

Исследование режимов работы конденсатного охладителя дымовых газов блочной отопительной котельной

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

Омский государственный университет путей сообщения

Рассмотрены особенности сжигания природного газа в водогрейных газотрубных котлах блочных автоматизированных котельных. Показана эффективность утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих дымовых газов. Для повышения КПД котлов предложена установка двухступенчатого конденсатного охладителя дымовых газов. Выполнено расчетное исследование режимов работы охладителя дымовых газов и проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: водогрейный газотрубный котел, утилизация теплоты, охладитель дымовых газов, коэффициент байпасирования, дымовая труба, конденсат, влагосодержание, коэффициент просушки.

В малой энергетике и жилищно-коммунальном хозяйстве получили распространение блочные автоматизированные котельные (БАК) на базе водогрейных газотрубных котлов малой и средней мощности, обладающие высокой степенью автоматизации технологического процесса, простой конструкцией, не требующие больших материальных затрат на монтаж и дальнейшее обслуживание при эксплуатации.

Однако при сжигании в котлах природного газа особую экологическую опасность представляют выбросы оксидов азота NO_x в атмосферу с дымовыми газами. Известны различные способы уменьшения образования NO_x в топках котлов: ступенчатое и нестехиометрическое сжигание, рециркуляция дымовых газов, впрыск воды или пара и др. Они направлены на снижение максимальной температуры в ядре факела, которая является определяющей в процессе образования термических (воздушных) оксидов азота NO_x , составляющих основную долю в общем объеме выхода оксидов азота при сжигании газа. Для котлов с цилиндрической топкой в виде жаровой трубы подобные технические решения в основном предусмотрены в конструкциях малотоксичных горелочных устройств, что значительно повышает их стоимость [1, 2].

Одно из важных направлений повышения технико-экономических показателей работы котлов, которому в настоящее время уделяется недостаточное внимание, — утилизация низкопотенциальной теплоты уходящих дымовых газов [2 – 5]. При температуре уходящих дымовых газов современных котлов 120 – 160 °С потери теплоты составляют 15 – 20 % физической теплоты топлива. Установка высоко-

развитых конвективно-конденсационных поверхностей нагрева за котлом позволяет не только использовать физическую теплоту газов за счет их дополнительного охлаждения, но и скрытую теплоту парообразования содержащихся в них водяных паров при охлаждении дымовых газов ниже температуры точки росы t_p . При сжигании природного газа среднего состава важно наличие достаточного количества низкотемпературного теплоносителя, в качестве которого может использоваться подпиточная вода для открытых систем теплоснабжения температурой 5 – 15 °С, а также обратная сетевая вода температурой ниже 60 °С, что при температурном графике тепловой сети 95/70 °С возможно на протяжении не менее 90 % продолжительности отопительного периода.

В ходе эксплуатации необходимо обеспечить условие бесконденсатной работы газоотводящего тракта котла путем подсушки охлажденных дымовых газов, которая зависит от глубины охлаждения дымовых газов в охладителе и газоотводящем тракте котла, конструкции дымовой трубы и климатических условий [2, 4, 5]. Степень подсушки определяется минимально допустимой температурой дымовых газов после подсушки t''_{yx} . Значение t''_{yx} должно быть достаточным, чтобы температура стенки в оголовке дымовой трубы $t_{ст}^{ор}$ была выше вторичной температуры точки росы, т. е. выполнялось условие $t_{ст}^{ор} > t_{2p}$, что полностью исключает конденсацию остаточных водяных паров на всем протяжении газоотводящего тракта котла [4, 5].

Если конструкция дымовой трубы допускает образование конденсата (предусмотрены

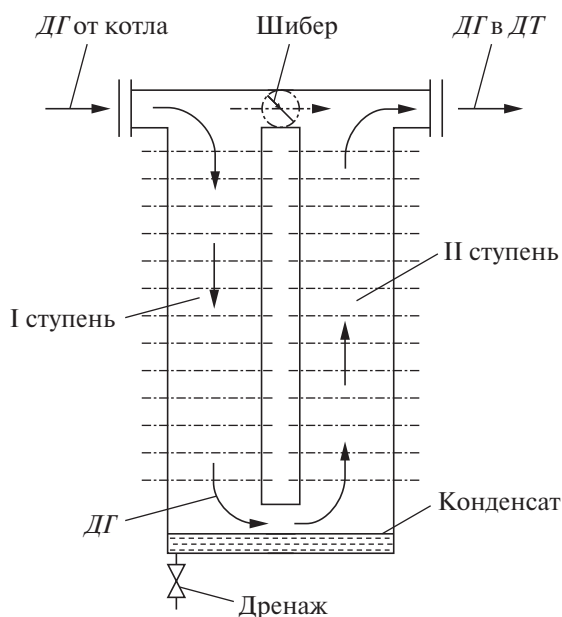


Рис. 1. Конструктивная схема двухступенчатого КОДГ: ДГ — дымовые газы; ДТ — дымовая труба

антикоррозионное покрытие и отвод конденсата), следует обеспечить температуру стенки в оголовке трубы $t_{\text{ст}}^{\text{ог}} > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ для предотвращения промерзания и обледенения дымовой трубы, так как это может привести к ее разрушению и выводу из строя котельной.

Предлагаемый авторами данной статьи для установки за котлом двухступенчатый конденсационный охладитель дымовых газов (КОДГ) поверхностного типа состоит из конвективной и конденсационной ступеней. На рис. 1 приведена конструктивная схема КОДГ, предназначенного для утилизации низкопотенциальной теплоты уходящих из котла продуктов сгорания. В нем используется как физическая теплота дымовых газов, так и теплота, выделяющаяся при конденсации содержащихся в них водяных паров.

Каждая ступень представляет собой пучок биметаллических оребренных трубок, омываемых с наружной стороны охлаждаемыми дымовыми газами, а с внутренней — нагреваемой водой. В конвективной ступени (I ступень) происходит охлаждение дымовых газов до температуры точки росы t_p , а в конденсационной (II ступень) — конденсация водяных паров из продуктов сгорания. Конденсация водяных паров осуществляется при температуре продуктов сгорания ниже температуры точки росы t_p . Для предотвращения конденсации остаточных водяных паров в газоходах и дымовой трубе конструкцией КОДГ предусмотрено подмешивание части

более горячих газов через байпасный газопровод. При этом температура образовавшейся смеси t_{yx}'' принимается выше ее вторичной температуры точки росы t_{2p} на допустимое значение Δt_{yx} , при котором должно выполняться одно из условий: $t_{2p}' > t_{2p}$ или $t_{\text{ст}}^{\text{ог}} > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ в зависимости от конструкции дымовой трубы.

Значение Δt_{yx} зависит от ряда определяющих факторов: тепловой нагрузки котла ($t_{\text{yx}}, d_{\text{г}}$), глубины охлаждения дымовых газов в КОДГ ($t_{\text{yx}}', d_{\text{г}}'$), размеров и конструкции газохода и ДТ, 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 [4].

Для расчета теплопроизводительности охладителя необходимо знать влагосодержание $d_{\text{г}}$ и температуру уходящих из него дымовых газов, а также коэффициент байпасирования B части более горячих газов через байпасный газопровод. С помощью разработанной авторами программы, основанной на предложенной методике [5] с учетом коэффициента байпасирования B , были выполнены численные исследования режимов работы КОДГ и дымовой трубы при условии конденсации водяных паров, содержащихся в уходящих из котла дымовых газах. Исследования проводили для случая установки КОДГ за котлом КВСА-3 (изготовитель — ООО «Октан», Омск). Принимали следующие исходные данные, рассчитанные на наихудшие условия работы оборудования:

- район размещения — Омская область;
- температура наружного воздуха $t_{\text{нар}} = -37 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- скорость ветра — 5 м/с;
- температура холодной воды на входе в КОДГ $t_{\text{х}} = 15, 40, 70 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- длина газоходов — 3 м, высота дымовой трубы — 25 м;
- газоходы и дымовая труба — металлические, обработанные антикоррозийным покрытием, изолированные минераловатными прошивными матами марки М 100 в обкладках из стальной сетки толщиной 50 мм;
- тепловая нагрузка котла — от 40 до 100 % номинальной $Q_{\text{ном}}$.

На рис. 2, 3 приведены результаты исследования режимов работы котла КВСА-3 при коэффициенте избытка воздуха $\alpha_{\text{т}} = 1,05$ и температурном графике тепловой сети 105/80 $^\circ\text{C}$. Из рис. 2, а следует, что зависи-

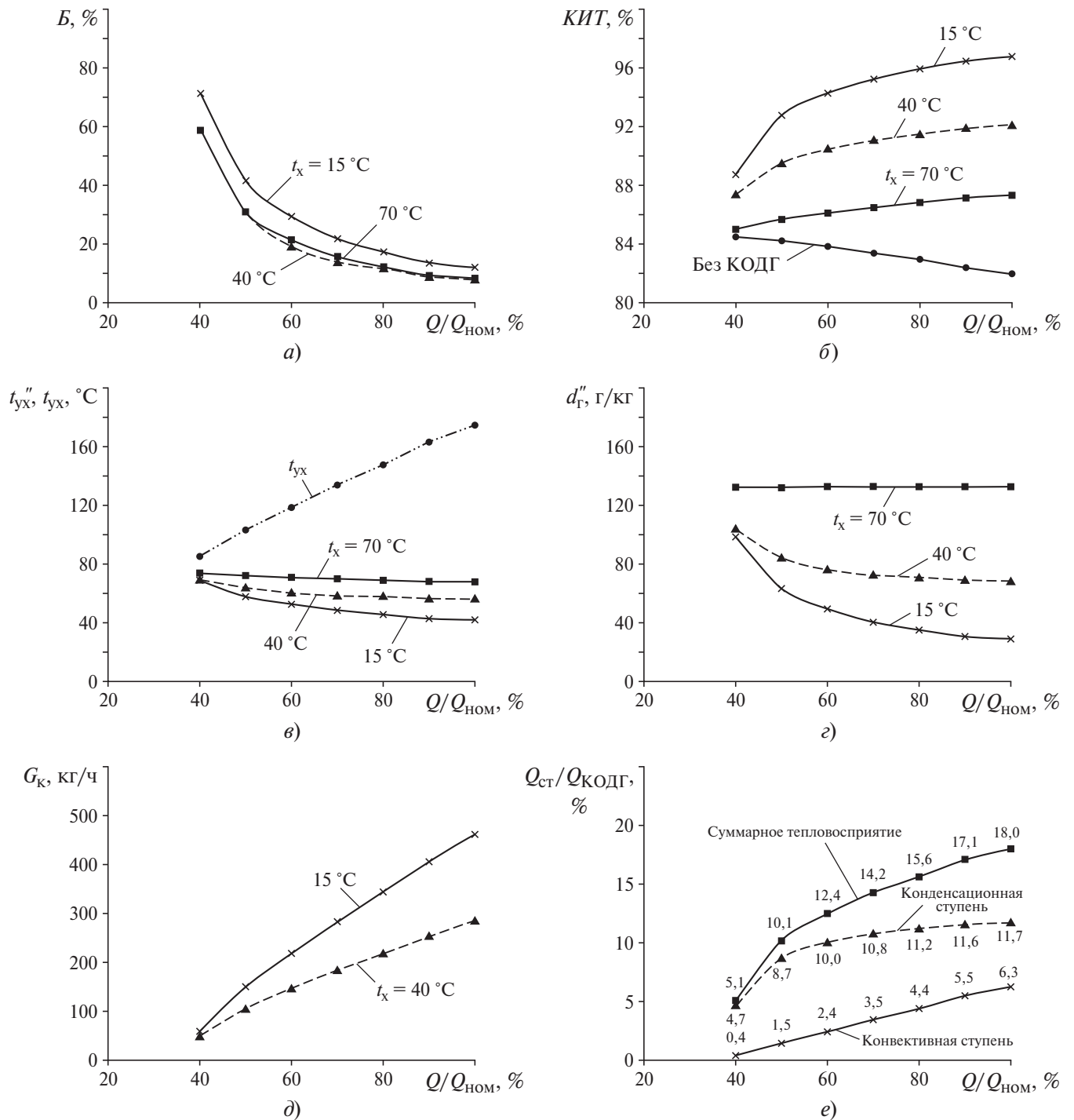


Рис. 2. Зависимости коэффициента байпасирования B (а), коэффициента использования топлива (б), температуры дымовых газов за КОДГ t'_{yx} (в), влагосодержания дымовых газов после подсушки d'_r (г), количества образующегося конденсата G_k (д), относительных тепловосприятий ступеней КОДГ (е) от относительной нагрузки $Q/Q_{НОМ}$ котла КВСА-3

мость коэффициента байпасирования B от тепловой нагрузки имеет нелинейный характер. Увеличение B при уменьшении нагрузки объясняется снижением температуры байпасируемых дымовых газов, что приводит к возрастанию их количества для обеспечения бесконденсатной работы дымовой трубы. Повышение B при снижении температуры хо-

лодной воды t_x объясняется более глубоким охлаждением дымовых газов, пропущенных через КОДГ. При более высоких температурах холодной воды коэффициент байпасирования практически не зависит от ее температуры. В номинальном режиме работы при принятых значениях $t_x = 15^\circ\text{C}$ получаем $B = 12,2\%$, при $t_x = 70^\circ\text{C}$ — $B = 8\%$. При

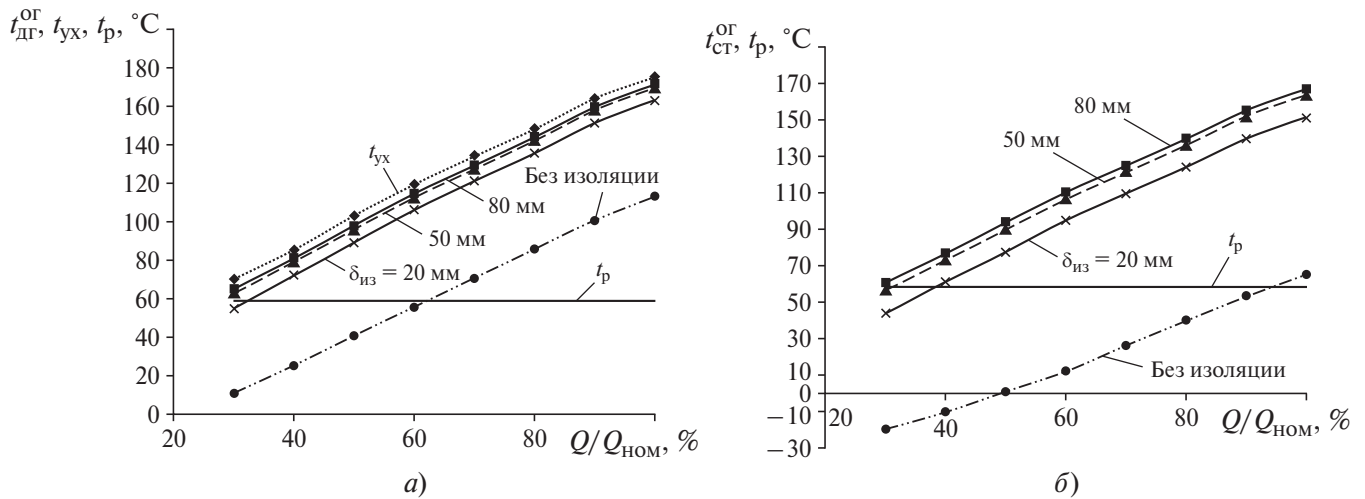


Рис. 3. Зависимости температуры дымовых газов на выходе из дымовой трубы (а) и температуры стенки оголовка дымовой трубы (б) от относительной нагрузки котла КВСА-3 без КОДГ

тепловой нагрузке котла 40 % номинальной и $t_x = 15^\circ\text{C}$ имеем $B = 71,5\%$, при $t_x = 70^\circ\text{C}$ — $B = 58,8\%$.

Применение КОДГ приводит к увеличению коэффициента использования топлива (КИТ). С ростом тепловой нагрузки котла КИТ возрастает (см. рис. 2, б) вследствие уменьшения коэффициента байпасирования B . Чем ниже значение t_x , тем выше КИТ. Это объясняется более глубоким охлаждением дымовых газов, пропущенных через КОДГ, которое сопровождается более интенсивным выделением скрытой теплоты парообразования содержащихся в них водяных паров.

Из рис. 2, в, г видно, что при установке КОДГ температура дымовых газов t''_{yx} и их влагосодержание d''_r после подсушки байпасированием становятся ниже этих же параметров газов за котлом (t_{yx}, d_r), что влечет за собой увеличение КПД установки. Таким образом, КПД возрастает за счет использования в КОДГ физической теплоты дымовых газов и скрытой теплоты парообразования водяных паров, содержащихся в дымовых газах, вследствие их конденсации.

При конденсации водяных паров в КОДГ образуется конденсат (см. рис. 2, д). При $t_x = 15^\circ\text{C}$ в номинальном режиме работы котла расход образующегося конденсата составляет 460 кг/ч, при этом удельное его количество $g_k = 178$ кг/Гкал. После нейтрализации в специальных устройствах этот конденсат можно использовать в технологических целях. Из рис. 2, е следует, что конденсационная ступень КОДГ воспринимает минимум в 2 раза больше теплоты, чем кон-

вективная ступень. Это подтверждает целесообразность более глубокого охлаждения дымовых газов именно за счет конденсации содержащихся в них водяных паров.

При исследовании режимов работы дымовой трубы дополнительно к указанным исходным данным принимали толщину изоляции газоходов и дымовой трубы $\delta_{\text{из}} = 20, 50, 80$ мм, а также рассматривали вариант без изоляции. Из рис. 3, а видно, что необходима изоляция дымовой трубы, так как при ее отсутствии дымовые газы, прошедшие через газоотводящий тракт, охлаждаются ниже температуры точки росы t_p , т. е. возможна конденсация водяных паров. В дымовой трубе без изоляции конденсация водяных паров происходит при тепловой мощности котла меньше 62 % номинальной.

Как следует из рис. 3, б, температура стенки оголовка неизолированной дымовой трубы $t_{\text{СТ}}^{\text{ОР}}$ ниже t_p практически во всех режимах работы котла. Более того, при тепловой нагрузке котла менее 50 % значение $t_{\text{СТ}}^{\text{ОР}}$ становится ниже 0, что приводит к обледенению оголовка и, как следствие, к возможной аварийной ситуации. Изоляция газоотводящего тракта толщиной $\delta_{\text{из}} = 50$ мм позволяет предотвратить конденсацию водяных паров в дымовой трубе во всех режимах работы котла и исключить ее обледенение.

Если тепловая нагрузка ГВС составляет 20 % и более от отопительной, то для повышения эффективности рекомендуется подключать обе ступени КОДГ последовательно перед теплообменником ГВС. Нужно иметь в виду, что движение нагреваемой воды долж-

но осуществляться в противотоке с дымовыми газами.

Таким образом, в двухступенчатом КОДГ полезно используется теплота уходящих дымовых газов как за счет их дополнительного охлаждения (физическая теплота), так и в результате выделения скрытой теплоты парообразования водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания (теплота конденсации).

Выводы

1. Байпасирование как способ подсушки пропущенных через КОДГ дымовых газов можно применять в тепловых схемах блочных автоматизированных котельных. Разработанная методика, учитывающая охлаждение дымовых газов в КОДГ и газоотводящем тракте котла в зависимости от его конструкции и климатических условий, позволяет определять минимально допустимое значение коэффициента байпасирования для достижения максимальной эффективности установки КОДГ, обеспечивая надежность газоотводящего тракта котла.

2. Значение коэффициента байпасирования “горячих” дымовых газов зависит от температурных условий работы дымовой трубы.

3. Для подсушки дымовых газов, пропущенных через КОДГ, к ним подмешивается некоторое количество “горячих” газов; в результате температура и влагосодержание “горячих” газов снижаются, а температура и влагосодержание “холодных” газов увеличиваются.

4. Установка КОДГ способствует значительному повышению КПД котельной установки. В номинальном режиме увеличение КПД составляет 5–14 %, в режиме при

среднегодовой температуре наружного воздуха – 8,4 °С (для Омска) — 2–10 % в зависимости от условий эксплуатации.

5. Для работы индивидуальных дымовых труб котлов без образования конденсата и (или) обмерзания оголовка необходимо предусматривать тепловую изоляцию.

6. С целью обеспечения устойчивого аэродинамического режима работы оборудования на КОДГ устанавливаются дымососы.

Список литературы

1. Ведрученко В. Р., Жданов Н. В., Кульков М. В. О направлениях развития и совершенствования котельных агрегатов малой и средней мощности. — В кн.: Энергетика и теплотехника: Сб. науч. тр. / Под ред. В. Е. Накорякова. Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. ун-та, 2012, вып. 17.
2. Ведрученко В. Р., Жданов Н. В. Комплексные методы повышения экономичности сжигания природного газа и снижения выбросов оксидов азота в котельных установках. — В кн.: Энергетика и теплотехника: Сб. науч. тр. / Под ред. В. Е. Накорякова. Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. ун-та, 2007, вып. 11.
3. Жданов Н. В. Повышение энергоэкологической эффективности сжигания газообразного топлива в водогрейных газотрубных котлах: Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. Омск, 2010.
4. Ведрученко В. Р., Жданов Н. В., Лазарев Е. С. Повышение эффективности топливоиспользования в котельных установках с применением охладителей дымовых газов. — Промышленная энергетика, 2013, № 4.
5. 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. В. Е. Накорякова. Новосибирск: Изд-во Новосибир. гос. техн. ун-та, 2011, вып. 16.

zhdanov-n@mail.ru