

УДК 621.187.14

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА НА КОТЛАХ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ЭКОНОМАЙЗЕРОВ

Докт. техн. наук, проф. ЖИХАР Г. И., асп. ЗАКРЕВСКИЙ В. А.

*Белорусский национальный технический университет*

В условиях современных энергетических проблем и роста цен на дефицитные виды топлива (газ и мазут) экономия топлива является важнейшей задачей энергетической отрасли Республики Беларусь. Признано необходимым широко использовать ресурсосберегающую технику, малоотходную и безотходную технологию, местные топлива и утилизировать вторичные энергоресурсы. Задача экономии топлива тесно связана с проблемой защиты окружающей среды. В настоящее время и в обозримой перспективе решение проблемы охраны окружающей среды становится определяющим не только при сооружении крупных топливно-энергетических комплексов, но и при реконструкции, расширении, техническом перевооружении действующих топливопотребляющих установок.

Одним из наиболее сложных и актуальных направлений среди экологических проблем теплоэнергетики является сокращение выбросов оксидов азота котельными установками. Проблема охраны окружающей среды от выбросов объектов теплоэнергетики приобрела особую социальную значимость. Оксиды азота относятся к числу наиболее токсичных выбросов теплоэнергетического оборудования. Они являются загрязняющими атмосферу при сжигании всех видов органического топлива в том числе и природного газа. Поскольку токсичность оксидов азота превышает токсичность большинства других вредных компонентов, сокращение выброса оксидов азота, крупнейшими источниками которых являются котельные агрегаты и промышленные печи, – есть одна из актуальнейших задач по защите атмосферного воздуха от загрязнения.

Как известно, в уходящих газах котлов, сжигающих природный газ, содержится около 15 % водяных паров. Их скрытая теплота парообразования (СТП) составляет до 15 % теплоты сгорания газа. На эту величину низшая теплота сгорания газа меньше ее истинной высшей теплоты сгорания. Соответственно при рассчитанном по  $Q_{н}^p$  КПД котла  $\eta_{ка}^{6p} = 94 \%$ , фактически его КПД  $\eta_{ка}^{6p} = 80 \%$ .

**Задачи глубокого охлаждения уходящих газов котлов.** В последнее время для использования скрытой теплоты парообразования широко применяются контактные экономайзеры на котлах малой и средней мощности. Подольский завод ИК «ЗИОМАР» несколько лет назад приступил к разработке установок использования СТП в мощных газовых энергоблоках [1]. По мнению представителей завода, эти установки решают следующие задачи:

- глубокое охлаждение уходящих газов;
- получение конденсата из уходящих газов;
- использование полученной теплоты конденсации водяных паров для подготовки конденсата системы регенерации;
- использование теплоты для подогрева подпиточной воды для нужд тепличного хозяйства, для отопления и вентиляции главного корпуса ТЭС, для предварительного подогрева воздуха;
- улучшение экологии.

Наиболее рациональным [1] представляется использование скрытой теплоты парообразования для нагрева конденсата в системе регенерации турбины мощностью 300 МВт вместо ПНД-1. Расчеты показывают, что в газовом энергоблоке мощностью 300 МВт при температуре уходящих газов 101 °С их теплотой, включая СТП, можно подогреть конденсат с расходом 639,5 т/ч от 27 до 58 °С (как в ПНД-1). При этом освободившийся отработанный пар вырабатывает дополнительную бестопливную мощность  $\Delta N$

$= 1,2$  МВт, за счет чего снижение удельного расхода топлива на энергоблоках составляет 0,4 %. Если часть дымовых газов (около 6 %) байпасировать мимо РВП, то температура уходящих газов составит 85 °С. Эта температура вполне приемлема для газоходов и дымовой трубы. Одновременно из установки выделяется конденсат с расходом 25 т/ч. Конечно, он не может служить непосредственно для подпитки энергоблока СКД, но, по мнению ученых Всероссийского теплотехнического института, его доведение до кондиции химвобессоленной воды требует существенно меньше затрат, чем получение химвобессоленной воды из сырой воды. Также снижается парциальное давление водяных паров в уходящих газах с 0,183 до 0,158 со снижением температуры конденсации с 58 до 54,5 °С. Поэтому опасность конденсации водяных паров на газоходах дымовой трубе уменьшается.

Вместо подогрева конденсата можно подогревать подпиточную воду. Если принять величину подпитки 5 %, то для котла производительностью 1000 т/ч подпитка может воспринять теплоту конденсата в размере 2,0 Гкал/ч.

Другой способ использования скрытой теплоты парообразования – это воздушное отопление главного корпуса ТЭС и подогрев дутьевого воздуха в холодное время. При воздушном отоплении главного корпуса водяные пары конденсируются в трубчатом воздухоподогревателе, работающем на шунтовом газоходе дымовых газов. Скрытая теплота воспринимается воздухом, вентилирующим здание. Система воздушного отопления замещает систему калориферного отопления, на которое расходуется теплота отборного пара турбины при некоторой потере ее электрической мощности. При

номинальной зимней температуре наружного воздуха  $t = -15$  °С нагрев до минимальной вентиляционной температуры  $+14$  °С требует теплоты для энергоблока мощностью  $300$  МВт  $9,3$  Гкал/ч, которое при  $t_{\text{нар}} = -30$  °С возрастает до  $14$  Гкал/ч, а при  $t_{\text{нар}} = 0$  °С снижается до  $4,5$  Гкал/ч. При этом энергоблок может вырабатывать дополнительную электрическую мощность  $5$  МВт, замещая отборы пара на подогреватели низкого давления. Как видно, для холодного времени года данная система является достаточно эффективной.

Из-за отсутствия при сжигании природного газа потерь теплоты вследствие механической неполноты сгорания, близости к нулю потерь в результате химической неполноты сгорания и весьма небольшой потери теплоты в окружающую среду единственной потерей теплоты в котлах, о дальнейшем снижении которой может идти речь, является лишь потеря с уходящими газами, которая равна по отношению к низшей теплоте сгорания газа  $5-6$  %.

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что в котельных агрегатах, работающих на природном газе, единственным путем существенного улучшения использования топлива является глубокое охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удастся конденсировать часть водяных паров, содержащихся в газах, и использовать выделяющуюся при конденсации скрытую теплоту. Необходимо учитывать и то, что глубокое охлаждение газов позволяет полнее использовать и их физическую теплоту.

В газифицированных котельных агрегатах другого пути заметного повышения коэффициента использования топлива (КИТ), кроме глубокого охлаждения продуктов сгорания до температуры, при которой происходит конденсация водяных паров из дымовых газов, нет. Поэтому есть все основания считать глубокое охлаждение продуктов сгорания природного газа в промышленных топливоиспользующих установках, и особенно в энергетике, наиболее эффективным путем значительного повышения КИТ и экономии газа в народном хозяйстве. Не случайно именно это направление стало усиленно развиваться в странах Западной Европы и США в начале 1970-х гг., когда начался топливный кризис. Поэтому вполне закономерно, что на XIII конгрессе МИРЭК глубокое охлаждение продуктов сгорания признано одним из наиболее важных энергосберегающих методов [2].

Глубокое охлаждение дымовых газов возможно в любом теплообменнике с большой поверхностью теплообмена в единице объема и достаточно высоким коэффициентом теплообмена, что обеспечивает приемлемые металлоемкость и габаритные размеры. Важно также, чтобы аэродинамическое и гидравлическое сопротивления подобных теплообменников не требовали большой затраты электроэнергии на привод насосного и тягового оборудования, а также замены его в действующих котлах.

Широкое применение для глубокого охлаждения дымовых газов получили контактные теплообменники, которые чаще всего называют контактными экономайзерами [3].

Главными преимуществами контактных экономайзеров является возможность конденсации водяных паров и использования выделяющейся при

этом теплоты для нагрева воды. Поэтому эффективность применения контактного нагрева воды дымовыми газами при прочих равных условиях возрастает с увеличением их начального влагосодержания.

Влагосодержание продуктов сгорания природного газа зависит в основном от коэффициента избытка воздуха в дымовых газах, а также от влагосодержания дутьевого воздуха, поступающего на горение в топку котла и с присосами воздуха в газоходы.

Для повышения надежности работы дымовой трубы важно, чтобы газы в контактном экономайзере охлаждались ниже точки росы. При охлаждении газов ниже точки росы в контактном экономайзере определенное количество паров и дымовые газы войдут в газоходы и дымовую трубу с более низкой температурой, но вместе с тем и с заметно более низкой точкой росы. Таким образом, хотя вероятность конденсации паров в дымовой трубе при нормальном режиме работы контактных экономайзеров сохраняется, возможное количество выпадающего в трубе конденсата уменьшается в несколько раз.

С точки зрения глубокого охлаждения газов целесообразно подавать в экономайзер воду с возможно более низкой температурой и нагревать ее до температуры ниже точки росы. Следовательно, глубина охлаждения дымовых газов определяется в каждом отдельном случае потребностью в воде и по возможности необходимой ее температурой, если она не превышает температуру мокрого термометра.

Эффективность глубокого охлаждения продуктов сгорания природного газа оценивается снижением потери теплоты с уходящими газами, определяемой при расчете по высшей теплоте сгорания топлива. Если принять умеренную температуру уходящих газов 40 °С, которая характерна для большинства действующих контактных экономайзеров, а температуру уходящих газов котельного агрегата без контактного экономайзера 150 °С, то экономия газа при наличии контактного экономайзера составляет 10–12 %.

Однако, несмотря на такую высокую эффективность использования контактных экономайзеров, следует отметить недостаточный объем их использования на электростанциях СНГ. Данное положение становится совершенно не допустимым в условиях, когда доля природного газа в топливном балансе электростанций Беларуси составляет порядка 90 %. При этом стоимость природного газа, используемого на электростанциях, в последнее время возросла в несколько раз.

**Экспериментальные исследования на промышленном котле.** Для использования теплоты уходящих газов на котле ГМ-50-14/250 Жодинской ГЭЦ дополнительно установлен контактный экономайзер ЭМ-6, в котором подогревается вода, применяемая на ХВО теплосети и для других нужд. Техническую документацию установки контактного экономайзера разработало научно-производственное предприятие «Энергоэффект» БелНИПИэнергопрома.

Контактный экономайзер работает следующим образом.

Уходящие дымовые газы после котла подаются через подводящий газоход в экономайзер, проходят через каналы газораспределения и равномерно распределяются по всему сечению контактного слоя. Проходя контактный слой, газы охлаждаются до температуры ниже точки росы, поднимаясь вверх, проходят сепаратор, оставляя капельную влагу, и удаляются через отводящий газоход. Далее дымовые газы удаляются через систему газоходов дымососом в дымовую трубу.

Сырая вода насосом через водораспределитель равномерно распределяется в объеме контактной камеры. Стекая вниз, вода контактирует с дымовыми газами, нагревается и по лопаткам газораспределителя поступает в декарбонизатор, где освобождается от избыточной углекислоты, и через патрубков отвода воды попадает в сборный бак. Из сборного бака нагретая вода направляется на ХВО теплосети котлов.

Воздух, количество которого регулируется поворотной заслонкой, через патрубок подачи воздуха попадает в декарбонизатор, где контактирует с нагретой водой, насыщается углекислотой. Далее, пройдя через выходной воздуховод, воздух смешивается с уходящими дымовыми газами.

Для насадочного слоя камеры контактного экономайзера была использована керамика, которая ранее применялась в холодной части регенеративных воздухоподогревателей котлов большой мощности с целью защиты холодной части РВП от низкотемпературной коррозии. Насадочный слой контактной камеры выполнен из керамических трубок с внешним диаметром 28 мм и длиной 500 мм. Керамические трубки имеют сложное внутреннее сечение и покрыты глазурью. Они собраны в кассеты. Нижняя часть насадочного слоя высотой 500 мм выполнена из кассет этих керамических трубок, а верхняя часть высотой 500 мм засыпана внавал кольцами из этих трубок.

Во время исследования работы котла с контактным экономайзером нагрузка котла изменялась от 25 до 50 т/ч, а расход воды на контактный экономайзер был в пределах от 10 до 50 т/ч.

При этих условиях расход природного газа на котел изменялся с 2012 до 4010  $\text{нм}^3/\text{ч}$  при работе котла с отключенным контактным экономайзером и с 1964 до 3890  $\text{нм}^3/\text{ч}$  при работе котла с включенным контактным экономайзером (рис. 1).

Следовательно, при работе котла с включенным экономайзером расход газа на котел при нагрузке 50 т/ч снижается на 120  $\text{нм}^3/\text{ч}$ . Температура горячего воздуха при изменении нагрузки котла в пределах 25–50 т/ч составляла 135–150 °С, температура холодной воды, поступаю-

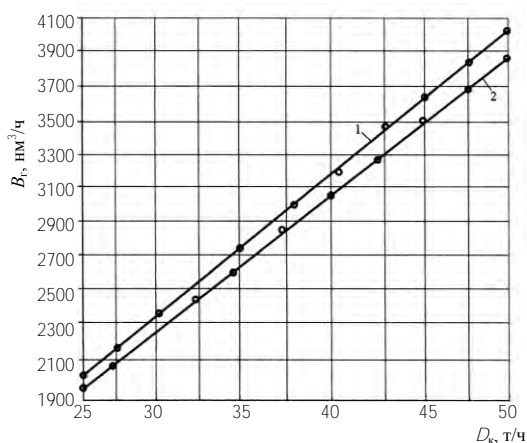


Рис. 1. Расход природного газа на котел в зависимости от нагрузки: 1 – котел работал с отключенным контактным экономайзером; 2 – с включенным контактным экономайзером

шей в контактный экономайзер,  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а после контактного экономайзера изменялась от  $20$  до  $39\text{ }^{\circ}\text{C}$  в зависимости от расхода воды и нагрузки котла.

Во время испытаний котла определялась концентрация оксидов азота в продуктах сгорания до и после контактного экономайзера с помощью переносного хроматографа «TESTO-350» в зависимости от нагрузки котла

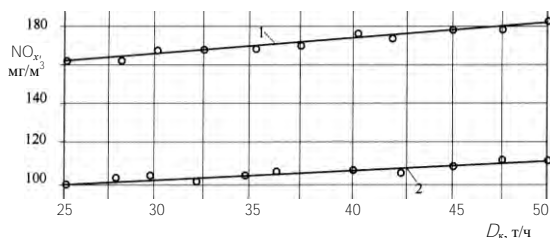


Рис. 2. Содержание  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания в зависимости от нагрузки котла: 1 – до контактного экономайзера; 2 – после

(рис. 2). Из рис. 2 видно, что содержание оксидов азота в газах до контактного экономайзера при увеличении нагрузки котла с  $25$  до  $50$  т/ч изменялось со  $162$  до  $181\text{ мг/м}^3$ , а в газах после контактного экономайзера соответственно возросло со  $101$  до  $109\text{ мг/м}^3$ . Следовательно, при нагрузке котла  $50$  т/ч содержание ок-

сидов азота в уходящих газах при работе котла с контактным экономайзером снижается на  $40\%$  по сравнению с содержанием их в газах при работе котла с отключенным контактным экономайзером.

Основным фактором, ограничивающим увеличение высоты насадки контактной камеры, является аэродинамическое сопротивление контактной камеры. На рис. 3 представлена зависимость аэродинамического сопротивления слоя насадки контактной камеры от скорости продуктов сгорания.

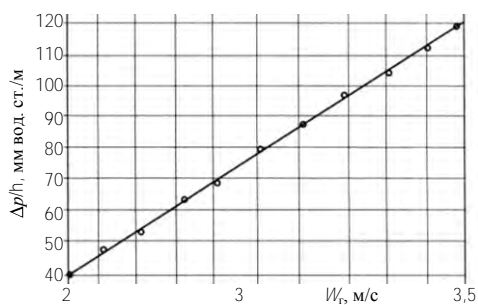


Рис. 3. Аэродинамическое сопротивление слоя керамической насадки контактной камеры экономайзера в зависимости от скорости газов

Из рисунка видно, что с увеличением скорости газов при прохождении через слой насадки аэродинамическое сопротивление контактной камеры резко возрастает. Например, при скорости прохождения газов через слой насадки  $2$  м/с аэродинамическое сопротивление контактной камеры составляло  $40$  мм вод. ст., а при скорости газов  $3,5$  м/с –  $120$  мм вод. ст.

Это существенно увеличивает аэродинамическое сопротивление газового тракта котла, и установленный дымосос при нагрузке котла  $35$  т/ч и выше не обеспечивает необходимого разряжения в точке, равной  $2-3$  мм вод. ст., что вынуждено заставляет пропускать часть уходящих газов после котла помимо контактного экономайзера. Это снижает эффективность использования теплоты уходящих газов в контактном экономайзере. Следовательно, зависимость аэродинамического сопротивления слоя насадки контактной камеры от скорости газов указывает на то, что примененная насадка обладает повышенным сопротивлением.

Во время испытаний котла с контактным экономайзером отбирались пробы сырой воды и воды после контактного экономайзера. При внедре-

нии контактных экономайзеров пристальное внимание уделяется изменению состава и качества нагреваемой в них воды. Качество воды, нагретой путем непосредственного контакта с продуктами сгорания природного газа, является важнейшим фактором, существенно влияющим на возможность и целесообразность применения контактных экономайзеров различного назначения в энергетике.

Как известно, из газов, входящих в состав продуктов сгорания, растворяются в воде лишь углекислый газ и диоксид азота. Согласно закону Генри количество растворенного газа пропорционально его парциальному давлению. В свою очередь, парциальное давление того или иного газа зависит от коэффициента избытка воздуха в дымовых газах.

В воде, подогреваемой дымовыми газами контактным методом до 40 °С и при коэффициенте избытка воздуха, равном 1,0–1,2, могут быть примерно следующие концентрации растворенных газов, мг/л:  $\text{CO}_2 \leq 100$ ;  $\text{N}_2 = 1,1$ ;  $\text{O}_2 = 3$ ;  $\text{H}_2 = 0,75$ ;  $\text{CH}_4 = 0,85$ ;  $\text{CO} = 1,0$ ;  $\text{NO} = 0,05$ . При более высоком коэффициенте избытка воздуха эти значения будут ниже [3].

Из перечисленных газов водород и азот являются физически инертными. Кислород не вреден. Метан и углекислый газ действуют на человека наркотически, но токсические их концентрации значительно выше, чем в продуктах сгорания. Поэтому заслуживает внимания лишь концентрация в воде оксидов углерода, являющегося ядовитым газом, а также оксидов азота.

Отравление оксидом углерода – угарным газом – возможно только через дыхательные пути и легкие. В связи с этим есть основания полагать, что применение нагретой в контактных экономайзерах воды для бытовых и тем более технологических нужд не представляет опасности для человека.

Для проверки приведенных выше соображений проводились исследования качества воды и ее изменений, вызванных контактом с продуктами сгорания природного газа. Анализы воды выполнены в химической лаборатории ТЭЦ. Следует отметить, что во время этих опытов какие-либо работы по наладке режима горения газа с целью предотвращения образования продуктов неполного сгорания не проводились, все горелочные устройства работали в обычном режиме.

Анализы воды показали, что в большинстве опытов подогретая вода имеет рН в пределах 6,6–7,2, что практически соответствует воде городского водопровода, которая имеет рН от 6,8 до 7,2. Поэтому нагретая вода не представляет опасности с точки зрения коррозионной активности. Количество взвешенных веществ в нагретой воде в контактном экономайзере снижается. Например, в сырой воде количество взвешенных веществ составляло 14 мг/л, а в воде после контактного экономайзера снижалось до 4,4 мг/л. Щелочность воды после контактного экономайзера также уменьшается с 3,0 до 2,3 мг-экв/л. Жесткость воды после контактного экономайзера уменьшилась до 3,65 мг-экв/л при жесткости сырой воды 3,95 мг-экв/л. Сухой остаток воды изменяется не существенно и составляет для сырой воды 320 мг/л, а для подогретой воды находится в пределах

296–316 мг/л. Содержание нитритов  $\text{NO}_2^-$  в воде после контактного экономайзера увеличивается по сравнению с содержанием в сырой воде с 0,13 мг/л для сырой воды до 0,34 мг/л для воды после контактного экономайзера. Аналогично изменяется и содержание нитратов  $\text{NO}_3^-$  мг/л в воде. Содержание нитратов в сырой воде составляло 5,6 мг/л, а в воде после контактного экономайзера оно достигает 9,0 мг/л. Это указывает на то, что оксиды азота  $\text{NO}_x$  растворяются в воде контактного экономайзера, что приводит к существенному снижению концентрации  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания после контактного экономайзера. Поэтому контактный экономайзер можно рассматривать как двухфункциональный агрегат, т. е. для использования теплоты уходящих газов котлов и как установку для очистки газов от содержащихся в них оксидов азота.

### ВЫВОДЫ

1. Анализ результатов исследований работы котла ГМ-50-14/250 с контактным экономайзером показал, что котел работает устойчиво, надежно, без наличия продуктов химического недожога в уходящих газах во всем диапазоне нагрузок.

2. Установка контактного экономайзера дополнительно на котле снижает расход природного газа при нагрузке 50 т/ч на 120  $\text{нм}^3/\text{ч}$ .

3. Установка контактного экономайзера снизила вредные выбросы оксидов азота при нагрузке котла 50 т/ч на 40 %. Контактный экономайзер может быть использован для достаточно эффективной очистки продуктов сгорания газа от оксидов азота.

4. Аэродинамическое сопротивление слоя насадки контактной камеры завышено. Это существенно увеличивает аэродинамическое сопротивление газового тракта котла. Поэтому установленный дымосос при повышенных нагрузках котла не обеспечивает необходимого разрежения в точке, равной 2 мм вод. ст., что вынужденно заставляет пропускать часть уходящих газов после котла помимо контактного экономайзера, а это снижает эффективность использования теплоты уходящих газов в контактном экономайзере.

5. Физико-химический состав воды, нагретой в контактном экономайзере, практически не изменяется и по санитарно-техническим и химическим свойствам соответствует требованиям, предъявляемым к ней на промышленных предприятиях и энергетике.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Л и п е ц, А. У. Об использовании скрытой теплоты парообразования водяных поров уходящих газов в мощных энергетических котлах / А. У. Липец, Л. В. Дирина, И. И. Надыров // Энергетик. – 2002. – № 2. – С. 19–20.

2. С т ы р и к о в и ч, М. А. XIII Конгресс МИРЭК и мировая энергетическая ситуация / М. А. Стырикович, А. А. Бесчинский // Теплоэнергетика. – 1987. – № 3. – С. 2–11.

3. А р о н о в, И. В. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. В. Аронов. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.