

УДК 621.128

## Decrease of Nitrogen Oxides in the Combustion Process Kansk-Achinsk Coal

Andrey V. Zhuikov\* and Anatoliy I. Matyushenko

Siberian Federal University,  
79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 02.03.2014, received in revised form 19.06.2014, accepted 29.07.2014

*The possibility of using exergy concepts to address environmental issues related to improving the process of vortex combustion Kansk-Achinsk coal in terms of reduction of nitrogen oxides. Exergy is the only concept in physics, the definition of which includes environmental and technical features of the system. Set out measures to reduce emissions using the method and apparatus of exergy nonequilibrium thermodynamics to assess their effectiveness.*

*Keywords: nitrogen oxides, boiler units, emissions, exergy method of analysis, methods of burning coal.*

### 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, 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.

### Основные методы снижения вредных газообразных выбросов в атмосферу

Сжигание топлив с малыми избытками воздуха – один из самых распространенных способов снижения выбросов окислов азота. Наибольшая эффективность достигается при сжигании с избытками воздуха  $\alpha''_{\text{нм}} = 1,03 \div 1,05$ . Зависимость концентрации  $\text{NO}_x$  от коэффициента

© Siberian Federal University. All rights reserved

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

избытка воздуха имеет вид экстремальной кривой с максимумом в интервале  $\alpha''_{\text{min}} = 1,1 \div 1,3$ . Причем максимум  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  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 (рис. 1), что противоречит требованиям защиты окружающей среды, а также в ряде случаев могут интенсифицировать высокотемпературную сульфидную коррозию экранов в топочной камере. Путем усовершенствования 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: при этом максимальные значения концентрации  $\text{NO}_x$  остаются без изменения, но вся кривая зависимости  $\text{NO}_x$  ( $\alpha''_{\text{min}}$ ) сдвигается в область меньших избытков воздуха (рис. 1).

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  $\text{NO}_x$ .

**Рециркуляция продуктов сгорания** включает в себя подвод топочных газов в зону горения и является эффективным средством снижения выброса  $\text{NO}_x$ . Уменьшение концентрации  $\text{NO}_x$  объясняется не столько низкой температурой рециркулирующих газов, сколько снижением температуры горения из-за уменьшения скоростей цепных реакций из-за присутствия инертных газов и снижения концентраций реагирующих веществ. Большое количество совре-

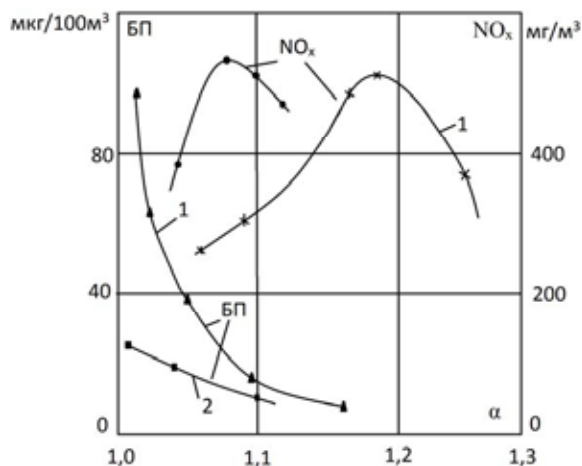


Рис. 1. Зависимость концентраций  $\text{NO}_x$  и БП от избытка воздуха: 1 – обычная горелка; 2 – усовершенствованная горелка

менных 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 окислов 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 подду топки (кривая 3, рис. 2) концентрация  $\text{NO}_x$  практически не меняется. В этих случаях основное сгорание топлива происходит прежде, чем рециркулирующие газы смешиваются с топливо-воздушной 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, меньшем 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  $\text{NO}_x$ .

Основная трудность реализации двухступенчатого сжигания состоит в правильном определении места подвода воздуха второй ступени и его количества, которые для разных кон-

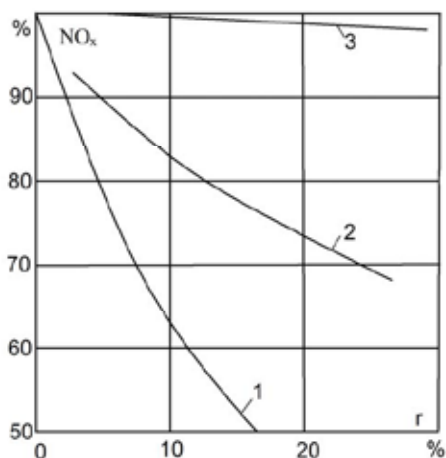


Рис. 2. Снижение образования  $\text{NO}_x$  в зависимости от рециркуляции топочных газов

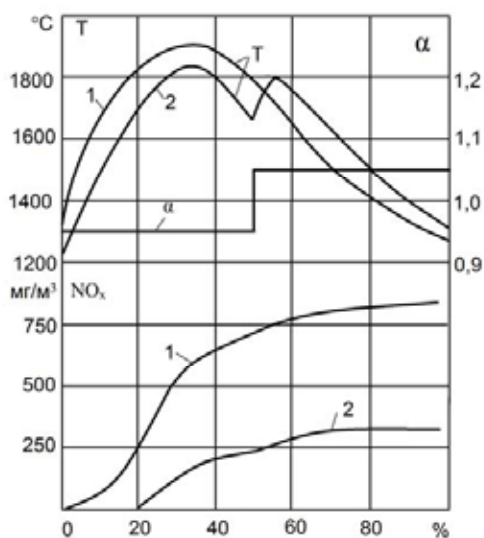


Рис. 3. Особенности двухступенчатого сжигания: 1 – одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание

струкций котельных агрегатов не являются тождественными. 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  $\text{NO}_x$  и на 10-15 % уменьшить образование БП. Наибольшая эффективность данного способа подавления образования окислов азота достигается при совместном использовании 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 шлицы 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 окажутся как бы взвешенными в нем. Наконец, при дальнейшем увеличении скорости потока слой становится высокотурбулентным и начинает «кипеть», что способствует быстрому перемешиванию частиц.

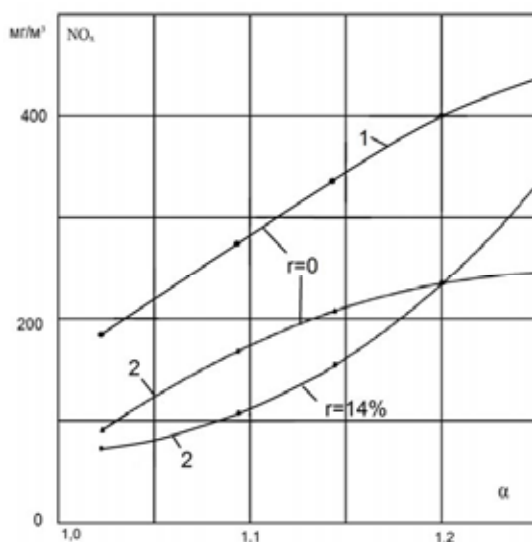


Рис. 4. Влияние избытка воздуха и рециркуляции на образование  $\text{NO}_x$ : 1 – одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание

Требования, предъявляемые к качеству топлива при сжигании в кипящем слое, невысоки. При этой технологии можно использовать любые сорта и марки угля, в том числе забаластированные: 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  $\text{NO}_x$ . Их применение позволяет снизить содержание оксидов азота на 15÷30 % и сажи на 40÷60 %.

Еще больший эффект снижения  $\text{NO}_x$  достигается при вводе в мазут водного раствора  $\text{MgCl}_2$ . Ввод данной присадки на котле ПК-41 в количестве 0,05 % от расхода топлива позволил уменьшить выброс  $\text{NO}_x$  на номинальной нагрузке и при  $\alpha''_{\text{нп}} = 1,08$  с 300 до 150  $\text{mg/m}^3$ . Эффект снижения оксидов 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  $\text{NO}_x$ , сажистых частиц и бенз(а)пирена в дымовых газах.

Недостаток данного метода состоит в том, 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** – один из наиболее экономичных способов предотвращения выбросов окислов азота, сажи и канцерогенных веществ [1]. По условиям образования  $\text{NO}_x$  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  $\text{NO}_x$  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 топki. 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  $\text{NO}_x$  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].

### **Обсуждение результатов исследований**

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 (рис. 5). 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 топki. Это неприемлемо для котлов, сжигающих канско-ачинские угли (КАУ), так как рост температуры на выходе из топki приводит к резкому повышению интенсивности загрязнения поверхностей нагрева. Здесь был применен принцип организации топчного процесса, в основу которого положено использование как гравитационных сил, так и сил инерции частиц топлива для вовлечения их в циркуляционное движение в топчной каме-

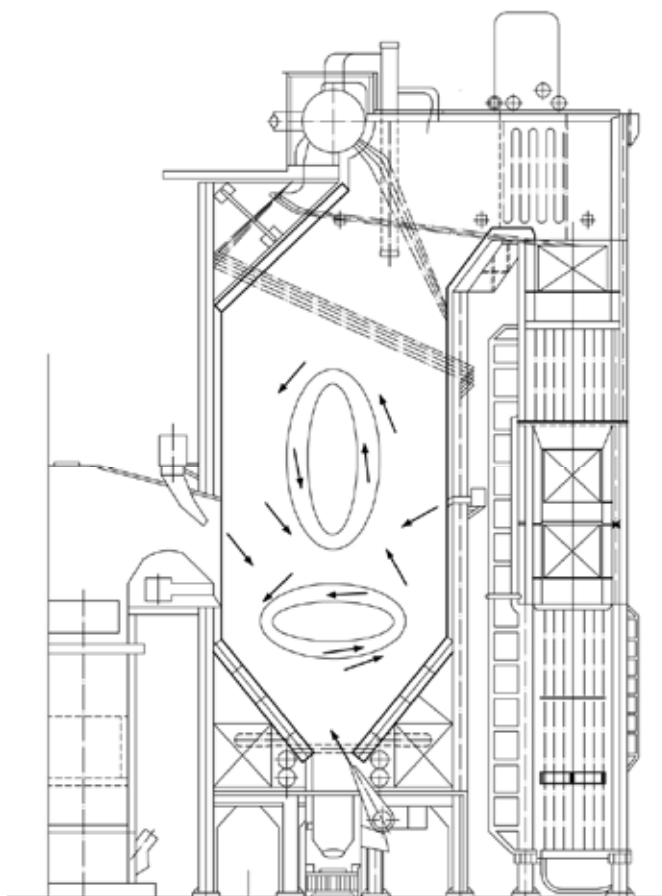


Рис. 5. Организация низкотемпературного ступенчатого топочного процесса в котле БКЗ-75-39ФБ

ре 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. Такое 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. Вторым фактором 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 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 составляет 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:

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

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 (ЧДДПНИ):

$$NPV = 1462,44 \text{ тыс. руб.}$$

Индекс доходности: DPI = 5,8 %.

В результате автоматического расчёта ВСД составляет 82 %.

### Выводы и рекомендации

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 %. Достигаемый 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 снижением 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. В работах [5-7] приведены конструкции, позволяющие реализовать эффективное сжигание канско-ачинских углей с учетом уменьшения выбросов оксидов азота.

### 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] Спейтер В. А. Обезвреживание промышленных выбросов дожиганием. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [3] Защита атмосферы от промышленных загрязнений: Справ. изд.: В 2-х 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. // Промышленная энергетика, 2011, №8. С. 911.
- [5] Патент на полезную модель № 109527 РФ, МПК<sup>7</sup> F23C 5/00 Низкоэмиссионная вихревая топка / А. В. Жуйков, В. А. Кулагин, М. П. Федченко, А. А. Яковенко; 2011124187/28; заявл. 15.06.11; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29.
- [6] Патент на полезную модель № 104670 РФ, МПК<sup>7</sup> F23C 5/00 Низкоэмиссионная вихревая топка / А. В. Жуйков, В. А. Кулагин, М. П. Федченко, С. А. Нагимулина; 2010154596/28; заявл. 30.12.10; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 4.
- [7] Патент на полезную модель № 116203 РФ, МПК<sup>7</sup> F23C 5/00 Низкоэмиссионная вихревая топка / А. В. Жуйков; 2011149438/06; заявл. 05.12.11; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

## Снижение оксидов азота в процессе сжигания канско-ачинских углей

**А. В. Жуйков, А. И. Матюшенко**  
Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

---

*Изучена возможность использования понятия эксергии для решения экологических проблем, связанных с совершенствованием процесса вихревого сжигания канско-ачинских углей с учетом снижения оксидов азота. Эксергия является единственным понятием в физике, определение которого включает в себя окружающую среду и особенности технической системы. Изложены мероприятия по снижению вредных выбросов с применением метода эксергии и аппарата неравновесной термодинамики для оценки их эффективности.*

*Ключевые слова: оксиды азота, котельные агрегаты, вредные выбросы, метод эксергетического анализа, способы сжигания углей.*

---