

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ КОТЛОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Е.С. Ибрагимов, Е.В. Гальтязев

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия

Приводятся данные о расчетных значениях повышения эффективности и надежности котельного оборудования тепловой электрической станции за счет монтажа дополнительных теплообменников в газозвушном тракте котла. В новых теплообменниках происходит уменьшение температуры дымовых газов за счет нагрева воздуха, направляемого в воздухоподогреватели котла. Охлаждение дымовых газов котлов происходит до минимально возможной температуры по условиям безопасной эксплуатации железобетонных и кирпичных дымовых труб электростанции. При изменении режима работы котла обеспечивается постоянное значение температуры дымовых газов после новых теплообменников. Нагрев воздуха происходит до температур выше, чем температура конденсации водяных паров в дымовых газах. Разработаны необходимые изменения в существующую принципиальную схему газозвушного тракта котла типа ПК-41. Выбрано оптимальное место установки дополнительных теплообменников. Определены размеры вновь монтируемых теплообменников. Приведены данные о повышении КПД котла и экономии топлива при различных режимах работы.

Ключевые слова: котельное оборудование, воздухоподогреватели, газозвушной тракт, энергоэффективность.

Введение

Основной причиной уменьшения экономичности работы котлов являются потери тепловой энергии с уходящими газами. С целью уменьшения потерь с уходящими газами котлов они оснащаются воздухоподогревателями, в которых происходит уменьшение температуры уходящих газов за счет нагрева воздуха, направляемого далее в горелочные устройства котлов. Эффективность теплообмена в воздухоподогревателях котлов зависит от особенностей их конструктивного исполнения. В процессе развития котлостроения проводилась модернизация конструкции проточной части воздухоподогревателей, особенно профиля листов набивки регенеративных воздухоподогревателей, что обеспечивало уменьшение температуры уходящих газов котлов. Проектные величины температуры уходящих газов энергетических котлов с не модернизированными регенеративными воздухоподогревателями (РВП) находятся в диапазоне 130–142 °С [1, 2]. В результате модернизации РВП находящихся в эксплуатации котлов можно понизить температуру уходящих газов максимально примерно до уровня 126–138 °С [3]. Например, на Кармановской ГРЭС она составила для котла блока № 6 около 129 °С в среднем за год. Вместе с тем предельная величина возможного уменьшения температуры уходящих газов котлов, эксплуатируемых на электростанциях, ограничена требованиями обеспечения длительной, безопасной эксплуатации железобетонных и кирпичных дымовых труб и должна быть не менее 100 °С [4]. Таким

образом, имеется значительный потенциал энергосбережения, связанный с дальнейшим уменьшением температуры уходящих газов, как сейчас находящихся в эксплуатации котлов, так и вновь выпускаемых промышленностью. Кроме того, в существующих конструкциях котлов нагрев холодного воздуха перед РВП для уменьшения скорости коррозии до безопасного уровня происходит либо за счет включения в работу дополнительного теплообменника, выполненного в виде парового калорифера, горячей средой которого является отборный пар турбин, либо за счет рециркуляции нагретого воздуха. При включении в работу парового калорифера происходит увеличение температуры, как воздуха на входе в РВП, так и температуры уходящих газов, понижающих экономичность работы котла. Согласно «Правилам технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ» [5] включение в работу калориферов или линии рециркуляции происходит только при сжигании мазута, а в период сжигания газа калориферы и рециркуляцию воздуха отключают, что приводит в зимний период времени к интенсивной атмосферной коррозии набивки РВП. Например, проведенный расчет поля температур набивки РВП котла блока № 6 на Кармановской ГРЭС при фактическом режиме работы на газовом топливе в зимний период времени выявил, что минимальное значение температуры металла набивки в «холодном слое» за один период оборота ротора РВП достигает примерно 23 °С при температуре холодного воздуха на входе в РВП 7 °С. При даже крат-

ковременном периоде сжигания мазута на набивке РВП остаются загрязнения, так как существующими средствами очистки полностью их удалить во время работы котла достаточно сложно. Поэтому после последующего перевода котла на сжигание газа такое низкое значение температуры металла приводит к увеличению скорости повреждений набивки РВП из-за сернистой коррозии в связи с наличием в загрязнениях набивки РВП после сжигания мазута соединений SO_3 [6].

Актуальность темы исследования

Уменьшение потерь тепловой энергии с уходящими газами за счет уменьшения температуры уходящих газов путем модернизации РВП является эффективным мероприятием по повышению уровня энергетической эффективности. В литературе имеются примеры различных технических решений, обеспечивающих повышение эффективности работы РВП [7, 8]. Вместе с тем уменьшение температуры уходящих газов в РВП приводит к уменьшению температуры набивки воздухоподогревателя и, соответственно, к увеличению скорости его коррозионных повреждений. Поэтому представляет интерес провести анализ эффективности применения другого технического решения, при котором использование тепловой энергии дымовых газов при их охлаждении будет использовано для увеличения температуры воздуха на входе в РВП. При этом будет обеспечено повышение КПД котла за счет уменьшения потерь с уходящими газами и повышение надежности работы РВП из-за увеличения температуры листов его набивки.

Обзор исследования авторов

В литературе приведены результаты анализа эффективности технических решений, посвященных решению задачи утилизации тепловой энергии дымовых газов котлов с целью уменьшения их температуры [9–12]. Несмотря на эффективность предлагаемых технических решений, используемых для достижения поставленной цели, они имеют и недостатки. В работах рассмотрены технические решения, при которых тепловая энергия, отводимая от дымовых газов при помощи установленных в газоходе котла теплообменников, использовалась для нагрева воды, далее используемой в целях отопления. Таким образом, задача повышения надежности работы котла путем нагрева воздуха перед РВП до необходимого уровня за счет утилизации тепловой энергии дымовых газов авторами данных работ не решалась. Кроме того, охлаждение дымовых газов предлагалось проводить до температуры ниже точки росы водяных паров, содержащихся в дымовых газах, что делало невозможным использовать данные технические решения при работе котла на мазуте. При этом теплота, переданная дымовыми газами охлаждающей воде, как и сама вода, должны быть по-

лезно утилизированы в схеме электростанции, что приводит к уменьшению теплофикационной выработки турбин электростанции. Значительное уменьшение температуры уходящих газов в новом теплообменнике вызывает необходимость выполнения теплообменника и газохода из антикоррозионных материалов [9].

Научная новизна

В связи с вышеизложенным представляет интерес анализ экономической эффективности другого технического решения, которое, по данным авторов, носит оригинальный характер и позволит увеличить не только эффективность, но и надежность работы котла. Для выполнения требования необходимо довести величину охлаждения дымовых газов до предельно низкой температуры, обеспечивающей надежную и безопасную эксплуатацию дымовых труб на электростанции [4] и нагрев воздуха на входе в РВП до температуры выше конденсации водяных паров в дымовых газах. При изменении режима работы котла величина температуры дымовых газов и воздуха может изменяться, поэтому должно быть обеспечено выполнение указанных выше требований к значениям температур при различных нагрузках котла, температуры наружного воздуха и других внешних параметров. Предлагается смонтировать новые теплообменники, расположив их в газоходе каждого корпуса котла после дымососа. Принципиальная тепловая схема реконструкции газоздуховодов котла (на примере одного из корпусов) приведена на рис. 1. При таком расположении теплообменников их можно монтировать на фундамент непосредственно на поверхности земли, так как газоходы котла после дымососа на достаточно протяженном участке располагаются непосредственно у земли, что уменьшает затраты на строительные-монтажные работы для вновь монтируемых теплообменников. Греющей средой в теплообменниках являются дымовые газы котла, а нагреваемой средой является холодный воздух, который после нагрева во вновь смонтированных теплообменниках направляется в РВП котла. При изменении режима работы котла, например, уменьшении паровой нагрузки котла относительно номинального значения, происходит уменьшение температуры дымовых газов. Для сохранения температуры дымовых газов на уровне, обеспечивающем надежную и безопасную эксплуатацию дымовых труб, предусмотрено байпасирование части воздуха помимо теплообменника. Расход воздуха через байпасный воздуховод регулируется при помощи регулятора 10 (см. рис. 1). Реконструкция газоздуховодного тракта увеличивает его аэродинамическое сопротивление. Поэтому при определении размеров проточной части новых теплообменников необходимо обеспечить не только требуемый теплосъем от дымовых газов, но и значение увели-

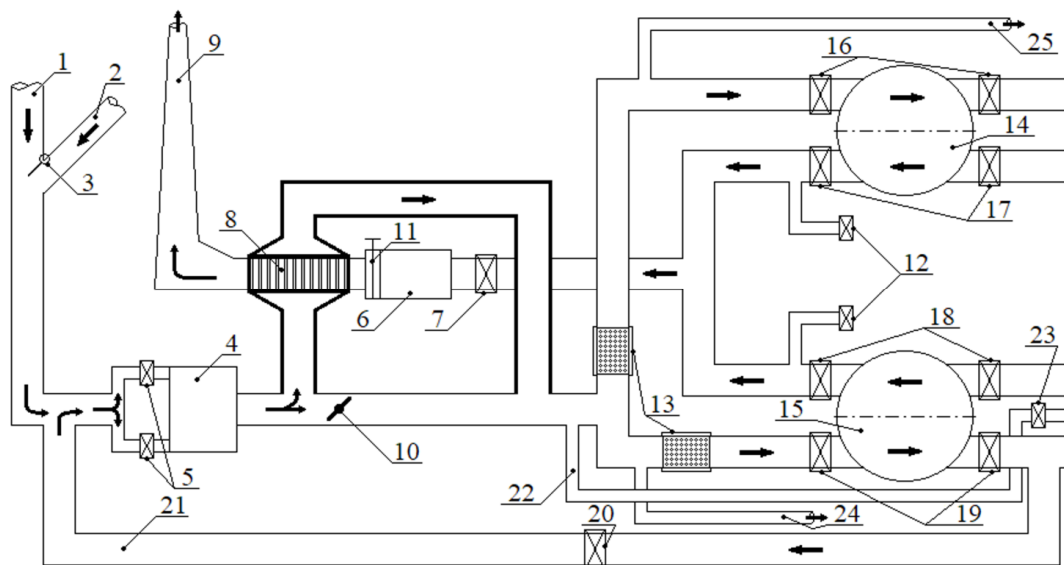


Рис. 1. Предлагаемая схема реконструкции газовоздушного тракта одного из корпусов котла ПК-41 (жирными линиями выделены изменения, вносимые в существующую схему):

1 – воздуховод холодного воздуха из котельного цеха; 2 – воздуховод холодного воздуха снаружи цеха; 3 – переключатель подвода воздуха; 4 – дутьевой вентилятор (ДВ); 5 – направляющий аппарат ДВ; 6 – дымосос (ДС); 7 – направляющий аппарат ДС; 8 – вновь монтируемый теплообменник; 9 – дымовая труба; 10 – регулятор расхода воздуха помимо нового теплообменника; 11, 12 – шиберы, используемые при выводе котла в ремонт; 13 – калорифер; 14, 15 – РВП; 16, 17, 18, 19 – отключающие шиберы РВП по воздушной и газовой стороне; 20, 21 – шибер и воздуховод рециркуляции горячего воздуха; 22, 23 – шибер и байпасный воздуховод РВП по воздуху при выводе в ремонт одного из РВП; 24, 25 – воздуховод на охлаждение балок каркаса котла

чения аэродинамического сопротивления теплообменников, которое не вызовет необходимости замены тягодутьевых механизмов котла. В связи с тем, что расчет размеров параметров теплообменника был привязан к фактическим характеристикам котла электростанции, на которой предлагалось проведение работ по модернизации, проведенный анализ режимов работы котла на номинальной нагрузке выявил предельную величину возможного увеличения аэродинамического сопротивления котла, которое составило по воздушной стороне 56 мм вод. ст., а по стороне дымовых газов – 43 мм вод. ст.

Применяемые методики расчета размеров теплообменников, технико-экономических показателей котла после модернизации и экономии затрат топлива изложены в [13–15]. Размеры теплообменников, монтируемых в газоходах котла, были определены исходя из обеспечения минимально допустимой температуры уходящих газов перед дымовой трубой 100 °С в зимнем режиме работы, когда температура холодного воздуха на входе в РВП составляла 7 °С. В результате проведенных расчетов различной компоновки и диаметра труб в теплообменнике было выявлено, что условию обеспечения необходимой предельной величины увеличения аэродинамического сопротивления соответствовала шахматная компоновка пучка с внешним диаметром труб 45 мм, толщиной 3 мм. Воздух проходит внутри труб, а дымовые газы поперечно омывают трубы с наружной стороны («перекрестный одноходовой теплообменник»).

В каждом газоходе к дымовой трубе после дымососа каждого корпуса котла планировалось установить один теплообменник. Всего на котел, состоящий из двух корпусов, монтируется два теплообменника. Из-за достаточно больших размеров теплообменников для уменьшения затрат на их изготовление, транспортировку и монтаж теплообменники изготавливаются из нескольких секций каждый.

Теоретическая часть

Расчет повышения КПД котла, показатели которого соответствовали нормативным значениям, проводился для фактического зимнего режима работы в диапазоне изменения паровой нагрузки от номинальной (зимний максимум работы блока) до минимальной (разгрузка блока в период минимальных цен на электроэнергию на оптовом рынке). Расчет КПД проводился по обратному балансу в соответствии с методикой, изложенной в [14]. Температура холодного воздуха на входе в новые теплообменники составляла 7 °С. Избытки воздуха в уходящих газах изменялись в зависимости от нагрузки котла от 1,296 до 1,511. Топливо – газ. Потери тепловой энергии с химическим и механическим недожогом отсутствовали. Потери тепловой энергии от обмуровки котла соответствовали нормативным значениям. На рис. 2 представлены зависимости изменения увеличения КПД котла «брутто» после модернизации $\Delta\eta_k^{бр}, \%$ в зависимости от паровой нагрузки котла $D_0, т/ч$ в зимнем

режиме работы (фактическая температура воздуха на входе в котел 7 °С).

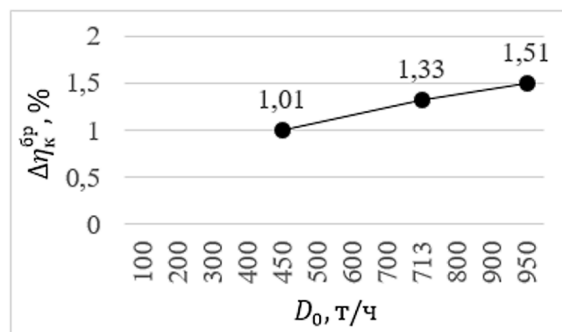


Рис. 2. Зависимость изменения увеличения КПД котла «брутто» от паропроизводительности котла

Температура уходящих газов после модернизации поддерживалась на постоянном уровне 102 °С при любом режиме работы котла, а до модернизации она уменьшалась при разгрузке котла.

Поэтому величина повышения КПД котла за счет модернизации существенно зависит от его режима работы. Максимальный эффект от проведения модернизации соответствует работе при номинальной нагрузке, а наименьшее значение экономического эффекта соответствует работе при минимальной нагрузке котла. Поэтому для определения экономической эффективности предлагаемого мероприятия был проведен расчет повышения КПД котла для среднегодового фактического режима работы, результаты которого представлены в таблице. Величина повышения КПД котла оказалась менее значительной, чем для работы в условиях зимнего максимума нагрузок, но тем не менее была существенно больше, чем у котла до модернизации. Уменьшение величины полученного эффекта связано в основном с более высокой среднегодовой температурой холодного воздуха на входе в новый теплообменник, которая составила 15 °С. Кроме того, фактическое состояние котла в анализируемом году эксплуатации было несколько луч-

Результаты расчета эффективности модернизации котла для среднегодового режима работы

№	Параметр	Размерность	Значение до модернизации/ после модернизации
1	Нагрузка котла	т/ч	713/713
2	Избыток воздуха в режимном сечении	–	1,05/1,05
3	Присосы в конвективную часть	%	29,1/29,1
4	Температура холодного воздуха на входе в новые теплообменники	°С	–/15
5	Температура воздуха после новых теплообменников (на входе в РВП)	°С	15 (на входе в РВП)/55 (после теплообменников)
6	Температура уходящих газов до новых теплообменников (после РВП)	°С	114 (после РВП)/138 (до теплообменников)
7	Температура уходящих газов после новых теплообменников	°С	–/103
8	Доля расхода воздуха, направляемого мимо новых теплообменников (через «байпас») от общего расхода воздуха	%	–/40
9	Увеличение КПД котла «брутто» за счет уменьшения температуры уходящих газов после модернизации	%	0,58
10	Аэродинамическое сопротивление нового теплообменника: по дымовым газам / по воздуху	мм вод. ст.	37/28
11	Увеличение потребляемой мощности после модернизации дутьевых вентиляторов/ дымососов	кВт	103/152
12	Суммарное увеличение затрат электроэнергии на собственные нужды из-за увеличения затрат на дутьевые вентиляторы и дымососы за год работы (7496 ч) после модернизации	тыс. кВт·ч/тыс. руб.	1911/1204
13	Экономия топлива за год работы после модернизации	т.у.т./тыс. руб.	3349/13 321
14	Экономический эффект от внедрения рассматриваемого технического решения на одном котле за год работы (п. 13 – п. 12)	тыс. руб.	12 117

ше нормативного. Температура воздуха на входе в РВП после новых теплообменников составила 55 °С, что выше температуры конденсации водяных паров в дымовых газах, которая составляет около 46 °С [16]. Представляет интерес оценка максимально возможных затрат на реализацию данного проекта, исходя из рассчитанного эффекта. Величина срока окупаемости, который обычно применяется в качестве одного из критериев эффективности проекта, зависит от принятой для расчета нормы прибыли и темпа роста цен. Для каждой из генерирующих компаний величина нормы прибыли для инвестиционных проектов принимается индивидуально, в данной работе она принята равной 15 %. Темп роста цен принят равным 1,02. В этом случае предельная величина капитальных вложений для обеспечения срока окупаемости в пределах 7 лет должна составлять не более 52 950 млн руб.

Практическая значимость

Для обеспечения необходимой величины охлаждения дымовых газов в зимнем режиме работы при номинальной нагрузке котла и одновременно повышения температуры воздуха на входе в РВП до температуры, превышающей температуру конденсации водяных паров в дымовых газах, он может быть оснащен дополнительными теплообменниками. Расчетная тепловая мощность каждого теплообменника должна составлять 9,2 Гкал/ч. Расчетные габаритные размеры каждого из двух теплообменников, монтируемых на котел, для обеспечения допустимой величины увеличения аэродинамического сопротивления газовоздушного тракта котла типа ПК-41 после модернизации составили: глубина расположения в газоходе (поперек потока дымовых газов) – 9320 мм, высота (длина трубок) 5780 мм, длина (по ходу дымовых газов) – 2550 мм. Общее количество трубок в одном теплообменнике 4794 штук (из них 94 трубки расположены поперечно потоку дымовых газов, 51 ряд трубок расположен вдоль хода дымовых газов).

При работе котла на газовом топливе за счет изменения расхода воздуха, направляемого в новые теплообменники, обеспечивается регулируемый теплосъем дымовых газов для обеспечения температуры уходящих дымовых газов 102 °С при различных режимах работы котла, что повышает эффективность его работы и обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию дымовых труб электростанции. Величина повышения КПД котла после модернизации зависит от режима работы котла и в зимнем режиме работы может составить до 1,51 % при номинальной нагрузке. Температура воздуха перед РВП при этом увеличивается до значений, превышающих температуру конденсации дымовых газов, что повышает надежность работы воздухоподогревателя. Поддержание необходимой температуры уходящих дымовых газов

после теплообменников можно обеспечить в автоматическом режиме работы за счет соответствующих дополнений в существующую систему автоматического управления котлом.

При переводе котла на работу на жидком топливе (мазуте) температура воздуха перед РВП должна быть обеспечена на уровне не менее 70 °С [5]. Повышение температуры до требуемого значения обеспечивается включением в работу калориферов или рециркуляцией горячего воздуха на вход в РВП. При этом вновь установленные подогреватели остаются в работе, а за счет калориферов обеспечивается только дополнительный подогрев воздуха. Во время работы котла на мазуте будет происходить занос поверхностей нагрева мазутной золой. В связи с этим новый теплообменник должен быть изготовлен из коррозионно-стойких материалов (или с антикоррозийным покрытием) и оснащен устройством для очистки образовавшихся отложений, например, установкой для термоволновой очистки.

Следует отметить, что рассматриваемое техническое решение ориентировано в первую очередь на электростанции, предназначенные в основном для производства только электрической энергии (ГРЭС). Для электростанций, на которых значительную долю в общем объеме производства составляет отпуск тепловой энергии (ТЭЦ) при наличии установок для подготовки очищенной воды значительной производительности (значительный объем подпитки тепловых сетей или значительное количество невозврата конденсата пара), необходима разработка технико-экономического обоснования выбора наиболее экономически целесообразного технического решения по утилизации тепловой энергии дымовых газов из рассмотренных в данной статье и в работе [9].

Выводы

1. Рассмотренное техническое решение позволит обеспечить достаточно существенное увеличение срока службы набивки воздухоподогревателей за счет увеличения температуры воздуха перед ними даже при работе в зимнем режиме с отключенными калориферами, что особенно актуально при работе на газовом топливе после периода работы на мазуте. При этом произойдет повышение КПД котла «брутто» за счет использования теплоты уходящих газов для подогрева воздуха. Величина повышения температуры воздуха и КПД котла зависит от типа котла и его технического состояния до проведения модернизации. Для рассмотренного в статье варианта модернизации котла типа ПК-41 величина температуры воздуха перед РВП при среднегодовом режиме работы составила 55 °С, при этом обеспечено увеличение КПД котла «брутто» на 0,58%.

2. Для возможности регулирования температуры уходящих газов при изменении нагрузки

котла необходимо снабжать вновь монтируемые теплообменники байпасным воздухопроводом помимо теплообменников.

3. Для охлаждения дымовых газов во вновь монтируемых теплообменниках не требуется применение охлаждающей воды. Поэтому при внедрении рассмотренного технического решения не произойдет разгрузки отборов паровых турбин и уменьшения теплофикационной выработки электростанции.

Литература

1. ТХ-34-70-001-83. Типовая энергетическая характеристика котла ТГМП-114 при сжигании природного газа. – М.: Союзтехэнерго, 1983. – 14 с.
2. Номенклатурный каталог Таганрогского котельного завода. – http://www.tkz.su/customers/KK_Nomenclaturni_catalog_preview.pdf (дата обращения: 18.02.2019).
3. Ибрагимов, Е.С. Повышение эффективности топливоиспользования тепловых электрических станций за счет модернизации турбинного и котельного оборудования / Е.С. Ибрагимов // *Научные горизонты*. – 2017. – № 3. – С. 71–83.
4. РД 153-34.1-21.523-99. Инструкция по эксплуатации железобетонных и кирпичных дымовых труб и газоходов на тепловых электростанциях. – М.: ОРГРЭС, 2000. – 30 с.
5. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003. – 320 с.
6. Цирульников, Л.М. Защита газомазутных котлов от сернистой коррозии / Л.М. Цирульников, З.И. Геллер. – Ташкент: Фан, 1974. – 147 с.
7. Storm, S. Recent Regenerative Airheater Improvements at HECO Kahe Point, Oahu / S. Storm, M. DeCaprio // *Electric Power Conference*. – 2011. – P. 10–12.
8. Storm, S. *Experiences with Regenerative Air Heater Performance Evaluations & Optimization* / S. Storm, J. Guffre // *POWER-GEN Europe*. – 2010. – P. 1–18.
9. Ibragimov, E. *Improving the Efficiency of Power Boilers by Cooling the Flue Gases to the Lowest Possible Temperature under the Conditions of Safe Operation of Reinforced Concrete and Brick Chimneys of Power Plants* / E. Ibragimov, S. Cherkasov // *MATEC Web of Conferences*. Vol. 245 (2018); *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018)*. – 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/201824507014
10. Аронов, И.З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И.З. Аронов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1974. – 280 с.
11. Соснин, Ю.П. Высокоэффективные газовые контактные водонагреватели / Ю.П. Соснин, Е.Н. Бухаркин. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Стройиздат, 1988. – 375 с.
12. Кудинов, А.А. Энергосбережение в теплогенерирующих установках / А.А. Кудинов // Ульяновск: УлГТУ. – 2000. – 139 с.
13. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
14. РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования. – М.: ОРГРЭС, 1995. – 109 с.
15. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. – 3-е изд. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.
16. Сжигание высокосернистого мазута на электростанциях / Н.И. Верховский, Г.К. Красноселов, Е.В. Машилов, Л.М. Цирульников. – М.: Энергия, 1970. – 447 с.

Ибрагимов Евгений Самимович, канд. техн. наук, доцент, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; ibragimoves5757@mail.ru.

Гальтяев Егор Викторович, магистрант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; galtyev@mail.ru.

Поступила в редакцию 6 марта 2019 г.

POWER PLANT BOILER PERFORMANCE AND RELIABILITY ENHANCEMENT

E.S. Ibragimov, ibragimoves5757@mail.ru,

E.V. Galtyaev, galtyev@mail.ru

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation

The paper reports on calculating the performance and reliability of thermal power plant boilers as enhanced by mounting additional heat exchangers in the gas-air path of the boiler. The additional heat exchangers cool the flue gases by heating the air directed to the air heaters. Flue gas are cooled down to the lowest temperatures safe for reinforced-concrete or brick fluestacks. While reconfiguring a boiler, the extra heat exchangers keep the flue-gas temperature remains constant. Air is heated to above the condensation temperature of water vapor carried with flue gas. The authors have devised the necessary amendments to the existing schematics of the gas-air paths in PK-41 boilers. The research effort helped optimize the location and size of additional heat exchangers. Efficiency and fuel-saving data reported.

Keywords: boiler equipment, air heaters, gas-air path, energy efficiency.

References

1. TH-34-70-001-83. *Tipovaja jenergeticheskaja karakteristika kotla TGMP-114 pri szhiganii prirodnogo gaza* [Typical Energy Characteristic-34-70-001-83. Typical Energy Characteristics of the Boiler TGMP-114 in the Combustion of Natural Gas]. Moscow, Soyuztehenenergo, 1983. 14 p.
2. *Nomenklaturnyj katalog Taganrogskogo kotel'nogo zavoda* [Nomenclature Catalogue of Taganrog Boiler Plant]. Available at: http://www.t kz.su/customers/KK_Nomenklaturni_catalog_preview.pdf (accessed 18.02.2019).
3. Ibragimov E.S. *Povyshenie jeffektivnosti toplivoispol'zovanija teplovyh jelektricheskikh stancij za schet modernizacii turbinnogo i kotel'nogo oborudovanija* [Improving the Efficiency of Fuel Use of Thermal Power Plants through the Modernization of Turbine and Boiler Equipment]. *Nauchnye gorizonty* [Scientific Horizons], 2017, no. 3, pp. 71–83. (in Russ.)
4. RD 153-34.1-21.523-99. *Instrukcija po jekspluatacii zhelezobetonnyh i kirpichnyh dymovyh trub i gazohodov na teplovyh jelektrostancijah* [Governing Document 153-34.1-21.523-99. Operating Instructions for Reinforced Concrete and Brick Chimneys and Flue-Gas Ducts in Thermal Power Plants]. Moscow, ORGRES, 2000. 30 p.
5. *Pravila tehnichej jekspluatacii jelektricheskikh stancij i setej Rossijskoj Federacii* [Rules of Technical Operation of Power Plants and Networks of the Russian Federation]. Moscow, SPO ORGRES, 2003. 320 p.
6. Tsirulnikov L.M., Geller Z.I. *Zashhita gazomazutnyh kotlov ot sernokisloj korrozii* [Protection of Gas-Oil Boilers Against Sulfuric Acid Corrosion]. Tashkent, Phan, 1974. 147 p.
7. Storm S., DeCaprio M. Recent Regenerative Airheater Improvements at HECO Kahe Point, Oahu. *Electric Power Conference*, 2011, pp. 10–12.
8. Storm S., Guffre J. Experiences with Regenerative Air Heater Performance Evaluations & Optimization. *POWER-GEN Europe*, 2010, pp. 1–18.
9. Ibragimov E., Cherkasov S. Improving the Efficiency of Power Boilers by Cooling the Flue Gases to the Lowest Possible Temperature under the Conditions of Safe Operation of Reinforced Concrete and Brick Chimneys of Power Plants. *MATEC Web of Conferences, Vol. 245 (2018), International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018)*, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1051/mateconf/201824507014
10. Aronov I.Z. *Kontaktnyj nagrev vody produktami sgoranija prirodnogo gaza* [Contact Heating of Water by Natural Gas Combustion Products]. 2nd ed., revised and enlarged ed. Moscow, Subsoil, 1974. 280 p.
11. Sosnin Yu.P., Bukharkin E.N. *Vysokoeffektivnye gazovye kontaktnye vodonagrevateli* [Contact High-efficiency Gas Water Heaters]. 4th ed., revised and enlarged ed. Moscow, Stroyizdat, 1988. 375 p.
12. Kudinov A.A. *Jenergosberezhenie v teplogenerirujushhijh ustanovkah* [Energy Saving in Heat-Generating Plants]. Ulyanovsk, Ulyanovsk State Technical University, 2000. 139 p.
13. *Teplovoj raschet kotlov (normativnyj metod)* [Thermal Calculation of Boilers (Regulatory Method)]. 3rd ed., revised and enlarged ed. St. Petersburg, Research and Production Association, Central Boiler and Turbine Institute, 1998. 256 p.
14. RD 34.08.552-95. *Metodicheskie ukazanija po sostavleniju otcheta jelektrо-stancii i akcionernogo obshhestva jenergetiki i jelektrifikacii o teplovoj jekonomichnosti oborudovanija* [Governing Document 34.08.552-95.

Methodical Instructions on Drawing Up the Report of Power Plant and Joint-stock Company of Power and Electrification about Thermal Efficiency of the Equipment]. Moscow, ORGRES, 1995. 109 p.

15. Mochan S.I. (Ed.) *Ajerodinamicheskij raschet kotel'nyh ustanovok (normativnyj metod)* [Aerodynamic Calculation of Boiler Plants (Regulatory Method)]. 3rd ed. Leningrad, Energy, 1977. 256 p.

16. Verkhovsky N.I., Krasnoselov G.K., Mashalov E.V., Tsirulnikov L.M. *Szhiganie vysokosernistogo mazuta na jelektrostantsijah* [Combustion of High-Sulfur Fuel Oil in Power Plants]. Moscow, Energy, 1970. 447 p.

Received 6 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Ибрагимов, Е.С. Повышение эффективности и надежности работы котлов электростанций / Е.С. Ибрагимов, Е.В. Гальтяев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 31–38. DOI: 10.14529/power190204

FOR CITATION

Ibragimov E.S., Galtyaev E.V. Power Plant Boiler Performance and Reliability Enhancement. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 31–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190204