

DOI: 10.21122/1029-7448-2016-59-3-249–259

УДК 621.182

Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности

П. М. Гламаздин¹⁾, Д. П. Гламаздин¹⁾, Ю. П. Ярмольчик²⁾

¹⁾Киевский национальный университет строительства и архитектуры
(Киев, Республика Украина),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016
Belarusian National Technical University, 2016

Реферат. Для котлов серий ПТВМ и КВГМ характерны высокие значения выбросов NO_x и CO в продуктах сгорания. Снижение содержания NO_x и CO возможно двумя путями: устройством на выходе из котлов конденсационных теплоутилизаторов и совершенствованием процессов теплопереноса в топках котлов. Применение теплоутилизаторов порождает проблемы с загрязнением образующегося конденсата слабо концентрированными кислотами. Авторы провели исследования с целью выяснения эффективности примененных ранее методов подавления выбросов оксидов азота на указанных типах котлов. На всех модернизированных объектах использовался прием выравнивания температурного поля и соответственно интенсификации теплообмена в топке путем замены горелок на более совершенные, конструкция которых позволяет снижать эмиссию оксидов азота. Проведенные исследования показали, что снижение уровня эмиссии NO_x в водогрейных котлах большой мощности вполне возможно путем их модернизации. Разработан проект модернизации котла ПТВМ-30, который реализован в крупной котельной в г. Винница (Украина). Проект включал несколько технических решений. Шесть горелок заменены на две, расположенные в поду, также демонтирован подовый экран. При этом уменьшение общей площади поверхностей нагрева за счет исключения подового экрана компенсировалось за счет заполнения мест расположения шести амбразур штатных горелок на боковых экранах выпрямленными экранными трубами. Установка горелок отдельно от экранов позволила исключить передачу вибрации на экранные трубы и через них на обмуровку котла. Автоматика предусматривала «связанное регулирование». Тягодутьевые машины оснащены частотными регуляторами. Во время пусконаладочных работ на котле проведены исследования, связанные с выявлением зависимости уровня эмиссии от формы температурного поля в топке, в частности от интенсивности крутки газозооной смеси на выходе из горелок. Исследованы два крайних случая – при максимально достижимой на горелке крутке 45° и без крутки. В результате экспериментов отмечено, что при уменьшении крутки уровень эмиссии оксидов азота снижается. Определены методы дальнейшего снижения выбросов оксидов азота: устройство системы рециркуляции дымовых газов путем их подмешивания в дутьевой воздух; ведение процесса при пониженных избытках воздуха с контролируемым химическим

Адрес для переписки

Гламаздин Павел Михайлович
Киевский национальный университет
строительства и архитектуры
просп. Воздухофлотский, 31,
03680, г. Киев-037, Республика Украина
Тел.: +380 44 241-55-80
knuba@knuba.edu.ua

Address for correspondence

Glamazdin Pavel M.
Kiev National University
of Construction and Architecture
31 Povitroflotsky Ave.,
03680, Kiev-037, Republic of Ukraine
Tel.: +380 44 241-55-80
knuba@knuba.edu.ua

недожогом, когда полное окисление углерода до CO_2 заканчивается вне топки на начальном участке конвективной части; увлажнение дутьевого воздуха в количестве 1,5–2,0 % от номинальной производительности котла.

Ключевые слова: эмиссия, оксиды азота, топка, горелка, температурное поле, эксперимент, крутка, газозоуддушная смесь

Для цитирования: Гламаздин, П. М. Экологические аспекты модернизации водогрейных котлов большой мощности / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин, Ю. П. Ярмольчик // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 3. С. 249–259

Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers

P. M. Glamazdin¹, D. P. Glamazdin¹, Yu. P. Yarmolchick²

¹Kiev National University of Construction and Architecture (Kiev, Republic of Ukraine),

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Boilers of KVGМ and PTVM series are characterized by high values of NO_x and CO content in the combustion products. Reduction of NO_x and CO content can be achieved by two ways: by installing the condensing heat recovery unit at the boiler outlet and by improving the heat and mass transfer processes in boiler furnaces. Application of the condensing heat recovery units causes pollution of resulting condensate by low-concentration acids. The authors conducted a study in order to determine the effectiveness of the previously applied methods of suppressing the emission of nitrogen oxides in the boilers of these types. Equalization of the temperature field and, consequently, enhancement of heat transfer in the furnace by substitution the used burners by the more advanced ones, the design of which facilitates reduction the emission of nitrogen oxides, were applied to all the upgraded facilities. The studies fulfilled demonstrate that a reduction of NO_x emissions in water-heating high power boilers is fairly possible by means of modernization of the latter. The authors have developed the project of the PTVM-30 boiler modernization, which was implemented at a large boiler plant in the city of Vinnitsa (Ukraine). The project included a number of technical solutions. Six burners were replaced by the two ones that were located in the hearth; also the hearth screen was dismantled. At the same time, reducing the total surface area of the heating caused by the exclusion of hearth screen was compensated by filling the locations of the six embrasures of staff burners on the side screens with straightened furnace tubes. Installing the burners separate from the screen made it possible to eliminate the transfer of vibration to the furnace tubes, and – via them – to the boilers setting. Automation provided “associated regulations”. Draught machines were equipped with frequency regulators. During commissioning of the boiler the studies were carried out that related to the identification of dependency of the emission level on the shape of the temperature field in the furnace, in particular, – on the intensity of twist of gas-air mixture at the exit from the burner. We studied two extreme cases, i.e. the case of the maximum achievable level of burner twist that is equal to 45° and the case of no twist. As a result of experiments, it was observed that if a decrease of the twist rate takes place the emission of nitrogen oxides is reduced. The methods of further reduction of emissions of nitrogen oxides have been determined, viz. the device recirculation of flue gases by mixing them in a blast air; conducting the process at low excess of air with controlled chemical underburning when complete oxidation of carbon to CO_2 accomplishes outside the furnace at the initial section of the convection part; hydration of blowing air into the humidification amount of 1.5–2.0 % of the nominal output of the boiler.

Keywords: emissions, nitrogen oxides, furnace, burner, temperature field, experiment, twist, gas-air mixture

For citation: Glamazdin P. M., Glamazdin D. P., Yarmolchick Yu. P. (2016) Environmental Aspects of Modernization of High Power Water-Heating Boilers. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 59 (3), 249–259 (in Russian)

В Украине и Беларуси, как и в других странах, образовавшихся после распада СССР и Совета экономической взаимопомощи, большая часть районов в городах снабжается теплотой посредством системы централизованного теплоснабжения (СЦТ). Источником теплоты для СЦТ являются либо теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), либо крупные отопительные котельные. И в одном и в другом случае используются мощные водотрубные водогрейные котлы в качестве основных источников теплоты или как пиковые. Котлы применяются в основном двух типов – серий ПТВМ и КВГМ, которые работают на природном газе (резервное топливо – мазут). Во время их проектирования и производства проблемы экологии не стояли так остро, как в настоящее время, поэтому для этих типов котлов характерны высокие значения выбросов NO_x и CO в продуктах сгорания, особенно для котлов типа ПТВМ (NO_x до 350–400 мг/м³).

Несмотря на ускорение развития альтернативной энергетики и увеличение доли возобновляемых источников энергии, «Дорожная карта Европейского союза по энергетике до 2050 г.» сохраняет за природным газом не менее 25 % в тепловом балансе ЕС [1]. Исходя из этого в ряде стран принимаются программы по снижению вредных выбросов, в том числе при сжигании горючих газов. Например, в 2015 г. в Украине принята программа повышения экологических характеристик теплогенерирующего оборудования большой мощности [2], что заставляет теплоэнергетические предприятия обратить более серьезное внимание на эту проблему.

Принципиальное снижение содержания NO_x и CO возможно двумя путями: устройством на выходе из котлов конденсационных теплоутилизаторов и совершенствованием процессов тепломассопереноса в топках котлов.

Устройство теплоутилизаторов с конденсацией содержащихся в продуктах сгорания водяных паров разрабатывалось еще в 60–80-е гг. прошлого века [3]. Этот способ принципиально не уменьшает количества вредных соединений, генерируемых в процессе сжигания органических топлив, а только предотвращает их попадание в атмосферный воздух. В результате применение теплоутилизаторов порождает проблемы с загрязнением образующегося конденсата, в котором растворяются оксиды азота, серы и углерода, превращая его в смесь нескольких кислот низкой концентрации [4]. Проблема надежной нейтрализации кислого конденсата при больших его количествах (до 5 т/ч и более) [5] до сих пор не имеет простого и надежного решения.

В СССР проблемой совершенствования тепло- и массообменных процессов с целью уменьшения генерирования в топках котлов оксидов азота и бензопирена занимались несколько исследовательских институтов (ВТИ, ЭНИН, ЦКТИ, ХФЦКБ, ИГАНУССР, СредАЗНИИГАЗ). Результаты их исследований опубликованы в научных статьях и монографиях [6–10]. Обобщая приведенные в этих источниках данные, можно выделить несколько направлений подавления образования оксидов азота в топках котлов:

- рециркуляцию дымовых газов в зону горения;
- ступенчатое и нестехиометрическое сжигание топлива;
- совершенствование конструкции горелок;
- оптимизацию места установки горелок в топке;
- интенсификацию теплообмена в топках;
- комбинированные методы.

Однако большая часть исследований проведена применительно к мощным энергетическим паровым котлам, предназначенным для обеспечения перегретым паром теплосиловых установок, работающих по циклу Ренкина. Условия эксплуатации и, следовательно, конструкция этих котлов значительно отличаются от условий эксплуатации водогрейных котлов. Только одно из исследований в приведенных источниках было посвящено оптимизации расположения горелок в топках водогрейного котла ПТВМ-50 [10].

Исследованиям процессов образования оксидов азота в водогрейных котлах малой и средней мощности посвящены работы [11, 12]. В [11] показано увеличение образования оксидов при повышении нагрузки котлов серий ДКВр и НРч-25, что совпадает с данными, приведенными в [6–10]. В [12] выявлено, что увеличение степени рециркуляции сверх определенного значения приводит к росту недожога, связанного с отсутствием в котлах такого типа конвективных поверхностей нагрева, наличие которых снижает этот отрицательный эффект.

В связи с гораздо более жесткими требованиями к уровню выбросов при сжигании органического топлива проблема снижения вредных выбросов возникла на территории бывшей ГДР при объединении Германии, а затем и в государствах Восточной Европы и Прибалтики по мере их вхождения в Евросоюз. Во всех этих странах эксплуатировались котлы серий ПТВМ и КВГМ большой мощности, где не стали заменять существующие котлы новыми, а модернизировали их, применяя перечисленные выше методы или их комбинации. Авторы провели специальное исследование с целью выяснения эффективности методов подавления выбросов оксидов азота. При этом использовали информацию от производителей горелок, которые устанавливались на котлах вместо штатных горелок ныне не существующей фирмы «Ильмарине» (Таллинн, Эстония), а также полученная авторами непосредственно на отопительных котельных или ТЭЦ, где модернизировались котлы.

В середине 1990-х гг. в городах Росток и Дрезден (ГДР) модернизированы котлы ПТВМ-100 путем замены 16 штатных горелок на шесть горелок большей мощности фирмы SAACKE (Германия), установленных на фронте котла в два яруса. На каждом ярусе использовано по одному дутьевому вентилятору. Кроме того, экраны в топке котла проварены специальными проставками, таким образом они преобразованы в мембранные газоплотные. Башенная компоновка изменена на обычную П-образную с использованием дымососа. В результате этих изменений в конструкции котла была достигнута величина выбросов NO_x менее 150 мг/м^3 , что удовлетво-

ряло тогда европейским нормам. В это же время в г. Шверин (Германия) был модернизирован котел ПТВМ-50 путем замены 12 штатных горелок на две новые горелки производства фирмы RAY (Германия), расположенные также одна под другой на фронте котла. В остальном модернизация была проведена в том же объеме. В конце 1990-х гг. в г. Секешфехервар (Венгрия) на двух котлах ПТВМ-30 заменили шесть штатных горелок на три горелки фирмы Weishaupt (Германия), расположенные в поду топки. Объем модернизации включал также перевод экранов топки в газоплотные мембранные.

При модернизации котлов во всех трех случаях заменена облегченная обмуровка на легкую из волокнистых теплоизоляционных материалов, покрытых сверху металлическим сайдингом, а также использован прием выравнивания температурного поля и соответственно интенсификации теплообмена в топке. Кроме того, конструкция горелок предполагала меньшую эмиссию оксидов азота. Таким образом, везде использована комбинация из двух методов. Более того, двухъярусное расположение горелок в котлах ПТВМ-100 и ПТВМ-50 позволило реализовать двухступенчатое горение.

В начале 2000-х гг. в Софии (Болгария) произведена модернизация котла ПТВМ-100 с увеличением его мощности до 120 Гкал/ч путем увеличения площади топочных экранов и устройства новой конвективной части с переходом от башенной компоновки к П-образной. При этом 16 штатных горелок были заменены на четыре более мощные производства фирмы Oilon (Финляндия). Горелки расположены на противоположных стенках топки по две в двух ярусах. Ярусы находятся на разной высоте, и горелки направлены под углом к поду топки [13]. Таким образом в этом случае реализована комбинация из трех методов подавления NO_x : выравнивание и интенсификация температурного поля в топке; использование горелок с конструкцией, обеспечивающей генерирование меньшего количества NO_x (так называемого эмиссионного класса LowNO_x) и возможность ступенчатого сжигания топлива с пониженными коэффициентами избытка воздуха.

В середине 2000-х гг. в соответствии с ужесточением европейских норм на котлах ПТВМ-100 и ПТВМ-50 произведена дополнительная реконструкция, заключающаяся в организации рециркуляции дымовых газов в топку котла. В результате эмиссия NO_x в этих котлах снижена до уровня новых норм – меньше 100 мг/м^3 . В данный период реконструирован третий котел ПТВМ-30 в г. Секешфехервар (Венгрия). В поду котла установлена одна горелка фирмы SAACKЕ (Германия), которая обеспечивала пониженные выбросы NO_x . Топочные экраны также преобразованы в газоплотные.

Во всех случаях полностью заменялась газовая арматура под европейский стандарт EN 676 [14] и система автоматического управления горелками по алгоритму так называемого «связанного регулирования».

В 2000-е гг. страны Прибалтики, в которых кроме котлов серии ПТВМ используются также котлы более поздней серии КВГМ, имеющей другую компоновку, также начали реализовывать программы модернизации ко-

тельного оборудования. Для котлов серии ПТВМ здесь применяли самые простые методы – замену некоторых горелок на новые или вообще модернизацию горелок в части установки устройств автоматического розжига и новых приборов контроля наличия пламени. Именно так преобразован один из котлов ПТВМ-100 в г. Таллине (Эстония), где все 16 горелок были оставлены на месте. Рядом, в той же котельной, работает такой же котел, но на нем вместо штатных горелок установлены четыре горелки фирмы Hamworthy (Великобритания) – на каждой из двух противоположных стенок топки по две горелки на разных уровнях под углом вниз.

В г. Алитус (Литва) произведена модернизация котла ПТВМ-50 путем замены всего четырех штатных горелок на новые горелки фирмы Pillard (Франция), расположенные по две с двух сторон на верхнем ярусе. Во всех случаях в обязательном порядке менялось газовое оборудование под стандарт EN 676 и устанавливалась новая система автоматического управления.

Примеры прямой замены горелок имеются в Российской Федерации – в Санкт-Петербурге произведена модернизация котла ПТВМ-30 путем замены шести штатных горелок на шесть горелок фирмы RAY (Германия) [15].

Котлы серии КВГМ имеют меньшее число штатных горелок: от одной – для котлов мощностью до 30 Гкал/ч включительно; до трех – для котлов КВГМ-100. Их модернизация производится в основном путем прямой замены горелок, количество которых либо остается прежним (при использовании горелок фирмы SAACKE), либо увеличивается (например, для котла КВГМ-10 в Латвии использовали две горелки фирмы ELKO (Германия) вместо одной штатной, а на ТЭЦ-2 в Риге на котле КВГМ-100 установлены четыре горелки фирмы TODD (США) вместо трех штатных, что связано со слишком большими длинами факелов горелок большой мощности, необходимых для прямой замены) [16].

В этих случаях для удовлетворения требований по эмиссии NO_x использовались горелки в специальном исполнении LowNO_x , которые имеются в перечне продукции всех ведущих производителей.

Проведенные исследования показали, что снижение уровня эмиссии NO_x в водогрейных котлах большой мощности вполне возможно путем их модернизации. Последняя не обязательно должна заключаться в замене горелок на новейшие и очень дорогие горелки с пониженной эмиссией NO_x . Предпочтительно осуществлять комплексный подход, т. е. применить несколько методов одновременно, что позволит использовать менее дорогие горелки и снизить общие расходы на модернизацию.

Авторами разработан проект модернизации котла ПТВМ-30, который реализован в крупной котельной в г. Виннице (Украина). Проект включал несколько технических решений. Шесть горелок заменены на две, расположенные в подду. В отличие от проектов, реализованных в г. Секешфехервар (Венгрия), горелки не крепили к трубной части, а устанавливали на специальном постаменте, из-за чего пришлось вообще убрать подовый экран и по-новому обвязать нижние коллекторы вертикальных топочных экранов. При этом уменьшение общей площади поверхностей нагрева за счет исключения подового экрана компенсировалось заполнением мест распо-

ложения шести амбразур штатных горелок на боковых экранах выпрямленными экранными трубами. Установка горелок отдельно от экранов позволила исключить передачу вибрации на экранные трубы и через них на обмуровку котла. Газовая аппаратура скомпонована согласно стандарту Европейского союза EN 676, автоматика предусматривала «связанное регулирование». Тягодутьевые машины не заменялись, но были дооснащены частотными регуляторами. Целью проекта, осуществленного в 2011 г., была полная автоматизация работы котла и повышение его КПД [17]. Экологические характеристики не ограничивались тогда так строго, как требует новый нормативный документ [2]. Приемлемым уровнем была определена концентрация NO_x не выше 250 мг/м^3 , до модернизации уровень эмиссии NO_x от котла достигал 360 мг/м^3 при коэффициенте избытке воздуха $\alpha \approx 1,25$, а температура уходящих газов составляла 190°C .

Во время пусконаладочных работ на котле проведены некоторые исследования, связанные с выявлением зависимости уровня эмиссии от формы температурного поля в топке, в частности от интенсивности крутки газозвоздушной смеси на выходе из горелок. Согласно [18], крутка показывает изменение момента количества движения газозвоздушной смеси на выходе из устья горелки, т. е. это мера закрученности потока. Исследованы два крайних случая: при максимально достижимой на горелке крутке 45° (максимальный угол наклона лопаток в установленной горелке) и без крутки (при 0° горелка становится прямоточной). И в том и в другом случае недожог практически отсутствовал (концентрация CO в дымовых газах была в пределах 10 ppm). Для измерения состава продуктов сгорания использовался газоанализатор Testo 300 (Германия). В результате экспериментов отмечено, что эмиссия NO_x в исследованных случаях угла крутки происходила совершенно по-разному. Как и в исследованиях [6–10], с повышением нагрузки эмиссия NO_x возрастала. Однако скорости этого роста значительно отличались (рис. 1).

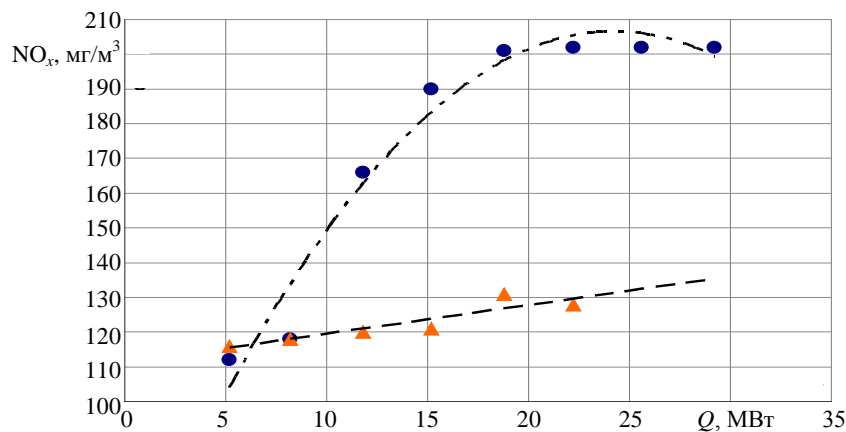


Рис. 1. Зависимость концентрации оксидов азота от мощности при различных крутках:

● – 45° ; ▲ – 0°

Fig. 1. The nitrogen oxides concentration vs boiler power at different twists:

● – 45° ; ▲ – 0°

Слишком большая крутка приводит к образованию в нижней части топки зоны с повышенной температурой, в которой активно генерируются оксиды азота. Превышение эмиссии оксидов азота по сравнению с прямоточным режимом составляет более 50 %. Реализовать режимы с большей нагрузкой, чем показано на рисунке, без крутки на прямоточном режиме работы горелки не удалось из-за опасения, что факел начнет достигать фестона. Однако и так стало очевидно, что при уменьшении крутки эмиссия оксидов азота снижается. Реконструированный котел находился в эксплуатируемой котельной, и проводить дальнейшие натурные эксперименты не представлялось возможным. Крутка была уменьшена наполовину, и в результате максимальная концентрация NO_x на выходе составила 175 мг/м^3 , что вполне удовлетворило заказчика. Нужно отметить, что согласно паспортным данным минимальная эмиссия NO_x для использованных горелок SG-150 фирмы SAACKE в обычном исполнении гарантируется в пределах 200 мг/м^3 . Это свидетельствует о том, что уровень выбросов от котла зависит не только от конструкции горелки, но и от оптимального для данной топки их расположения. В результате реконструкции получены и другие положительные эффекты. Значительно расширен диапазон нагрузок со стороны уменьшения. Поскольку горелки включены в каскаде, минимальная нагрузка котла при работе одной горелки составляет 2,5 МВт, что соответствует ночной нагрузке на горячее водоснабжение в летнее время, когда разбор воды практически отсутствует и система работает в режиме циркуляции. Котел работает полностью в автоматическом режиме либо реализуя погодное регулирование, либо регулирование по температуре теплоносителя на выходе из котла по командам, задаваемым диспетчером. Достигнута экономия электроэнергии на привод тягодутьевых машин в пределах 30 %. КПД котла – 92,5–94 % на всех режимах. Пуск котла осуществляется одним нажатием кнопки. При малых нагрузках летом, когда котел работает один на трубу высотой 100 м, рассчитанную на работу трех котлов, дымосос автоматически отключается и разрежение в топке поддерживается шибером с сервоприводом.

Компьютерное моделирование температурного поля в топке котла, проведенное авторами [19], подтвердило, что при различной нагрузке крутка должна быть разной, чего можно добиться, изменив конструкцию горелок. Изменение крутки в соответствии с изменением нагрузки позволит выровнять тепловое напряжение в топке по площади Q_F на различной высоте и сгладить за счет этого рост эмиссии NO_x с ростом нагрузки. Вертикальное расположение факела снизу-вверх способствует выравниванию Q_F . Коэффициент заполнения топки факелом при этом приближается к единице. Попытки создания подобных горелок производились и ранее. Предлагалось, например, использовать горелки ВНИИМГ-Д мощностью до 22,5 МВт с регулируемой длиной факела и очень широким диапазоном регулирования [20].

С выходом новых, более жестких требований к наличию NO_x в уходящих газах авторы проекта столкнулись с необходимостью повторно модернизировать котел. Аналогичная ситуация возникла на ТЭЦ в Ростове и Дрездене (Германия) в 2005 г. Собственно, и пути решения проблемы

аналогичны. Для дальнейшего уменьшения выбросов без замены горелок можно использовать разные методы или их комбинации. Простейший метод – устройство системы рециркуляции дымовых газов путем их подмешивания в дутьевой воздух. Дорогобужский котельный завод даже анонсировал выпуск специальной горелки, рассчитанной на использование рециркуляции дымовых газов [21]. При необходимости еще более глубокого снижения NO_x можно использовать ведение процесса при пониженных избытках воздуха с контролируемым химическим недожогом, когда полное окисление углерода до CO_2 заканчивается уже вне топки на начальном участке конвективной части [22]. Наконец, можно еще больше снизить выбросы NO_x путем увлажнения дутьевого воздуха в количестве 1,5–2,0 % от номинальной производительности котла [23].

ВЫВОД

Неизбежное ужесточение требований к экологическим характеристикам водогрейных и паровых котлов в системе централизованного теплоснабжения не обязательно должно вести к их замене. Имеется ряд способов снижения вредных выбросов в атмосферу, основанных на положительных результатах экспериментальных исследований и опробованных в условиях эксплуатации. При выборе набора методов предварительно необходимо произвести численное исследование температурного поля в топке котла, подлежащего реконструкции, с целью определения количества и места расположения горелок. При необходимости замены горелок не обязательно использовать самые дорогие горелки типа LowNO_x 3-го эмиссионного класса [24]. Можно обойтись более простыми и дешевыми горелками, а глубокого подавления эмиссии оксидов азота достичь, используя другие, менее затратные способы, включая методы режимной наладки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гелетуха, Г. Г. Аналіз основних положень дорожньої карти ЄС з енергетики до 2050 року / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железка, А. І. Дроздова // Промислова теплотехніка. 2012. Т. 34, № 5. С. 64–69.
2. Національний план скорочення викидів від великих опалювальних установок (Кінцевий Проект) [Електронний ресурс]. 2015. Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>. Дата доступу: 23.01.2016.
3. Примак, А. В. Методы и аппараты снижения выбросов азота в энергоустановках / А. В. Примак, А. И. Сигал. Киев: Наук. думка, 1989. 44 с.
4. Жуков, Е. Теплообменники конденсационных котлов / Е. Жуков // Аква-Терм. 2013. № 2. С. 10–13.
5. Седлов, А.С. Получение конденсата из уходящих дымовых газов на экспериментальной установке ОАО ГРЭС-24 / А. С. Седлов, А. П. Солодов, Д. Ю. Бухонов // Энергосбережение и водоподготовка. 2006. № 5. С. 76–77.
6. Найденов, Г. Ф. Горелочные устройства и защита атмосферы от оксидов азота / Г. Ф. Найденов. Киев: Техніка, 1979. 96 с.
7. Внуков, А. К. Надежность и экономичность котлов для газа и мазута / А. К. Внуков. М.; Л.: Энергия, 1966. 368 с.
8. Найденов, Г. Ф. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках / Г. Ф. Найденов. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
9. Павлов, В. А. Условия оптимизации процессов сжигания жидкого топлива и газа в энергетических и промышленных установках / В. А. Павлов, И. Н. Штейнер. Л.: Энергоатомиздат, 1984. 120 с.

10. Кривоногов, Б. М. Повышение эффективности сжигания газа и охрана окружающей среды / Б. М. Кривоногов. Л.: Недра, 1986. 280 с.
 11. Шматов, Е. П. Исследования влияния рециркуляции продуктов сгорания природного газа в топку котла на его теплотехнические характеристики / Е. П. Шматов // Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания: межвуз. сб. трудов. Л.: ЛИСИ, 1976. № 1. С. 40–43.
 12. Исследование условий образования оксидов азота в топке чугунного секционного котла при рециркуляции продуктов сгорания природного газа / Е. П. Шматов [и др.] // Совершенствование сжигания газа и мазута в топках котлов и снижение вредностей в продуктах сгорания: межвуз. сб. трудов. Л.: ЛИСИ, 1983. № 7. С. 33–37.
 13. Щукин, К. Реконструкция котла ПТВМ-100 с заменой горелок / К. Щукин // Аква-Терм. 2009. № 6. С. 20–21.
 14. The European Union Standard: EN 676: 2003 Automatic Forced Draught Burners for Gaseous Fuels [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: http://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/appliances-burning-gaseous-fuels/index_en.htm. Дата доступа: 23.01.2016.
 15. Высокие технологии для вашего успеха. Модернизация российских котлов ПТВМ, КВГМ, ДЕ, ДКВР. Презентационные материалы компании NORD-Крафт, Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. 2015. Режим доступа: <http://www.nordkraft.ru/modernizaciya.html>. Дата доступа: 23.01.2016.
 16. Жигурс, А. Опыт АО «Ригас-Силтунс» в реконструкции водогрейных котлов КВГМ-50 и КВГМ-100 / А. Жигурс, А. Царс, С. Плескачев // Новости теплоснабжения. 2009. № 4. С. 34–39.
 17. Гламаздин, П. М. Досвід модернізації водогрійних котлів ПТВМ-30 / П. М. Гламаздин, Д. П. Гламаздин // Житлово-комунальне господарство України. 2012. № 9 (52). С. 59–61.
 18. Зельдович, Я. Б. Теория горения и детонации газов / Я. Б. Зельдович. М.: Изд-во АН СССР, 1944. 312 с.
 19. Гламаздин, Д. П. Влияние температурного поля в топке котла на его экологические характеристики / Д. П. Гламаздин, П. М. Гламаздин // Вентиляция, освещение и теплогазоснабжение. 2011. Вып. 15. С. 78–81.
 20. Горелки длиннопламенные и с регулируемой длиной факела для природного газа / А. В. Арсеньев [и др.]. М.: ВНИИЭгазпром, 1973. 40 с. (Использование газа в народном хозяйстве).
 21. Барабаш, В. В. Опыт реконструкции и модернизации водогрейных котлов / В. В. Барабаш // Новости теплоснабжения. 2004. № 9. С. 35–37.
 22. Росляков, П. В. Контролируемый химический недожог – эффективный метод снижения выбросов оксидов азота [Электронный ресурс] / П. В. Росляков, И. Л. Ионкин, Л. Е. Егорова. Режим доступа: http://www.analitech.ru/files/Controlled_chemical_underburning.pdf. Дата доступа: 23.01.2016.
 23. Янкевич, В. И. Наладка газомазутных промышленных котельных / В. И. Янкевич. М.: Энергоатомиздат, 1988. 216 с.
 24. Hübner, C. Emissions of Oil and Gas Appliances and Requirements in European Standards / C. Hübner, R. Boos. Vienna: Austrian Energy Report, 1998. P. 56–59.
- Поступила 25.01.2016 Подписана в печать 28.03.2016 Опубликовано онлайн 03.06.2016

REFERENCES

1. Geletukha G. G., Zhelezka T. A., Drozdova A. I. (2012) Analysis of the Main Provisions of the Roadmap of the EU in the Energy Sector up to 2050. *Promislova Teplotekhnika* [Industrial Thermotechnics], 34 (5), 64–69 (in Ukrainian).
2. *National Plan to Reduce Emissions from the High Flame Plants. Final Draft* (2015) Available at: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/doccatalog/document?id=244996332>. (Accessed 23 January 2016) (in Ukrainian).
3. Primak A. V., Sigal A. I. (1989) *Methods and Apparatus for Reducing Nitrogen Emissions in Power Plants*. Kiev, Naukova Dumka. 44 (in Russian).
4. Zhukov E. (2013) Heat Condensing Boilers. *Akva-Term* [Aqua-Therm], (2), 10–13 (in Russian).
5. Sedlov A. S., Solodov A. P., Buhonov D. Yu. (2006) Obtaining Condensate from Flue Gases in a Pilot Plant of TPP-24. *Energoberezhenie i Vodopodgotovka* [Energy-Saving and Water Treatment], (5), 76–77 (in Russian).

6. Naydenov G. F. (1979) *Burners and Protection of the Atmosphere from Nitrogen Oxides*. Kiev, Tehnika. 96 (in Russian).
7. Vnukov A. K. (1966) *Reliability and Cost Efficiency of Boilers for Gas and Oil*. Moscow-Leningrad, Energia. 368 (in Russian).
8. Naydenov G. F. (1982) *Improving the Efficiency of the use of Gas and Oil in Power Plants*. Moscow, Energoizdat. 240 (in Russian).
9. Pavlov V. A., Steiner I. N. (1984) *Conditions of Optimization of Processes of Combustion of Liquid Fuels and Gas in Power and Industrial Plants*. Leningrad, Energoatomizdat. 120 (in Russian).
10. Krivonogov B. M. (1986) *Improving of the Efficiency of the Gas Combustion and the Environmental Protection*. Leningrad, Nedra. 280 (in Russian).
11. Shmatov E. P. (1976) Studies of the Effect of Recycling the Products of Natural Gas Combustion in the Boiler Furnace on its Thermal Performance. *Sovershenstvovanie Szhiganiya Gaza i Mazuta v Topkakh Kotlov i Snizhenie Vrednostei v Produktah Sgoraniya. Mezhvuzovskiy Sbornik Trudov* [Improvement of the Gas and Heavy Oil Burning in Boilers and Reducing Hazards in the Combustion Products. Interuniversity Collection of Works]. Leningrad, Leningrad Institute of Civil Engineering, (1), 40–43 (in Russian).
12. Shmatov E. P., Krivonogov B. M., Shelin A. V., Rosenberg A. A. (1983) Study the Conditions of Formation of Nitrogen Oxides in the Furnace of Cast Iron Sectional Boiler During the Recirculation of Natural Gas Combustion Products. *Sovershenstvovanie Szhiganiya Gaza i Mazuta v Topkakh Kotlov i Snizhenie Vrednostei v Produktah Sgoraniya. Mezhvuzovskiy Sbornik Trudov* [Improvement of the Gas and Heavy Oil Burning in Boilers and Reducing Hazards in the Combustion Products. Interuniversity Collection of Works]. Leningrad, Leningrad Institute of Civil Engineering, (7), 33–37 (in Russian).
13. Shchukin K. (2009) Reconstruction of the PTVM-100 Boiler with Replacement of Burners. *Akva-Term* [Aqua-Therm], (6), 20–21 (in Russian).
14. *The European Union Standard: EN 676: 2003 Automatic Forced Draught Burners for Gaseous Fuels*. Available at: http://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards/appliances-burning-gaseous-fuels/index_en.htm. (Accessed: 23 January 2016).
15. *High-Tech for Your Success. Modernization of Russian Boilers of PTVM, KVGM, DE, DKVR. Presentation Materials of the NORD-Kraft Company, St. Petersburg*. Available at: <http://www.nordkraft.ru/modernizaciya.html>. (Accessed: 23 January 2016) (in Russian).
16. Zhigurs A., Tsars A., Pleskachev S. (2009) Experience of “Rigas-Siltuns” JSC in Reconstruction KVGM-50 and KVGM-100 Water-Heating Boilers. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (4), 34–39 (in Russian).
17. Glamazdin P. M., Glamazdin D. P. (2012) Research of the PTVM-30 Water-Heating Boilers Modernization. *Zhitlovo and Communal Gospodarstva* [Housing and Utilities], 52 (9), 59–61 (in Ukrainian).
18. Zeldovich Ya. B. (1944) *Theory of Combustion and Detonation of Gases*. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences. 312 (in Russian).
19. Glamazdin D. P., Glamazdin P. M. (2011) Effect of Temperature Field in the Furnace of the Boiler on its Environmental Characteristics. *Ventilyatsiya, Osveschenie i Teplogazosnabzhenie* [Ventilation, Lighting and Heat & Gas Supply], (15), 78–81 (in Russian).
20. Arsenev A. V., Maslov V. M., Vintovkin A. A., Druzhinin G. M. (1973) *Long-Flame Burners and the Burners with the Adjustable Length of the Torch for Natural Gas*. Moscow, VNMMEgazprom. 40 (in Russian).
21. Barabash V. V. (2004) Experience of Reconstruction and Modernization of Boilers. *Novosti Teplosnabzheniya* [News of Heat Supply], (9), 35–37 (in Russian).
22. Roslyakov P. V., Ionkin I. L., Egorova L. E. (2015) *Controlled Chemical Underburning as an Effective Method of Reducing Emissions of Nitrogen Oxides*. Available at: http://www.analitech.ru/files/Controlled_chemical_underburning.pdf. (Accessed 23 January 2016) (in Russian).
23. Yankelevich V. I. (1988) *Gas-Oil Industrial Boiler Adjustment*. Moscow, Energoatomizdat. 216 (in Russian).
24. Hübner C., Boos R. (1998) *Emissions of Oil and Gas Appliances and Requirements in European Standards*. Vienna, Austrian Energy Report, 56–59.