

УДК 662.613.5:62-68

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОТЫ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ В КОНТАКТНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

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

*Белорусский национальный технический университет,
РУП «Минскэнерго»*

Экономия топлива, сжигаемого в котельных агрегатах, и предохранение атмосферы от загрязнения выбросами из дымовых труб являются важными и постоянными заботами энергетиков. Признано необходимым широко использовать ресурсосберегающую технику, мало- и безотходную технологию, местные виды топлива и утилизировать вторичные энергоресурсы. Задача экономии топлива тесно связана с проблемой защиты окружающей среды.

Одним из наиболее сложных и актуальных направлений среди экологических проблем теплоэнергетики является сокращение выбросов оксидов азота котельными агрегатами.

Проблема охраны окружающей среды от выбросов объектов теплоэнергетики приобрела особую социальную значимость. Оксиды азота относятся к числу наиболее токсичных выбросов котельных агрегатов. Они приводят к загрязнению атмосферы при сжигании всех видов органического топлива, в том числе и природного газа. Поскольку токсичность оксида азота превышает токсичность большинства других вредных компонентов, сокращение выброса оксидов азота, крупнейшими источниками которых являются котельные агрегаты и промышленные печи, – одна из актуальнейших задач по защите атмосферного воздуха от загрязнения.

При сжигании природного газа в уходящих газах котлов содержится около 15 % водяных паров. Их скрытая теплота парообразования составляет до 15 % теплоты сгорания газа. Поэтому КПД котла, рассчитанный по низшей теплоте сгорания, будет ниже фактического КПД на 14–15 %. В последнее время для использования теплоты уходящих газов котлов, работающих на природном газе, применяются контактные экономайзеры.

Установка контактных экономайзеров на котлах ТЭС позволяет решить такие задачи, как глубокое охлаждение уходящих газов, получение конденсата из уходящих газов, использование полученной теплоты конденсации водяных паров для подготовки конденсата системы регенерации, теплоты для подогрева подпиточной воды для нужд тепличного хозяйства,

отопления и вентиляции главного корпуса ТЭС, предварительного подогрева воздуха и улучшения экологии [1].

В связи с отсутствием при сжигании природного газа потерь теплоты от механического недожога топлива, близостью к нулю потерь теплоты от химической неполноты горения топлива и весьма небольшой потерей 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 %. Отсюда следует вывод: в котельных агрегатах, работающих на природном газе, единственным путем существенного улучшения использования топлива является глубокое охлаждение продуктов сгорания до такой температуры, при которой удастся сконденсировать максимально возможную часть паров, содержащихся в газах, и использовать выделяющуюся при конденсации скрытую теплоту. Кроме того, глубокое охлаждение газов позволяет полнее использовать и их физическую теплоту.

В газовых котлоагрегатах другого пути заметного повышения эффективности использования топлива, кроме глубокого охлаждения продуктов сгорания до температуры, при которой происходит конденсация водяных паров из дымовых газов, нет. Количество теплоты, выделяющейся при полной конденсации водяных паров, т. е. при охлаждении дымовых газов до 0 °С и осушении их до 0 влаги на 1 кг, по отношению к низшей теплоте сгорания природного газа составляет 11,9 %, или около 1000 ккал на 1 м³ газа, поэтому соотношение высшей и низшей теплоты сгорания природного газа для большинства месторождений СНГ в среднем равно 1,12.

Глубокое охлаждение продуктов сгорания газа имеет ряд особенностей. Первая из них заключается в том, что рассмотрение данного вопроса нельзя ограничить только собственно котлоагрегатом или утилизационным теплообменником, где возможно охлаждение газов. Требуется рассмотреть также условия работы элементов котельной, находящихся по газовому тракту за утилизационным теплообменником, поскольку известны случаи разрушения дымовых труб котельных, работающих на газе, из-за выпадения влаги при низких тепловых нагрузках котлоагрегатов, когда температура газов за котлами уменьшается до 80–90 °С и ниже.

Должное охлаждение газов следует обеспечить либо в самом котле, либо в утилизационном теплообменнике, установленном после основного агрегата. При этом необходимо обеспечить такое течение процесса охлаждения газов, чтобы выпадение конденсата в максимально возможной и экономически оправданной степени было осуществлено в пределах основного или утилизационного агрегата, что позволяет, во-первых, использовать выделяющуюся при конденсации паров теплоту, во-вторых, облегчить работу находящихся за теплообменником газоходов, дымососа и дымовой трубы, поскольку в этом случае в газоходы поступят лишь остаточные водяные пары, выпадение которых легче предотвратить.

В газифицированных отопительно-производственных котельных температура продуктов сгорания при расчетной нагрузке составляет на входе в дымовую трубу 120–150 °С, а влагосодержание – 100–130 г/кг сухих газов. При сниженной нагрузке температура уменьшается до 80–100 °С, а температура «точки росы» продуктов сгорания составляет 50–55 °С.

При температуре внутренней поверхности дымовой трубы ниже температуры «точки росы» продуктов сгорания внутри трубы образуется конденсат. Анализ условий работы дымовых труб показывает, что основной причиной конденсатообразования внутри трубы является низкая температура продуктов сгорания при достаточно высоком их влагосодержании. Образованию конденсата способствует также низкая скорость движения продуктов сгорания, при которой имеют место значительное охлаждение газов в трубе и связанное с этим значительное охлаждение стенок.

Для защиты дымовых труб от разрушения их внутренние поверхности покрывают гидроизоляцией, используя для этого торкрет-бетон, пленочные и рулонные покрытия (полиуретановый лак, битумиполь, эпоксидные составы, стеклоткань, винипласт) [2]. При наличии воздушного зазора предусмотрены специальные устройства для перепуска среды из зазора и настиления ее на стенку внутреннего ствола.

При работе котлоагрегатов с утилизаторами теплоты уходящих газов температура их снижается до 20–40 °С, влагосодержание – до 15–50 г/кг сухих газов, а температура «точки росы» – до 20–25 °С. Общее количество влаги в продуктах сгорания по сравнению с котлами без утилизаторов уменьшается в три-пять раз.

В газифицированных котельных установках независимо от того, имеются утилизаторы (контактные теплообменные аппараты) или нет, необходимо применять гидроизоляцию дымовых труб и устройства для отвода конденсата. При установке контактных экономайзеров в действующих котельных, имеющих кирпичные и железобетонные трубы без влагозащиты, работа последних предусматривается при режимах, предотвращающих конденсатообразование в трубе.

Основной режимной характеристикой работы контактного экономайзера является отношение расхода воды к расходу продуктов сгорания, т. е. коэффициент орошения. Наиболее выгодный, с теплотехнической точки зрения, – режим при значении коэффициента орошения более 3 кг/кг для обычно принятых высот насадок. В этом случае температура уходящих продуктов сгорания составляет 25–30 °С, влагосодержание 15–25 г/кг сухих газов. При данных параметрах температура «точки росы» составляет 20–30 °С, а количество влаги, выпадающей в дымовой трубе, – минимальное. Такой режим считается наиболее эффективным.

Для предотвращения конденсатообразования в дымовой трубе можно рекомендовать подмешивание горячего воздуха к уходящим продуктам сгорания. При этом, кроме увеличения температуры смеси продуктов сгорания с воздухом, несколько снижается температура «точки росы» за счет низкого влагосодержания (8–10 г/кг). При наличии обводного газохода разность между температурами уходящих продуктов сгорания и «точки росы» можно также увеличить за счет пропуска части продуктов сгорания мимо контактного экономайзера.

Температура «точки росы» при этом возрастает за счет увеличения влагосодержания смеси, однако рост температуры смеси происходит интенсивнее. Таким образом, установка в газифицированных котельных контактных экономайзеров не ухудшает условий работы дымовых труб. Количество выпадающего конденсата в дымовой трубе при работе контактных

экономайзеров значительно снижается, а осуществление конструктивных и эксплуатационных мероприятий обеспечивает условия работы дымовой трубы, при которых конденсация влаги сводится до минимума.

Значение «точки росы» продуктов полного сгорания природного газа зависит от коэффициента избытка воздуха в дымовых газах (рис. 1). Как видно из рис. 1, при увеличении коэффициента избытка воздуха от 1,0 до 2,0 температура «точки росы» уменьшается с 60 до 48 °С. Влагосодержание продуктов полного сгорания природного газа также сильно зависит от коэффициента избытка воздуха (рис. 2). Из рис. 2 видно, что с увеличением коэффициента избытка воздуха от 1,0 до 2,0 влагосодержание продуктов сгорания уменьшается от 150 до 80 г/кг.

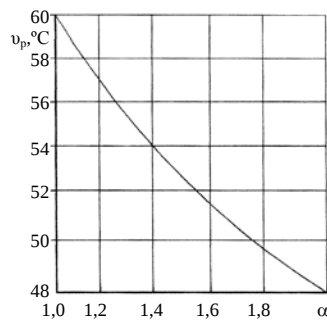


Рис. 1. Зависимость точки росы продуктов полного сгорания природного газа от коэффициента избытка воздуха в дымовых газах

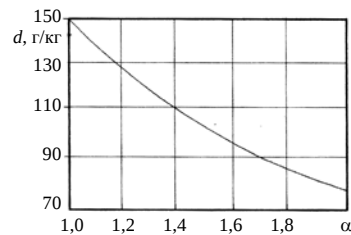


Рис. 2. Зависимость влагосодержания продуктов полного сгорания природного газа от коэффициента избытка воздуха (средневзвешенное для газовых месторождений СНГ)

Значение предельной температуры контактного нагрева воды продуктами полного сгорания природного газа зависит от их температуры при различных влагосодержаниях d и коэффициента избытка воздуха α (рис. 3). Так, для контактных экономайзеров, устанавливаемых непосредственно после промышленных котлов, при температуре газов за котлами 250–300 °С предельная температура нагрева воды составляет $v_n = 65–70$ °С, а для устанавливаемых после хвостовых поверхностей нагрева энергетических и крупных промышленных котлов с температурой газов на входе в контактный экономайзер 120–140 °С $v_n = 50–60$ °С.

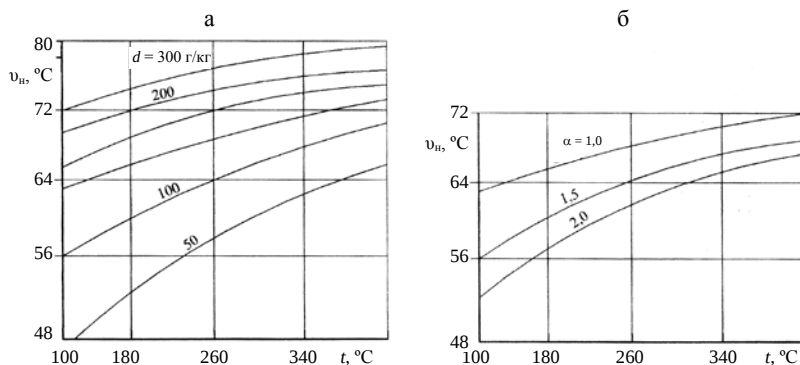


Рис. 3. Зависимость предельной температуры контактного нагрева воды продуктами полного сгорания природного газа от их температуры при различных: а – влагосодержании d ; б – коэффициенте избытка воздуха α

Использование теплоты уходящих газов котлоагрегатов получило широкое применение в зарубежной практике на котлах средней и большой производительности даже при сжигании твердых топлив. Например, в Швеции [3] в 2000 г. пущена станция комбинированного производства теплоты и электроэнергии (CHP-combined and power plant), включающая в себя паровой котел с пузырьковым кипящим слоем (BFB-bubbling fluidized bed) и установку конденсации дымовых газов. Паровой котел BFB производства фирмы Metso Power (Финляндия) тепловой мощностью 110 МВт рассчитан на параметры пара 14,0 МПа, 540 °С и расход пара 41 кг/с (150 т/ч). Основным видом топлива при производстве энергии в настоящее время стала биомасса. В 2007 г. ее потребление составило около 1 млн м³, что соответствует выработке 832 млн кВт·ч теплоты.

На выходе дымовых газов из котлов BFB после электрофильтров установлен скруббер конденсации дымовых газов с увлажнителем первичного воздуха, идущего на горение. Через пластинчатый теплообменник он нагревает «оборотную» воду, поступающую из тепловой сети с температурой 54 °С. При этом дымовые газы охлаждаются от 139 до 30 °С, обеспечивая регенерацию теплоты в объеме 22,5 %. Проведенными испытаниями установлены высокие технико-экономические показатели работы котла BFB. При сжигании биотоплива КПД его достигает 90 %, а с учетом использования теплоты конденсации дымовых газов – еще более высоких значений.

Другим примером использования теплоты уходящих газов на котле большой мощности при работе на угле служит блок 460 МВт [4]. С июня 2009 г. началась промышленная эксплуатация блока 460 МВт (Лагижа, Польша), на котором установлен котел с циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) компании Foster Wheeler.

Важной особенностью проекта нового блока в Лагиже является система глубокой утилизации (СГУ) теплоты уходящих газов, которая позволяет повысить КПД котла и блока за счет уменьшения температуры уходящих газов до 85 °С. Утилизация теплоты дымовых газов осуществляется в пластиковом охладителе, в котором теплота газов передается при помощи замкнутого водяного контура через водовоздушный подогреватель к первичному и вторичному воздуху. После этого теплообменника воздух направляется в регенеративный воздухоподогреватель.

Применение СГУ теплоты уходящих газов позволяет увеличить абсолютный КПД блока на 0,8 %, производство энергии на 8 МВт, сократить эмиссию CO₂ на 39000 т/год.

На блоке в качестве проектного топлива сжигается уголь с теплотой сгорания рабочей массы около 4800 ккал/кг, зольностью 23 %, влажностью 12 % и содержанием серы 1,2 %. Также намечено использование до 10 % биомассы и до 30 % осушенных шлаков с теплотой сгорания 1700–4000 ккал/кг. Требования к выбросам оксидов серы и азота были приняты равными 200 мг/м³. Электростанция обеспечивает лучший в мире КПД для блоков с котлами с ЦКС – 43,3 % (средний по Европе КПД блоков – 36 %).

Для использования теплоты уходящих газов на котле ГМ-50-14/250 Жодинской ТЭЦ дополнительно установлен контактный экономайзер ЭМ-6, в котором подогревается вода, поступающая на ХВО теплосети и для других нужд. Схема контактного экономайзера приведена на рис. 4.

Принцип работы контактного экономайзера следующий. Уходящие дымовые газы после котельного агрегата подаются через подводящий газоход в экономайзер, проходят через все каналы газораспределения и равномерно распределяются по всему сечению контактного слоя 3. Проходя контактный слой, газы охлаждаются до температуры ниже «точки росы», поднимаются вверх, проходят сепарационную камеру 4, оставляя капельную влагу, и удаляются через отводящий газоход 7.

Сырая вода насосом через водораспределитель 8 равномерно распределяется в объеме контактной камеры 2. Стекая вниз, вода контактирует с дымовыми газами, нагревается и по лопаткам газораспределителя 12 поступает в декарбонизатор 5, где освобождается от избыточной углекислоты, и через патрубок отвода воды 14 попадает в сборный бак. Из сборного бака нагретая вода направляется на ХВО.

Воздух, количество которого регулируется заслонкой 11, через патрубок подачи воздуха 9 попадает в декарбонизатор 5, где контактирует с нагретой водой, насыщается углекислотой. Далее, пройдя через выходной воздуховод 10, воздух смешивается с уходящими дымовыми газами.

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 (рис. 5). 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.

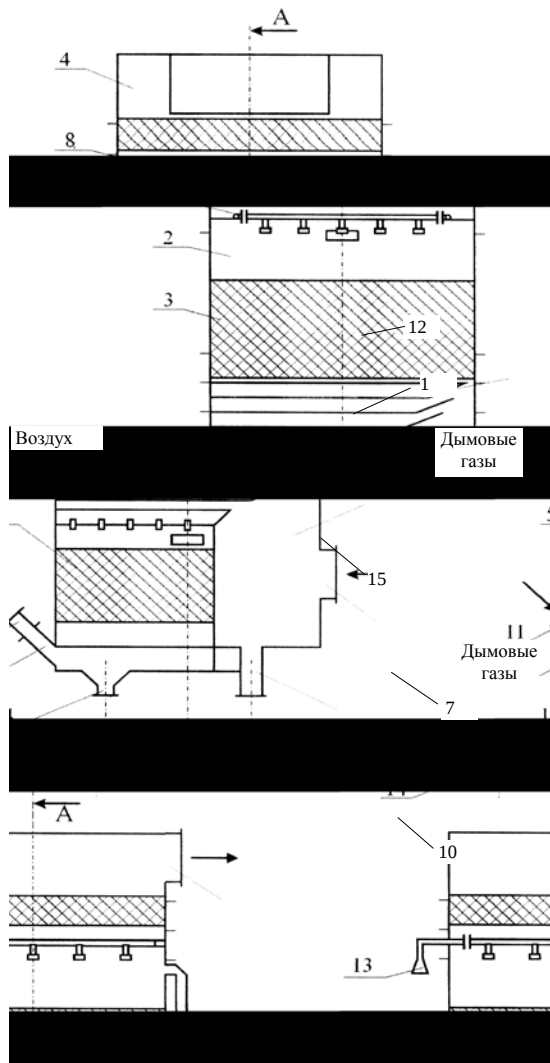


Рис. 4. Схема контактного экономайзера: 1 – камера декарбонизатора; 2 – контактная камера; 3 – контактный слой насадки; 4 – сепарационная камера; 5 – декарбонизатор; 6 – подводящий газоход; 7 – отводящий газоход; 8 – водораспределитель; 9 – патрубок подачи воздуха; 10 – выходной воздуховод; 11 – заслонка; 12 – газораспределитель; 13 – патрубок подвода сырой воды; 14 – отвода воды; 15 – перелив

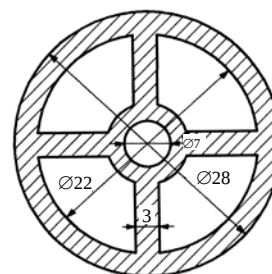


Рис. 5. Сечение насадки контактной камеры

Исследование работы котла с контактным экономайзером проводилось в диапазоне нагрузки от 25 до 50 т/ч. При нагрузке котла 50 т/ч с отключенным контактным экономайзером расход природного газа составляет 4010 $\text{нм}^3/\text{ч}$, а при работе с включенным экономайзером – 3890 $\text{нм}^3/\text{ч}$, т. е. при работе с включенным экономайзером расход газа снизился на 120 $\text{нм}^3/\text{ч}$.

Изменение температуры уходящих газов в зависимости от нагрузки представлено на рис. 6. Как видно, температура уходящих газов при нагрузке 13,89 кг/с (50 т/ч) с отключенным контактным экономайзером составляла 135 °С, а после включения контактного экономайзера она снизилась до 83 °С.

На рис. 7 представлено изменение КПД котла в зависимости от нагрузки котла. Из рисунка следует, что при нагрузке 13,89 кг/с (50 т/ч) КПД котла при включении контактного водяного экономайзера увеличивается порядка на 3 %. Температура холодной воды на входе в контактный экономайзер была 7 °С. После контактного экономайзера температура подогретой воды изменялась в зависимости от расхода воды и нагрузки котла и была в пределах от 20 до 39 °С. Проводился анализ продуктов сгорания на содержание оксидов азота до и после контактного экономайзера в зависимости от нагрузки. Концентрация оксидов азота в продуктах сгорания определялась с помощью переносного хроматографа TESTO-350. При нагрузке котла 50 т/ч концентрация оксидов азота в продуктах сгорания составляла 181 $\text{мг}/\text{м}^3$ до контактного экономайзера, а после него – 109 $\text{мг}/\text{м}^3$. Следовательно, концентрация оксидов азота в продуктах сгорания при нагрузке 50 т/ч после экономайзера снизилась на 72 $\text{мг}/\text{м}^3$.

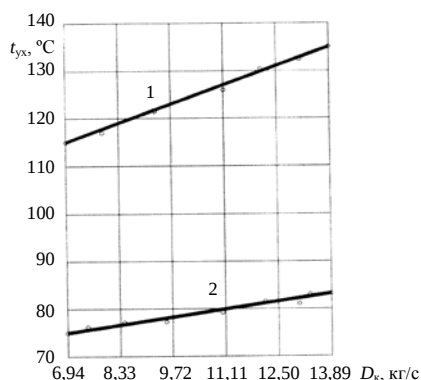


Рис. 6. Температура уходящих газов котла ГМ-50-14/250 в зависимости от нагрузки: 1 – котел без контактного экономайзера; 2 – то же с контактным экономайзером

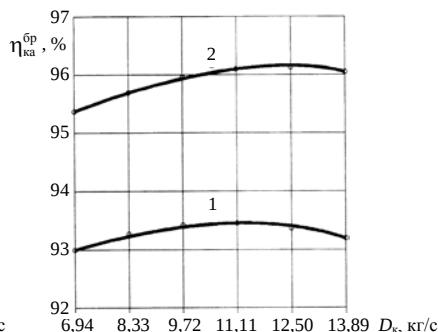


Рис. 7. Изменение КПД котла ГМ-50-14/250 в зависимости от нагрузки: 1 – котел без контактного экономайзера; 2 – то же с контактным экономайзером

Анализ воды показывает, что содержание нитритов NO_2 в воде после контактного экономайзера увеличивается по сравнению с содержанием их в сырой воде с 0,13 (до экономайзера) до 0,32 $\text{мг}/\text{л}$ (для воды после контактного экономайзера). Аналогично изменяется и содержание нитратов NO_3 в воде. Содержание нитратов в сырой воде составляло 5,6 $\text{мг}/\text{л}$, а в воде после контактного экономайзера – 9,0 $\text{мг}/\text{л}$. Это указывает на то, что оксиды азота NO_x растворяются в воде контактного экономайзера, что приво-

дит к существенному снижению концентрации NO_x в продуктах сгорания после контактного экономайзера.

Поэтому контактный экономайзер, имеющий значительную контактную поверхность, можно рассматривать как двухфункциональный агрегат, т. е. для использования теплоты уходящих газов котлов, и как установку для очистки газов от содержания в них оксидов азота. При внедрении контактных экономайзеров большое внимание уделяется изучению состава и качества воды, нагретой в экономайзере, так как она нагревается путем непосредственного контакта с продуктами сгорания природного газа.

Для проверки изменений качества воды во время испытаний котла с контактным экономайзером отбирались пробы сырой воды и воды после контактного экономайзера. Анализы воды выполнены в химической лаборатории ТЭЦ. Количество свободной углекислоты в воде определялось путем титрования едким натрием, содержание кислорода – методом Винклера, концентрация водородных ионов – электронным рН-метром, автоматически приводящим показания к стандартной температуре 25 °С.

Исследования показали, что химический состав воды практически не меняет ее качество, с точки зрения санитарно-гигиенических требований она практически не ухудшается. Установлено, что неизменными остаются такие показатели, как цветность, прозрачность, наличие взвешенных веществ.

Жесткость и щелочность воды изменяются незначительно. Заметно увеличивается CO_2 в нагретой воде, и как следствие снижается рН. Если эту воду довести до кипения, то вследствие падения растворимости газа практически полностью удаляется CO_2 , а рН нагретой воды становится примерно равным величине рН исходной. Таким образом, при дальнейшем нагреве воды после контактного экономайзера в термических деаэраторах возможно полное удаление CO_2 из воды. Контактный экономайзер имеет встроенный декарбонизатор. При полностью открытом воздушном шибере декарбонизатора концентрация в воде CO_2 снижается, повышается рН воды (т. е. снижается коррозионная активность воды), однако при этом несколько повышается концентрация O_2 . В целом же в контактном экономайзере наблюдается заметная деаэрация воды.

Результаты химических анализов воды свидетельствуют о том, что качество воды в процессе ее нагрева в контактных газовых экономайзерах не ухудшается. Химический и бактериологический состав воды практически не меняется.

Находящийся в продуктах сгорания в небольших количествах диоксид азота вступает в реакцию с водой с образованием стехиометрической смеси азотной и азотистой кислот. В контактном экономайзере происходит вымывание NO_2 водой по реакции $4\text{NO}_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 4\text{HNO}_3$.

Следует учитывать, что эффективная очистка уходящих газов в контактном экономайзере приводит к некоторому изменению качества воды, контактирующей с уходящими газами. Проведенные исследования показали, что в воде, прошедшей контактный экономайзер, увеличивается содержание свободной углекислоты от 25,5 мг/л – для воды перед контактным экономайзером до 59,1 мг/л – для воды после контактного экономайзера при отключенном декарбонизаторе и до 30,5 мг/л – при включенном де-

карбонизаторе. При этом снижается рН от 6,9 – для воды перед контактным экономайзером до 6,45 – для воды после контактного экономайзера при закрытом воздухе на декарбонизатор и увеличивается до 7,2 – при полном включении воздуха на декарбонизатор. Для нейтрализации кислой воды целесообразно некоторое подщелачивание воды, контактирующей с газами.

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. И можно считать, что коррозионная активность воды, нагретой в контактном газовом экономайзере, не больше нагретой в бойлерах.

Нагретая в контактных экономайзерах горячая вода по химическим свойствам соответствует требованиям, предъявляемым к ней на промышленных предприятиях, и может применяться для систем производственного горячего водоснабжения, а также в качестве подпиточной воды тепловых сетей и питательной воды для котлов.

ВЫВОДЫ

1. Установка контактного экономайзера дополнительно на котле ГМ-50–14/250 снизила расход природного газа при нагрузке 50 т/ч порядка на 3 %.
2. Контактный экономайзер может быть использован для очистки продуктов сгорания от оксидов азота.
3. Физико-химические свойства воды, нагретой в контактном экономайзере, практически не изменяются.
4. Коррозионная активность воды, нагретой в контактном экономайзере, не больше, чем воды, нагретой в бойлерах.
5. Горячая вода, нагретая в контактном экономайзере, по санитарно-техническим и химическим свойствам соответствует требованиям, предъявляемым к воде на промышленных предприятиях.
6. Зарубежный опыт показывает, что глубокое охлаждение уходящих газов возможно и является высокоэффективным даже на котлах, работающих на твердом топливе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л и п е ц, А. У. Об использовании скрытой теплоты парообразования водяных паров уходящих газов в мощных энергетических котлах / А. У. Липец, Л. В. Дирина, И. И. Надыров // Энергетик. – 2002. – № 2. – С. 19–20.
2. А р о н о в, И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. З. Аронов. – Л.: Недра, 1990. – 280 с.
3. В и х р е в, Ю. В. Опыт сжигания биомассы в кипящем слое при комбинированном производстве энергии / Ю. В. Вихрев // Энергетика за рубежом. – 2010. – Вып. 1. – С. 32–36.
4. A d a m s z y k, F. Integration of a Powerise Flue Gas Heat Recovery System in the Worldwide Largest Fluidized Bed Boiler Lagisza 460 MW Efficiency Increase and CO₂ Reduction / F. Adamczyk // VGB Power Tech. – 2008. – № 12.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 13.05.2010