

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

**ВНЕДРЕНИЕ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ КОТЛЕ
ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С ВНУТРИТОПОЧНОЙ
РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ**

© 2021 г. Н. А. Зройчиков^а, *, Д. Р. Григорьев^б, **, М. Gamburg^с, ***, А. В. Пай^а, ****

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^бООО “Экогор”, ул. Ленинская Слобода, д. 23, стр. 2, Москва, 115280 Россия

^сZeeco inc., 22151 East 91st Street Broken Arrow, Oklahoma 74014 USA

*e-mail: zroychikovna@mpei.ru

**e-mail: grigoryev@ecogor.ru

***e-mail: Michael_Gamburg@zeeco.com

****e-mail: PaiAV@mpei.ru

Поступила в редакцию 14.02.2021 г.

После доработки 04.03.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Рассмотрены результаты реконструкции котла Е-500-13.8-560 КДТ (ТПЕ-430), проведенной в целях снижения выбросов оксидов азота (NO_x). При этом уровень концентрации NO_x , составивший 119 мг/м^3 , достигнут только благодаря установке новых горелочных устройств. Показано, что действующее природоохранное законодательство содержит комплекс мер, существенным образом затрагивающих текущую и планируемую деятельность предприятий теплоэнергетики и энергомашиностроения. Приводится краткое описание котла, рассматриваются вопросы его эксплуатации, анализируются эксплуатационные и инвестиционные затраты на реконструкцию котла. Проведен анализ тепловых расчетов котла. Описаны доступные из существующих горелочные устройства с ультразвуковыми выбросами, выбран оптимальный их вариант. Показано, что для успешной реализации проекта перед заменой горелок на котлах должна проводиться специальная инженеринговая работа, связанная с оптимизацией конструкции и параметров воздушного тракта. Для построения модели воздушного тракта проведены натурные исследования воздухопроводов котла ТПЕ-430. На основании полученных данных построена физическая модель воздушного тракта из оргстекла и выполнены продувки холодным воздухом с визуализацией потоков гелиевыми мыльными микропузырьками. По результатам физического моделирования сформирована конфигурация воздухопроводов от кольцевого коллектора к новым горелкам, определены местоположение и размеры конструктивных элементов для установки в воздуховодах и воздушных коробах горелок, обеспечивающих требуемую равномерность течения воздуха.

Ключевые слова: котел, топочная камера, горелочные устройства, топливо, дымовые газы, экология, нормативные выбросы, оксиды азота, тепловые расчеты, физическая модель, реконструкция, локализации производства

DOI: 10.1134/S0040363621110084

Национальный проект “Экология” содержит комплекс мер, существенным образом затрагивающий текущую и планируемую деятельность предприятий теплоэнергетики и энергомашиностроения. До 31.12.2024 должны быть сокращены совокупные объемы выбросов загрязняющих веществ на 22% в 12 городах, в которых расположены более 20 ТЭС электроэнергетической отрасли [1].

Основным маркером загрязняющих веществ для ТЭС, сжигающих природный газ, являются оксиды азота (NO_x). В соответствии с [2], самые

эффективные способы подавления NO_x — это применение малотоксичных горелок и организация рециркуляции дымовых газов. Согласно [2], малотоксичными считаются горелочные устройства, которые без применения дополнительных мероприятий обеспечивают выбросы NO_x менее 150 мг/м^3 , приведенные к 6% O_2 при температуре горячего воздуха выше 200°C . Многие действующие котлы проектировались без рециркуляции дымовых газов, в связи с чем внедрение этого метода на действующих котельных установках при-

водит наряду со снижением надежности работы пароперегревательных поверхностей нагрева к снижению параметров пара и КПД котла. Кроме того, рециркуляция дымовых газов способствует повышению расхода электроэнергии на собственные нужды, что в общей сложности увеличивает эксплуатационные затраты до 4% [3]. В связи с этим наибольший интерес вызывает применение технологии, которая обеспечит снижение выбросов NO_x без увеличения этих затрат. В мировой практике на котлах, сжигающих газ, достигнуты значительные успехи в снижении выбросов NO_x до ультранизких значений.

В [4] отмечается актуальность внедрения на энергетических котлах малотоксичных горелок нового поколения, позволяющих исключить необходимость сооружения на отечественных газовых ТЭС дорогостоящих установок азотоочистки, повысить энергоэффективность котельных установок и существенно снизить эксплуатационные затраты.

ОПИСАНИЕ КОТЛА ТПЕ-430. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Котел Е-500-13.8-560 КДТ (ТПЕ-430) однобабанный, рассчитан на сверхвысокие параметры пара (давление 13.8 МПа, температура перегретого пара 560°C). Котел газоплотный, но работает с уравновешенной тягой. Топочная камера котла призматическая, прямоугольного сечения с размерами в плане 15 920 × 8640 мм по осям экранных труб. Стены топки экранированы цельносварными мембранными панелями из гладких труб. Пароперегреватель котла состоит из радиационного и ширмового пароперегревателей, расположенных в верхней части топки, и двух конвективных ступеней в горизонтальном газоходе. Экономайзер имеет две ступени и находится в опускном газоходе. Регулирование температуры перегрева пара осуществляется впрыском собственного конденсата.

Для подогрева воздуха используются два регенеративных воздухоподогревателя (РВП). В заводском исполнении котел имеет восемь плоскофакельных горелок, расположенных встречно в один ярус на фронтальной и задней стенках топки. На рис. 1 представлены продольный и поперечный разрезы котла ТПЕ-430 с проектными (заводскими) горелками. В таком исполнении выбросы NO_x при сжигании природного газа составляли около 650 мг/м³ при 6% O_2 .

В соответствии с классификацией [5] котел ТПЕ-430 с теплонапряжением зоны активного горения (ЗАГ) $q_{\text{ЗАГ}} > 0.44$ МВт/м² и продолжительностью пребывания продуктов сгорания в области высоких температур $\tau_{\text{ЗАГ}} > 0.62$ с по характеристикам зоны активного горения для выбора воздухоохраных мероприятий относится к пятой груп-

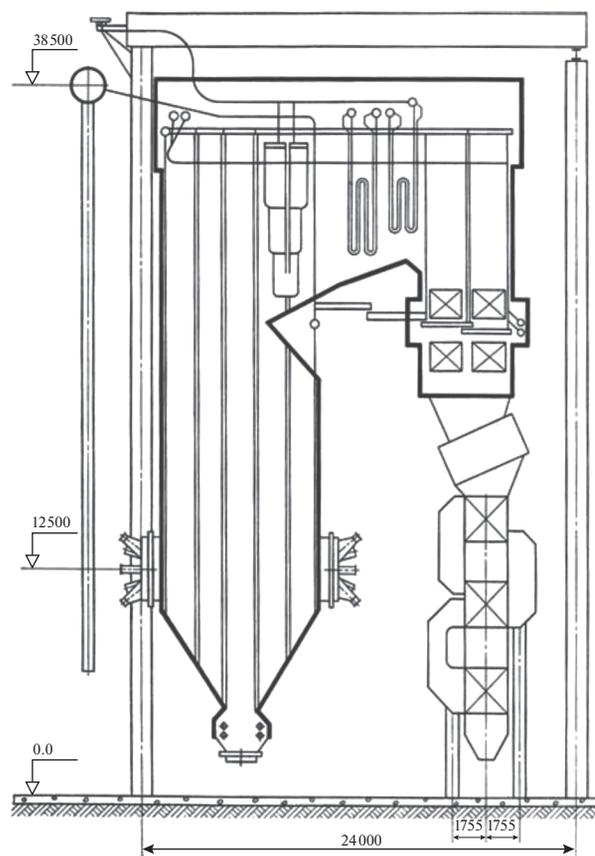


Рис. 1. Продольный разрез котла ТПЕ-430 с проектными горелками

пе¹, что говорит об условиях, весьма способствующих формированию значительных выбросов NO_x . При этом котел спроектирован для сжигания угля с высокой температурой горячего воздуха (более 305°C), что также приводит к росту образования NO_x .

Для снижения выбросов NO_x в атмосферу плоскофакельные горелки на котле ТПЕ-430 были заменены на газомазутные ГМУ-45-11, при этом над горелками были установлены сопла третичного дутья из расчета подачи 30% воздуха при значении коэффициента избытка воздуха за первой ступенью конвективного пароперегревателя $\text{КПП-1 } \alpha''_{\text{КПП-1}} = 1.14$. После такой реконструкции выбросы NO_x снизились и составили 157 мг/м³.

Для участия энергоблока с котлом ТПЕ-430 в регулировании нагрузки в энергосистеме, а также в целях дальнейшего снижения выбросов NO_x руководством энергосистемы было принято амби-

¹ По характеристикам зоны активного горения котлы классифицируются по семи группам для выбора мероприятий по охране окружающей среды.

циозное решение о проведении реконструкции котла для увеличения диапазона регулирования нагрузки (снижения уровня минимальной паровой нагрузки до 200 т/ч, т.е. до 40% номинальной нагрузки) и снижения выбросов NO_x до уровня Гётеборгского протокола (83 мг/м^3 при 6% O_2) [6].

Для решения этих задач были проведены расчетные и натурные исследования, которые показали, что при выполнении некоторых работ по реконструкции котла он способен нести требуемую нагрузку во всем диапазоне регулирования, в том числе минимальную 200 т/ч.

В целях снижения выбросов NO_x были рассмотрены различные мероприятия, начиная от режимных малозатратных и заканчивая полной реконструкцией пароводяного и газовоздушного трактов котла.

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ КОТЛА И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для выбора оптимального варианта реконструкции котла были проведены тепловые расчеты в соответствии с [7].

Тепловые расчеты выполнялись в два этапа. На первом этапе разрабатывалась адекватная расчетная модель котла, верифицированная с существующими фактическими показателями его работы. Для этого в адекватную модель вносились конструктивные и режимные характеристики котла, полученные на основании его испытаний и фактического конструктивного состояния.

На втором этапе с использованием разработанной модели котла были проведены расчеты, определены тренды показателей при разных режимах работы и заданных изменениях в конструкции котла. Полученные таким образом расчетные показатели приняты за базу, относительно которой оценивался эффект от различных вариантов реконструкции котла.

Анализ результатов тепловых расчетов показал, что в существующем состоянии котел при нагрузке 450 т/ч с избытком воздуха $\alpha_{\text{кпп-1}}'' = 1.14$ способен поддерживать температуру промежуточного перегрева пара $t_{\text{пп}}$ только при максимальных расходах конденсата на впрыски (в связи с переводом на сжигание природного газа и соответствующим ростом температуры газов на выходе из топки).

При существующей системе сжигания, обеспечивающей работу котла с избытком воздуха $\alpha_{\text{кпп-1}}'' = 1.07$, температура перегретого пара сохраняется на уровне 560°C на номинальной нагрузке. При этом значительно снижается расход конденсата на впрыск, а следовательно, появляется запас по регулированию температуры промежуточного перегрева на высоких нагрузках при использовании

рециркуляции дымовых газов в горелочные устройства.

Очевидно, что полученные результаты расчетов объясняются соотношением лучистого и конвективного теплообмена в тепловосприятии поверхностями нагрева котла, показателем которого является температура газов на выходе из топки (ϑ_t''). При нагрузке 450 т/ч и подаче 30% общего расхода воздуха в сопла третичного дутья и при коэффициенте рециркуляции $r = 0$ температура на выходе из топки составила $\vartheta_t'' = 1146^\circ\text{C}$. Из-за уменьшения объемного теплонапряжения топки на нагрузке 200 т/ч значение ϑ_t'' снизилось до 838°C .

В варианте реконструкции котла с заменой горелок температура на выходе из топки ϑ_t'' на такой же нагрузке (450 т/ч) с учетом увеличения степени рециркуляции газов до $r = 10\%$ составила 1002°C , а на нагрузке 200 т/ч $\vartheta_t'' = 675^\circ\text{C}$. Дальнейшее увеличение степени рециркуляции приводит к недопустимому повышению температуры металла пароперегревательных поверхностей нагрева. Таким образом, для надежной работы котла во всем диапазоне нагрузок необходимо иметь способы/возможности, позволяющие регулировать температуру газов на выходе из топки.

С учетом полученных результатов теплового расчета были сформулированы требования для трех вариантов реконструкции котла, которые должны предусматривать возможность работы котла с соплами третичного дутья и/или с добавлением газов рециркуляции в горелки на всех режимах, особенно на пониженных нагрузках. Соответственно, горелочные устройства должны работать на пониженных нагрузках согласно выбранным режимам. Система управления и автоматики котла должна предусматривать реализованный алгоритм управления расходами третичного воздуха и рециркуляции дымовых газов.

ВЫБОР ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ С УЛЬТРАНИЗКИМИ ВЫБРОСАМИ

В России с 90-х годов серьезных исследований в области разработки горелочных устройств с ультранизкими выбросами не проводилось. Большинство усовершенствований было выполнено на базе технических решений прошлого века, в том числе на базе горелок, разработанных в ОАО ВТИ (ГМВИ) и ОАО НПО ЦКТИ (ГМУ). Достигнутый уровень минимальных выбросов NO_x на многорелочных паровых котлах без применения первичных технологических мероприятий при сжигании природного газа составил около 170 мг/м^3 [2].

Директива Европейского парламента и Совета Европейского союза 2016/2284/ЕС от 14 декабря

2016 г. о сокращении национальных выбросов в атмосферу определенных загрязняющих веществ законодательно закрепила повышенные требования к количеству выбросов NO_x в Европе. В связи с этим в нашей стране на момент проведения проектных работ по реконструкции котла ТПЕ-430 апробированные решения от европейских инженеринговых компаний отсутствовали. В этот период европейские компании только начинали внедрять свои новые горелки в опытно-промышленную эксплуатацию.

В США повышенные требования к выбросам оксидов азота на уровне 18 мг/м^3 при 3% O_2 действуют в Калифорнии с 2000 г. [8], поэтому американские инженеринговые компании имеют достаточный опыт разработки и эксплуатации горелок с ультранизкими выбросами NO_x , в том числе с горелками, способными работать с выбросами NO_x менее 9 мг/м^3 . Следует обратить внимание на то, что в результате ужесточения в 1990 г. требований к количеству выбросов оксидов азота до уровня 150 мг/м^3 , затем в 1995 г. до 100 мг/м^3 [8] владельцы котельных агрегатов в Калифорнии были вынуждены в течение 20 лет четыре раза менять горелки на своих котлах. На каждом этапе законотворческой деятельности компании создавали горелочные устройства, обеспечивающие выполнение требований законодательства. Безусловно, если бы была создана технология, работающая на опережение требований законов, предприятия сэкономили бы значительные средства [9].

Для принятия решения о реконструкции котла ТПЕ-430 рассматривался широкий ряд горелочных устройств. На основе полученных технико-коммерческих предложений было рассмотрено пять вариантов реконструкции котла и отобраны горелки пяти типов:

- вихревая, двухпоточная по газу ГМВИ (Россия) (вариант 1);
- прямоточно-вихревая, однопоточная по газу ГМПВ (Россия) (вариант 2);
- SAACKE DDZG-EN (Германия) (вариант 3);
- прямоточно-вихревая, однопоточная по газу Zeeco GB (США) (вариант 4);
- прямоточно-вихревая, двухпоточная по газу Zeeco Free Jet (США) (вариант 5).

В качестве сравнительных параметров принимались во внимание: количество каналов подачи природного газа; требуемое давление природного газа; воздушное сопротивление; достигнутые уровни выбросов NO_x ; надежность; количество котлов, оборудованных горелками подобной мощности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ВАРИАНТОВ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ, ПРИНЯТЫХ К РАССМОТРЕНИЮ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ КОТЛА

Оценка затрат на реконструкцию выполнялась на основании экспертных данных и технико-коммерческих предложений на поставку оборудования.

В объем работ при замене горелочных устройств входят приобретение и монтаж горелок, газовых блоков, системы автоматизации горения.

Для достижения целевого показателя выбросов NO_x 125 мг/м^3 для 1–4-го вариантов замены горелок требуются дополнительные затраты на монтаж схем подачи газов рециркуляции в объеме до 7% и подачи воздуха над горелками через сопла третичного дутья в объеме до 30% общего расхода воздуха.

В варианте 3 с горелками SAACKE необходимо было провести замену дутьевого вентилятора в связи с большим сопротивлением горелочных устройств. Стоимость этого варианта реконструкции значительно выше стоимости остальных. Это обусловлено тем, что компания SAACKE поставляет системы сжигания обязательно в комплексном виде, т.е. к горелке прилагаются автоматика и газовая арматура, которые значительно дороже российских аналогов. Однако такой подход позволяет компании исключить факторы, влияющие на качество работы горелочного устройства, такие как неравномерность расхода воздуха по горелкам, качество управления горением и др., которые в некоторых случаях могут свести к нулю эффективность проекта.

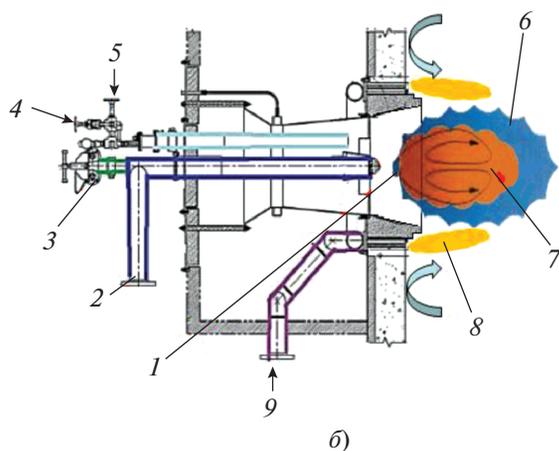
Исходя из этих соображений, далее нецелесообразно рассматривать варианты 1, 2, 4, которые не обеспечивают выбросы оксидов азота ниже 125 мг/м^3 без дополнительных мероприятий. Вариант 3 с горелками SAACKE был исключен по соображениям неоправданно высокой стоимости.

С учетом того что на момент принятия решения ожидалась ратификация Парижских соглашений (что и произошло в 2019 г.), была поставлена задача снижения выбросов NO_x до уровня экологических требований Гётеборгского протокола (83 мг/м^3 при 6% O_2) [6]. Этим требованиям вполне соответствуют горелки третьего поколения Zeeco Free Jet.

Особенностью горелок третьего поколения Zeeco Free Jet является организация в самом факеле горелки рециркуляции дымовых газов, что обеспечивает уменьшение образования NO_x (рис. 2) благодаря снижению температуры и концентрации реагирующих веществ в корне факела. В отличие от горелок предыдущих поколений, основная часть топлива в горелках третьего поколения подается не в воздух, а снаружи струи воздуха, по



а)



б)

Рис. 2. Фотография структуры факела (а) и схема работы (б) горелки Zeeco Free Jet третьего поколения. 1 – центральный газ, предназначенный для стабильности горения; 2 – патрубок подачи центрального газа; 3 – форсунка; 4 – газ на запально-зажигательное устройство (ЗЗУ); 5 – воздух на ЗЗУ; 6 – низкотемпературная обогащенная кислородом зона; 7 – зона с низким избытком воздуха; 8 – внутренняя рециркуляция (газовые струи инжектируют продукты горения из топки); 9 – внешний кольцевой газ

внешнему периметру амбразуры в топочное пространство, заполненное инертными продуктами горения. Струи газа инжектируют продукты горения, разбавляются ими, и далее после смешения с воздушным потоком происходит процесс горения топливовоздушной смеси. Стабильность горения обеспечивается раскаленной амбразурой определенной формы, выполненной из специального материала.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ТРАКТА КОТЛА

Более 93% объема среды, проходящей через горелку, – это воздух, от способа подачи которого

зависит качество горения. Известно, что регулирующие органы по воздуху имеют нелинейную расходную характеристику и крайне низкую повторяемость. Шибер на воздуховоде большого размера не является регулирующим органом и может применяться только для открытия или закрытия прохода потока воздуха, в связи с чем исключается участие регулирующих органов по воздуху в управлении горением. При этом организовывается работа всех горелок в одинаковых условиях в результате корректировки конфигурации воздушного тракта в целях обеспечения равномерности расхода воздуха по сечению горелки и через каждую горелку с отклонением менее 2%.

Для получения исходных данных были проведены натурные исследования воздухопроводов котла ТПЕ-430. На основании полученных при измерениях данных была создана 3D-модель воздухопроводов (рис. 3).

При разработке модели воздушного тракта учитывалось равенство всех однотипных критериев подобия для натуре и модели, что является необходимым и достаточным условием их физического подобия. В рассматриваемом случае измерения осуществляются в автомодельной области, так как по уровням скоростей и давлений число Рейнольдса $Re > 10^7$.

Для выполнения условий геометрического подобия все сходственные линейные размеры модели выполнялись пропорциональными, а соответствующие углы равными натурному объекту. При этом отношение сходственных линейных размеров натуре и модели было одинаково для всех размеров.

Физическая модель воздушного тракта изготавливалась из оргстекла, продувки проводились холодным воздухом с визуализацией потоков гелиевыми мыльными микроскопическими пузырьками (при условии, что соотношение плотностей воздушного потока и мыльных гелиевых пузырьков равно единице) (рис. 4).

Визуализация потоков воздуха позволила:

выявить и устранить участки с недостаточно заполненными воздушным потоком сечениями воздухопроводов;

оптимизировать конфигурацию воздухопроводов от кольцевого коллектора к новым горелкам;

определить местоположение и размеры направляющих пластин и закрылков для установки в воздухопроводах и воздушных коробах горелок, обеспечивающих требуемую равномерность течения воздуха.

Горелки Zeeco Free Jet мощностью 48 МВт разрабатывались индивидуально для котла ТПЕ-430 с учетом диаметра и состояния существующей амбразурой и фактического напора воздуха. Расчетный размер устья не вписывался в диаметр разводки экранных

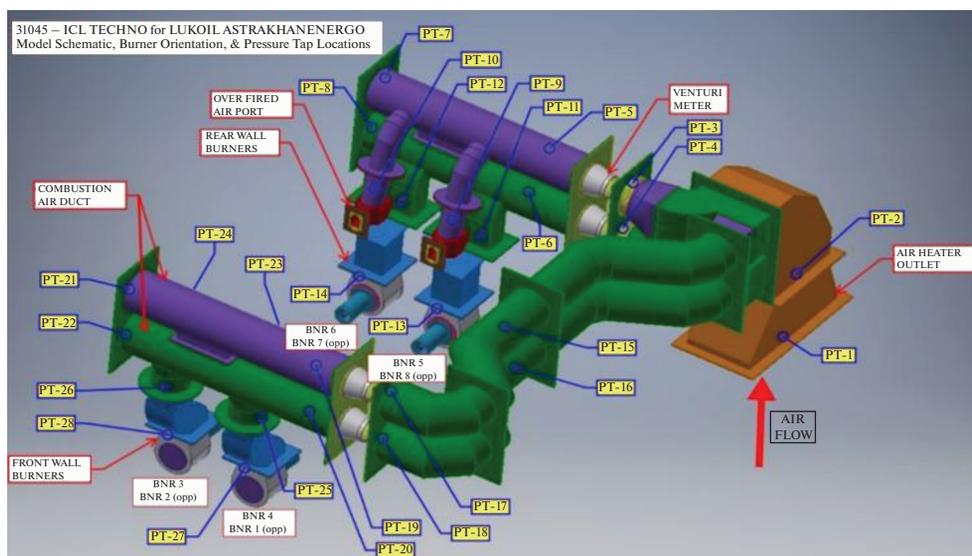


Рис. 3. 3D-модель воздуховодов к горелкам котла

труб под амбразуру горелки. К некоторому сожалению, для исключения затрат на переделку экранных труб диаметр устья горелки был принят равным существующему диаметру разводки экранных труб. Внутренние элементы горелки были разработаны с учетом минимизации сопротивления по воздуху.

В связи с требованиями, сформулированными в постановлениях Правительства РФ по локализации производства природоохранного оборудования в России, воздушные короба горелок были изготовлены на российском котельном заводе. Во время изготовления коробов проводился тщательный контроль качества изготовления.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ КОТЛА

В 2019 г. после завершения реконструкции котла с установкой грелок Zeeco Free Jet, газовых



Рис. 4. Элементы физической модели для наблюдения за продувками

блоков с системой автоматического управления горением АМАКС и реконструкцией сопл третичного дутья были проведены тепловые испытания.

Пуск горелок производился на центральном канале. Согласно инструкции, после набора нагрузки выше 20% включается в работу периферийный канал и дальнейший набор нагрузки осуществляется на периферийном канале. Расчетное значение давления газа в центральном канале при номинальной нагрузке составило 11 кПа, на периферийном канале — 60 кПа. В соответствии с заложеной в горелочное устройство Zeeco Free Jet технологией, с ростом подачи газа в периферийный канал увеличивается степень подавления NO_x . Расход газа через центральный канал определяет надежность горения. На рис. 5 представлена зависимость концентрации NO_x от нагрузки при давлении газа на центральном канале 5 и 15 кПа. Из графика видно, что во всем диапазоне нагрузок концентрации NO_x составляют менее 100 мг/м³. При снижении давления газа на центральном канале горелки с 20 до 5 кПа концентрации NO_x уменьшились на 8% и составили 92 мг/м³, что на 25% ниже значений, указанных в ГОСТ Р 50831-95 [9]².

На рис. 6 представлена зависимость концентрации NO_x от давления газа на центральном канале при фиксированной нагрузке 450 т/ч.

Как видно из рис. 6, при снижении давления газа на центральном канале с 28 до 5 кПа на нагрузке 450 т/ч концентрация оксидов азота сокра-

² К сожалению, все ГОСТ, соответствующие Закону о техническом регулировании № 184-ФЗ, носят добровольный/рекомендательный характер. “Нормативные значения” определены в виде “технологических показателей” в ИТС 38-2017, однако они на момент написания статьи не были утверждены приказом Минприроды РФ.

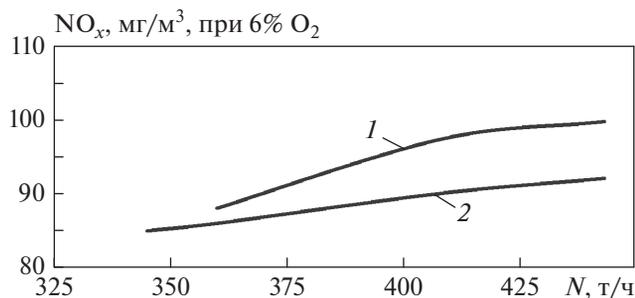


Рис. 5. Зависимость концентраций выбросов NO_x от нагрузки котла при двух фиксированных давлениях газа в центральном канале. Давление газа в центральном канале, кПа: 1 – 15; 2 – 5

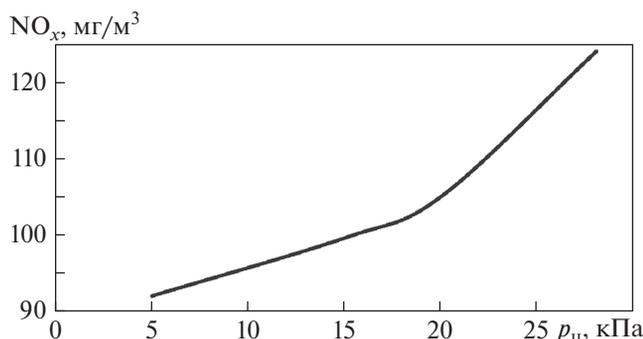


Рис. 6. Зависимость концентрации выбросов NO_x при изменении давления газа в центральном канале при нагрузке 450 т/ч

тилась на 25%. Дальнейшее снижение давления газа центрального канала было ограничено уставками работы защиты котла.

Видимых изменений структуры факела при значительном снижении расхода газа через цен-

тральный канал не наблюдалось, амбразура оставалась раскаленной и обеспечивала надежное воспламенение. На рис. 7 представлены фотографии факела горелки при двух режимах работы: при 5 и 25 кПа. На фотографиях видно, что на одной и той же горелке при одинаковых условиях мгновенной светимости увеличение расхода газа через центральный канал приводит к росту голубого спектра факела (более прозрачный цвет) по оси горелки.

При нагрузке 450 т/ч были проведены опыты по уменьшению расхода воздуха через сопла третичного дутья. При полностью открытых шиберов расчетный расход воздуха через сопла составляет 15%. После закрытия сопел концентрация NO_x увеличилась с 92 до 119 мг/м³. Таким образом, только благодаря установке новых горелочных устройств был достигнут уровень концентраций NO_x на 5% ниже значений, указанных в ГОСТ Р 50831-95 [10].

Температура перегретого пара и температура поверхностей нагрева во всех опытах находились в допустимых пределах. Следует отметить, что при полном открытии воздушных шиберов на сопла третичного дутья требуемый расход конденсата на впрыск второго пароохладителя увеличивается на 6%.

На рис. 8 представлены зависимости концентраций NO_x и CO от избытка воздуха α_r в топке котла. Исследования влияния избытков воздуха на выбросы оксидов азота производились при паропроизводительности 345 т/ч.

В результате снижения избытков воздуха с 1.14 до 1.06 концентрация NO_x уменьшилась с 88 до 82 мг/м³, при этом концентрация CO за дымосо-



а)



б)

Рис. 7. Факел горелки при паровой нагрузке котла 450 т/ч и различных давлениях газа в центральном канале. Давление газа в центральном канале, кПа: а – 5; б – 25

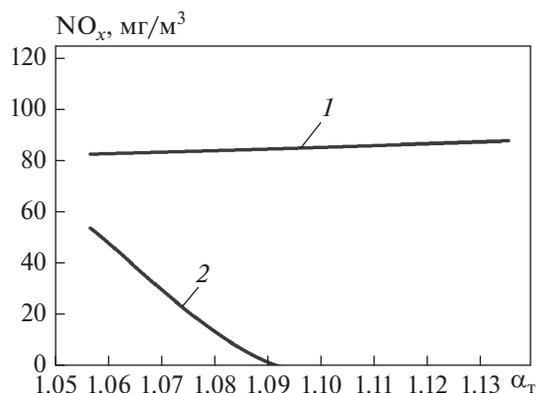


Рис. 8. Зависимость концентрации NO_x (1) и CO (2) от избытков воздуха

сом изменялась в пределах от 54 мг/м³ до 0. Температура перегретого пара и температура поверхностей нагрева во всех опытах оставалась в допустимых пределах, расход впрысков не менялся.

Измерения напоров воздуха показали, что неравномерность распределения воздуха по горелкам составляет на низких нагрузках 2–4% и менее 2% на нагрузках свыше 75%.

Следует отметить, что после реконструкции за осенне-зимний период на котле не было ни одного аварийного останова по причине разрыва экранных труб. До замены горелок такие аварии происходили регулярно. Структура факела горелок не имеет локальных зон высоких температур, генерирующих высокие локальные тепловые потоки на экраны, что повысило надежность работы экранных труб.

ВЫВОДЫ

1. Реконструкция котла с установкой новой системы сжигания с горелками третьего поколения Zeeco Free Jet обеспечила снижение выбросов оксидов азота до 92 мг/м³ при 6% O_2 без применения рециркуляции дымовых газов.

2. Благодаря реконструкции котла эффективность его работы повысилась при сохранении надежной работы поверхностей нагрева топки.

3. Достигнутая концентрация выбросов NO_x свидетельствует о том, что требования по охране окружающей среды вполне выполнимы, причем без снижения технико-экономических показателей работы котла при относительно невысоких инвестиционных затратах.

4. Испытания, проведенные после реконструкции котла ГПЕ-430, показали, что имеются дополнительные резервы по снижению выбросов оксидов азота и доведению их значений до требований Гётеборгского протокола (83 мг/м³ при 6% O_2). При этом если восстановить схему рециркуляции

дымовых газов, то можно обеспечить еще более глубокое снижение выбросов NO_x .

5. Современные системы сжигания с низкими выбросами NO_x — это комплекс работ, значительную часть которых составляет инжиниринг, позволяющий в результате реконструкции снизить выбросы оксидов азота, повысить КПД и надежность работы котла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Паспорт** национального проекта “Экология”. Утв. президиумом Совета при Президенте РФ по стратегическому развитию и национальным проектам (протокол № 16 от 24.12.2018). Официальный сайт М-ва природных ресурсов и экологии РФ: www.mnr.gov.ru
2. **ИТС 38-2017**. Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии. Утв. 22.12.2017 Росстандартом (2929). Дата введения 01.07.2018. Официальный сайт Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет: www.gost.ru
3. **Парчевский В.М.** Эколого-экономическая оценка технологических методов снижения выбросов оксидов азота // Теплоэнергетика. 1993. № 1. С. 13–17.
4. **Актуальность** разработки и внедрения малоэмиссионных горелок нового поколения, обеспечивающих современные и перспективные требования по выбросам оксидов азота на энергетических котлах / В.Е. Михайлов, М.И. Сапаров, Н.А. Зройчиков, Д.Р. Григорьев, Н.С. Шестаков, Н.С. Клепиков, А.Э. Лейкам, А.М. Рокачевский, А.Ю. Недре, А.Н. Вивчар // Экологическое машиностроение. 2019. № 3. С. 56–63.
5. **Ионкин И.Л., Росляков П.В., Егорова Л.Е.** Классификация газомазутных котлов по характеристикам зоны активного горения для выбора воздухоохраных мероприятий // Теплоэнергетика. 2000. № 1. С. 69–74.
6. **Гётеборгский протокол 1999 г.** по борьбе с подкислением, эвтрофикацией и приземным озоном, разработанный для уменьшения подкисления, эвтрофикации и приземного озона путем установления потолочных значений выбросов для диоксида серы, оксидов азота, летучих органических соединений. (Протокол ратифицировали 25 стран и ЕС.) // https://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/pdf/abate.pdf
7. **Тепловой расчет котлов (нормативный метод)**. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998.
8. **Rule 4320**. Advanced emission reduction options for boilers, steam generators, and process heaters greater than 5.0 MMBtu/hr (RULE 4320 FAQs). (Adopted Oct. 16, 2008; Amended Dec. 17, 2020). <https://www.valleyair.org/rules/currentrules/r4320.pdf>
9. **Решение** проблемы выбросов оксидов азота в штате Калифорния (США) / Н.А. Зройчиков, Д.В. Шпаков, А.О. Никулин, В.Р. Котлер // Энергетика за рубежом. 2018. № 6. С. 44–47.
10. **ГОСТ 50831-95**. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования. Дата введения 01.01.1997.

Introduction of Burners with In-Furnace Flue Gas Recirculation at a Power Boiler

N. A. Zroychikov^{a,*}, D. R. Grigoriev^{b,**}, M. Gamburg^{c,***}, and A. V. Pay^{a,****}

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^b OOO Ecogor, Moscow, 115280 Russia

^c Zeeco Inc., Oklahoma, 74014 United States

*e-mail: zroychikovna@mpei.ru

**e-mail: grigoryev@ecogor.ru

***e-mail: Michael_Gamburg@zeeco.com

****e-mail: PaiAV@mpei.ru

Abstract—The results of the reconstruction of an E-500-13.8-560 KDT (TPE-430) boiler performed to reduce nitrogen oxide (NO_x) emissions are discussed. In this case, a NO_x concentration of 119 mg/m³ has been reached only by using new burner devices. It has been demonstrated that the applicable environmental legislation contains a set of measures having a considerable effect on the current and planned business activities of the thermal power industry and power machine building enterprises. A brief description of the boiler is presented. Challenging issues of its operation are considered, and the operating and investment expenditures are analyzed. The thermal design of the boiler is assessed. The available burner devices with ultralow emissions are considered, and their best option has been selected. It has been demonstrated that successful implementation of the project requires special engineering activities to be performed before replacing the burners in the boilers to optimize the design and parameters of the air path. To construct a model of the air path, on-site studies of the air ducts of the TPE-430 boiler were carried out. On the basis of the obtained data, a physical model of the air path was made of plexiglass air. It was blown with cold air whose flow was visualized using helium soap microbubbles. The results of the physical simulation were used to arrange the annular ducts from the manifold to the new burners and to determine location and size of structural members to be installed in air ducts and burner boxes to achieve the required uniformity of the air flow.

Keywords: boiler, combustion chamber, burners, fuel, flue gases, ecology, standard emissions, nitrogen oxides, thermal design calculations, physical model, reconstruction, production localization