

УДК 621.128

Снижение оксидов азота в топках котлов

А.В. Жуйков*

*Сибирский федеральный университет,
Россия 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79¹*

Received 2.12.2011, received in revised form 9.12.2011, accepted 16.12.2011

Изложены основные пути и методы снижения вредных газообразных выбросов в атмосферу от тепловых электрических станций и котельных, а так же способ снижения оксидов азота, внедренный на промышленной котельной г. Красноярска.

Ключевые слова: оксиды азота, тепловые электрические станции, котельные, выбросы в атмосферу.

Введение

Промышленные и отопительные котельные и тепловые электрические станции являются крупнейшими загрязнителями окружающей среды. Продукты сгорания топлив, сжигаемых на этих предприятиях, содержат вредные загрязняющие вещества, обладающие различной токсичностью. Из всех выбросов в атмосферу энергетическими предприятиями наиболее токсичны окислы серы, окислы азота и канцерогенные вещества.

В связи с возросшими в последние годы требованиями к охране окружающей среды борьба с токсичными выбросами в атмосферу приобрела особую актуальность.

Важнейшим мероприятием по снижению образования вредных веществ служит усовершенствование технологии сжигания топлива, посредством которого удастся снизить содержание вредных веществ на 10-40 %. Однако этого недостаточно для удовлетворения норм, введенных в ряде индустриально развитых стран. Указанное мероприятие эффективно в сочетании с очисткой газов.

Предлагаем краткий обзор основных путей и методов снижения вредных газообразных выбросов в атмосферу от ТЭС и котельных, а также метод по снижению NO_x , разработанный автором и внедренный на промышленной котельной г. Красноярска.

Методы исследования

Сжигание топлив с малыми избытками воздуха является одним из самых распространенных способов снижения выбросов окислов азота. Наибольшая эффективность достигается при сжигании с избытками воздуха $\alpha''_{\text{ин}} = 1,03 \div 1,05$. Зависимость концентрации NO_x от

* Corresponding author E-mail address: a.v.zhuikov@mail.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

коэффициента избытка воздуха имеет вид экстремальной кривой с максимумом в интервале $\alpha''_{\text{min}} = 1,1 \div 1,3$. Причем максимум NO_x соответствует, как правило, такому значению коэффициента избытка воздуха, при котором в данных условиях достигается наиболее полное сгорание топлива. В диапазоне $\alpha''_{\text{min}} = 1,1 \div 1,3$ обеспечивается достаточное количество свободного кислорода и достаточно высокий температурный уровень. Различие в местоположении и уровне максимумов концентраций NO_x определяется различиями в конструкциях горелочных устройств, топочных камер и др.

Однако низкие уровни избытка воздуха приводят к увеличению выбросов канцерогенных веществ, твердых частиц и окиси углерода, что противоречит требованиям защиты окружающей среды, а также в ряде случаев могут интенсифицировать высокотемпературную сульфидную коррозию экранов в топочной камере. Усовершенствованием горелочных устройств, обеспечивающих надежное регулирование расходов топлива и воздуха по горелкам и хорошее смешение топливовоздушной смеси, можно интенсифицировать процесс горения топлива и добиться значительного уменьшения БП (рис. 1): при этом максимальные значения концентрации NO_x остаются без изменения, но вся кривая зависимости NO_x (α''_{min}) сдвигается в область меньших избытков воздуха.

Таким образом, сжигание топлив с малыми избытками воздуха без значительных выбросов продуктов неполного сгорания возможно только при усовершенствовании горелочных устройств, позволяющих интенсифицировать процесс горения. Кроме того, большое значение при этом имеет устранение неорганизованных присосов в топку, так как подсосанный воздух участвует в дожигании факела с образованием дополнительного количества NO_x .

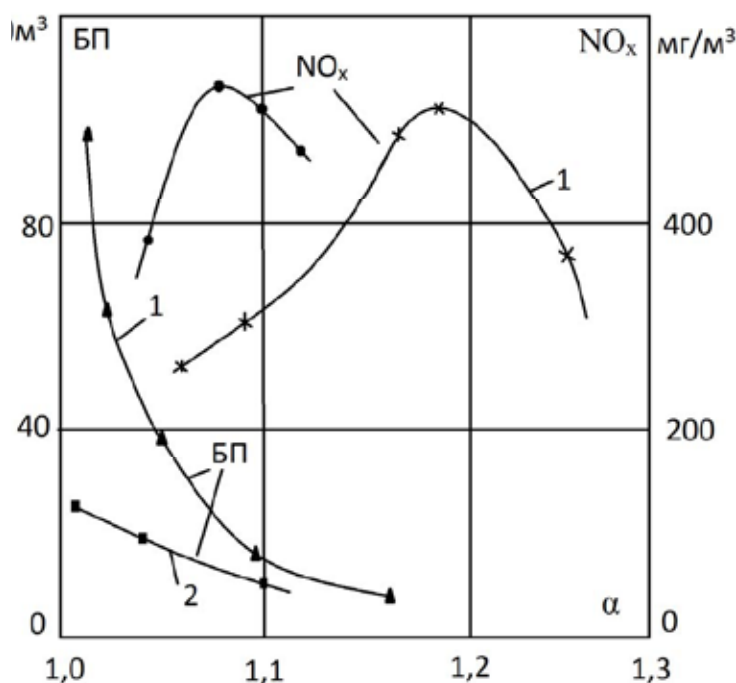


Рис. 1. Зависимость концентраций NO_x и БП от избытка воздуха (1 – обычная горелка; 2 – усовершенствованная горелка)

Рециркуляция продуктов сгорания включает в себя подвод топочных газов в зону горения, является эффективным средством снижения выброса NO_x . Уменьшение концентрации NO_x объясняется не столько низкой температурой рециркулирующих газов, сколько снижением температуры горения из-за уменьшения скоростей цепных реакций вследствие присутствия инертных газов и снижения концентраций реагирующих веществ. Большое количество современных котлов оборудовано различными схемами рециркуляции продуктов сгорания в зону горения. Исследования этих схем с точками отбора дымовых газов на рециркуляцию в диапазоне от 150 до 600 °С и ввод их в различные зоны показали, что наибольший эффект снижения образования оксидов азота достигается при попадании всего количества рециркулирующих газов в зону активного горения в случае полного их предварительного перемешивания с дутьевым воздухом (рис. 2). В этом смысле наибольшей эффективностью обладает ввод продуктов сгорания в воздухопроводы перед горелками или подача их в топку через отдельные каналы горелок (кривая 1, рис. 2). Ввод рециркулирующих газов через шлицы, расположенные под горелками (кривая 2, рис. 2), менее эффективен, а при вводе дымовых газов через шлицы в под топку (кривая 3, рис. 2) концентрация NO_x практически не меняется. В этих случаях основное сгорание топлива происходит прежде, чем рециркулирующие газы смешиваются с топливовоздушной смесью.

Организация рециркуляции продуктов сгорания в зону горения довольно дорогостоящее мероприятие, поскольку требует дополнительных капитальных затрат на установку дутьевого оборудования и газоотходов рециркуляции. Если не учитывать затрат на рециркуляцию дымовых газов, то на КПД котла этот метод практически не оказывает влияния.

Под двухступенчатым или двухстадийным сжиганием подразумевается такая организация процесса горения, когда через горелки с топливом подается воздух в количестве, мень-

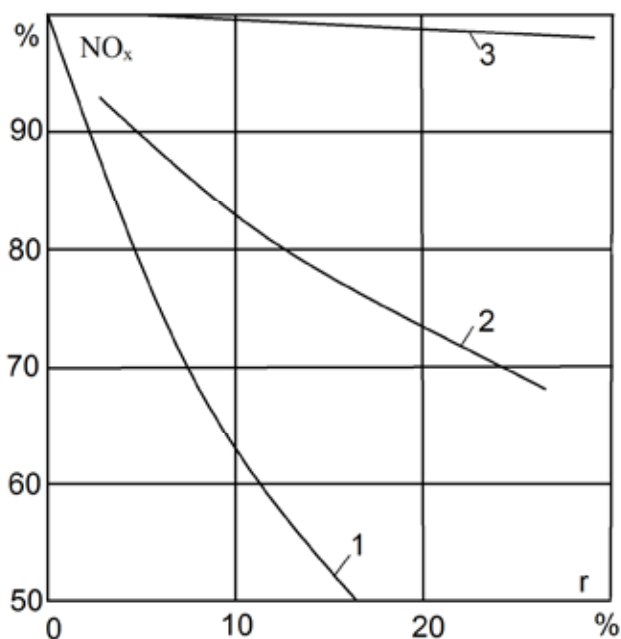


Рис. 2. Снижение образования NO_x в зависимости от рециркуляции топочных газов

шем стехиометрического (обычно $\alpha = 0,8 \div 0,95$), а остальное необходимое по балансу количество воздуха вводится в топочную камеру далее по длине факела. Таким образом, на первом этапе горения осуществляется сжигание топлива при недостатке окислителя, а на втором – дожигание продуктов газификации при пониженных температурах (рис. 3). Благодаря этому в начале факела из-за пониженной концентрации кислорода уменьшается образование топливных окислов азота, а снижение температурного уровня на второй стадии уменьшает образование термических NO_x .

Основная трудность реализации двухступенчатого сжигания состоит в правильном определении места подвода воздуха второй ступени и его количества, которые для разных конструкций котельных агрегатов не тождественны. Воздух должен быть введен таким образом, чтобы обеспечить полное смешение с продуктами реакции первой ступени для завершения догорания. В то же время эта зона должна быть достаточно удалена от устья горелки с тем, чтобы начальное выгорание у первой ступени достигло достаточной полноты. Недостаточно интенсивное смешение во второй ступени может привести к значительному увеличению выбросов продуктов неполного сгорания.

При правильной организации двухступенчатое сжигание позволяет на 40-50 % снизить выбросы NO_x и на 10-15 % уменьшить образование БП. Наибольшая эффективность данного способа подавления образования окислов азота достигается при совместном ис-

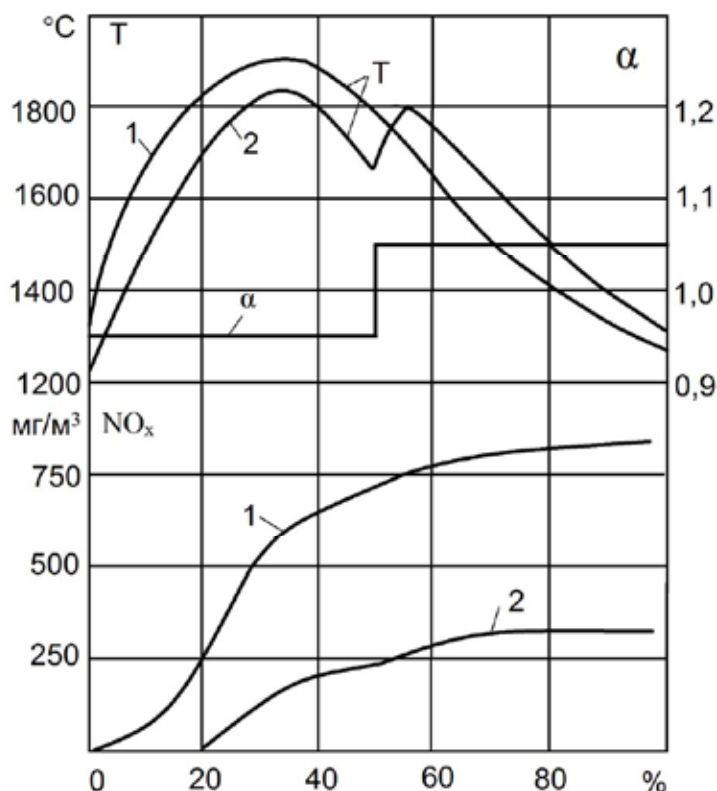


Рис. 3. Характеристики двухступенчатого сжигания (1 – одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание)

пользовании режима с малыми избытками воздуха или режима с рециркуляцией топочных газов (рис. 4) [1].

В целом данный способ перспективен, относительно дешев и может быть реализован на большинстве существующих котлов как за счет разбаланса соотношения “топливо-воздух” по ярусам горелок, так и за счет подачи недостающего воздуха через щели или погашенные горелки в верхней части топки. Возможна также организация встречного дутья вторичного воздуха [1].

Технологически сжигание угля в кипящем (или псевдооживленном) слое занимает промежуточное положение между классическим его сжиганием в топке с колосником и сжиганием угольной пыли с подачей воздуха. Если через насыпанный слой измельченного топлива снизу прогнать воздух, то давление этого слоя будет уменьшаться с возрастанием скорости воздуха. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока при определенной величине скорости воздуха отдельные частицы топлива не поднимутся воздушным потоком и не окажутся как бы взвешенными в нем. Наконец, при дальнейшем увеличении скорости потока слой становится высокотурбулентным и начинает “кипеть”, что способствует быстрому перемешиванию частиц.

Требования, предъявляемые к качеству топлива при сжигании в кипящем слое, невысоки. При этой технологии можно использовать любые сорта и марки угля, в том числе забаластиро-

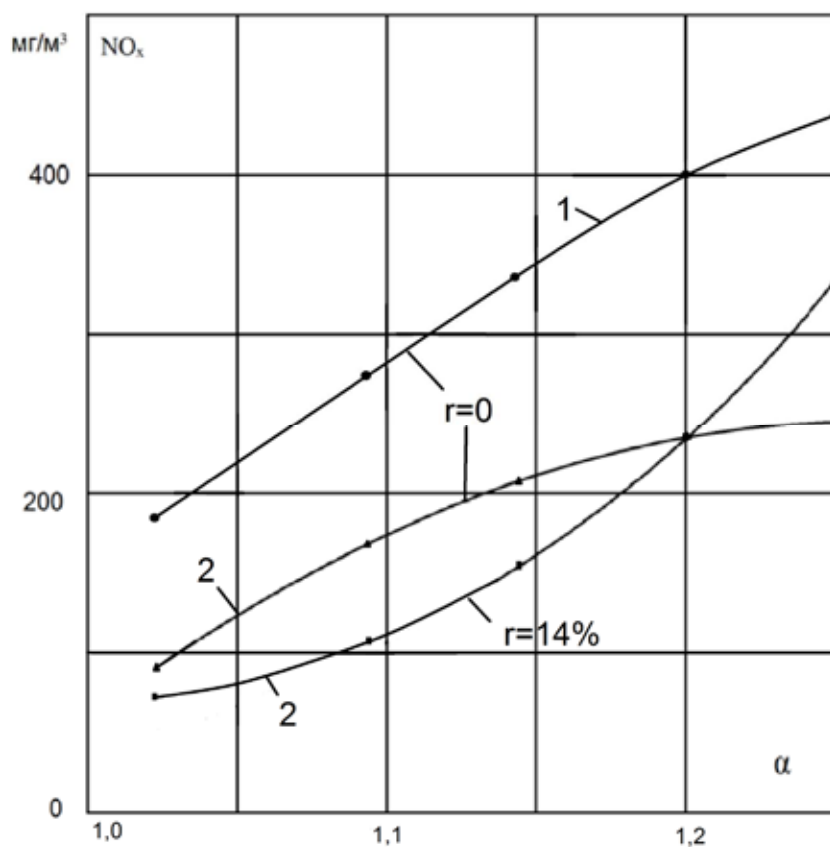


Рис. 4. Влияние избытка воздуха и рециркуляции на образование NO_x – одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание)

ванные: каменные угли, бурые угли, битумные пески, сланцы, а также топлива с низкой теплотой сгорания. Переход от одного вида топлива к другому не требует реконструкции топочного устройства [2].

Ввод присадок. Большие возможности для снижения вредных выбросов открывают различные присадки, которые могут быть поданы в котел вместе с топливом или отдельно в любую из зон котла. Часто это обходится дешевле, чем предварительная очистка топлива.

Достаточно перспективны, как показали исследования, растворимые присадки, содержащие металлоорганические соединения. Ввод в зону с высокой температурой присадок в виде солей и эфиров муравьиной и щавелевой кислоты позволил за счет промежуточных продуктов разложения указанных веществ добиться разложения части образовавшихся оксидов азота. Присадки данного типа являются катализаторами восстановления и разложения NO_x . Их применение позволяет снизить содержание окислов азота на 15÷30 % и сажи на 40÷60 %.

Еще больший эффект снижения NO_x достигается при вводе в мазут водного раствора MgCl_2 . Ввод данной присадки на котле ПК-41 в количестве 0,05 % от расхода топлива позволил уменьшить выброс NO_x на номинальной нагрузке и при $\alpha''_{\text{min}} = 1,08$ с 300 до 150 мг/м³. Эффект снижения окислов азота в данном случае достигается благодаря совместному влиянию Mg, хлора и воды.

Эффективным оказалось действие твердой алюмосиликатной присадки «Кремалит-1». Связано это с особенностями поведения диспергированной алюмосиликатной присадки в мазуте.

Испарения капель мазута в этом случае сопровождается микровзрывами под действием вскипающей внутри капель воды, разрывающей мазутную оболочку. Подобные микровзрывы интенсифицируют процесс горения. Частицы присадки при этом реагируют с минеральными компонентами как в факеле, так и за его границами. Присадка «Кремалит-1» способствует снижению концентрации NO_x , сажистых частиц и бенз(а)пирена в дымовых газах.

Недостатком данного метода считается то, что ввод воды или пара вызывает дополнительные потери тепла с уходящими газами, которые возрастают прямо пропорционально величине впрыска. В результате несколько снижается КПД котла.

Усовершенствование горелочных устройств является одним из наиболее экономичных способов предотвращения выбросов окислов азота, сажи и канцерогенных веществ [1]. По условиям образования NO_x приходится ограничивать размеры горелок, обеспечивать умеренные теплонапряжения, затяжку горения, равномерные поля температур. Поэтому горелочные устройства с пониженным выбросом токсичных продуктов сгорания можно разделить на следующие типы: улучшенного смешения, с рециркуляцией продуктов сгорания, со ступенчатым сжиганием топлива, многофакельного типа.

При использовании горелочных устройств с интенсифицированным смешением факел получается коротким и соответственно сокращается время пребывания топлива в высокотемпературной зоне горелки. В результате достигается низкое содержание NO_x в продуктах сгорания. При этом обеспечивается хорошее сгорание топлива при малых избытках воздуха и минимальное содержание сажи, СО и бенз(а)пирена в дымовых газах. Диаметр и длина факела зависят от типоразмера горелочного устройства и мало зависят от коэффициента избытка воздуха и нагрузки.

Снижение образования окислов азота при применении многофакельных горелочных устройств происходит за счет быстрого сгорания топлива и уменьшения удельного заполнения объема топки. Рассекателем в горелочном устройстве или форсунке служит специальный насадок. Такие горелочные устройства обеспечивают также низкое сажеобразование и снижают образование БП.

Применение разных типов горелочных устройств улучшенной конструкции позволяет снизить содержание NO_x на 30-50 %, а иногда и более, а также уменьшить сажеобразование и выбросы других вредных продуктов сгорания. Как правило, с их помощью удается улучшить процессы выгорания топлива, увеличить КПД и повысить надежность работы котлов [3].

Обсуждения и результаты

В процессе разработки простого и дешевого способа подавления образования оксидов азота при сжигании ирша-бородинских углей на котле БКЗ-75-39ФБ предложен вариант ступенчатого сжигания топлива, отличающийся от классического варианта рядом конструктивных и технологических особенностей. Организация ступенчатого сжигания твердого топлива с подачей части воздуха выше основных горелок (классический вариант) позволяет снизить содержание оксидов азота на 40-50 %, но при этом отмечается одновременный рост температуры газов на выходе из топки. Это неприемлемо для котлов, сжигающих канско-ачинские угли (КАУ), так как рост температуры на выходе из топки приводит к резкому повышению интенсивности загрязнения поверхностей нагрева. Здесь был применен принцип организации топочного процесса, в основу которого положено использование как гравитационных сил, так и сил инерции частиц топлива для вовлечения их в циркуляционное движение в топочной камере с подачей свежего окислителя по длине факела. Газовый вихревой факел в топке образуется в результате аэродинамического взаимодействия горелочных факелов и плоского факела нижнего дутья, направленного параллельно фронтальному скату «холодной воронки». Возникающая циркуляция топлива создаёт благоприятные условия для выгорания наиболее крупных частиц за счет значительного увеличения времени их пребывания в топочном процессе при неоднократном возврате к месту подачи свежего окислителя. Таким образом, нижняя часть топки (холодная воронка) начинает интенсивно участвовать в теплообменных процессах, что несколько снижает температуру дымовых газов на **выходе** из топки, **тем самым** предотвращая загрязнение конвективных поверхностей нагрева за счет некоторого растягивания процесса горения по всему объему топочной камеры с подачей свежего окислителя по длине факела. Вследствие интенсивного турбулентного перемешивания продуктов горения, многократной циркуляции частиц в топочной камере и ряда других факторов в топочных устройствах такого типа происходят существенные изменения в процессе горения топлива, способствующие подавлению образования оксидов азота.

Предлагаемый способ ступенчатого сжигания во многом лишен недостатков классической схемы. Основное отличие предлагаемого способа от классической схемы заключается в том, что эффект снижения температуры топочных газов получен за счет воздействия двух факторов. Во-первых, созданием в топочном объеме турбулентных пульсаций с большой глубиной зоны перемешивания за счет взаимодействия струи топливно-воздушной смеси с плоской струей вторичного дутьевого воздуха, направленного под углом к аксиальной оси факела. Та-

кое взаимодействие привело к размыванию факела по объему топки и созданию циркуляционных потоков, включивших в работу объем «холодной воронки» топочной камеры. В процессе перераспределения факела температура его ядра уменьшилась, что повлияло на выход оксида азота. Второй фактор связан с обдувом устья факела потоком газа из холодной воронки, когда газ из «холодной воронки» охлаждает начальный участок факела. Такое взаимодействие кроме гидродинамической неустойчивости приводит к неустойчивости, обусловленной эффектом термоэмиссии, сопровождающимся возникновением турбулентных вихрей значительно меньших размеров, заполняющих циркуляционные потоки в объеме топки. Известно, что такие потоки обладают хорошей устойчивостью и частицы топлива могут многократно циркулировать в объеме топочной камеры. Подвод окислителя и отвод продуктов реакции горения в данном случае более эффективен, чем в традиционной схеме, поэтому при использовании предлагаемого способа ухудшения полноты сгорания не наблюдается [4, 5].

Для определения затрат на реконструкцию котла мы определяем величину необходимых капитальных вложений, включающих в себя капитальные вложения на составление проекта работ, а также сметную стоимость. На составление проектных работ закладываем 100 тыс. руб. Сметная стоимость равна 188, 564 тыс. руб. Она состоит из сметной стоимости строительных работ, сметной стоимости оборудования и монтажных работ. Капитальные вложения (без НДС), необходимые нам для реконструкции одного котла, составляют:

$$K=K_{\text{пр}}+K_{\text{см}}=100000+159800=259,8 \text{ тыс. руб.}$$

Итого: затраты на реконструкцию (с НДС) – 306,6 тыс. руб.

В результате автоматического расчета получили следующие данные:

Простой срок окупаемости (PP): $PP = 2,23$ года.

Дисконтированный срок окупаемости: $DPP = 2,35$ года.

Чистый дисконтированный поток с нарастающим итогом (ЧДПНИ):

$$NPV = 1462,44 \text{ тыс. руб.}$$

Индекс доходности: $DPI = 5,8 \%$.

В результате автоматического расчёта ВСД составляет 82 %.

Выводы

Анализируя работу реконструированного котла БКЗ-75-Э9ФБ и данные инструментальных замеров, следует отметить, что организация низкотемпературного ступенчатого сжигания в целом снижает содержание оксидов азота на 25-49 %. Достижимый эффект объясняется образованием в топочной камере котла зон горения, отличающихся избытком воздуха и уровнем температур. То есть кроме основной зоны горения в топке образуются восстановительная и дожигательная зоны. В первой зоне сжигается основная масса топлива (примерно 65-75 %) при небольшом избытке воздуха. Во второй зоне (зоне холодной воронки) при использовании воздуха нижнего дутья – остальное топливо, а в третью зону подается оставшийся воздух, необходимый для полного сгорания топлива при использовании сопел, расположенных на задней стенке топочной камеры на уровне основных горелок. Следует отметить, что наряду со сниже-

нием выбросов в атмосферу оксидов азота в целом проведенная реконструкция благоприятно отразилась на эксплуатации котлов. Уменьшилось загрязнение поверхности нагрева, снизилась температура уходящих газов, потери с механическим недожогом (q_4) остались в пределах нормы для котлов такого типа.

Список литературы

- [1] Цирульников Л.М., Коюхов В.Г., Кадыров Р.А. Охрана воздушного бассейна и пути уменьшения токсичности выбросов газомазутных котлов. М.: ВНИИГазпром 1975. 51 с.
- [2] Снейтер В.А. Обезвреживание промышленных выбросов дожиганием. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [3] Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. Изд-е: В 2 ч.; Пер. с англ./ Под ред. С. Калверта, Г.М. Иглунда. М.: Металлургия, 1988. 760 с.
- [4] Жуйков А.В., Кулагин В.А., Радзюк А.Ю. Способ уменьшения выбросов оксидов азота от котла БКЗ-75-39ФБ, работающего на ирша-бородинских углях// Промышленная энергетика. 2011. №8. С. 9-11.
- [5] Патент №109527 F23C 5/00. Низкоэмиссионная вихревая топка / Оpubл. 20.10.2011 Бюл. №29.

Reducing Nitrogen Oxides in the Boiler Furnaces

Andrey V. Ghuykov
Siberian Federal University
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041 Russia

The basic ways and methods to reduce harmful gaseous emissions from thermal power plants and boilers, as well as a method of reducing nitrogen oxides, introduced on an industrial boiler plant in Krasnoyarsk.

Keywords: nitrogen oxides, thermal power plants, boilers, emissions into the atmosphere.
