

На правах рукописи



**ЖУЙКОВ**  
Андрей Владимирович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО  
СТУПЕНЧАТОГО ВИХРЕВОГО СЖИГАНИЯ КАНСКО-АЧИНСКИХ  
УГЛЕЙ**

05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2014

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»  
на кафедре Теплотехники и гидрогазодинамики

Научный руководитель:

доктор технических наук  
**Матюшенко Анатолий Иванович**

Официальные оппоненты:

**Лебедев Виталий Матвеевич**, доктор технических наук, профессор;  
ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения»;  
кафедра теплоэнергетики, заведующий кафедрой;

**Калинин Николай Васильевич**, кандидат технических наук, доцент;  
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»;  
кафедра промышленных теплоэнергетических систем; профессор

Ведущая организация:

**«Сибирский теплотехнический научно-исследовательский институт ВТИ»  
Красноярского филиала ЗАО «Сибирский энергетический научно-  
технический центр»**

Защита диссертации состоится 24 декабря 2014 г. в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07 при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, 70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета по адресу <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан 24 ноября 2014 г.

и.о. Ученого секретаря  
диссертационного совета

Кулагина Татьяна Анатольевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** обусловлена необходимостью совершенствования технологических процессов низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания топлива для котлов, работающих на канско-ачинских углях и позволяющих снизить содержание оксидов азота в уходящих газах. Обеспечение приоритета экологической безопасности наряду с высокой эффективностью сжигания топлива является одним из важнейших условий функционирования и дальнейшего развития современной промышленной теплоэнергетики.

При сжигании органических топлив в промышленных котельных в атмосферу городов выбрасывается большое количество вредных веществ, в том числе, значительное количество оксидов азота. Специфика пылеугольного сжигания связана: со сложностью регулирования факела, с жесткой зависимостью между устойчивостью горения и режимом работы горелочных устройств, с условиями воспламенения и выгорания топлива, составом топлива, способом сжигания и многое другое. Эти факторы в совокупности значительно осложняют разработку эффективного способа подавления оксидов азота в источнике. Существующих методов расчета и анализа их результатов недостаточно для обеспечения необходимой точности и надежности проектирования котельного оборудования, работающего на канско-ачинских углях, а также оценки их энергоэффективности.

Добиться снижения выбросов вредных веществ можно путём совершенствования процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания топлива с использованием эксергетического анализа для оценки термодинамической эффективности системы в целом.

**Работа выполнена** в рамках приоритетного направления развития науки, технологий и техники РФ Пр-577 «Энергосберегающие технологии», критические технологии «Производство электроэнергии и тепла на органическом топливе», «Системы жизнеобеспечения и защиты человека», «Энергосбережение», и Программе Красноярского краевого экологического фонда «Экологически чистая энергетика».

**Объект исследований** – топочные устройства промышленных котельных средней мощности на примере энергетического котла БКЗ-75-39ФБ.

**Предмет исследований** – характеристики технологического процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей.

**Цель диссертационной работы** - усовершенствование процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей с учетом снижения выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

Изучить современные методы снижения оксидов азота в существующих топочных устройствах теплотехнологических систем;

Показать возможность усовершенствования процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей, удовлетворяющих требованиям рационального распределения долей воздуха в топке котла и снижению выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу;

Определить режимы топочного процесса реконструируемого котельного оборудования, обеспечивающие наибольшую экологическую эффективность его работы без снижения КПД;

Обосновать предлагаемые технические и технологические решения путем проведения экспериментальных исследований котла БКЗ 75-39ФБ при варьировании режимных параметров (нагрузка, коэффициент избытка воздуха, доли третичного воздуха) с оценкой его технико-экономических и эксергетических показателей.

**Основная идея диссертации.** Выполнить оценку степени совершенствования процесса ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей в промышленных котлах средней мощности на базе эксергетического метода В. М. Бродянского с доработкой А. Б. Богданова, позволяющего адекватно, только по качественным показателям (температура, степень загрузки), определять издержки производства тепла. Разработать методику оценки проектных решений реконструкции промышленных котельных на базе эксергетического анализа работы оборудования.

**Методика исследования.** Для решения поставленных задач использованы методы регрессионного и эксергетического анализов, проведено сравнение с результатами экспериментальных исследований. Экспериментальные работы проведены на промышленном оборудовании котельной ООО «КраМЗЭнерго».

**Научная новизна** и основные положения, выносимые на защиту:

1. Предложена и обоснована усовершенствованная схема низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания топлива, отличающаяся рациональным распределением долей воздуха в топке котла и позволяющая повысить экологическую эффективность работы котлоагрегатов без снижения КПД брутто.

2. Установлена зависимость концентрации оксидов азота в дымовых газах пылеугольных котлов средней мощности, сжигающих бурые угли, от доли воздуха, подаваемого в топку на нижнее дутье, позволяющая определить режимы топочного процесса котельного оборудования с наибольшей экологической эффективностью его работы.

3. Определено оптимальное значение коэффициента избытка воздуха в топочных устройствах низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания пылеугольных котлов средней мощности, при котором снижение выбросов в атмосферу оксидов азота достигает 10 %.

4. Разработана и обоснована методика оценки проектных решений реконструкции промышленных котельных на базе эксергетического анализа работы оборудования, позволяющая снизить объем режимно-наладочных испытаний котельного оборудования.

**Значение для теории.** Предложенная методика оценки проектных решений реконструкции промышленных котельных, а также рекомендации по управлению технологией процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей создают теоретическую основу для проектирования и разработки новых энергоэффективных методов и оборудования различных теплотехнологических процессов.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в том, что выполненные исследования позволили научно обосновать технические решения, внедрение которых способствуют повышению энергетической эффективности и экологической безопасности сжигания канско-ачинских углей в топочных устройствах промышленных котельных. Усовершенствованный топочный процесс позволяет снизить содержание оксидов азота в уходящих газах на 10-12 %, а также увеличить КПД котлов, работающих на канско-ачинских углях.

**Достоверность результатов и выводов** диссертационной работы обоснована использованием апробированных методик исследования теплоэнергетических объектов, удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных, полученных на действующем котельном оборудовании. Выводы достаточно хорошо соответствуют с результатами, полученными другими исследователями и не противоречат физическим закономерностям процессов.

**Апробация работы.** Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на X–XII Всероссийской НПК по проблемам энергоресурсосбережения «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (Красноярск, 2009-2011), Международной научно-технической конференции «Бенардосовские чтения» (Иваново, 2011), Всероссийской молодежной конференции «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики» (Томск, 2012), Всероссийской молодежной конференции «Горение твердого топлива» (Томск, 2012).

**Использование результатов работы** осуществлено на котельной ООО «КраМЗЭнерго», а также в учебном процессе ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» при разработке курсов лекций «Котельные установки и парогенераторы», «Основы инженерного проектирования теплотехнических установок», «Источники энергии теплотехнологий», «Технология сжигания и переработки топлива», «Физико-химические основы теплотехнологии» и создании учебных пособий в Политехническом институте СФУ для студентов направления 140100 – Теплоэнергетика и теплотехника, а также в научно-исследовательской деятельности Факультета энергетики ПИ СФУ.

**Личный вклад автора.** Научные и практические результаты, положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором лично. Общая научная идея, направления и задачи исследований были сформулированы при участии научного руководителя. Натурные исследования проводились на котельной ООО «КраМЗЭнерго», сотрудникам которого автор выражает свою глубокую признательность за помощь в проведении данной работы.

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 15 печатных работах, из них: четыре статьи в периодических изданиях из перечня ВАК, три патента РФ на полезную модель, две статьи - в сборниках научных трудов, шесть - в трудах Всероссийских и Международных научно-технических конференций.

**Структура и объём диссертации.** Материалы диссертации изложены на 137 страницах основного текста, включающих 60 рисунков и 19 таблиц. Работа состоит из введения, пяти разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованных источников из 124 наименований и приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**В первом разделе** выполнен анализ существующих основных методов подавления оксидов азота, как в России, так и за рубежом.

Большой вклад в развитие теории и практики угольных технологий внесли фундаментальные работы М.П. Барановой, К.А. Григорьева, С.П. Деткова, В.А. Дубровского, Я.Б. Зельдовича, Г.Ф. Кнорре, Ю.Л. Маршака, В.И. Мурко, А.А. Отса, Ю.А. Рундыгина, Ф.А. Серанта, А.Г. Тумановского, А.М. Хидиятова, Г.С. Ходакова и др., а также работы В.М. Журавлева, А.Д. Ключникова, В.А. Кулагина, В.М. Лебедева и др. в области энергосбережения и энергоэффективности промышленной теплоэнергетики. Детально проанализированы работы В.М. Бродянского, А.Б. Богданова, Н.В. Калинина и др. в области эксергетического анализа.

В работах Г.Н. Делягина, В.Р. Котлера, Н.В. Лаврова, Э.И. Розенфельда, П.В. Рослякова, Л.М. Цирульниковой, S. Calvert, Н.М. Englund и др. отмечается, что основными факторами, влияющими на образование  $\text{NO}_x$ , являются: температура пламени, концентрация кислорода в зоне горения, время пребывания продуктов сгорания в зоне высоких температур. Эти факторы в свою очередь определяются коэффициентом избытка воздуха, конструкцией горелочных устройств, аэродинамикой процесса горения, условиями теплообмена и т.д.

Содержание выбросов  $\text{NO}_x$  в дымовых газах ТЭС и котельных к настоящему времени достаточно высокое. Технологические мероприятия по подавлению образования оксидов азота и данные об эффективности различных методов подавления  $\text{NO}_x$  как в России, так и за рубежом представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технологические методы уменьшения выбросов  $\text{NO}_x$

Метод	Уменьшение выброса $\text{NO}_x$ , % при сжигании:		
	природного газа	мазута	угля
Рециркуляция отходящих газов	60	20	5-15
Ступенчатое сжигание топлива	55	40	40
Сжигание с малым избытком дутьевого воздуха	20	20	20
Уменьшение подогрева дутьевого воздуха	50	40	0
Впрыск в топку воды или водяного пара	60	40	0
Впрыск воды в виде водомазутной эмульсии	20-50	20-50	0

Отдельно рассмотрены НТВ- и ВИР-технологии сжигания углей Канско-Ачинского бассейна, положительные и отрицательные результаты их внедрения.

Анализ литературных источников свидетельствует, что как в России, так и за рубежом проделана большая работа по снижению образования оксидов азота. Однако для котлов малой и средней мощности, работающих на канско-ачинских углях, проблема снижения выбросов и подавления образования оксидов азота остается актуальной и в настоящее время, что подтвердило правильность выбора темы исследования и актуальность решаемых в работе задач.

**Во втором разделе** дано краткое описание объекта исследований, а также методика измерений и обработки опытных данных. Приведены результаты испытаний с целью снижения оксидов азота в дымовых газах путем изменения режимов работы котла без конструктивных изменений оборудования.

Расчеты содержания оксидов азота в дымовых газах котла производились по методике СО 153-34.02.304-2003 «Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций». Концентрации газообразных выбросов определялись с использованием прибора ДАГ 500. Расхождение инструментальных замеров и расчетных данных составило 5,5 %.

Из рисунка 1 видно, что после изменения режимов работы котла, потери тепла с механическим недожогом  $q_4$  не превышают 0,4 % и с увеличением коэффициента избытка воздуха  $\alpha_T$  снижаются до 0,15 % (расчетные  $q_4^p = 1$  %; норматив  $q_4 = 1-2$  % в зависимости от зольности топлива) за счет снижения провала несгоревших частиц угля в шлаковый комод при работе сопел заднего дутья и, соответственно, снижения содержания горючих в шлаке  $C_{\text{гшл}}$ .

На рисунке 2 представлены потери тепла с уходящими газами в зависимости от коэффициента избытка воздуха. Видно, что с ростом  $\alpha_T$  потери тепла с уходящими газами повышаются с  $q_2 = 7,6$  % ( $\alpha = 1,22$ ) до  $q_2 = 9,6$  % (при  $\alpha = 1,55$ ). Основными потерями тепла для данного типа котлов являются потери тепла с уходящими газами.

Изменения КПД брутто на рисунке 3 показывают, что оптимальной является величина  $\alpha_T = 1,35$ , при этом КПД брутто составляет  $\eta_{\text{бр}} = 90,1$  % (данные зависимости построены при температуре питательной воды в опытах  $t_{\text{пв}} = 104$  °С).

Из рисунка 4 видно, что концентрации оксидов азота в выбросах находятся на уровне  $\text{NO}_x = 355-450$  мг/нм<sup>3</sup>. При работе котла на высоких нагрузках  $D_{\text{пр}} = 60-79$  т/ч, когда обеспечивается ступенчатость сжигания топлива за счет подачи части вторичного воздуха через сопла заднего дутья с высокими скоростями, и при работе с коэффициентом избытка воздуха близким к оптимальному  $\alpha_{\text{опт}} \approx 1,25-1,35$  концентрация оксидов азота находится на уровне  $\text{NO}_x = 370-450$  мг/нм<sup>3</sup>.

Проведенные испытания показали, что снижение содержания оксидов азота не может быть достигнуто только за счет изменения режима работы котла. Оптимальное значение коэффициента избытка воздуха для данного типа котлов до реконструкции составило  $\alpha_T = 1,35$ .

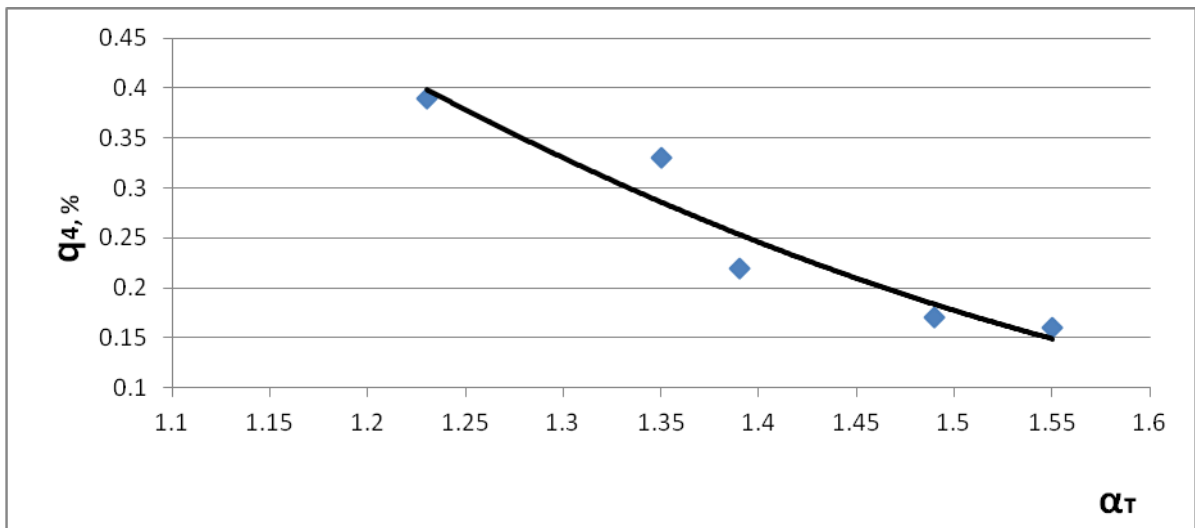


Рисунок 1 – Потери тепла с механическим недожогом в зависимости от коэффициента избытка воздуха в котле

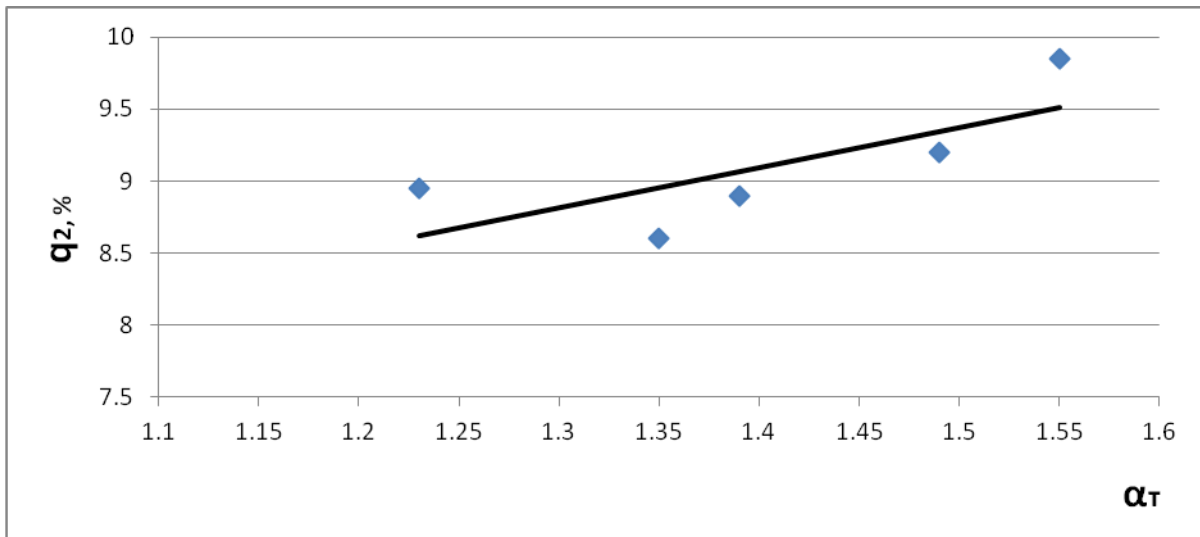


Рисунок 2 – Потери тепла с уходящими газами в зависимости от коэффициента избытка воздуха в котле

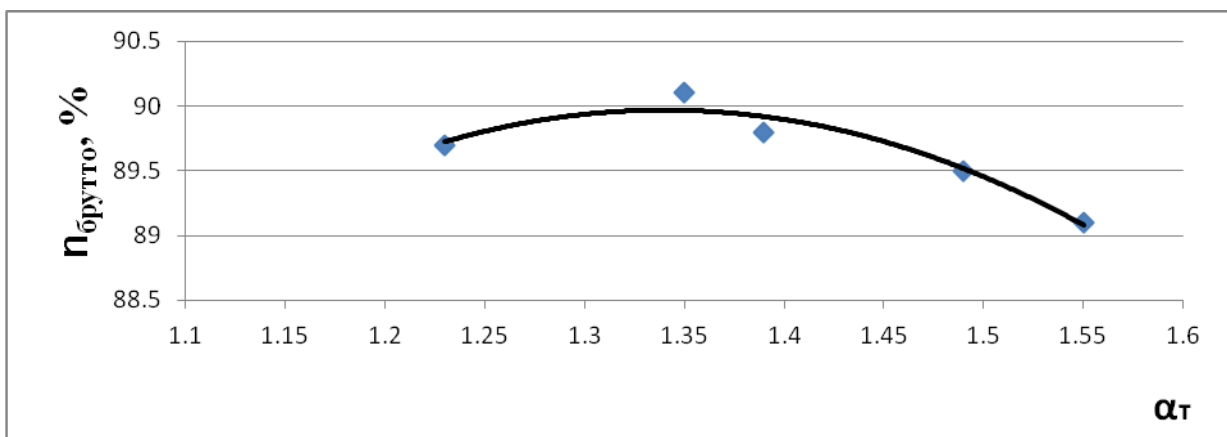


Рисунок 3– КПД брутто котла в зависимости от коэффициента избытка воздуха



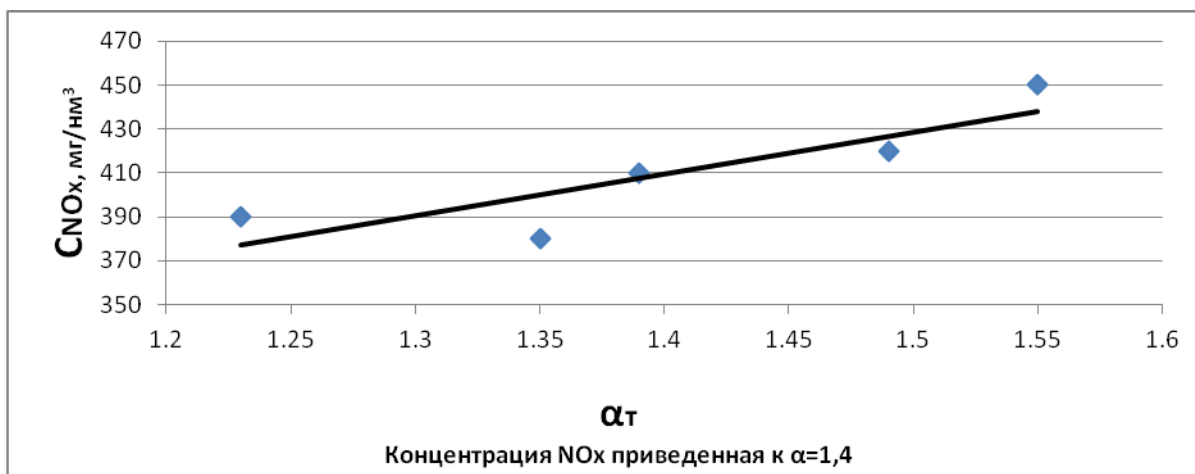


Рисунок 4 - Концентрация оксидов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха

**В третьем разделе** описана схема организации низкотемпературного ступенчатого вихревого топочного процесса с рациональным распределением долей воздуха.

В данном случае 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, выполненного из двух параллельных сопел, соединенных внутри между собою, организуя широкое щелевидное сопло.

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. Скорость воздушного потока из сопел нижнего дутья достигает 30 м/с, таким образом, нижняя часть топки начинает интенсивно участвовать в теплообменных процессах, снижая температуру дымовых газов на выходе и предотвращая загрязнение конвективных поверхностей нагрева за счет 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 сжигания топлива, способствующие подавлению образования оксидов азота.

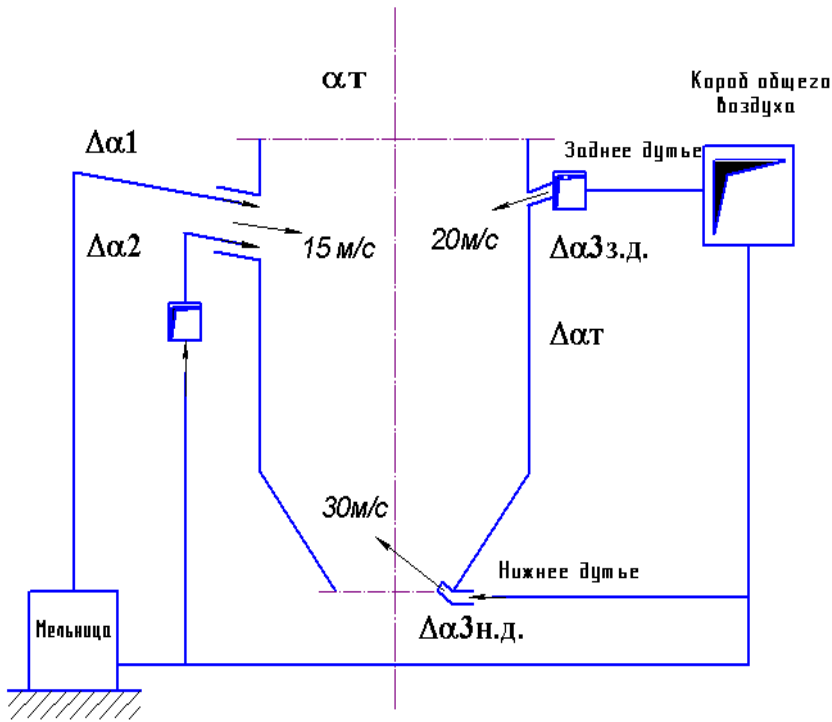


Рисунок 5 - Схема организации низкотемпературного ступенчатого вихревого топочного процесса

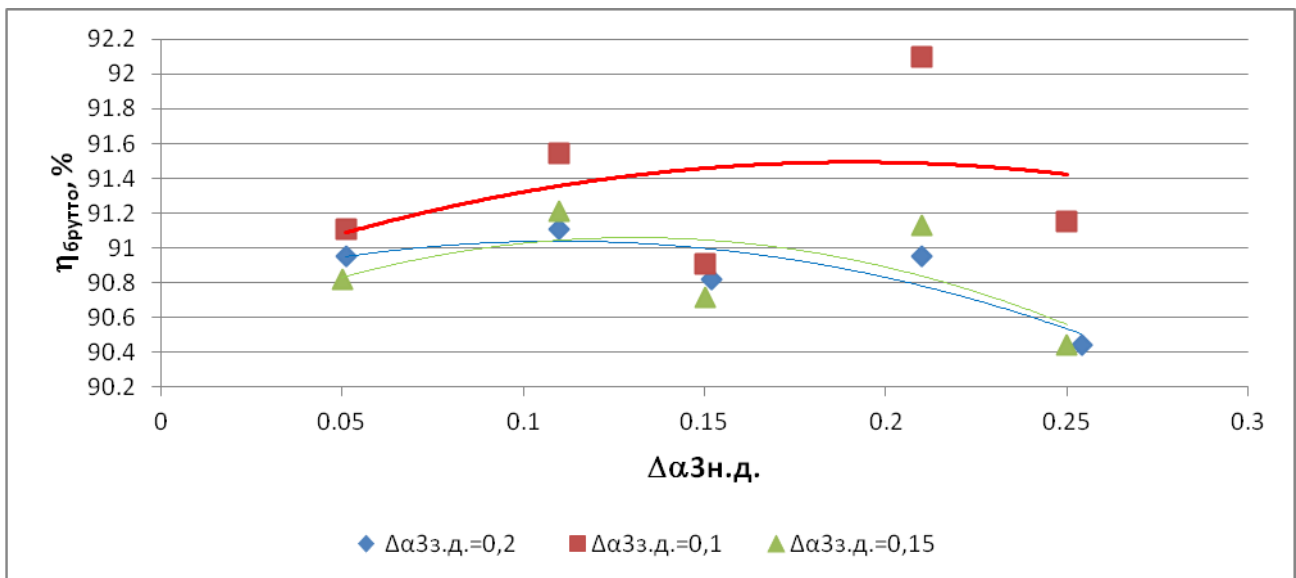


Рисунок 6 - Зависимость КПД брутто от доли воздуха на нижнее дутье при нагрузке 65÷75 т/ч

После реконструкции были проведены испытания с целью поиска рационального распределения воздуха в котле и определения наилучшего значения коэффициента избытка воздуха, при котором содержание оксидов азота будет минимальным, а КПД брутто не уменьшится. Анализируя рисунки 6-9 можно сделать вывод, что максимальный КПД брутто и минимальное содержание оксидов азота в котле достигается при доле третичного воздуха, поступающего через сопла нижнего дутья  $\Delta\alpha_{3н.д.} = 0,2-0,25$  в зависимости от нагрузки котла.

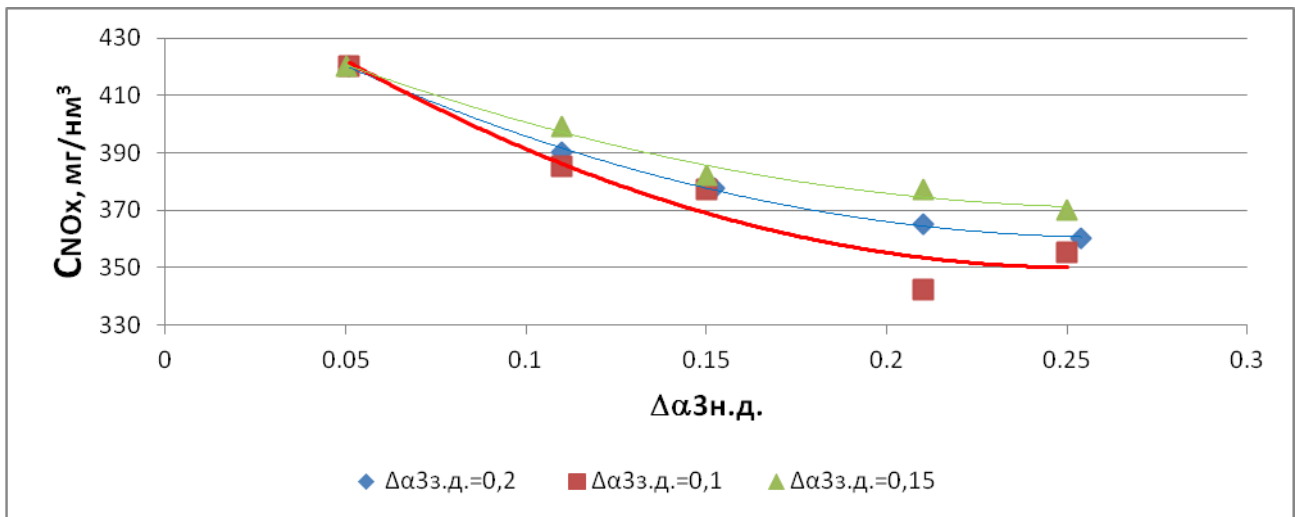


Рисунок 7 - Влияние доли воздуха на нижнее дутье на содержание оксидов азота в дымовых газах при нагрузке 65÷75 т/ч

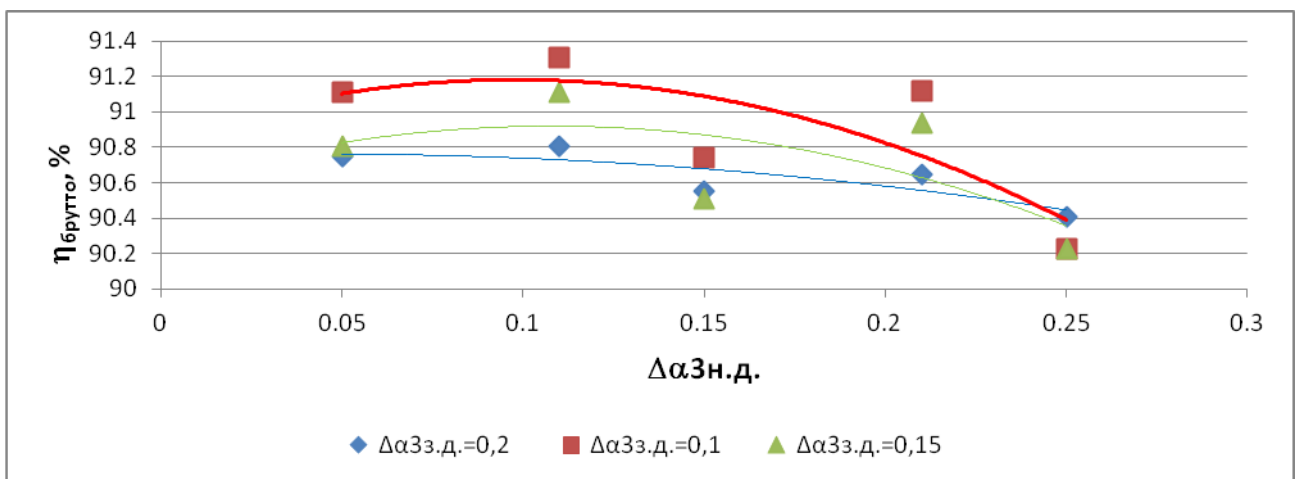


Рисунок 8 - Зависимость КПД брутто от доли третичного воздуха через сопла нижнего дутья при нагрузке 50÷60 т/ч

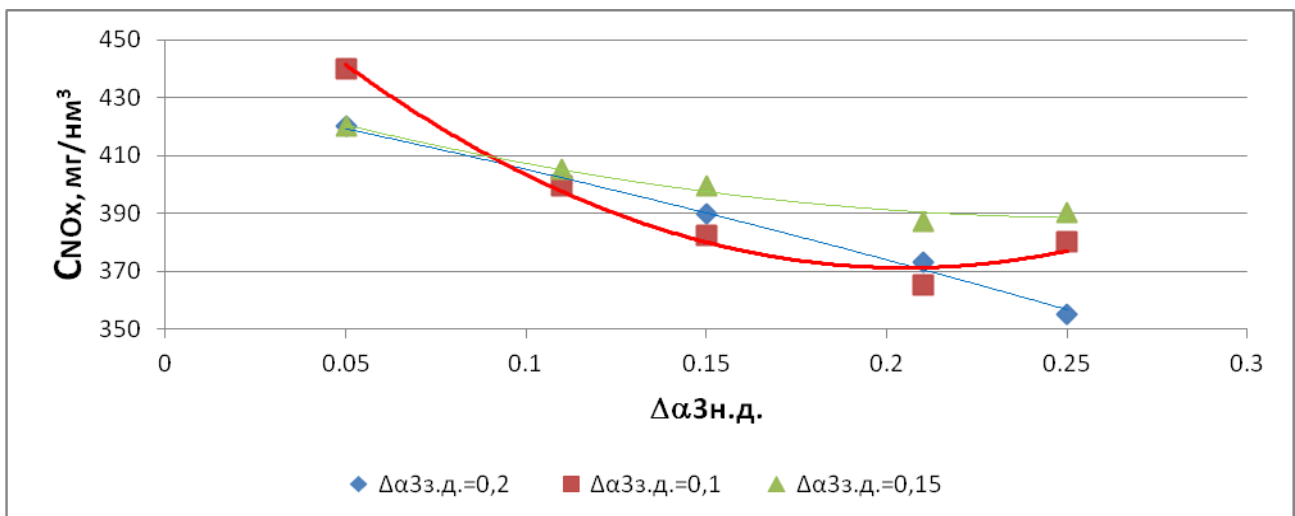


Рисунок 9 - Содержание оксидов азота в дымовых газах в зависимости от доли третичного воздуха через сопла нижнего дутья при нагрузке 50÷60т/ч

Из рисунков 10 и 11 можно сделать вывод, что оптимальное значение коэффициента избытка воздуха  $\alpha_T$  для котла БКЗ 75-39ФБ при переводе на низкотемпературное, вихревое сжигание топлива равно  $\alpha_T = 1,25$ . При увеличении или уменьшении значения коэффициента избытка воздуха в топке отмечается уменьшение КПД брутто котла и увеличение содержания оксидов азота в дымовых газах. Общее перераспределение воздуха на котле, снижает расход вторичного воздуха, что позволяет обеспечить ступенчатость сжигания, снизить температуру в топке котла на 50-100 °С, что подтверждается снижением температуры уходящих газов (рисунок 12) и, соответственно, уменьшить образование оксидов азота. Подвод окислителя и отвод продуктов реакции горения в данном случае более эффективен, чем в традиционной схеме - ухудшения полноты сгорания не наблюдается. В таблице 2 и 3 приведены результаты испытаний котла при различных нагрузках и распределении долей воздуха в котле.

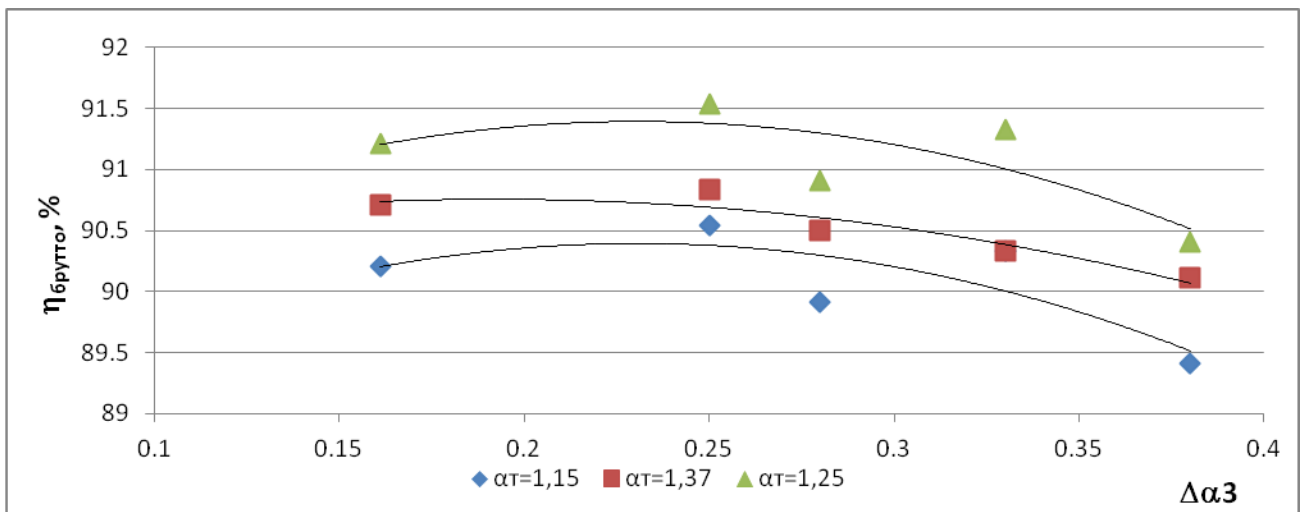


Рисунок 10 - Зависимость КПД брутто от доли воздуха третичного дутья при коэффициенте избытка воздуха в пределах  $\alpha_T = 1,1 \div 1,8$

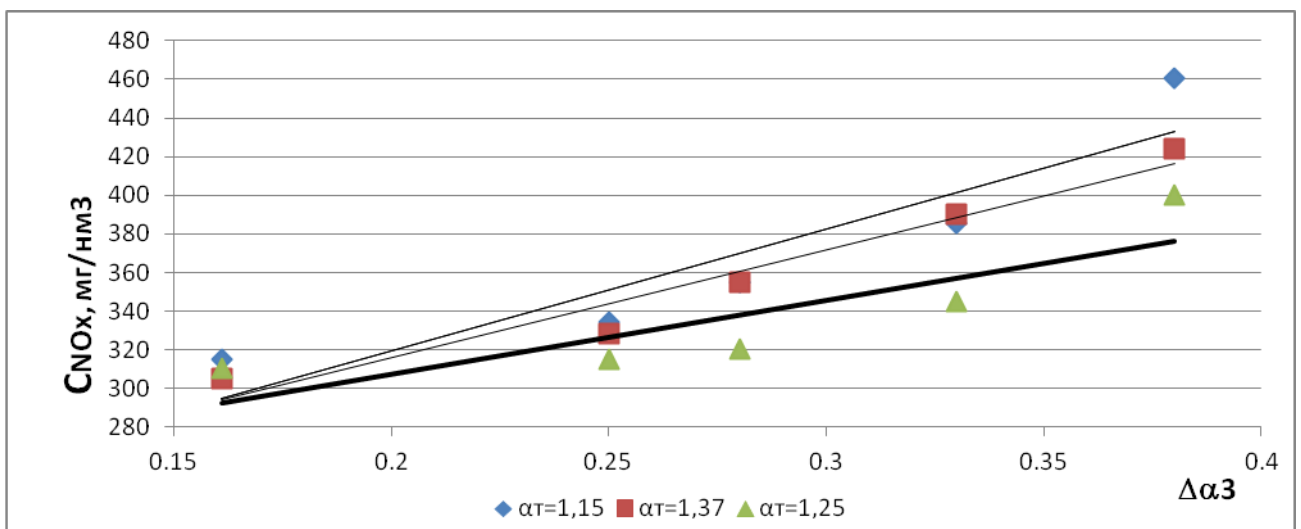


Рисунок 11 - Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах от доли воздуха третичного дутья при  $\alpha_T = 1,0 \div 1,8$

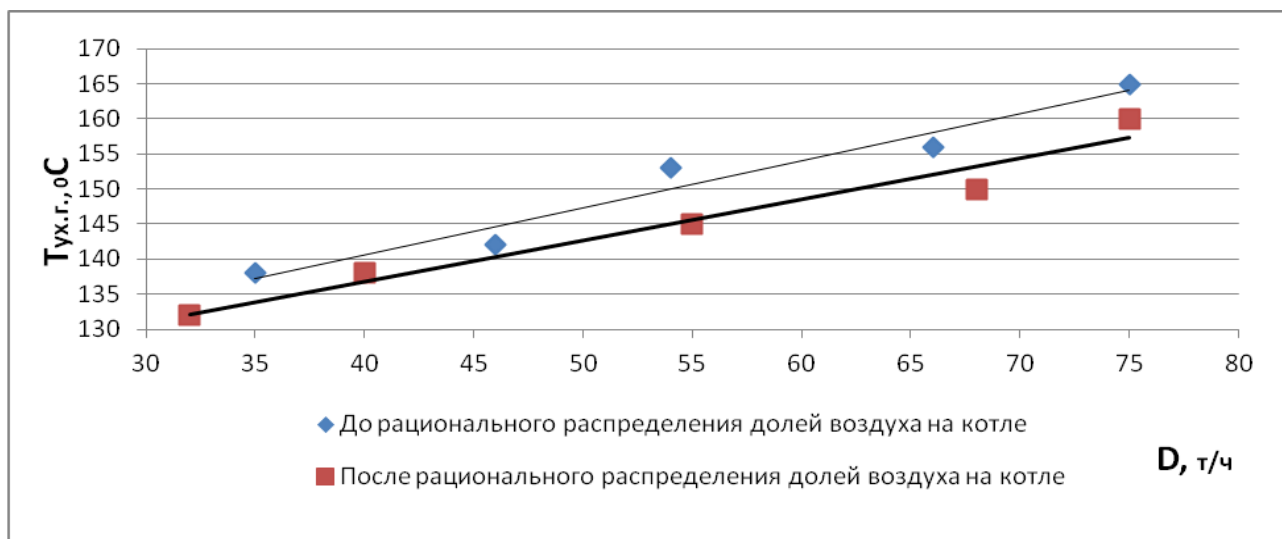


Рисунок 12 – Зависимость температура уходящих газов от нагрузки котла до и после рационального распределения долей воздуха

Таблица 2 – Показатели работы котла после реконструкции при рациональном коэффициенте избытка воздуха

Нагрузка котла в пределах, т/ч	Коэффициент избытка воздуха за котлом, б <sub>т</sub>	Концентрация оксидов азота, мг/нм <sup>3</sup>	q <sub>4</sub>	q <sub>2</sub>	КПД котла (брутто)
50-60	1,25	370÷420	0,36	7,54	91,3
65-75	1,25	350÷410	0,29	7,41	91,5

Таблица 3 –Рациональное распределение воздуха в котле

Нагрузка котла в пределах, т/ч	Доля первичного воздуха, Δα <sub>1</sub>	Доля вторичного воздуха, Δα <sub>2</sub>	Доля третичного воздуха, Δα <sub>3</sub> =Δα <sub>3н.д.</sub> + Δα <sub>3з.д.</sub>		Присосы в топку, Δα <sub>т</sub>
			Нижнее дутье, Δα <sub>3н.д.</sub>	Заднее дутье, Δα <sub>3з.д.</sub>	
50-60	0,53	0,25	0,15	0,12	0,07
65-75	0,55	0,25	0,2	0,13	0,05

Результаты, приведенные на рисунках 6-11, можно обобщить одной зависимостью от коэффициента избытка воздуха в горелке (рисунок 13), что не противоречит результатам исследований на других котлах. Для обеспечения минимальной величины содержания оксидов азота для данного котла без снижения КПД брутто рекомендуется принять коэффициент избытка воздуха в горелке α<sub>т</sub> = 0,77. После реконструкции котла содержание оксидов азота уменьшилось на 10-12 %, а содержание бенз(а)пирена, не увеличилось, что видно из результатов на рисунках 14 и 15, на которых приведено сравнение экспериментальных данных с расчетными содержания оксидов азота и бенз(а)пирена.

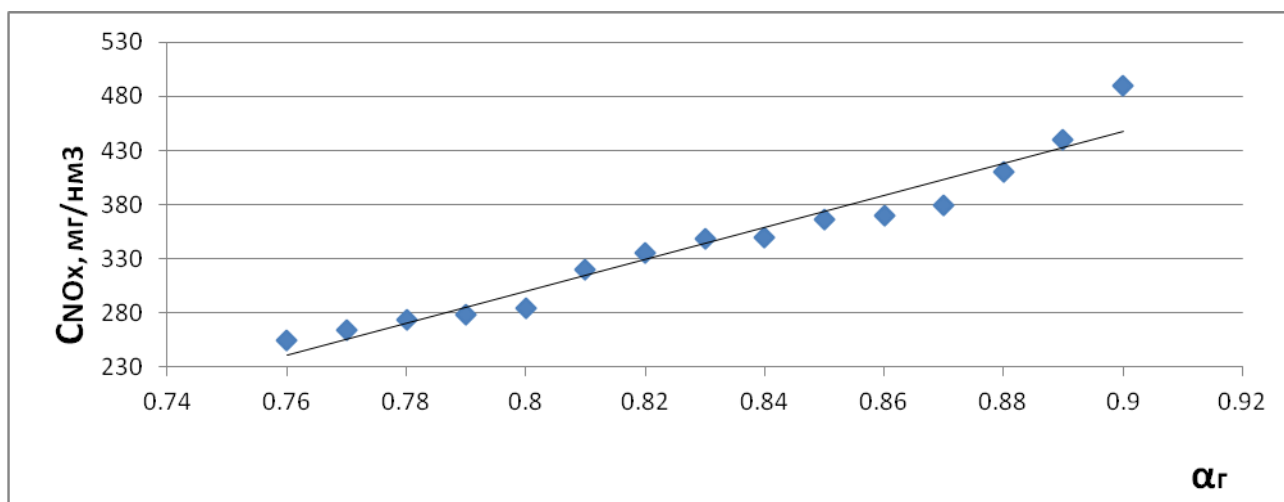


Рисунок 13 – Зависимость содержания оксидов азота от коэффициента избытка воздуха в горелке

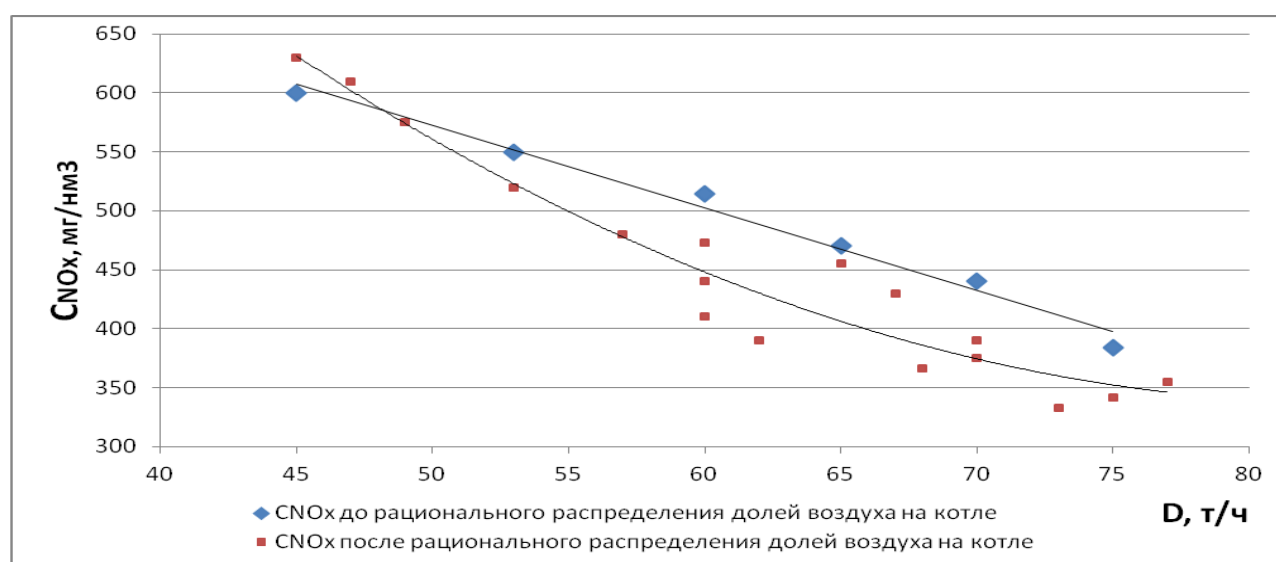


Рисунок 14 – Зависимость содержания оксидов азота в уходящих газах от нагрузки котла БКЗ 75-39ФБ

В четвертом разделе рассмотрены результаты реконструкции и перестройки режима работы исходя из необратимости процесса сжигания топлива в топке котла после перевода его на низкотемпературное вихревое сжигания топлива. Расчёт эксергетического КПД котла произведён для производительности 40, 50, 60, 65 и 75 т/ч до и после рационального распределения воздуха в котле. Результат расчёта эксергетических показателей изображен на рисунках 16–19.

Применение эксергетического баланса основано на сравнении эксергетического КПД однотипных процессов и потерь эксергии, происходящих в отдельных звеньях исследуемого процесса (рисунок 16) в отличие от термического КПД, не учитывающего различное качество разных видов энергии и способов её проявления.

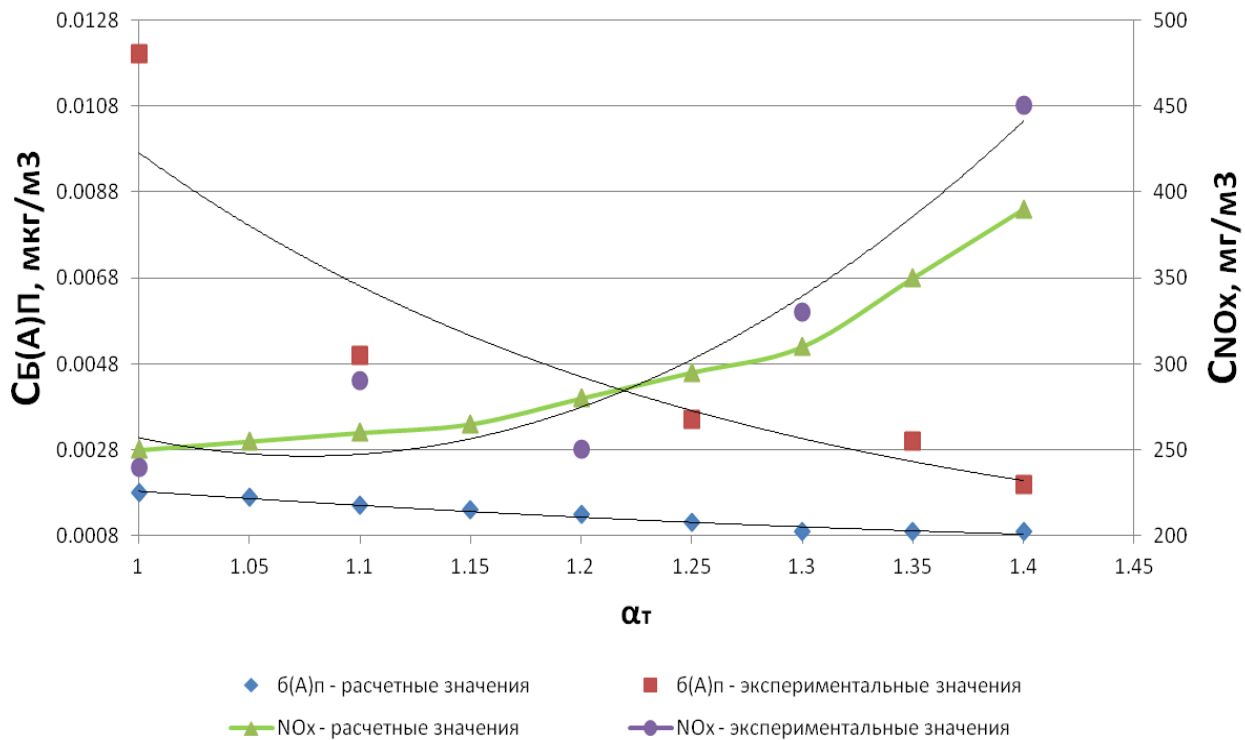


Рисунок 15 – зависимость содержания бенз(а)пирена и NO<sub>x</sub> от коэффициента избытка воздуха после рационального распределения воздуха в котле

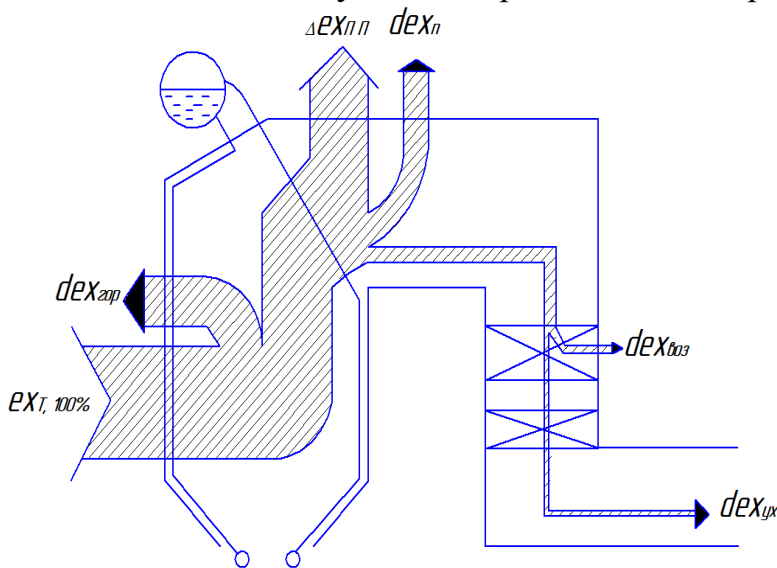


Рисунок 16 - Эксергетический баланс котельного агрегата БКЗ 75-39ФБ

Из рисунка 17 следует, что эксергетический КПД после реконструкции не уменьшился, а результаты, приведенные на рисунках 18 и 19, свидетельствуют о том, что после перевода котла на низкотемпературное вихревое сжигание топлива, немного снизились самые большие потери эксергии в котле при сжигании топлива, а так же потери с уходящими газами в связи со снижением температуры уходящих газов.

Эксергетический баланс котлоагрегата описывается выражением:

$$ex_t = \Delta ex_{пп} + dex_{тоз} + dex_{ух} + dex_{п} + dex_{воз} + ex_{ух}, \quad (1)$$

где  $\Delta ex_{\text{III}}$  – приращение эксергии в процессе превращения воды в пар;  $dex_{\text{II}}$  – потеря эксергии в процессе превращения воды в пар;  $dex_{\text{гор}}$  – потеря эксергии при необратимом процессе горения топлива;  $dex_{\text{воз}}$  – потеря эксергии продуктов сгорания за счет теплообмена в воздухоподогревателе;  $ex_{\text{yx}}$  – потеря эксергии с уходящими газами.

Эксергетическому КПД котла соответствует выражение

$$\eta_{ex}^{ka} = \eta_{ka} \cdot \frac{Q_H^P}{ex_m} \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_t} \right) \quad (2)$$

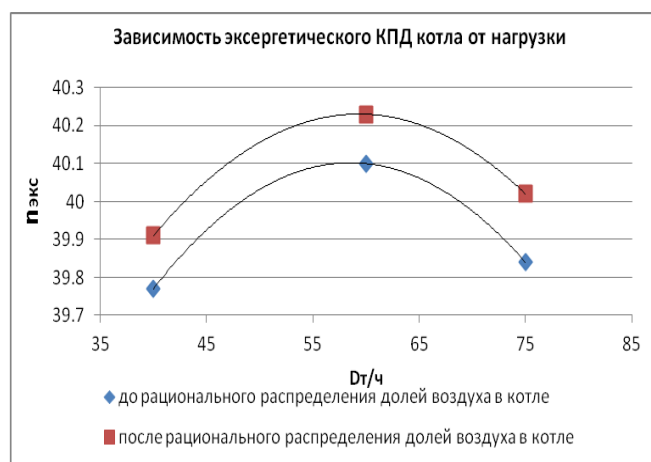


Рисунок 17 – Сравнение эксергетических КПД

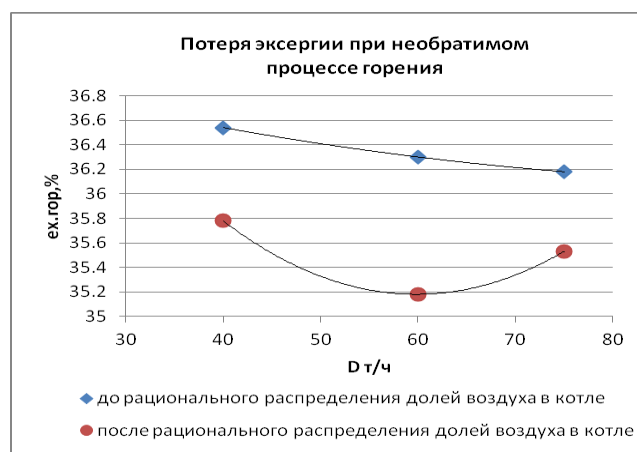


Рисунок 18 – Зависимость потери эксергии при горении топлива от нагрузки котла



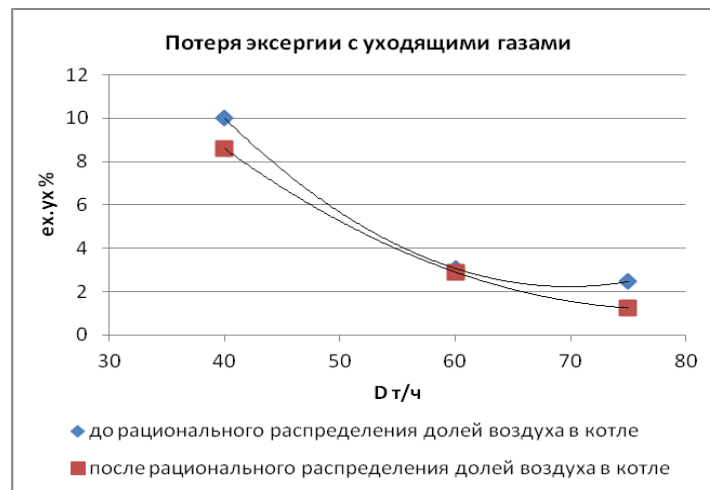


Рисунок 19 – Зависимость потери эксергии с уходящими газами от нагрузки котла

Рациональное распределение воздуха в котле приводит к уменьшению потерь эксергии при сжигании топлива и потерь тепла с уходящими газами. Так же снизились выбросы в окружающую среду, что свидетельствует о положительном решении задачи - определить режимы топочного процесса, обеспечивающие наибольшую экологическую эффективность его работы без снижения КПД.

**Пятый раздел** посвящен технико-экономическому обоснованию предлагаемых решений по совершенствованию процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей. Расчет коммерческой эффективности проекта показывает, что при незначительных первоначальных инвестициях данного проекта ожидается получение следующих результатов:



Рисунок 20. Коммерческая эффективность процесса

1. «Чистый дисконтированный денежный доход» уже на второй год эксплуатации значительно больше нуля, следовательно, проект усовершенствования низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинского угля признается эффективным (рисунок 20);

2. Значение «внутренней нормы доходности» составляет 82 %, что превышает норму дисконта и свидетельствует о достаточно высоком «резерве безопасности проекта».

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена и обоснована усовершенствованная схема низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания топлива, отличающаяся рациональным распределением долей воздуха в топке котла и позволяющая повысить экологическую эффективность работы котлоагрегатов без снижения КПД брутто путем выбора оптимального распределения долей воздуха в топке котла.

2. Установлена зависимость концентрации оксидов азота в дымовых газах пылеугольных котлов средней мощности, сжигающих бурые угли, от доли воздуха, подаваемого в топку на нижнее дутье и позволяющая определить режимы топочного процесса котельного оборудования с наибольшей экологической эффективностью его работы. Оптимальные значения составили:  $\Delta\alpha_{\text{н.д.}} = 0,2$ ,  $\Delta\alpha_{\text{з.д.}} = 0,1$ .

3. Определено оптимальное значение коэффициента избытка воздуха в топочных устройствах низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания пылеугольных котлов средней мощности  $\alpha_r = 0,77$ , при котором снижение выбросов в атмосферу оксидов азота достигает 12 %, а технико-экономические показатели не уменьшаются.

4. Разработана и обоснована методика оценки проектных решений реконструкции промышленных котельных на базе эксергетического анализа работы оборудования, позволяющая снизить объем режимно-наладочных испытаний котельного оборудования. Эксергетический анализ позволяет более точно определять, какой элемент оборудования приносит наибольшие потери работоспособности, тем самым указывая на предмет будущего технического или технологического усовершенствования.

5. Предлагаемые технические и технологические решения обоснованы экспериментально путем проведения испытаний котла БКЗ 75-39ФБ при разных нагрузках и коэффициентах избытка воздуха с оценкой его технико-экономических и эксергетических показателей. Расчет коммерческой эффективности проекта показывает, что реконструкция котельного агрегата имеет достаточно хорошие перспективы для практического использования при незначительных первоначальных инвестициях и может быть использована для других типов котлоагрегатов.

**Основное содержание диссертации изложено в публикациях:  
статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК:**

1. **Жуйков, А.В.** Оценка экологического ущерба от котла БКЗ 75-39ФБ с применением эксергетического анализа / А. В. Жуйков, А. И. Матюшенко // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 5 (2014 7) 596-604;

2. **Жуйков, А. В.** Способ уменьшения выбросов оксидов азота от котла БКЗ-75-39ФБ, работающего на ирша-бородинских углях / А. В. Жуйков,

В. А. Кулагин, А. Ю. Радзюк // Промышленная энергетика, 2011. - № 8. – С. 9–11;

3. **Жуйков, А. В.** Снижение оксидов азота в топках котлов / А. В. Жуйков // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 6 (2011 4) 724–732;

4. **Жуйков, А. В.** Низкотемпературное ступенчатое сжигание топлива / А. В. Жуйков // Вестник МГТУ. 2011. - Том 14. - № 4. – С. 701–703;

**патенты:**

5. Патент на полезную модель № 109527 РФ, МПК<sup>7</sup> F23C 5/00 Низко-эмиссионная вихревая топка / **А. В. Жуйков**, В. А. Кулагин, М. П. Федченко, А. А. Яковенко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – 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 Низко-эмиссионная вихревая топка / **А. В. Жуйков**, В. А. Кулагин, М. П. Федченко, С. А. Нагимулина; заявитель и патентообладатель Жуйков Андрей Владимирович. – 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 Низко-эмиссионная вихревая топка / **А. В. Жуйков**; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – 2011149438/06; заявл. 05.12.11; опубл. 20.05.2012, Бюл. № 14.

**статьи, опубликованные в других изданиях:**

8. **Жуйков, А. В.** Роль эксергетического анализа в энергетике / А. В. Жуйков, А. А. Яковенко // Вестник ассоциации выпускников КГТУ. - Красноярск: ПИК «Офсет». 2011. - Вып. 20. – С. 128-130;

9. **Жуйков, А. В.** Зарубежные методы снижения оксидов азота, образующихся в топках паровых котлов ТЭС / А. В. Жуйков // Вестник ассоциации выпускников КГТУ. - Красноярск: ПИК «Офсет». 2010. - Вып. 19. – С. 86-89;

**материалы научно-технических конференций:**

10. **Жуйков, А. В.** Подавление образования оксидов азота в топочных газах / А. В. Жуйков // Сборник тезисов и докладов Всероссийской молодежной конференции «Химическая физика и актуальные проблемы энергетике». – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 94–98.

11. **Жуйков, А. В.** Один из способов уменьшения экологических проблем при сжигании твердых топлив / А. В. Жуйков // Сборник тезисов и докладов Всероссийской молодежной конференции «Горение твердого топлива». – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 40–41.

12. **Жуйков, А. В.** Один из способов снижения NO<sub>x</sub> / А. В. Жуйков // Бенардосовские чтения: доклады XVI Международной НТК. - Иваново, 2011. – С. 130-133;

13. **Жуйков, А. В.** Методы снижения NO<sub>x</sub> на ТЭС Великобритании, США и Португалии / А. В. Жуйков, Ю. В. Видин // Энергоэффективность систем жиз-

необеспечения города: материалы XII Всероссийской НПК. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2011. – С. 100–104;

14. **Жуйков, А. В.** Топка для снижения оксидов азота / А. В. Жуйков, В. А. Кулагин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: материалы XII Всероссийской НПК. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2011. – С. 104–107;

15. **Жуйков, А. В.** Эксергетический анализ котлов после внедрения низкотемпературного сжигания топлива / А. В. Жуйков, А. А. Яковенко // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: материалы XII Всероссийской НПК. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2011. – С. 96–100;