техн. наук, Жданов Н. В., канд. техн. наук,
Лазарев Е. С., инж.

Омский государственный университет путей сообщения

Показаны пути уменьшения конденсации водяных паров в газоходах и дымовой трубе котельной с помощью охладителей дымовых газов. Сделан вывод о возможности повышения эффективности топливоиспользования котла за счет установки охладителей дымовых газов разных типов. Для жаротрубных котлов автоматизированных модульных котельных предложен двухступенчатый охладитель, выбор и расчет которого необходимо проводить в комплексе с расчетом всей котельной установки. Выполнено теоретическое обоснование принятых технических решений.

Ключевые слова: котлоагрегат, конденсация дымовых газов, охладитель дымовых газов, байпасирование, влагосодержание, теплообмен, теплота сгорания топлива, парциальное давление водяных паров.

С целью предотвращения конденсации водяных паров в газоходах и дымовой трубе котлоагрегаты большинства производителей имеют такую конструкцию, при которой температура дымовых газов на выходе из котла составляет 120 – 160 °С, что обеспечивает надежную работу газоотводящего тракта. В таких котлах КПД, приведенный к низшей теплоте сгорания топлива, составляет 92 – 93 %, а приведенный к высшей теплоте сгорания с учетом потери теплоты парообразования водяных паров, содержащихся в дымовых газах, равен 82 – 83 %.

При снижении температуры дымовых газов до значения, при котором происходит конденсация содержащихся в них водяных паров, достигается двойной эффект: с одной стороны, выделяемая скрытая теплота конденсации водяных паров существенно повышает используемый энергетический потенциал топлива, который усваивается хвостовыми поверхностями нагрева котла, а с другой — уменьшаются потери теплоты с уходящими газами q_2 [1].

Такие котлы, получившие название “низкотемпературные” (при отсутствии конденсации водяных паров продуктов сгорания) или “конденсационные” (при наличии конденсации водяных паров), выпускают фирмы “Viessmann”, “Ecoflame”, “Buderus”, “Logano” и др. Основной недостаток конденсационных котлов — присутствие агрессивной среды при растворении CO_2 в образующемся конденсате, которая вызывает интенсивную коррозию поверхностей нагрева, а потому — необходимость нейтрализации данного раствора. Опасность коррозии многократно возрастает

в случае использования серосодержащего топлива, при сжигании которого образуются оксиды серы, усугубляющие агрессивное действие кислой среды [1].

Защита от коррозии может быть обеспечена за счет выполнения элементов котла из коррозионно-стойких сталей, легированных хромом, никелем или молибденом. Применение дорогих материалов значительно повышает стоимость котлов, хотя при этом существенно возрастает их экономичность. Так, при работе на природном газе КПД котла, приведенный к высшей теплоте сгорания, приближается к максимально возможному на 11 % и составляет 93 – 94 %. Содержание водяных паров в дымовых газах в случае сжигания жидкого топлива меньше, чем при сжигании газа, поэтому и дополнительный выигрыш за счет использования теплоты их конденсации меньше и составляет 5 – 7 %. Продукты сгорания природного газа среднего состава при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,15$ имеют влагосодержание 135 г/кг сухих газов, при этом температура точки росы $t_p = 58$ °С.

Вышеизложенное свидетельствует о возможности значительного повышения эффективности использования топлива за счет применения охладителей дымовых газов (ОДГ), устанавливаемых за котлом. В ОДГ происходит охлаждение продуктов сгорания ниже температуры точки росы, сопровождающееся конденсацией содержащихся в них водяных паров. В результате в ОДГ используется как физическая теплота продуктов сгорания, так и скрытая теплота парообразования водяных паров. По принципу действия различают

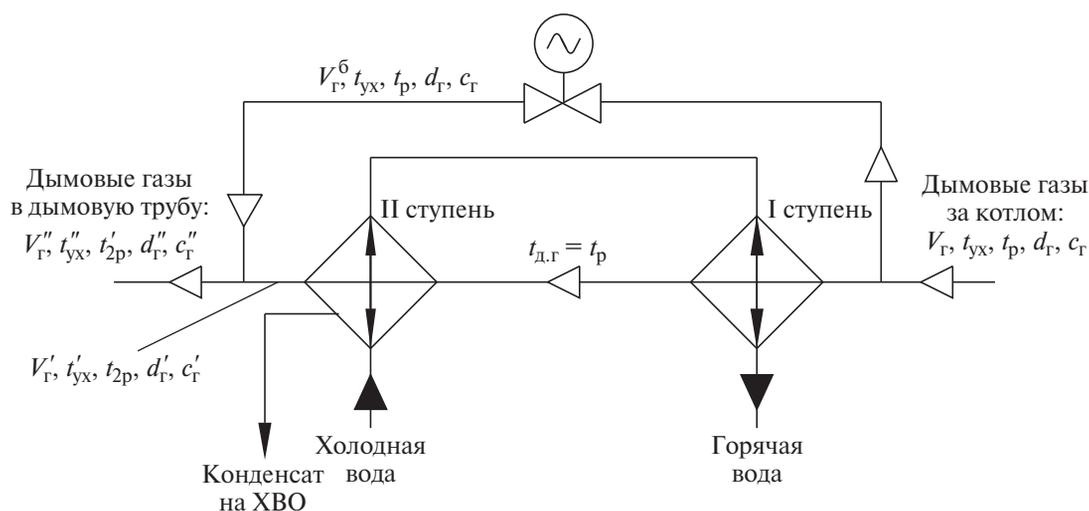


Рис. 1

контактные и поверхностные (конденсационные) ОДГ.

Вопросы теоретического обоснования и практического внедрения различных конструкций контактных аппаратов для охлаждения дымовых газов за котлами нашли отражение в [2 – 4] и др. Работы исследователей посвящены вопросам теоретического описания процессов тепломассообмена в контактных аппаратах, разработкам их конструкций и анализу опыта эксплуатации. Известно большое число конструкций контактных аппаратов [2, 3], обладающих высокой эффективностью и получивших широкое применение на крупных энергетических предприятиях и в котельных.

Различные конструкции поверхностных (конденсационных) охладителей дымовых газов за котлами рассмотрены в [5 – 9] и др. В этих работах подчеркивается, что развитие конструкций поверхностных (конденсационных) ОДГ, а именно — применение современных высокоразвитых оребренных поверхностей, позволяет применять их наряду с контактными аппаратами, при этом эффективность не уступает последним. Поверхностные аппараты в виду их компактности можно использовать в составе блочных автоматизированных котельных.

На рис. 1 приведена расчетная схема двухступенчатого конденсационного охладителя дымовых газов (КОДГ), предназначенного для установки за котлом типа КВСА-3 производства ООО ПФ “Октан” (Омск). При температуре дымовых газов выше температуры точки росы t_p процесс их охлаждения в КОДГ протекает за счет конвективного теплообмена при постоянном влагосодержании.

Охлаждение дымовых газов до температуры t_p и ниже приводит к конденсации содержащихся в них водяных паров и выделению скрытой теплоты парообразования. Конденсация водяных паров интенсифицирует конвективный теплообмен, при этом происходит уменьшение влагосодержания дымовых газов, находящихся в состоянии насыщения при относительной влажности $\varphi \approx 100\%$. В результате после КОДГ охлажденные дымовые газы, находящиеся в состоянии насыщения, попадают в газоходы и дымовую трубу (газоотводящий тракт котла). Дальнейшее их охлаждение может привести к конденсации остаточных водяных паров, т. е. к образованию конденсата, если температура внутренней поверхности газоотводящего тракта $t_{ст}$ будет ниже вторичной температуры точки росы t_{2p} . Следует иметь в виду, что после КОДГ в результате конденсации водяных паров влагосодержание дымовых газов снижается, при этом уменьшается парциальное давление водяных паров, поэтому $t_{2p} \approx 30 \div 40^\circ\text{C}$ (зависит от глубины охлаждения).

Для предотвращения остаточной конденсации водяных паров существенное значение приобретает подсушка дымовых газов, пропущенных через КОДГ [10]. Степень подсушки определяется минимально допустимым значением температуры дымовых газов после подсушки t''_{yx} . Значение t''_{yx} должно быть достаточным, чтобы температура стенки в оголовке дымовой трубы $t_{ст}^{of}$ была выше вторичной температуры точки росы, т. е. выполнялось условие $t_{ст}^{of} > t_{2p}$, что полностью исключает конденсацию остаточных водяных

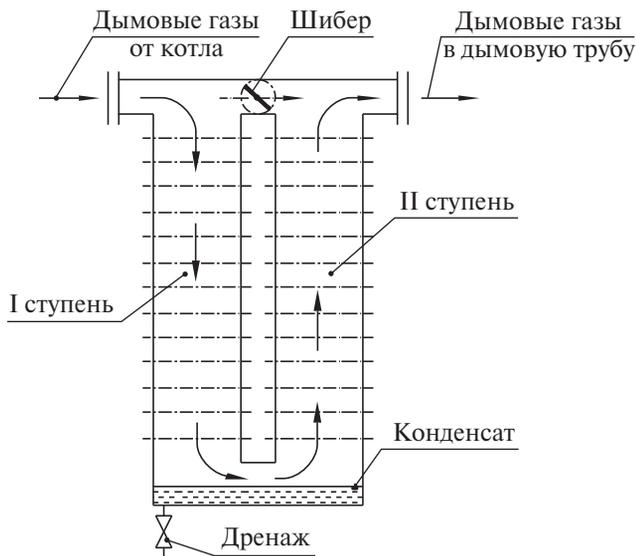


Рис. 2

паров на всем протяжении газоотводящего тракта котла.

Если конструкция дымовой трубы допускает образование конденсата (предусмотрены антикоррозионное покрытие и отвод конденсата), в этом случае необходимо обеспечить значение температуры $t_{\text{ст}}^{\text{ог}} > 0$ с целью предотвращения промерзания и обледенения дымовой трубы, что может привести к ее разрушению и выходу из строя котельной установки.

В литературе описаны некоторые способы подсушки дымовых газов [10, 11]. Однако все они неизбежно приводят к повышению капитальных затрат и одновременно к определенному снижению эффективности установки оборудования, предназначенного для глубокого охлаждения продуктов сгорания. Наиболее простой и легко осуществимый способ — байпасирование части “горячих” дымовых газов, минуя КОДГ [10, 12]. При этом “горячие” и более влажные газы после котла смешиваются с “холодными” и значительно обезвоженными газами, пропущенными через КОДГ. Таким образом, байпасирование приводит к увеличению температуры пропущенных через КОДГ дымовых газов t''_{yx} , но повышает их влагосодержание. Увеличение влагосодержания дымовых газов после подсушки приводит к повышению вторичной температуры точки росы $t'_{2\text{р}} > t_{2\text{р}}$. Из-за того, что часть продуктов сгорания проходит мимо КОДГ (байпасируется), его теплопроизводительность снижается. Количество байпасируемых дымовых газов должно определяться из

условия отсутствия конденсации водяных паров ($t_{\text{ст}}^{\text{ог}} > t''_{2\text{р}}$) или исключения обмерзания в оголовке дымовой трубы ($t_{\text{ст}}^{\text{ог}} > 0$) для каждого конкретного случая с учетом степени охлаждения газов в КОДГ, влагосодержания и температуры “горячих” газов, конструкции дымовой трубы и климатических условий на территории размещения котельной установки.

Другие способы подсушки газов требуют установки дополнительных теплообменных поверхностей, тягодутьевого оборудования, что связано с дополнительными затратами тепловой и электрической энергии, а также требует увеличения компоновочного пространства, что в свою очередь усложняет установку КОДГ в существующих котельных.

На рис. 2 приведена конструктивная схема принятого нами двухступенчатого КОДГ поверхностного типа, состоящего из конвективной и конденсационной ступеней. Каждая ступень представляет собой пучок биметаллических оребренных трубок, омываемых с наружной стороны охлаждаемыми дымовыми газами, а с внутренней — нагреваемой водой. В конвективной ступени происходит охлаждение дымовых газов до температуры точки росы $t_{\text{р}}$, а в конденсационной — конденсация водяных паров из продуктов сгорания при их температуре ниже температуры точки росы $t_{\text{р}}$.

Для предотвращения конденсации остаточных водяных паров в газоходах и дымовой трубе конструкцией КОДГ предусмотрено подмешивание части более горячих газов через байпасный газоход. При этом температура образовавшейся смеси t''_{yx} принимается выше ее вторичной температуры точки росы $t'_{2\text{р}}$ на допустимое значение Δt_{yx} , при котором должно выполняться условие $t_{\text{ст}}^{\text{ог}} > t'_{2\text{р}}$ или $t_{\text{ст}}^{\text{ог}} > 0$ в зависимости от конструкции дымовой трубы.

Значение Δt_{yx} зависит от ряда факторов: тепловой нагрузки котла, глубины охлаждения дымовых газов в КОДГ, размеров и конструкции газохода и дымовой трубы, климатических условий.

Таким образом, значение Δt_{yx} должно определяться тепловым расчетом дымовой трубы с учетом охлаждения дымовых газов в КОДГ и степени их подсушки за счет байпасирования. Для расчета теплопроизводительности КОДГ необходимо найти влагосодер-

жание и температуру уходящих из него дымовых газов, а также коэффициент байпасирования части более горячих газов через байпасный газоход. Все обозначения величин в формулах ниже принимаются в соответствии с приведенной расчетной схемой КОДГ (см. рис. 1).

Уравнение теплообмена при смешении “горячих” и “холодных” дымовых газов за КОДГ имеет следующий вид:

$$B_p V_{\Gamma}^6 c_{\Gamma} t_{yx} + B_p V'_{\Gamma} c'_{\Gamma} t'_{yx} = B_p V''_{\Gamma} c''_{\Gamma} t''_{yx}, \quad (1)$$

где B_p — расход топлива, $\text{м}^3/\text{с}$; V_{Γ}^6 , c_{Γ} и t_{yx} , V'_{Γ} , c'_{Γ} и t'_{yx} , V''_{Γ} , c''_{Γ} и t''_{yx} — объемы, $\text{м}^3/\text{м}^3$, удельные объемные теплоемкости, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ и температуры, $^{\circ}\text{C}$, дымовых газов: байпасированных, пропущенных через КОДГ и после смешения за КОДГ.

Объемные теплоемкости продуктов сгорания c_{Γ} , c'_{Γ} и c''_{Γ} в диапазоне температур работы КОДГ ($30 - 250^{\circ}\text{C}$) можно считать одинаковыми и равными $0,33 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$. При этом погрешность расчета составляет менее 3%.

Тогда объем байпасируемых дымовых газов

$$V_{\Gamma}^6 = B V_{\Gamma}, \quad (2)$$

где V_{Γ} — объем образующихся при сгорании 1 м^3 газообразного топлива дымовых газов на выходе из котла, приведенный к нормальным условиям, $\text{м}^3/\text{м}^3$; B — коэффициент байпасирования.

В [12] получено выражение для расчета коэффициента байпасирования

$$B = \frac{(V_{\text{с.г}} + V'_{\text{H}_2\text{O}})(t'_{2\text{п}} + \Delta t_{\text{yx}} - t_{2\text{п}})}{V_{\Gamma} t_{\text{yx}} - V_{\text{с.г}} t_{2\text{п}} - V_{\text{H}_2\text{O}}(t'_{2\text{п}} + \Delta t_{\text{yx}})}. \quad (3)$$

Объем дымовых газов, пропущенных через КОДГ, определяем по формуле

$$V'_{\Gamma} = (1 - B)V_{\text{с.г}} + V'_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{с.г}}$ — объем сухих дымовых газов на выходе из котла, образующихся при сгорании 1 м^3 газообразного топлива, приведенный к нормальным условиям, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Объем остаточных водяных паров в дымовых газах, образующихся при сгорании 1 м^3 газообразного топлива и пропущенных через

КОДГ, приведенный к нормальным условиям, вычисляем из выражения

$$V'_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d'_{\Gamma} R_{\text{H}_2\text{O}} V'_{\text{с.г}}}{1000 R_{\text{с.г}}}, \quad (5)$$

где d'_{Γ} — влагосодержание дымовых газов, $\text{г}/\text{кг}$ сухих газов; $V'_{\text{с.г}} = V_{\text{с.г}}(1 - B)$ — объем сухих дымовых газов, образующихся при сгорании 1 м^3 газообразного топлива и пропущенных через КОДГ, приведенный к нормальным условиям, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $R_{\text{H}_2\text{O}} = \mu R / \mu_{\text{H}_2\text{O}}$ — газовая постоянная водяных паров, содержащихся в дымовых газах, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\mu R = 8,31$ — универсальная газовая постоянная, $\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$; $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 18$ — молекулярная масса водяных паров, $\text{кг}/\text{кмоль}$.

Газовая постоянная сухих продуктов сгорания, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$

$$R_{\text{с.г}} = r_{\text{N}_2} \frac{\mu R}{\mu_{\text{N}_2}} + r_{\text{RO}_2} \frac{\mu R}{\mu_{\text{RO}_2}} + r_{\text{вх}} \frac{\mu R}{\mu_{\text{вх}}}, \quad (6)$$

где $r_{\text{N}_2} = V_{\text{N}_2} / V_{\text{с.г}}$; $r_{\text{RO}_2} = V_{\text{RO}_2} / V_{\text{с.г}}$; $r_{\text{вх}} = (\alpha_{\text{yx}} - 1)V^0 / V_{\text{с.г}}$ — объемные доли азота N_2 , трехатомных газов ($\text{CO}_2 + \text{SO}_2$) и избыточного воздуха в объеме сухих газов; V^0 — теоретически необходимый объем воздуха для полного сгорания 1 м^3 газообразного топлива, приведенный к нормальным условиям, $\text{м}^3/\text{м}^3$; V_{N_2} , V_{RO_2} — объемы азота и трехатомных газов, образующихся при сгорании 1 м^3 газообразного топлива, приведенные к нормальным условиям, $\text{м}^3/\text{м}^3$; α_{yx} — коэффициент избытка воздуха перед КОДГ.

Температуру продуктов сгорания после подсушки при заданном значении коэффициента B можно рассчитать по формуле

$$t''_{\text{yx}} = \frac{B V_{\Gamma} t_{\text{yx}} + [(1 - B)V_{\text{с.г}} + V'_{\text{H}_2\text{O}}] t_{2\text{п}}}{V_{\text{с.г}} + V'_{\text{H}_2\text{O}} + B V_{\text{H}_2\text{O}}}. \quad (7)$$

Количество теплоты, воспринятой в КОДГ, кВт,

$$Q_{\text{КОДГ}} = \frac{Q \cdot 10^3}{Q_{\text{н}}^c \eta_{\text{к}}^{\text{н}}} \left[4,187 \cdot 0,33 (V_{\Gamma} t_{\text{yx}} - V''_{\Gamma} t''_{\text{yx}}) + (r_{\text{ср}} - 4,187 t_{\text{к}}) (d_{\Gamma} - d''_{\Gamma}) \frac{V_{\text{с.г}} \rho_{\text{с.г}}}{1000} \right], \quad (8)$$

где Q — тепловая нагрузка котла, МВт; $Q_{\text{н}}^c$ — низшая теплота сгорания сухой массы топли-

ва, кДж/м^3 ; $\eta_{\text{к}}^{\text{н}}$ — КПД котла, определенный по низшей теплоте сгорания; $r_{\text{ср}}$ — среднее значение теплоты парообразования в интервале температур, при которых происходит конденсация водяных паров, содержащихся в дымовых газах, кДж/кг ; $t_{\text{к}}$ — температура конденсата, удаляемого из КОДГ, $^{\circ}\text{C}$; $\rho_{\text{с.г}}$ — плотность сухих дымовых газов при нормальных условиях, кг/м^3 ; $d_{\text{г}}$ и $d_{\text{г}}''$ — влагосодержание дымовых газов до КОДГ и после смешения, г/кг .

Влагосодержание образовавшейся смеси продуктов сгорания после байпасирования определяем по формуле

$$d_{\text{г}}'' = \frac{1000 R_{\text{с.г}} V_{\text{H}_2\text{O}}''}{0,461 V_{\text{с.г}}} \quad (9)$$

Итак, можно сделать следующие выводы:

1. Охлаждение дымовых газов в КОДГ и газоотводящем тракте котла зависит от его конструкции и климатических условий.

2. Байпасирование как способ подсушки пропущенных через КОДГ дымовых газов можно применять в тепловых схемах блочных автоматизированных котельных.

3. Для подсушки дымовых газов, пропущенных через КО ДГ, к ним следует подмешивать некоторое количество “горячих” газов. В результате температура и влагосодержание “горячих” газов снижаются, а температура и влагосодержание “холодных” газов увеличиваются.

4. Объем байпасирования “горячих” дымовых газов зависит от температурных условий работы дымовой трубы.

5. Установка КОДГ за котлом позволяет повысить КПД котельной установки в номинальном режиме на 5–14 %, в режиме при среднегодовой температуре наружного воздуха, равной $-8,4^{\circ}\text{C}$ (для Омска), — на 2–10 % в зависимости от условий эксплуатации.

6. Для достижения максимальной эффективности установки КОДГ необходимо мини-

мально допустимое значение коэффициента байпасирования [12, 13].

Список литературы

1. **Соколов Б. А.** Устройство и эксплуатация паровых и водогрейных котлов малой и средней мощности: Учеб. пособ. М.: Издательский центр “Академия”, 2008.
2. **Аронов И. З.** Использование тепла уходящих газов газифицированных котельных. — М.: Энергия, 1967.
3. **Семенюк Л. Г., Михайлов А. А.** Схемы теплоутилизационных установок контактного типа. — Промышленная энергетика, 1993, № 2.
4. **Бухаркин Е. Н.** Конструкции конденсационных экономайзеров для газовых котлов. — Промышленная энергетика, 1993, № 2.
5. **Баскаков А. П., Черепанова Е. В.** Коррозионная стойкость в подкисленном конденсате (применительно к аппаратам глубокого охлаждения продуктов сгорания). — Промышленная энергетика, 2005, № 7.
6. **Баскаков А. П., Ильина Е. В.** Основные факторы, определяющие эффективность глубокого охлаждения продуктов сгорания в газифицированных котельных. — Промышленная энергетика, 2004, № 4.
7. **Кудинов А. А., Калмыков М. В.** Повышение эффективности работы конденсационного теплоутилизатора поверхностного типа. — Промышленная энергетика, 2002, № 6.
8. **Капишников А. П.** Оптимизация параметров теплообменной поверхности конденсационного экономайзера. — Промышленная энергетика, 2002, № 8.
9. **Капишников А. П.** Принципы развития конструкции конденсационных экономайзеров. — Промышленная энергетика, 1999, № 3.
10. **Аронов И. З.** Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа. — Л.: Недра, 1990.
11. **Аронов И. З.** О методике расчета теплового баланса котлов при установке конденсационных теплообменников. — Промышленная энергетика, 1994, № 4.
12. **Ведрученко В. Р., Жданов Н. В., Жданова Е. Е.** Методика расчета коэффициента байпасирования “горячих” дымовых газов муниципальной блочной автоматизированной котельной. — В кн.: Энергетика и теплотехника: Сб. науч. тр. / Под ред. акад. РАН В. Е. Накорякова. Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. ун-та, 2011, вып. 16.
13. **Жданов Н. В.** Повышение энергоэкологической эффективности сжигания газообразного топлива в водогрейных газотрубных котлах. — Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Омск, 2010.

zhdanov-n@mail.ru