

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**Жуйков Андрей Владимирович**

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

Специальность 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
А.И. Матюшенко

Красноярск – 2014

## Оглавление

Введение.....	4
РАЗДЕЛ I. Технологические и конструктивные методы подавления NO <sub>x</sub> .....	8
1.1. Сжигание топлив с малыми избытками воздуха .....	8
1.2. Рециркуляция продуктов сгорания .....	10
1.3. Двухступенчатое сжигание топлива .....	13
1.4. Сжигание топлив в кипящем слое.....	16
1.5. Ввод присадок .....	18
1.6. Усовершенствование горелочных устройств .....	21
1.7. НТВ-сжигания, ВИР-технологии .....	26
1.8. Цели и задачи исследований.....	27
РАЗДЕЛ II. Объект исследования .....	30
2.1. Краткое описание объекта исследований .....	30
2.2. Методика измерений и обработка опытных данных.....	34
2.3. Балансовые испытания котлоагрегата .....	38
РАЗДЕЛ III. Исследование влияния доли третичного дутья на технико-экономические показатели котлоагрегата .....	43
3.1. Перевод котлоагрегата на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание .....	43
3.2. Исследование влияния доли воздуха нижнего дутья на снижение оксидов азота в пределах нагрузки 65-75 т/ч .....	49
3.3. Исследование влияния доли воздуха нижнего дутья на снижение оксидов азота в пределах нагрузки 50-60 т/ч .....	59
3.4. Исследование зависимости снижения оксидов азота от третичного дутья при изменении коэффициента избытка воздуха.....	68
3.5. Зависимость температура уходящих газов от нагрузки котла до и после рационального распределения долей воздуха в котле .....	71
3.6. Зависимость содержания оксидов азота от коэффициента избытка воздуха в горелке .....	72
3.7. Зависимость содержания бенз(а)пирена и NO <sub>x</sub> от коэффициента избытка воздуха в условиях рационального распределения долей воздуха в котле .....	74

РАЗДЕЛ IV. Эксергетический анализ объекта исследований .....	76
4.1. Исследование степени совершенствования процесса горения при рациональном распределении долей воздуха в котле .....	76
РАЗДЕЛ V Экономический анализ перевода котлоагрегатов средней мощности на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание на примере котла БКЗ 75-39ФБ .....	86
5.1. Показатели мощности котла .....	86
5.2. Расчёт проектной стоимости перевода котла БКЗ 75-39-ФБ на НСВС .....	88
5.3. Расчёт экономических показателей в условиях рационального распределений долей воздуха.....	90
5.4. Определение срока окупаемости проекта .....	92
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....	98
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	122
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ, ПАТЕНТЫ .....	132

## ВВЕДЕНИЕ

**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 двухступенчатого 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 указанной 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 IV–XII Всероссийской НПК по проблемам энергоресурсосбережения «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города» (Красноярск, 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 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.

## **Раздел I. Технологические и конструктивные методы подавления NO<sub>x</sub>**

### **1.1 Сжигание топлив с малыми избытками воздуха.**

Сжигание топлив с малыми избытками воздуха является одним из самых распространенных способов снижения выбросов окислов азота [1-108].

Наибольшая эффективность достигается при сжигании твердого топлива с избытками воздуха  $\alpha_{\text{пт}}'' = 1,03-1,05$ . Зависимость концентрации NO<sub>x</sub> от коэффициента избытка воздуха имеет вид экстремальной кривой с максимумом в интервале  $\alpha_{\text{пт}}'' = 1,1-1,3$ . Причем максимум NO<sub>x</sub> соответствует, как правило, такому значению коэффициента избытка воздуха, при котором в данных условиях достигается наиболее полное сгорание топлива. В диапазоне  $\alpha_{\text{пт}}'' = 1,1-1,3$  обеспечивается достаточное количество свободного кислорода и достаточно высокий температурный уровень. Различие в местоположении и уровне максимумов концентраций NO<sub>x</sub> определяется различиями в конструкциях горелочных устройств, топочных камер и др.

Уменьшение  $\alpha_{\text{пт}}''$  до 1,03–1,05 позволяет на 25–30% снизить концентрацию окислов азота в уходящих газах по сравнению с режимами при  $\alpha_{\text{пт}}'' = 1,15-1,20$ . В отдельных случаях, в зависимости от особенностей котлоагрегата возможно и более резкое снижение выброса NO<sub>x</sub>. Снижение концентрации в уходящих газах при сжигании топлив с малыми избытками воздуха происходит за счет снижения образования как термических, так и топливных окислов азота. Кроме того, данный метод повышает КПД котлоагрегата на 1–2% и снижает интенсивность загрязнения конвективных поверхностей нагрева.

Однако низкие уровни избытка воздуха приводят к увеличению выбросов канцерогенных веществ, твердых частиц и окиси углерода (рис.1.1), 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 топливоздушная смеси, можно интенсифицировать процесс горения топлива и добиться значительного уменьшения бенз(а)пирена (далее БП) (рис.1.1). При этом максимальные значения концентрации  $\text{NO}_x$  остаются без изменения, но вся кривая зависимости  $\text{NO}_x$  ( $\alpha_{\text{пт}}$ ) 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  $\text{NO}_x$ .

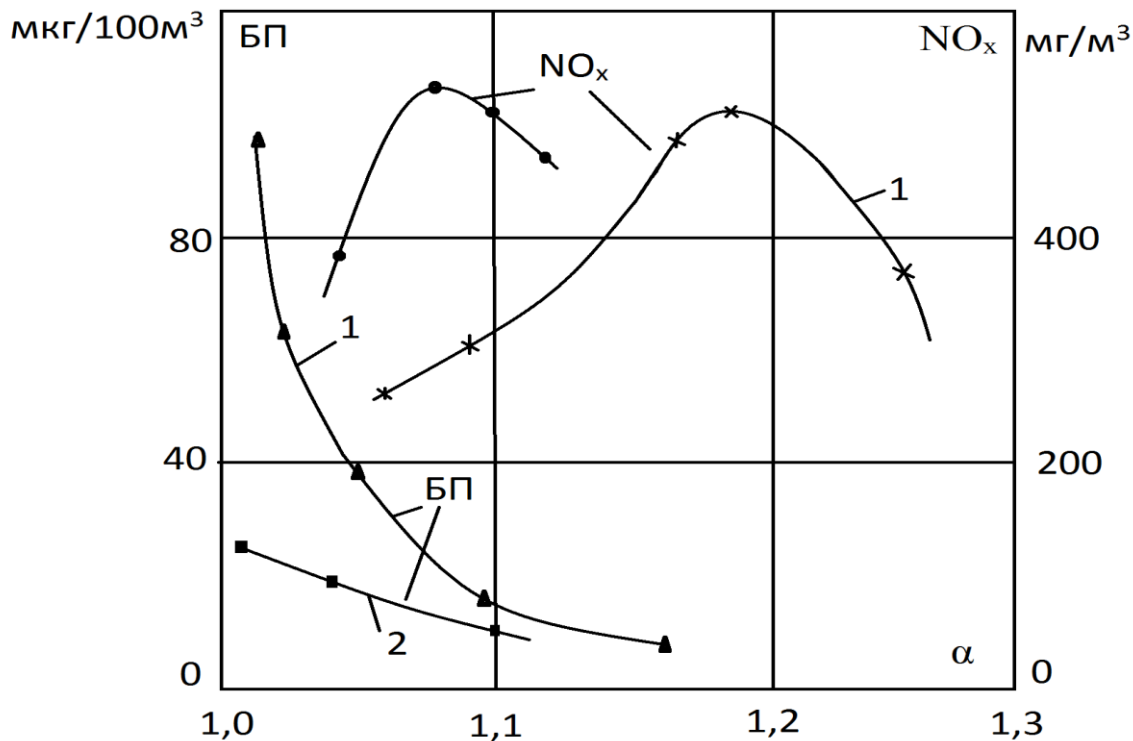


Рисунок 1.1-Зависимость концентраций  $\text{NO}_x$  и БП от избытка воздуха

(1 – обычная горелка; 2 – усовершенствованная горелка)

## 1.2 Рециркуляция продуктов сгорания.

Подвод топочных газов в зону горения является эффективным средством снижения выброса  $\text{NO}_x$ [1-108]. Уменьшение концентрации  $\text{NO}_x$  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°C и ввод их в различные зоны показал, 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 1.2). 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 1. 2). Ввод рециркулирующих газов через шлицы, расположенные под горелками (кривая 2, рис 1 .2), менее эффективен, а при вводе дымовых газов через шлицы в поду топки (кривая 3, рис 1.2) концентрация  $\text{NO}_x$  практически не меняется. В этих случаях основное сгорание топлива происходит прежде, чем рециркулирующие газы смешиваются с топливовоздушной смесью.

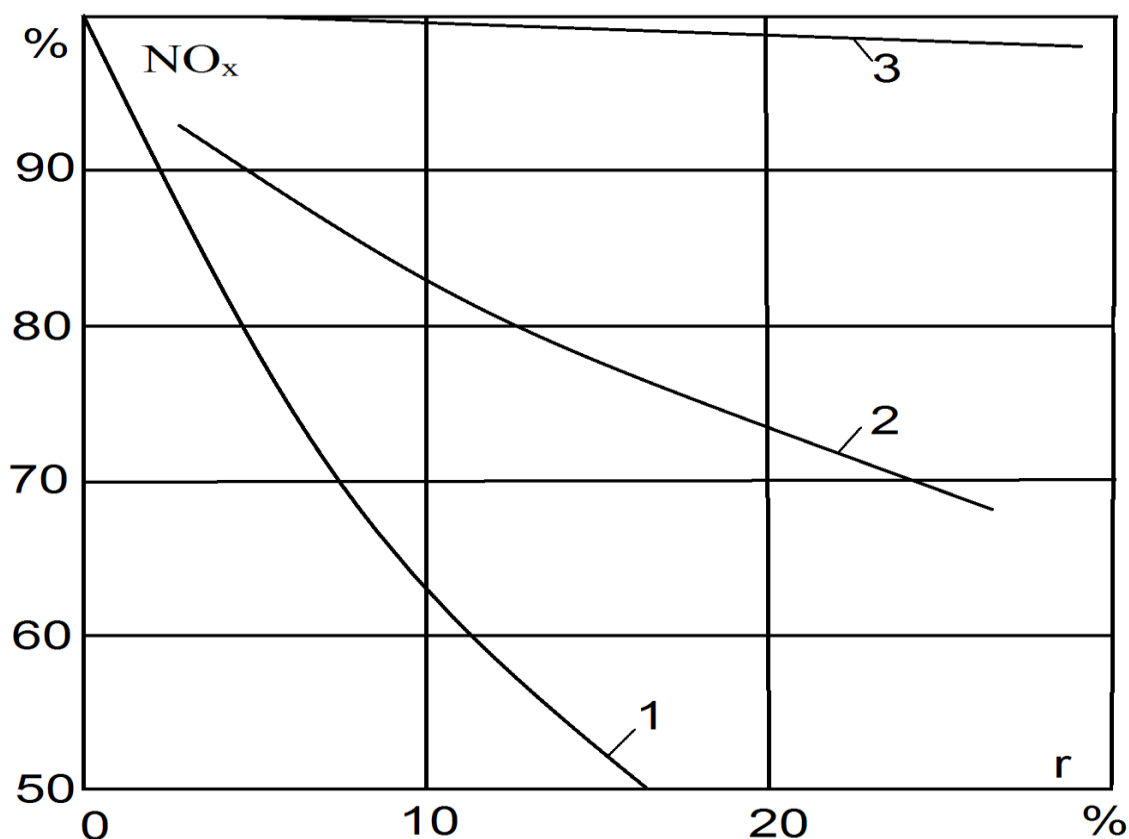


Рисунок 1.2-Снижение образования  $\text{NO}_x$  в зависимости от рециркуляции топочных газов

Рециркуляция топочных газов воздействует только на термические окислы азота, поэтому наибольший эффект она дает при сжигании в котлах природного газа и легких сортов мазута. Рециркуляция продуктов сгорания в размере  $r=20-30\%$  в отдельных случаях может почти полностью исключить образование термических  $\text{NO}_x$  или на  $30-60\%$  снизить общий выброс окислов азота.

Рециркуляция газов до  $20-30\%$  незначительно влияет на горение и может быть также использована как средство регулирования температуры перегрева пара. Однако, дальнейшее увеличение степени рециркуляции приводит к чрезмерному снижению концентрации кислорода в факеле, к резкому увеличению продуктов неполного сгорания, обрыву и погасанию факела. Кроме того, влияние рециркуляции на образование  $\text{NO}_x$  существенно

только в диапазоне 0–30%; дальнейшее увеличение степени рециркуляции незначительно влияет на уровень содержания окислов азота в продуктах сгорания.

Влияние рециркуляции продуктов сгорания на образование БП представлено на рис.1.3 [2]. При малых избытках воздуха снижение  $\text{NO}_x$  за счет рециркуляции незначительно, а при  $\alpha > 1,1$  рециркуляция снижает содержание  $\text{NO}_x$  почти на 30%. В области малых избытков воздуха рециркуляция дымовых газов заметно увеличивает выброс БП. Влияние рециркуляции на образование БП уменьшается с увеличением коэффициента избытка воздуха.

Строго говоря, дымовые газы не могут рассматриваться как полностью инертная среда. В котлах, работающих под разрежением, избыток воздуха в рециркулирующих газах достигает 10–20 %. В результате достаточное количество кислорода и несвязанного азота, а также относительно большое время пребывания в топке, могут в отдельных случаях превратить рециркулирующие газы в смесь, в которой при высоких температурах создаются благоприятные условия для дополнительного окисления азота. Такое явление происходит при попадании рециркулирующих газов не в зону активного горения, а в зону активного окисления атмосферного азота, что возможно, например, при частичных нагрузках котла и коротком факеле в топках с подачей рециркулирующих продуктов сгорания навстречу топливовоздушной смеси [2].

Организация рециркуляции продуктов сгорания в зону горения является довольно дорогостоящим мероприятием, поскольку требует дополнительных капитальных затрат на установку дутьевого оборудования и газоотходов рециркуляции, так же идет снижение КПД котла.

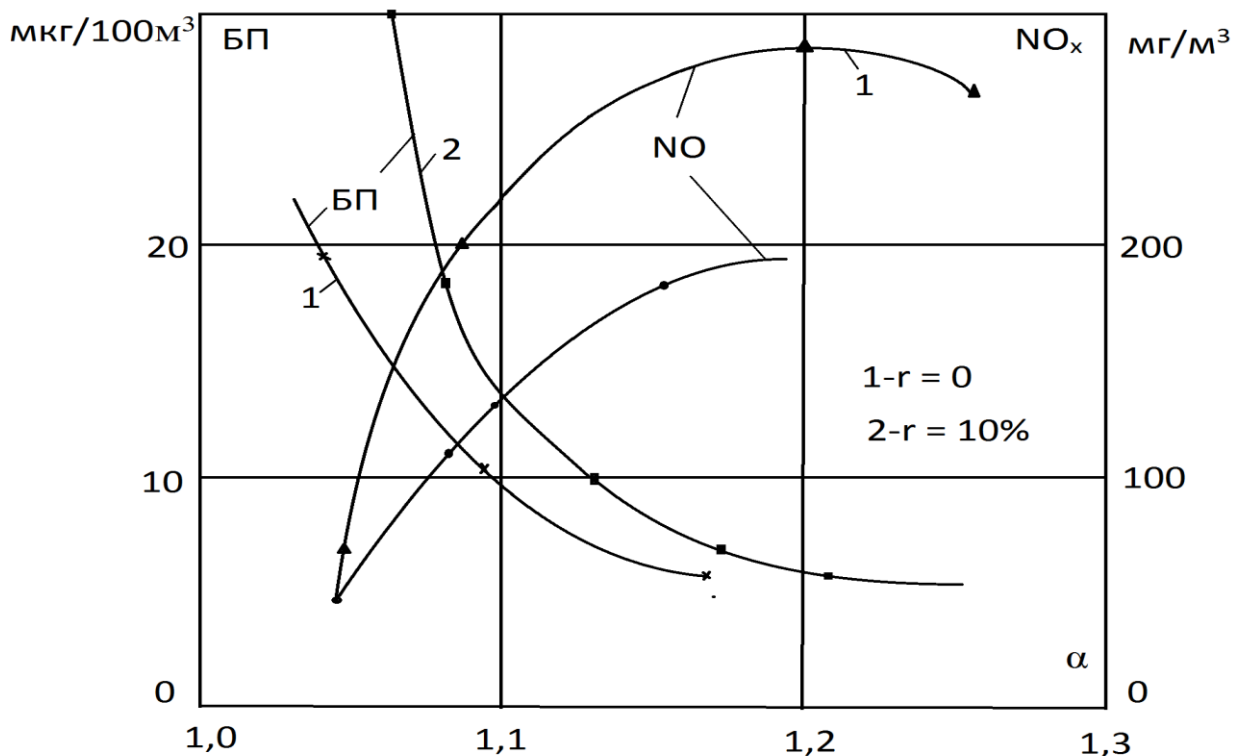


Рис.1.3. Влияние рециркуляции на выброс  $\text{NO}_x$  и БП

### 1.3 Двухступенчатое сжигание топлива.

Под двухступенчатым или двухстадийным сжиганием (за рубежом его называют OFA — overfireair) подразумевается такая организация процесса горения, когда через горелки с топливом подается воздух в количестве, меньшем стехиометрического (обычно  $\alpha = 0,8-0,95$ ), 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.1.4).

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  $\text{NO}_x$  [20].

Основная трудность реализации двухступенчатого сжигания состоит в правильном определении места подвода воздуха второй ступени и его количества,

которые для разных конструкций 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 30-40 % 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 (рис1.5) [2].

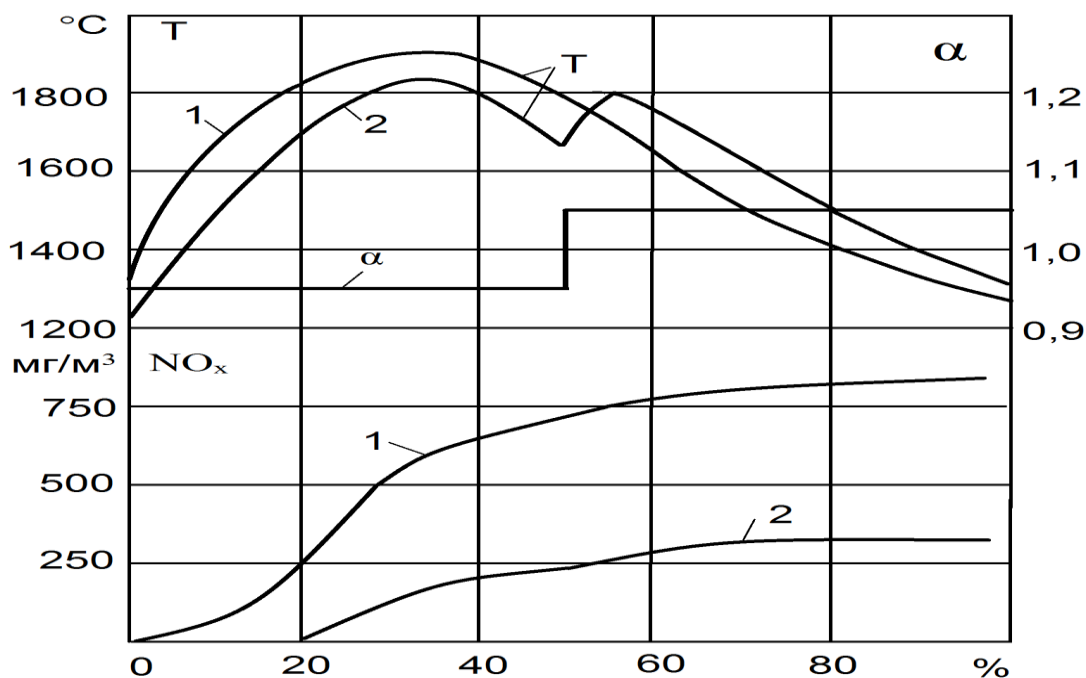


Рисунок 1.4- Принципиальная схема двухступенчатого сжигания  
(1 – одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание)

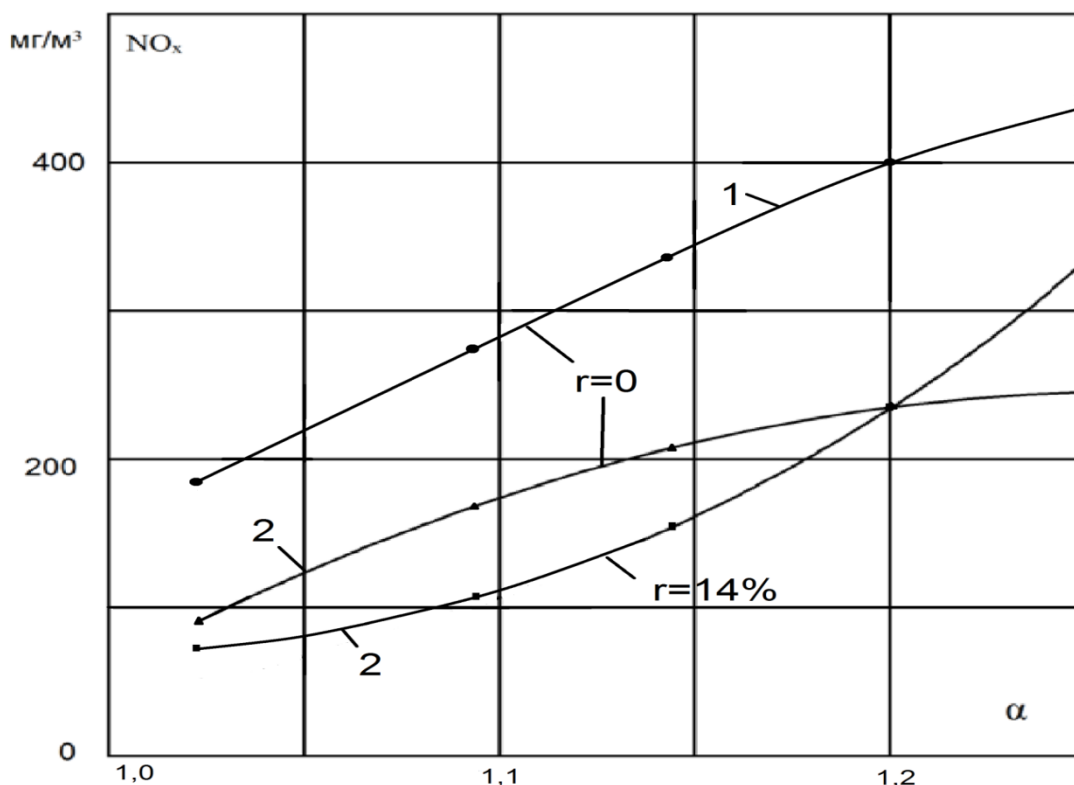


Рисунок 1.5-Влияние избытка воздуха и рециркуляции на образование NO<sub>x</sub>  
(1-одноступенчатое сжигание; 2 – двухступенчатое сжигание)

Для преодоления этого препятствия, специалисты фирмы Mitsui Babcock Energy Limited (MBEL, Великобритания) предложили метод усиленного (или бустерного) двухступенчатого сжигания — BOFA. От традиционного OFA этот метод отличается наличием дополнительного (бустерного) дутьевого вентилятора, который создает высоконапорные струи третичного воздуха. Интенсивное перемешивание этих струй с продуктами сгорания позволяет дожечь CO и другие продукты неполного сгорания до выхода дымовых газов из топки даже в тех случаях, когда сопла третичного воздуха располагаются в верхней части топочной камеры [17, 18].

Следующий опыт использования метода BOFA был получен при реконструкции энергоблока № 9 на ТЭС Kingston (США), топливом для которой служит восточный битуминозный уголь, с высоким выходом летучих. Энергоблок мощностью 200 МВт оборудован котлом с тангенциальной топкой, разделенной на две части двусветным экраном. На первом этапе было решено внедрить схему BOFA, а для дальнейшего сни-

жения выбросов  $\text{NO}_x$ . смонтировать еще и схему  $\text{NO}_x$  Star (селективное некаталитическое восстановление с присадкой в зону реагирования кроме аммиака необходимого количества природного газа). По данным MBEL, использование комплексного технического решения позволило снизить выбросы  $\text{NO}_x$  на 68%, причем применение только BOFA уменьшало эмиссию  $\text{NO}_x$  на 40, а только  $\text{NO}_x$  Star — на 53%. В результате при сжигании битуминозных углей восточных месторождений на энергоблоке № 9 ТЭС Kingston удалось снизить концентрацию  $\text{NO}_x$  в дымовых газах за котлом до 190 [17, 18].

Еще один котел был переведен специалистами MBEL на технологию BOFA в Португалии, на ТЭС Sines. Здесь установлено четыре энергоблока мощностью по 314 МВт. Каждый котел паропроизводительностью 950 т/ч потребляет 106 т/ч импортного каменного угля с высшей теплотой сгорания 27,6 МДж/кг (6590 ккал/кг). Параметры пара — 16,2 МПа, 535/535°C мг/м<sup>3</sup>. Следовательно, 30%-ное снижение выбросов  $\text{NO}_x$  было получено при допустимом содержании горючих в уносе. Номинальная паропроизводительность, давление, температура первичного и вторичного пара остались без изменения, а котел мог работать при любом сочетании включенных горелок [17, 18].

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 [1-108].

#### **1.4 Сжигание твердых топлив в кипящем слое.**

При сжигании угля в кипящем слое используется сравнительно крупная дробленка с размерами частиц 1,5–6мм, в связи с чем снижаются затраты на подготовку топлива. Глубина слоя составляет 0,6–0,9м при скорости потока 1–4,5м/с. Большая поверхность твердых частиц и хороший контакт между ними и потоком газов создают благоприятные условия для



протекания реакций. Эффективное горение топлива (благодаря интенсивному теплообмену с погруженными в слой поверхностями нагрева) происходит при температуре кипящего слоя 760–980°C, что значительно ниже температуры, характерной для пылеугольных топок. В этом диапазоне температур зола топлива не размягчается и не спекается. Это существенно облегчает ее удаление. За счет циркуляции частиц, обеспечивающей хорошее их перемешивание, в слое обеспечивается равномерное распределение температуры.

Применение кипящего слоя при сжигании сернистых топлив позволяет значительно уменьшить выбросы в атмосферу окислов азота и серы. Выбросы существенно сокращаются, так как в результате сжигания топлива при сравнительно низких температурах практически не образуются термические окислы азота.

Путем введения в кипящий слой адсорбирующего вещества можно одновременно с процессом горения организовать процесс десульфации топочных газов. В качестве адсорбента может быть использован молотый известняк или доломит, содержащие соединения  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ . Известняк вступает в реакцию с сернистым ангидридом  $\text{SO}_2$  при температуре 750–790°C с образованием сернокислого кальция  $\text{CaSO}_4$ , который легко удаляется из слоя вместе с золой.

В результате выбросы  $\text{SO}_2$  с дымовыми газами могут быть снижены на 90%. При сжигании в кипящем слое уменьшается также возгонка сульфатов щелочных металлов, что ослабляет высокотемпературную коррозию труб и отложения на них.

Требования, предъявляемые к качеству топлива при сжигании в кипящем слое, невысоки. При этой технологии можно использовать любые сорта и марки угля, в том числе забалластированные: 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 [5,16].

## 1.5 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 [1-108].

Достаточно перспективными, как показали исследования, оказались 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 окислов 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  $\alpha_{\text{пл}} = 1,08$  с 300 до 150  $\text{мг/м}^3$ . 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.

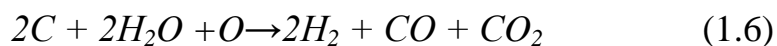
Испарения капель мазута в этом случае сопровождается микровзрывами под действием вскипающей внутри капель воды, разрывающей мазутную оболочку. Подобные микровзрывы интенсифицируют процесс горения. Частицы присадки при этом реагируют с минеральными компонентами, как в факеле, так и за его границами. Присадка "Кремалит-1" способствует снижению концентрации  $\text{NO}_x$ , сажистых частиц и БП в дымовых газах. Воздействие присадки на окислы азота, по всей вероятности, имеет каталитический характер и может быть описано реакцией:



Общее снижение  $NO_x$  при вводе присадки "Кремалит-1" при дозировке 0,5 кг присадки на 1 т мазута составляет 40÷45 %.

Наиболее перспективным и распространенным является ввод воды в зону горения, как в виде эмульсии, так и отдельно. Данный метод относительно прост и дешев [7,16].

Так как в результате горения углеводородов (в мазуте или газовом факеле) неизбежно образуются углерод и вода, снижение образования  $NO_x$  может быть объяснено механизмом взаимодействия сажистых частиц с водяными парами. Углерод взаимодействует с парами воды с образованием конечных продуктов - водорода, окиси и двуокиси углерода.



Известно, что  $H_2$  и  $CO$  способствуют восстановлению окислов азота. Таким образом, эта реакция приводит не только к уменьшению концентрации сажистых частиц и адсорбированию из них БП, но и к получению восстановителей  $NO_x$ .

При впрыскивании пара (или воды) в топочные устройства различных по производительности и конструкции котлов, снижение содержания  $NO_x$  продуктах сгорания имеет одинаковый характер и пропорционально расходу пара (воды) (рис1.6).

Снижение выброса  $NO_x$  достигается и при применении водомазутных эмульсий [2,5,7,16]. Горение водомазутных эмульсий происходит, при температурах ниже 1600 °С. Уменьшение эмиссии окислов азота происходит благодаря снижению средней температуры в зоне горения в результате того, что часть тепла расходуется на испарение капель воды, а также более равномерного распределения температур в топочной камере. Быстрое испарение воды из водомазутной эмульсии приводит к тончайшему распылению топлива, что способствует тесному контактированию капелек мазута с кислородом воздуха и обеспечивает интенсивное бессажевое сжигание и подавление  $NO_x$ .

Для сжигания водомазутных эмульсий применяются форсунки механического распыла. В качестве топлива может использоваться мазут любой марки. Вода и мазут через дозирующее устройство 2 и подогреватели 1,3 подаются в определенной пропорции в смеситель 4. Образованная таким образом водомазутная эмульсия, насосом низкого давления 5 подается через форсунку 6 в топку (рис. 1.7). Содержание воды в эмульсии составляет 20–25 % по объему. Сжигание водомазутных эмульсий дает возможность снизить выбросы  $\text{NO}_x$  на 30÷40 %.

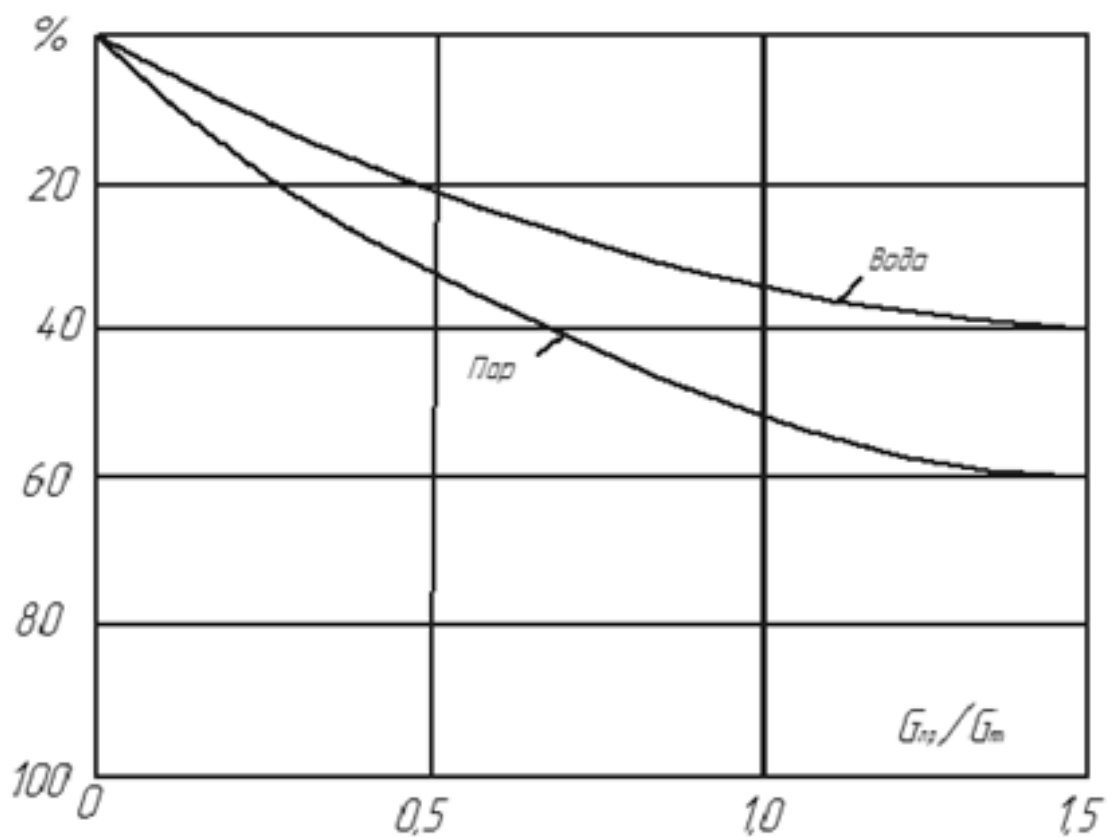


Рисунок 1.6-Влияние подачи пара и воды на образование  $\text{NO}_x$ .

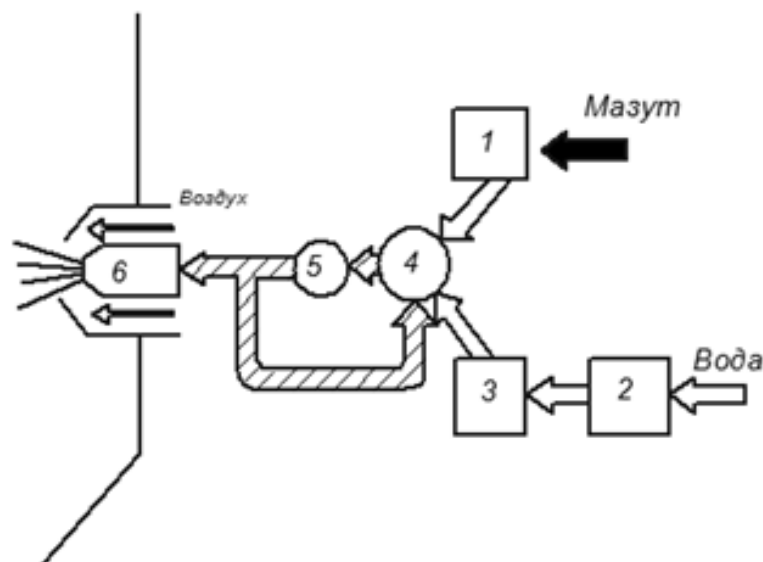


Рисунок 1.7- Схема приготовления и сжигания водомазутной эмульсии.

Недостатком данного метода является то, что ввод воды или пара приводит к дополнительным потерям тепла с уходящими газами, которые возрастают прямо пропорционально величине впрыска. В результате несколько снижается КПД котла.

### 1.6 Усовершенствование горелочных устройств.

Усовершенствование горелочных устройств является одним из наиболее экономичных способов предотвращения выбросов окислов азота, сажи и канцерогенных веществ [1-108]. 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  $\text{NO}_x$  в продуктах сгорания. При этом обеспечивается хорошее сгорание топлива при малых избытках воздуха и минимальное содержание сажи, СО и БП в дымовых газах. Диаметр и длина факела загасят от типоразмера горелочного устройства и мало зависят от коэффициента избытка воздуха и нагрузки.

Другой путь связан с уменьшением температуры горения, увеличением длины пламени и ростом потерь тепла излучением. Это достигается некоторым ухудшением качества смешения. Поэтому наиболее благоприятные условия для максимального снижения образования окислов азота получается в простом прямоточном факеле при максимальном разбавлении воздуха продуктами сгорания. Для пылеугольного факела важно при этом обеспечить стабильное воспламенение на выходе из горелки, чтобы не допустить предварительного смешения первичного и вторичного воздуха до того, как последний перемешается с инертными топочными газами.

Снижение образования окислов азота при применении много-факельных горелочных устройств происходит за счет быстрого сгорания топлива и уменьшения удельного заполнения объема топки. Рассекателем в горелочном устройстве или форсунке служит специальная насадка. Такие горелочные устройства обеспечивают также низкое сажеобразование и снижают образование ВП.

К типу горелок ступенчатого сжигания относятся горелки для двухстадийного сжигания и горелки для сжигания топлив в условиях, отличных от стехиометрических. Основная идея способа заключается в том, чтобы в зоне с недостатком воздуха обеспечить преимущественно конверсию газообразных азотосодержащих веществ (типа  $\text{HCN}$  и  $\text{NH}_3$ ), вышедших одновременно с летучими, в молекулярный азот  $\text{N}_2$ . Это реализуется в горелочных устройствах, в которых необходимый для горения воздух разде-

ляется на два потока таким образом, чтобы непосредственно у устья горелки сформировалась зона с  $\alpha < 1$ . Подмешивание в струю второго потока воздуха необходимо для завершения горения топлива, происходит далее по потоку струи. На рис.1.8 показана такая горелка, где воздух для второй стадии вводится через дискретные воздушные сопла, расположенные вокруг периферии основной горелки.

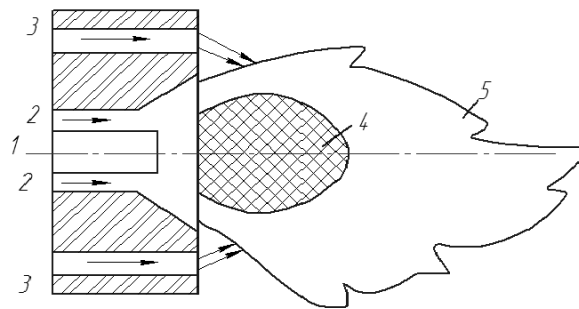


Рисунок 1.8- Горелка ступенчатого сжигания 1-аэрозоль; 2-вторичный воздух; 3-третичный воздух; 4-зона с  $\alpha < 1$  ; 5-зона сжигания.

Горелочные устройства с рециркуляцией продуктов сгорания можно разделить на два типа:

- 1) с естественной эжекцией топочных газов в струю;
- 2) с принудительной рециркуляцией продуктов сгорания в горелку.

В горелке с естественной рециркуляцией топочных газов (рис 1.9а) воздух для горения и топливо вводятся в топку отдельно. В результате происходит затягивание процессов перемешивания топлива с воздухом и активного выгорания смеси. На начальном участке факела обеспечивается значительная эжекция (или "саморециркуляция") продуктов сгорания как в воздушный, так и топливный потоки. Благодаря рециркуляции продуктов сгорания в зоне реакции происходит разбавление концентраций исходных

веществ (кислорода и топлива) и, как следствие, снижение скоростей цепных реакций горения и уменьшения температуры.

В совокупности это позволяет эффективно подавлять образование  $\text{NO}_x$ .

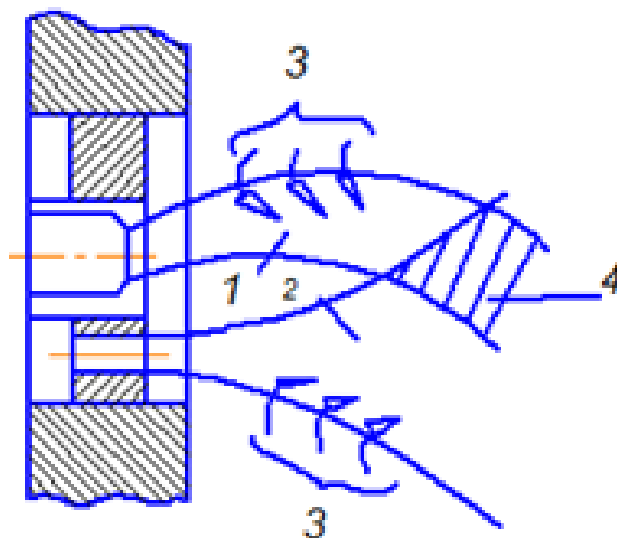


Рисунок 1.9а- Горелки с естественной рециркуляцией продуктов сгорания: 1- топливо; 2-воздух; 3-топочные газы; 4- зона смешения.

В горелочных устройствах с принудительной рециркуляцией уходящие газы через специальные газопроводы подаются в горелки или короба горячего воздуха перед горелками. Конструкция горелок и способ ввода рециркулирующих дымовых газов существенно влияют на образование окислов азота. Наиболее эффективное действие рециркуляции имеет место при подаче продуктов сгорания через отдельные каналы горелок со скоростью равной или выше выходной скорости воздуха. Еще большего эффекта можно достичь при подаче дымовых газов через каналы, расположенные между каналами первичного и вторичного воздуха (рис. 1.9б).



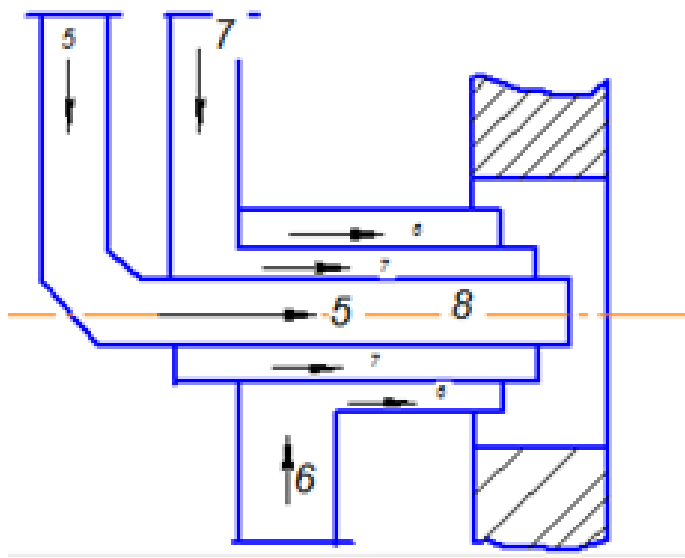


Рисунок 1.9б- Горелки с принудительной рециркуляцией продуктов сгорания: 5-аэросмесь; 6-вторичный воздух; 7-газы рециркуляции.

Существуют горелочные устройства, в конструкции которых реализованы сразу несколько способов подавления окислов азота. Путем установки простейшего инерционного пылеконцентратора на пылепроводе перед горелкой поток аэросмеси делится на высококонцентрированный и низкоконцентрированный (рис.1.10). В результате воспламенение и сгорание летучих у большей части топлива происходит при доле первичного воздуха, значительно меньшей стехиометрического соотношения. Это обеспечивает снижение эмиссии  $\text{NO}_x$ . Летучие низкоконцентрированного потока топлива будут гореть в среде с повышенным избытком воздуха, что также снижает образование  $\text{NO}_x$ . Для более глубокого снижения выбросов окислов азота, кроме установки этих горелок, применяется также ступенчатое сжигание - в основные горелки подается только 80-90 % всего воздуха, направляемого в котел.

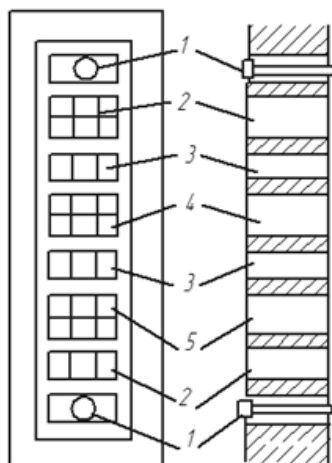


Рисунок 1.10- Комбинированная пылеугольная горелка.

(1-мазутная форсунка; 2-вторичный воздух; 3-газы рециркуляции; 4-аэросмесь с повышенной концентрацией пыли; 5-обедненная топливом аэросмесь)

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.

### 1.7 НТВ и ВИР-технологии.

Применение НТВ-технологии и ВИР-технологии позволяет:

- упростить систему подготовки топлива, увеличить её производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;
- стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от "подсветки" факела газом или мазутом даже при сжигании низкосортных топлив;

- обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;
- повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15...20 %;
- исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;
- обеспечить снижение выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  на 30...50 %;
- обеспечить снижение выбросов оксидов серы  $\text{SO}_x$  на 20...40 % за счет их связывания с основными оксидами золы ( $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$ ) при благоприятных внутритопочных условиях;
- обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку  $\text{CaO}$ -содержащих добавок.

НТВ-технология направлена на сжигание дробленого угля кусочками 0-25мм. Вир-технология направлена на сжигание угля более огрубленного помола.

### **1.8 Цели и задачи исследований.**

Цель диссертационной работы состоит в усовершенствовании процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей с учетом снижения выбросов  $\text{NO}_x$  в атмосферу. Для достижения указанной 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.

## ВЫВОДЫ

На основании проведенного литературного анализа технологические мероприятия по подавлению образования оксидов азота и данные об эффективности различных методов подавления  $NO_x$  можно свести в следующую таблицу 1.1.

Таблица 1.1 Основные способы уменьшения оксидов азота [1-107]

Метод	Уменьшение выброса $NO_x$ , % при сжигании:		
	природного газа	мазута	угля
Рециркуляция отходящих газов	60	20	5-15
Ступенчатое сжигание топлива	55	40	40
Снижение плотности теплового потока в топке	20	20	20
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

Содержание вредных выбросов с дымовыми газами ТЭС и котельных к настоящему времени достаточно высоко. Представление о них дают результаты измерений содержания окислов азота в дымовых газах различных котлоагрегатов, приведенные в табл.1.2.

Содержание  $NO_x$  в дымовых газах котлов при сжигании канско-ачинских углей находится в пределах 400-500 мг/м<sup>3</sup> (табл.1.2). Эти и другие литературные данные показывают, 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.

Таблица 1.2 Содержание  $\text{NO}_x$  в дымовых газах котлов и концентрация кислорода в зоне реакции.

Тип котла	D, т/ч	Топливо	$Q_M^P$ , ккал/кг	$N^P$ , %	Тип топки	Тип горелочного устройства	$\alpha$ в точке отбора	$\text{NO}_x$ , мг/м <sup>3</sup>
ТП-90	500	Газ	8400	-	Открытая с двух светным экраном	Щелевые, тангенцианное расположение	1,25 1,02	470 160
БКЗ 320-140	320	Ирша-бородинский	3740	0,6	С пережимом ЖШУ	Прямоточные, угловое раположение	1,25	410
ТПП-110	4×475	АШ-кузнецкий Т	5360	0,7	С пережимом ЖШУ	Вихревые, встречные в 2 яруса	1,2	1200
ТГМП-314	950	Мазут	9480	0,4	Открытая	Вихревые, встречные в 2 яруса	1,1	1020
БКЗ-320-140ГМ	329	Мазут	9700	0,3:0,4	Открытая	Вихревые, встречные в 2 яруса	1,05	750
ТП-109	650	Донецкий	4550	0,9	С двухсветным экраном	Вихревые, встречные в 2 яруса	1,25	610
ПК-10Ш	220	Ирша-бородинский	3816	0,6	ТШУ	тангенциальное	1,4	450

## РАЗДЕЛ II. Объект исследования

### 2.1 Краткое описание объекта исследований.

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

Котел БКЗ-75-39 ФБ Белгородского завода энергетического машиностроения рассчитан на работу на бурых углях с твердым шлакоудалением. Котел БКЗ-75 вертикально-водотрубный однобарабанный с естественной циркуляцией выполнен по П-образной схеме компоновки поверхностей нагрева (рисунок 2.2.1). Котел работает с уравновешенной тягой. Технические характеристики котла представлены в таблице 2.2.1.

Таблица 2.1.1 - Технические характеристики котла

Паропроизводительность, т/ч	75
Давление пара на выходе из котла, МПа (кгс/см <sup>2</sup> )	39 (40)
Температура, °С:	
– перегретого пара	440
– питательной воды	145
– уходящих газов	140
КПД котла (брутто), %	90,3
Габаритные размеры, мм:	
– высота	23580
– ширина по осям колонн	7430
– глубина по осям колонн	11120

Топочная камера экранирована трубами  $\varnothing 60 \times 3$  мм. Трубы фронтального и заднего экранов в нижней части образуют холодную воронку. В верхней части камеры трубы заднего экрана разведены в четырехрядный фестон.

Барaban котла, внутренним диаметром 1500 мм, с толщиной стенки 40 мм, выполнен из стали 20К. В барабане имеется отсек первой ступени испарения и два отсека второй ступени испарения по торцам барабана, оборудованные внутрибарабанными циклонами. Третья ступень испарения состоит из двух выносных циклонов с диаметром 337 мм. Пар из циклонов поступает в барабан.

Пароперегреватель – конвективный, змеевиковый, вертикальный с коридорным расположением труб  $\varnothing 38 \times 3$  мм (сталь 20), состоит из двух ступеней: ПП-1 и ПП-2. Температура перегрева пара регулируется поверхностным пароохладителем, расположенным в рассечке пароперегревателя. Пароохладитель включен по воде перед первой ступенью водяного экономайзера.

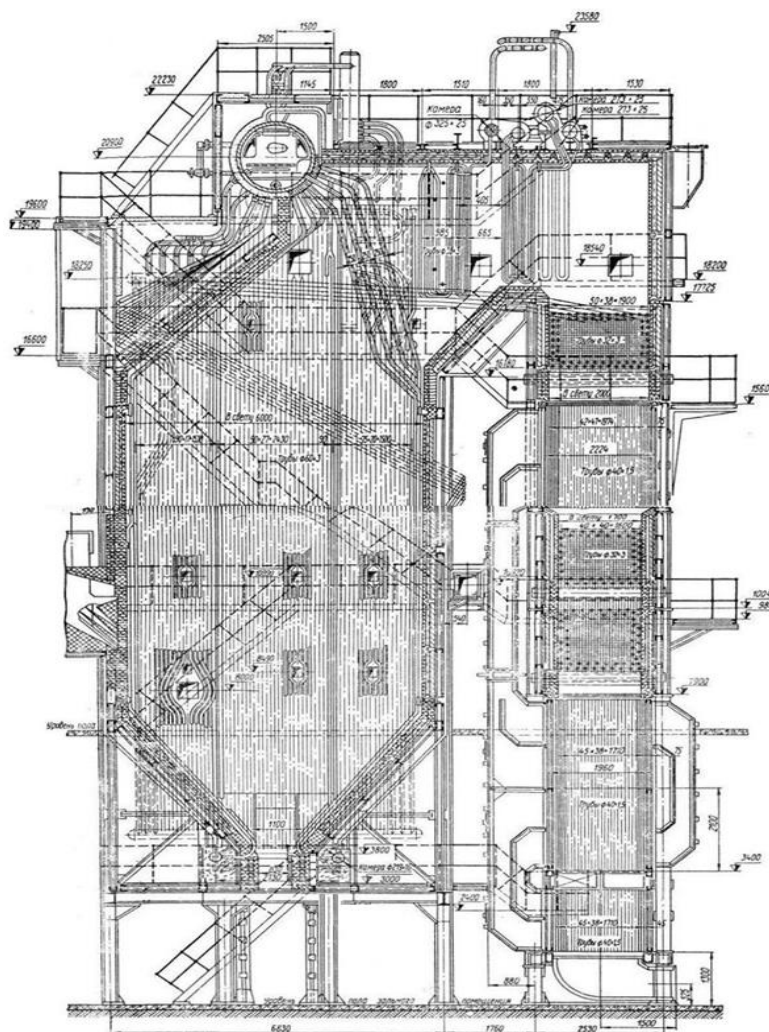


Рисунок 2.1.1. Котел БКЗ 75-39ФБ

Водяной экономайзер – кипящего типа, гладкотрубный, змеевиковый, выполнен из труб  $\varnothing 32 \times 3$  мм, состоит из двух пакетов расположенных в конвективном газоходе котла.

Трубчатый воздухоподогреватель вертикального типа размещен в рассечку с водяным экономайзером, выполнен из труб  $\varnothing 40 \times 1,6$  мм расположенных в шахматном порядке, одноходовой по газам и четырёхходовой по воздушной стороне. Имеется линия рециркуляции горячего воздуха на всас дутьевого вентилятора.

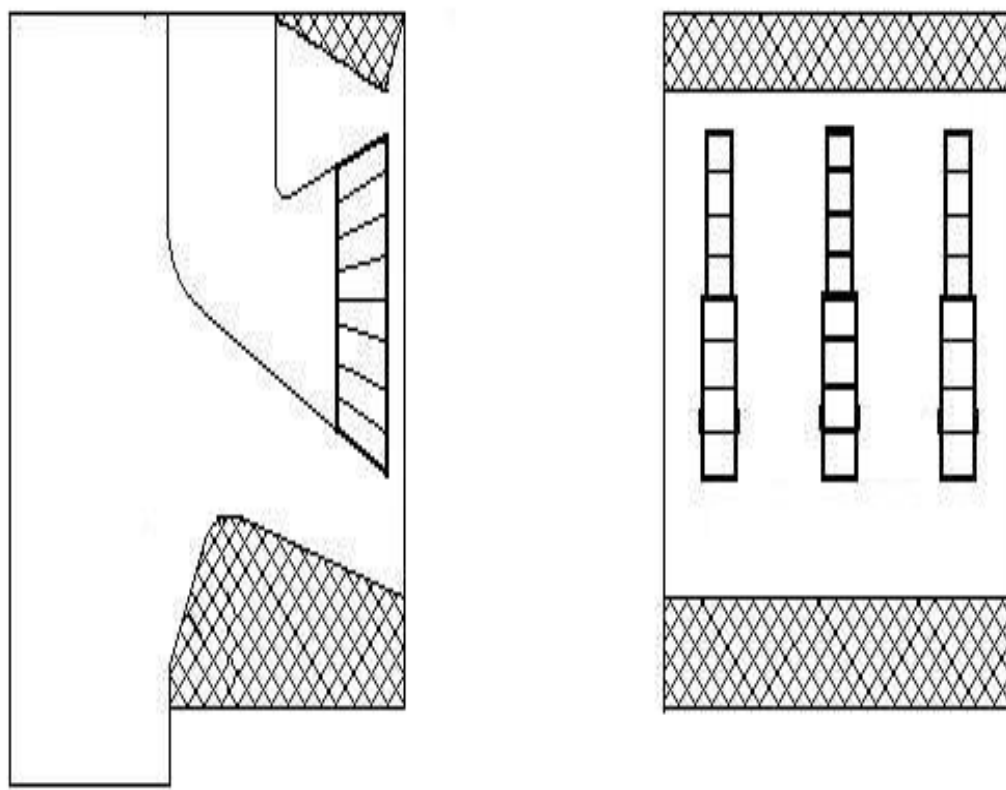


Рисунок 2.1.2 – Горелка котла БКЗ-75-39ФБ ст.№2



Система пылеприготовления индивидуальная, с прямым вдуванием и сушкой топлива горячим воздухом. Котел оборудован двумя молотковыми мельницами типа ММТ-1300/2564/750(производительностью  $V_m=24\text{т/ч}$ ,  $N_э=315\text{кВт}$ ), с гравитационными сепараторами. Топливо подается двумя питателями сырого угля типа СПУ-700/5040 (производительностью  $V_m=5,4-34\text{т/ч}$ , число оборотов  $n=300-1500\text{об/мин}$ ).

Топка оборудована двумя прямоточными горелками эжекционного типа, расположенными в один ярус с фронта топки. Воздушные сопла вторичного воздуха горелок (3 сопла на горелку) переменной по высоте ширины (рисунок 2.1.2). Для направления вторичного воздуха вниз, либо вверх горелки имеют перекидные шибера, установленные на вторичном воздухе непосредственно перед горелкой. На верхней образующей амбразуры установлен аэродинамический выступ, обеспечивающий наклон горелочной струи вниз.

Для защиты ската амбразуры горелки от отложений пыли предусмотрены воздушные сопла (ВС) под горелкой (3 сопла на горелку).

Воздух на котел подается дутьевым вентилятором типа ВДН-18/II производительностью  $Q_B=170000\text{м}^3/\text{ч}$ ,  $n=980\text{ об/мин.}$ ,  $N_э= 200\text{ кВт}$ , дымовые газы удаляются дымососом с двухсторонним всасыванием типа Д-18х2 производительностью  $Q_T=143 \cdot 10^3\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $n=580\text{ об/мин}$ ,  $N_э=135\text{ кВт}$ .

Дымовые газы очищаются в электрофильтре УГ-2-3-26-01. Уловленная зола непрерывно удаляется водой в канал гидрозолоудаления ГЗУ. Шлак удаляется из шлаковых комодов периодически (1 раз в смену) вручную и смывается соплами в канал ГЗУ. Для очистки поверхностей нагрева на котле установлены десять маловыдвижных паровых обдувочных аппарата типа ОМ-0,35 и один глубоководной паровой типа ОГ-6.

## **2.2 Методика измерений и обработка опытных данных.**

Расчеты содержания оксидов азота в дымовых газах котла БКЗ 75-39ФБ производились по методике, «СО 153-34.02.304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций», для сравнения их в дальнейшем с экспериментальными данными, которые получали при помощи прибора ДАГ 500. Расхождение показаний прибора и расчетных данных составили 5,5%. Принципиальная схема точек измерений котла ст. №1 представлена на рисунке 2.2.1.

Отборы проб топлива производились из питателей сырого угля (ПСУ). Шлак отбирался из шлаковых комодов, зола отбиралась из-под общего бункера электрофильтров. Температура газов и воздуха, анализ газов на содержание  $O_2$ ,  $CO$  и  $NO_x$  определялись с помощью автоматического переносного газоанализатора ДАГ-510, давление газов и воздуха, а также их расходы определялись с помощью тягонапоромера. Анализ содержания БП проводилось расчетным методом и экспериментальным путем.

Температура по воздушному и газовому трактам измерялась с помощью переносных термопар. Давление воздуха и разрежение по газовому тракту измерялись по месту трубкой Нифера и жидкостным тягонапоромером, скорости потоков измерялись трубкой Прандля и микроанометром. Измерение температуры газов в объеме топки выполнялась оптическим пирометром «Проминь».

Краткий технический анализ топлива, содержания горючих в шлаке и уносе выполнялись в хим. лаборатории ООО «КраМЗЭнерго».

В балансовых опытах определялась токовая загрузка электродвигателей мельниц, дутьевого вентилятора и дымососа по которым выполнялся расчет потребляемой мощности.

Основные параметры работы котла фиксировались по приборам щита управления.

К показаниям расходомеров перегретого пара вводилась поправка на отклонения параметров пара от расчетных (для измерительной диафрагмы):

$$D_{\text{пе}} = D * \sqrt{\frac{V_{\text{рас}}}{V}}, \text{ т/ч}, \quad (2.2.1)$$

где  $D$  - расход пара по показаниям паромера;  $v_{\text{рас}}$ ,  $v$  - удельные объемы пара при расчетных и фактических значениях давления и температуры.

Приведенная паропроизводительность котла (к расчетным параметрам перегретого пара и питательной воды) рассчитывалась по выражению:

$$D_{\text{пр}} = D_{\text{пе}} * (i_{\text{пе}} - i_{\text{пв}}) / (i_{\text{пе}}^{\text{р}} - i_{\text{пв}}^{\text{р}}), \text{ т/ч}, \quad (2.2.2)$$

где  $i_{\text{пе}}$ ,  $i_{\text{пв}}$ ,  $i_{\text{пе}}^{\text{р}}$ ,  $i_{\text{пв}}^{\text{р}}$  - энтальпия перегретого пара и питательной воды фактическая и расчетная, ккал/ч.

Потери тепла с уходящими газами рассчитывались по уточненной формуле Корницкого [59]:

$$q_2 = (K * \alpha_{\text{yx}} + C) * (\vartheta_{\text{yx}} - \frac{\alpha_{\text{yx}}}{\alpha_{\text{yx}} + b} t_{\text{хв}}) * A_t * (1 - 0,01 * q_4) * 10^{-2}, \%, \quad (2.2.3)$$

где  $K$ ,  $C$  и  $b$  - коэффициенты, зависящие от сорта и приведенной влажности топлива;  $A_t$  - поправочный коэффициент учитывающий влияние температуры на теплоемкость продуктов сгорания;  $\alpha_{\text{yx}}$ ,  $\vartheta_{\text{yx}}$  - коэффициент избытка воздуха и температура уходящих газов;  $t_{\text{хв}}$  - температура холодного воздуха.

от химической неполноты сгорания:

$$q_3 = 3,32 * V_{\text{со}} * (\vartheta_{\text{yx}} - 0,02) * (1 + 0,006 * W^{\text{п}}) * (1 - 0,01 * q_4), \%, \quad (2.2.4)$$

где  $V_{\text{со}}$  - содержание  $\text{CO}$  в уходящих газах, %;  $\alpha_{\text{yx}}$  - коэффициент избытка воздуха в уходящих газах;  $W^{\text{п}}$  - приведенная влажность.

Потери тепла от механической неполноты сгорания определялись по формулам:

$$q_4 = q_4^{ун} + q_4^{шл}, \% , \quad (2.2.5)$$

$$q_4^{ун} = \frac{7800 * A^r * a_{ун} * \Gamma_{ун}}{(100 - \Gamma_{ун}) * Q_i^r}, \%,$$

$$q_4^{шл} = \frac{7800 * A^r * a_{шл} * \Gamma_{шл}}{(100 - \Gamma_{шл}) * Q_i^r}, \%,$$

где  $\Gamma_{ун}$ ,  $\Gamma_{шл}$  - доля золы, поступающая в унос и шлак, взято по нормам [61],

для БКЗ-75  $\Gamma_{ун}=0,95$ ,  $\Gamma_{шл}=0,05$ ;  $\Gamma_{ун}$ ,  $\Gamma_{шл}$  - содержание горючих в уносе и шлаке, %;  $A^r$  - зольность, %;  $Q_i^r$  - теплота сгорания топлива низшая рабочего состояния, ккал/кг.

Потери тепла от наружного охлаждения:

$$q_5 = q_{5ном} * D_{ном} / D_{пр}, \% , \quad (2.2.6)$$

где  $D_{пр}$  – фактическая приведённая нагрузка в опыте, т/ч.

Потеря с теплом шлака  $q_{6шл}$  в соответствии с [60] при твёрдом шлакоудалении и при  $A^r \leq Q_i^r / 400$  (что соответствовало качеству топлива во время испытаний) не учитывалась.

Коэффициент полезного действия брутто котлоагрегата рассчитывался по формуле:

$$\eta^{бр} = 100 - q_{сум}, \% . \quad (2.2.7)$$

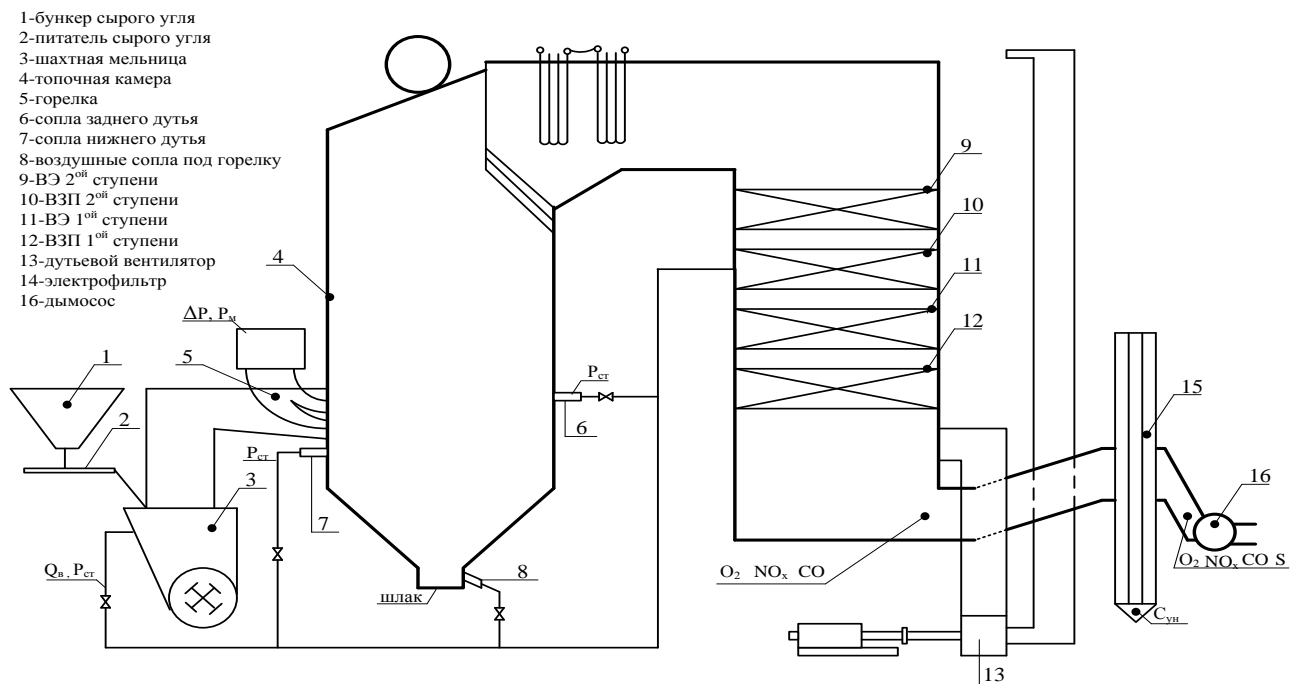


Рисунок 2.3.1. Схема экспериментального контроля котла БКЗ-75 ст.№1

Расход топлива, подаваемого в топку, определялся по формуле:

$$B_k = Q_k / (Q_i^r * \eta^{6p}) * 10^2, \quad (2.2.8)$$

Присосы воздуха в топку и газоход конвективных пучков определялись в соответствии с [61].

Мощность электродвигателей тягодутьевых машин и мельниц вычислялась как:

$$N_{эл} = \sqrt{3} V * I * \cos\phi, \text{ кВт*ч}, \quad (2.2.9)$$

где:  $V$  - напряжение,  $I$  - ток,  $\cos\phi$  – коэффициент мощности электродвигателя.

Удельный расход электроэнергии на тягу и дутье, на пылеприготовление определялся по формулам:

$$\mathcal{E}_{тд} = N_{дс+дв} / D_{пр}, \text{ кВт.ч/т.п.}, \quad (2.2.10)$$

$$\mathcal{E}_{пш} = N_{мтт} / B_k \text{ кВт.ч/т.т.}, \quad (2.2.11)$$

где:  $N_{дс+дв}$  – потребляемая мощность ДС и ДВ,  $N_{мтт}$  – потребляемая мощность ММТ,  $D_{пр}$  – приведенная нагрузка котла,  $V_k$  – расход топлива на котел.

### 2.3 Балансовые испытания котлоагрегата.

Балансовые испытания котла БКЗ-75 ст.№1 проводились с целью определения его основных технико-экономических показателей работы при нагрузке  $D_{пе}=65-75$ т/ч перед рациональным распределением долей воздуха в котле.

Оптимальными режимами работы котла являются режимы с наименьшими тепловыми потерями и соответственно с максимальным КПД брутто котла, при этом уровень вредных выбросов в уходящих газах должен быть минимальным.

На рисунке 2.3.1 представлены потери тепла с механическим недожогом в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

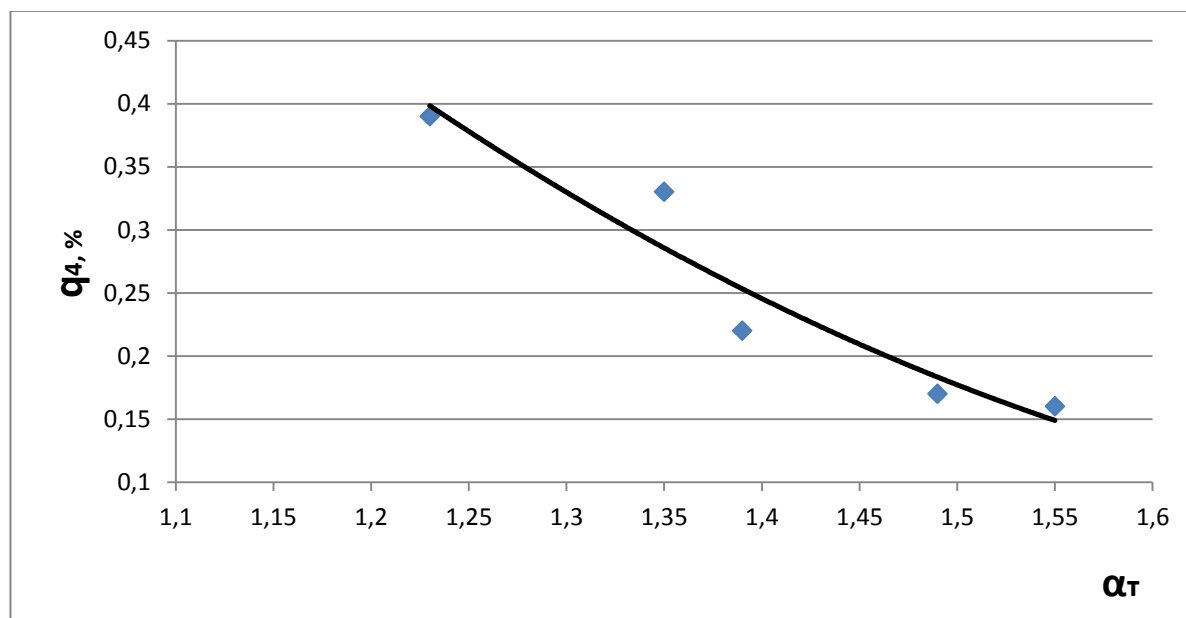


Рисунок 2.3.1 – Потери тепла с механическим недожогом в зависимости от коэффициента избытка воздуха при нагрузке 65-75 т/ч

Из рисунка 2.4.1 видно, что потери тепла с механическим недожогом  $q_4$  не превышают 0,4% и с увеличением “ $\alpha$ ” снижаются до 0,15% (расчетные  $q_4^p=1\%$ , норматив  $q_4=1-2\%$  в зависимости от зольности топлива). Это достигается за счет меньшего провала несгоревших частиц угля в шлаковый комод при работе сопл заднего дутья и соответственно снижения содержания горючих в шлаке  $C_{\text{шл}}^r$  (таблица 3.2.1).

Основными потерями тепла для данного типа котлов являются потери тепла с уходящими газами. На рисунке 2.4.2 представлены потери тепла с уходящими газами в зависимости от коэффициента избытка.

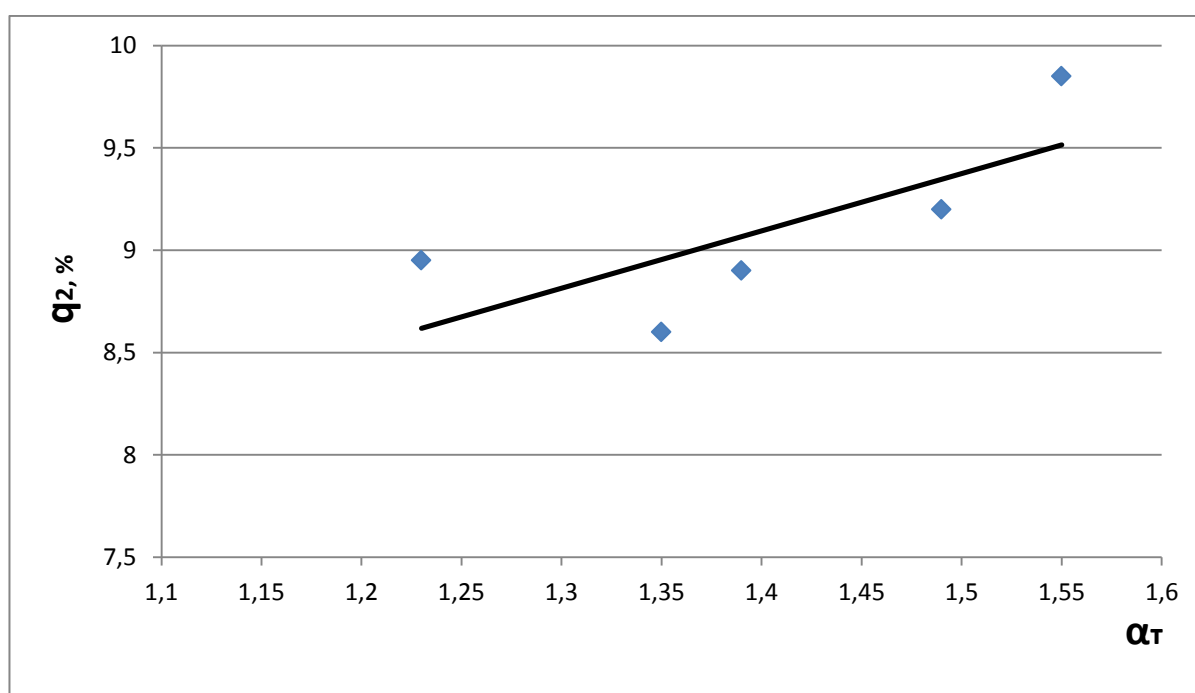


Рисунок 2.3.2 – Потери тепла с уходящими газами в зависимости от коэффициента избытка воздуха при нагрузке 65-75 т/ч

Из рисунка 2.3.2 видно, что с ростом коэффициента избытка воздуха потери тепла, с уходящими газами повышаются с  $q_2=8,6\%$  ( $\alpha=1,22$ ) до  $q_2=9,52\%$  (при  $\alpha=2,0$ ).

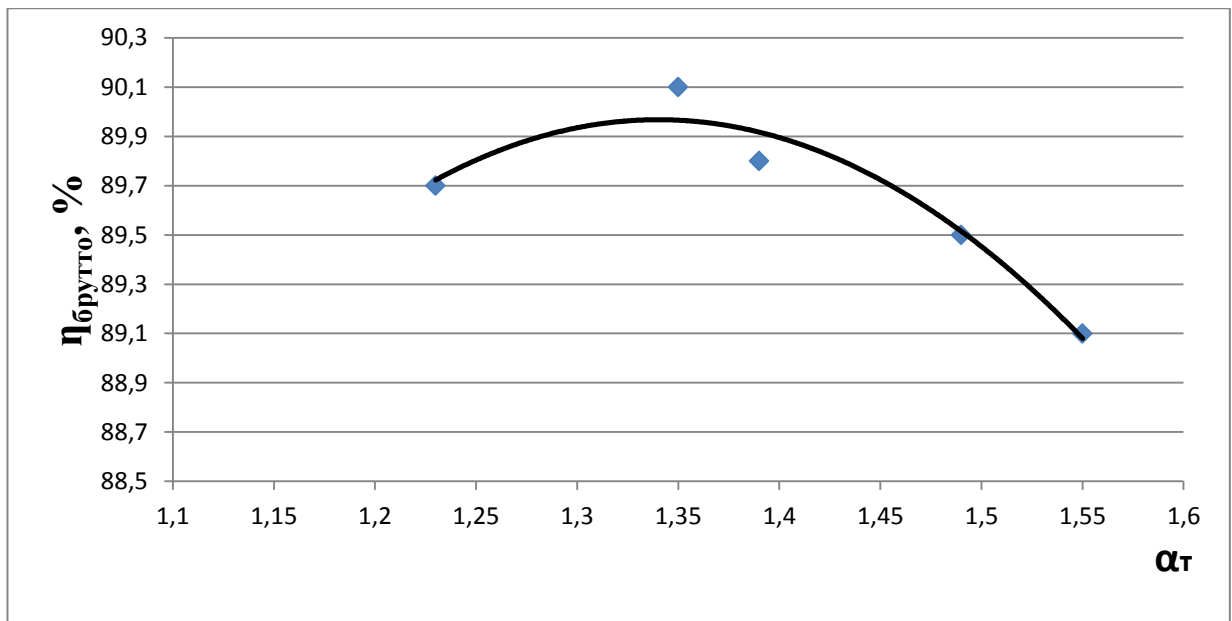


Рисунок 2.3.3– КПД брутто котла в зависимости от коэффициента избытка воздуха при нагрузке 65-75 т/ч

КПД брутто котла в зависимости от коэффициента избытка воздуха имеет оптимальные значения. Оптимальный “ $\alpha_{опт}$ ” определяется из максимального КПД брутто котла. На рисунке 2.3.3 представлен КПД брутто котла в зависимости от коэффициента избытка воздуха.

Из рисунка 2.3.3 видно, что при работе на двух пылесистемах и нагрузке  $D_{пр}=75-79$ т/ч оптимальным является  $\alpha_{опт}=1,35$ , КПД брутто составляет  $\eta_{бр}=90,1\%$ , (данные зависимости построены при температуре питательной воды в опытах  $t_{пв}=104^{\circ}\text{C}$ ).

При нагрузках меньше  $D_{max}$  оптимум “ $\alpha_{опт}$ ” уходит в зону больших значений:

- при  $D_{пр} = 63-66$ т/ч  $\alpha_{опт} = 1,25$ , КПД брутто составляет  $\eta_{бр}=89,8\%$ ,  $t_{пв}=104^{\circ}\text{C}$ ;
- при  $D_{пр} = 55-58$ т/ч  $\alpha_{опт} = 1,28$ , КПД брутто достигает  $\eta_{бр}= 89,9\%$ ,  $t_{пв}= 104^{\circ}\text{C}$ ;



- при  $D_{пр} = 43-44$  т/ч  $\alpha_{опт} = 1,5$ , КПД брутто составляет  $\eta_{бр} = 89,5\%$ ,  $t_{пв} = 104^\circ\text{C}$  меньшего значения “ $\alpha$ ” на котле при низкой нагрузке и работе 2х п/с получить не удалось.

Потери тепла с химическим недожогом в диапазоне нагрузок  $D_{пр} = 34-75,9$  т/ч при изменении коэффициента избытка воздуха  $\alpha = 1,55-1,22$  находятся на уровне  $q_3 \leq 0-0,02\%$ , т.е. содержание СО в топочных газах составляет  $CO = 0-325$  мг/нм<sup>3</sup>, что не превышает допустимые нормы  $CO \leq 400$  мг/нм<sup>3</sup>. Это свидетельствует о достаточности воздуха на горение при  $\alpha = 1,32$  (расчетный  $\alpha = 1,2$ ). Наиболее высокие  $q_3$  наблюдались на нагрузке  $D_{пр} = 79,2$  т/ч, содержание СО в топочных газах в среднем составило  $CO = 428$  мг/нм<sup>3</sup> ( $q_3 = 0,15\%$ ), что было связано с перекосом  $O_2 = 3,5/4,6$  по сторонам топки.

Концентрация оксидов азота (приведенная к  $\alpha''_{yx} = 1,4$ ) в выбросах в зависимости от коэффициента избытка воздуха представлена на рисунке 2.3.4.

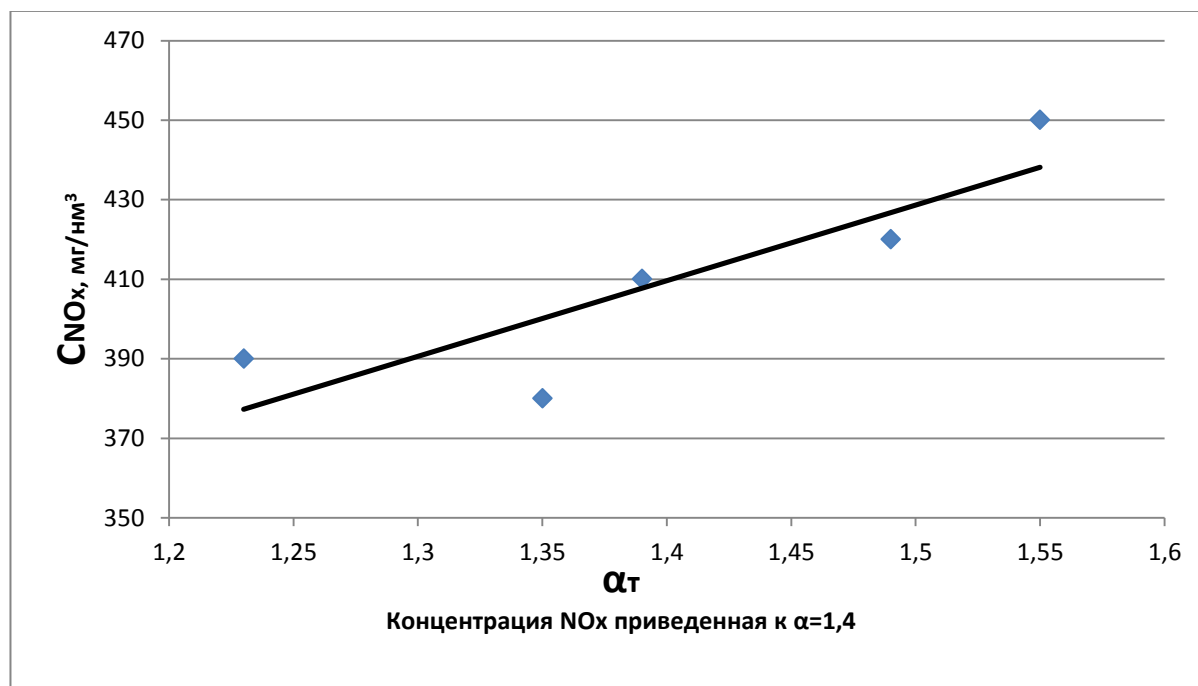


Рисунок 2.3.4 - Концентрация оксидов азота в зависимости от коэффициента избытка воздуха при нагрузке 65-75 т/ч

Из рисунка 2.3.4 видно, что концентрации оксидов азота в выбросах находятся на уровне  $\text{NO}_x=372-440\text{мг/нм}^3$ . При работе котла на высоких нагрузках  $D_{\text{пр}}=60-79\text{т/ч}$ , когда обеспечивается ступенчатость сжигания топлива за счет подачи части вторичного воздуха через СЗД, ВС 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  $\text{NO}_x=390-400\text{мг/нм}^3$ . При работе на низких нагрузках  $D_{\text{пр}}=30-50\text{т/ч}$  и с повышением коэффициента избытка воздуха концентрация оксидов азота увеличивается, это связано с увеличением  $\alpha_{\text{гор}}$  (избытков воздуха в горелках).

#### **Вывод.**

После обследования котлоагрегата БКЗ 75-39ФБ выявлено, что оптимальное значение коэффициента избытка воздуха составило  $\alpha_{\text{т}}=1,35$ , при котором содержание оксидов азота за котлом составляет около  $400\text{ мг/м}^3$ , что остается достаточно высоким для данных типов котлов.

Целесообразно перевести в котле рациональное распределение долей воздуха с целью более глубокого изучения влияния долей третичного дутья на: содержания  $\text{NO}_x$  в дымовых газах, КПД котла, изменение потерь тепла с уходящими газами и механической неполнотой сгорания топлива.

### РАЗДЕЛ III. Исследование влияния доли третичного дутья на технико-экономические показатели котлоагрегата

#### 3.1. Перевод котлоагрегата на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание.

Для исследования влияния долей третичного дутья на работу котлов средней мощности, на примере котла БКЗ 75-39ФБ, было решено произвести технологические изменения устройства низкотемпературного ступенчатого сжигания во время капитального ремонта. После анализа существующих схем были сделаны предварительные расчетные оценки, по которым была произведена реконструкция сопел нижнего дутья. Особенности конструкции рассмотрены в публикациях автора [109-124].

Экспериментальными исследованиями показано, что все вопросы аэродинамики струй имеющих различную форму устья (круглую, квадратную, прямоугольную, треугольную, кольцевую и эллипсоидную), сводятся к закономерностям развития эквивалентной струи по площади диаметром:

$$D = \sqrt{4F/\pi} \quad (3.1.1)$$

Траектория круглой струи в поперечном потоке газообразной среды была определена по экспериментально установленной формуле Ю.В. Ивановым:

$$\frac{\alpha y}{D} = 195 \cdot \left(\frac{p_c \cdot \omega_c^2}{p_0 \cdot \omega_0^2}\right)^{1,3} \cdot \left(\frac{\alpha x}{D}\right)^2 + \frac{\alpha x}{D} \cdot c \tan a \quad (3.1.2)$$

где  $\alpha$  – угол атаки,  $x$  – угол от среза до сопла.

Относительная дальнобойность плоских струй была определена по формуле:

$$\frac{\alpha x}{b_0} = 1,1 \cdot \frac{\omega_0}{\omega_c} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{p_c}} \quad (3.1.3)$$

Где  $b_0$  – толщина пограничного слоя на начале плоской струи

В итоге получилось сопло нижнего дутья щелевидной формы состоящее из десяти сопел соединенных друг с другом и направленные к

скату холодной воронки под углом  $57^{\circ}$ .

В процессе разработки простого и дешевого способа подавления образования оксидов азота при сжигании бурых углей на котле БКЗ-75-39ФБ предложен вариант ступенчатого сжигания топлива, отличающийся от классического варианта рядом конструктивных и технологических особенностей (рис. 3.1.1). 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, выполненного из двух параллельных сопел соединенных внутри между собою, организуя широкое щелевидное сопло направленного параллельно фронтального скату «холодной воронки» (рис.3.1.2). 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.

Данная схема перевода испытываемого котла на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание во многом лишена недостатков. Основное

отличие 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. 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. 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.

С точки зрения надежной и бесшлаковой работы котлов перспективность низкотемпературного ступенчатого сжигания канско-ачинских углей обосновывается и механизмом загрязнения поверхностей нагрева. По вопросу загрязнения поверхностей нагрева котла проведено много исследований. Опытом эксплуатации и многочисленными исследованиями установлено, что интенсивность шлакования и образования плотных связанных отложений на конвективных поверхностях нагрева зависит от температурного уровня в самой топке и на выходе из нее.

Известно, что наличие в золе канско-ачинских углей (КАУ) большого количества окиси кальция и железа приводит в определенных условиях к образованию легкоплавких эвтектик в интервале температур 700-850°C и

особенно в интервале 850-1100°C, основного фактора, оказывающего влияние на шлакование и загрязнение поверхностей нагрева.

Образующийся  $CaSO_4$  обладает высокой температурой плавления ( $t_{пл}=1410^\circ C$ ) и не может быть расплавлен в зонах более низких температур. Видимо вероятнее всего сульфат кальция образует легкоплавкие эвтектики с другими компонентами золы. Так, сульфат кальция дает с сульфидом кальция ( $CaS$ ) эвтектики, которые плавятся уже при 850°C.

Следовательно, с уменьшением образования  $CaS$  будет уменьшаться и образование плотных отложений. Известно, что предпосылкой для образования  $CaS$  является наличие восстановительной атмосферы, в то время как в присутствии кислорода окисление сульфида в сульфат происходит по реакции  $CaS+2O_2=CaSO_4$ .

Одной из причин образования восстановительной атмосферы в топке может быть образование продуктов химического и механического недожога, как результат неравномерного распределения пыли и воздуха по месту и времени в топочной камере и неэффективного смесеобразования между ними. Следовательно, необходимо своевременная доставка окислителя к топливу и в определенном количестве при правильной организации топочного процесса, ему и отвечает низкотемпературное ступенчатое сжигание топлива.

Проанализируем с качественной стороны совокупность явлений, происходящих в непосредственной близости от углеродной поверхности, вступившей под воздействием высокой температуры в реакцию с омывающей ее окислительной средой. Известно, что горение углерода при

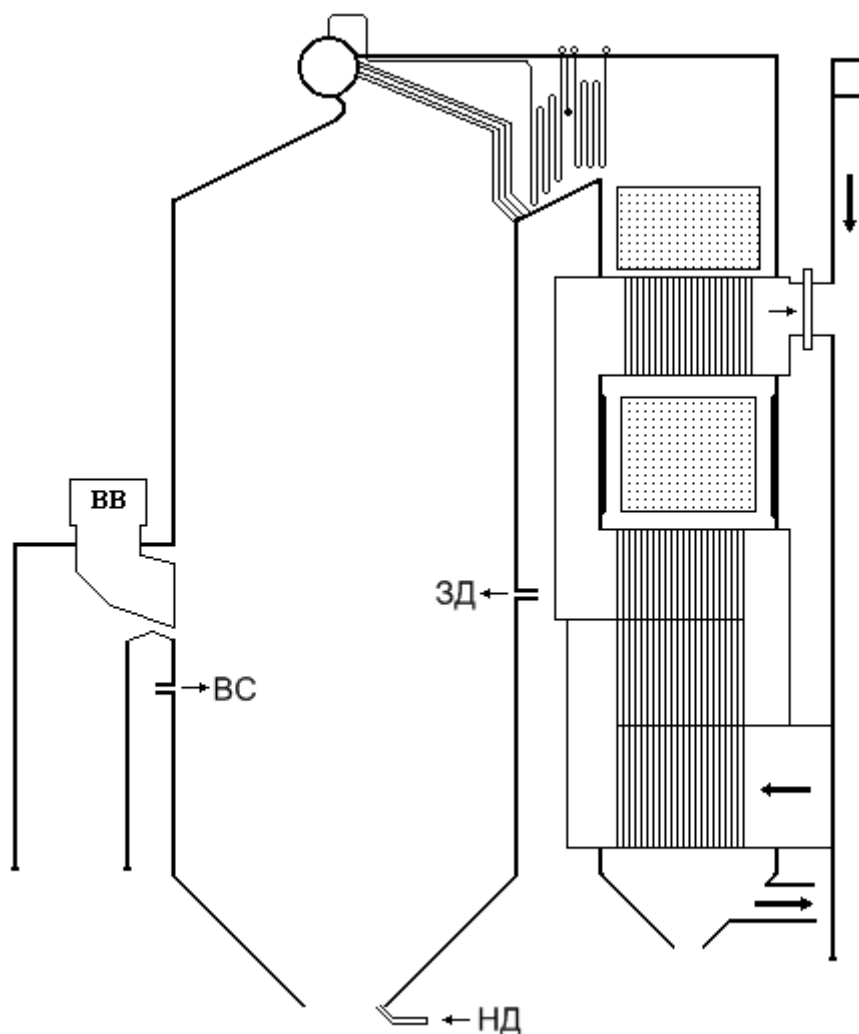


Рисунок 3.1.1– Принципиальная схема подачи воздуха на котле БКЗ-75-39ФБ ст.№1

температурах, превышающих 1100С- 1300С, происходит в диффузионной области. В этой области химическая реакция вследствие высокой температуры реагирующей поверхности начинает идти с такими скоростями, которые несоизмеримо выше скорости доставки кислорода к этой поверхности, т.е. концентрация кислорода практически становится равной нулю у поверхности углерода. При наличии значительной концентрации у этой поверхности двуокиси углерода окисление твердого углерода развивается окислителем, в качестве которого выступает двуокись углерода ( $CO_2$ ) с образованием окиси углерода - источника восстановительной среды. Таким образом, вокруг частицы углерода образуются «микрзоны»

восстановительной среды, благоприятствующие образованию низкоплавных эвтектик.



Рисунок 3.1.2- Сопло нижнего дутья [109-124]

Кроме того у низкотемпературного ступенчатого сжигания топлива есть еще одно эффективное средство против образования восстановительной среды у поверхности частицы при горении. Обычно применяемое в котлах факельное сжигание характеризуется непрерывным движением горящих частиц топлива вместе с потоком газов, то есть типичный параллельнопоточный процесс. Благодаря большой парусности частиц пылевидного топлива они двигаются вместе с несущим их дутьевым потоком с относительной скоростью, практически равной нулю. Это уменьшает интенсивность диффундирования реагирующего газа к поверхности частицы за счет конвекции. При горении с увеличением температуры скорость химической реакции согласно закону Аррениуса растет экспоненциально, в то время как скорость подвода кислорода, ограниченная в основном молекулярной диффузией к частице топлива, увеличивается незначительно. Наступает так называемое диффузионное «торможение». В этом случае из-за отсутствия кислорода у



поверхности горячей частицы окисление кислорода происходит за счет  $CO_2$  с образованием  $CO$ , т.е. образуется восстановительная среда.

Но если за счет средств гидродинамического характера увеличивать степень интенсивности обмена веществ вблизи реагирующей поверхности углерода, (подачей воздуха через нижнее и заднее дутье), разрыв между потенциально-возможной скоростью химической реакции и ее фактической скоростью при данной температуре будет сокращаться. Особенно процессы массо- и газообмена ускоряются за счет турбулентной диффузии, когда увеличивается относительная скорость между окислителем и частицами топлива, что имеет место при подаче воздуха через сопла, установленные в «холодной» воронке котла БКЗ-75-39ФБ и на задней стенке топки. В результате этого поступление кислорода к месту гетерогенной реакции улучшается. Происходит замена оксид-углеродной (восстановительной) среды окислительной средой. Следовательно, вблизи реагирующей частицы топлива возникает микросреда, уменьшающая возможность образования легкоплавких эвтектик.

### **3.2 Исследование влияния доли воздуха нижнего дутья на снижение оксидов азота в пределах нагрузки 65-75 т/ч.**

Целью рационального распределения долей воздуха на котел является выявление такого процентного соотношения между вторичным и третичным дутьем (третичное дутье состоит из заднего дутья предусмотренным заводом изготовителем и нижнего дутья реконструированного во время очередного капитального ремонта) при котором достигается наивысшее КПД брутто и наименьшее содержание оксидов азота в дымовых газах котла. Для организации нижнего дутья рассмотрим варианты распределения необходимых долей расхода воздуха от третичного дутья, а в частности от заднего дутья, затем от вторичного дутья и с изменением коэффициента избытка воздуха. Зависимости параметров работы котла: КПД брутто, потеря тепла с уходящими газами, потеря тепла от механической неполноты

сгорания топлива и содержание оксидов азота в дымовых газах от доли расхода воздуха на нижнее дутье приведены на рисунках с 1 по 12.

Таблица 3.2.1 Серия опытов №1 распределение долей расхода воздуха при нагрузках 70-75т/ч

Параметры	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
D	75т/ч	75т/ч	75т/ч	70т/ч	70т/ч
$\alpha_T$	1,252	1,251	1,253	1,253	1,254
$\Delta\alpha_T$	0,051	0,054	0,052	0,053	0,051
$\Delta\alpha_1$	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
$\Delta\alpha_2$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$\Delta\alpha_{3з.д.}$	0,21	0,151	0,11	0,051	0
$\Delta\alpha_{3н.д.}$	0,051	0,11	0,152	0,21	0,254
q2	7,9	7,79	7,95	8,5	8,55
q4	0,35	0,31	0,35	0,29	0,25
$C_{NOx}$	420,2	390,4	377,7	365,1	360,3
$\eta_{брутто}$	90,95	91,11	90,82	90,95	90,44

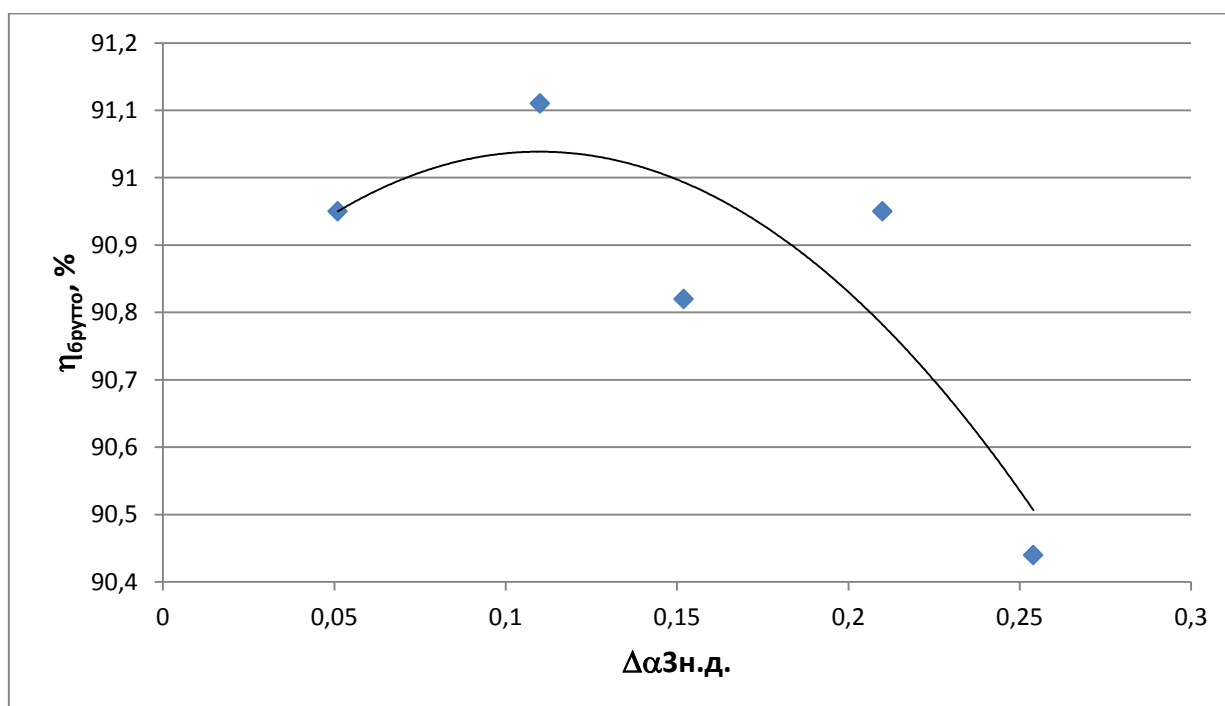


Рисунок 3.2.1- Зависимость КПД брутто от доли расхода воздуха на нижнее дутье при  $\Delta\alpha_{3з.д.} = 0,2-0$  (D=70-75т/ч)

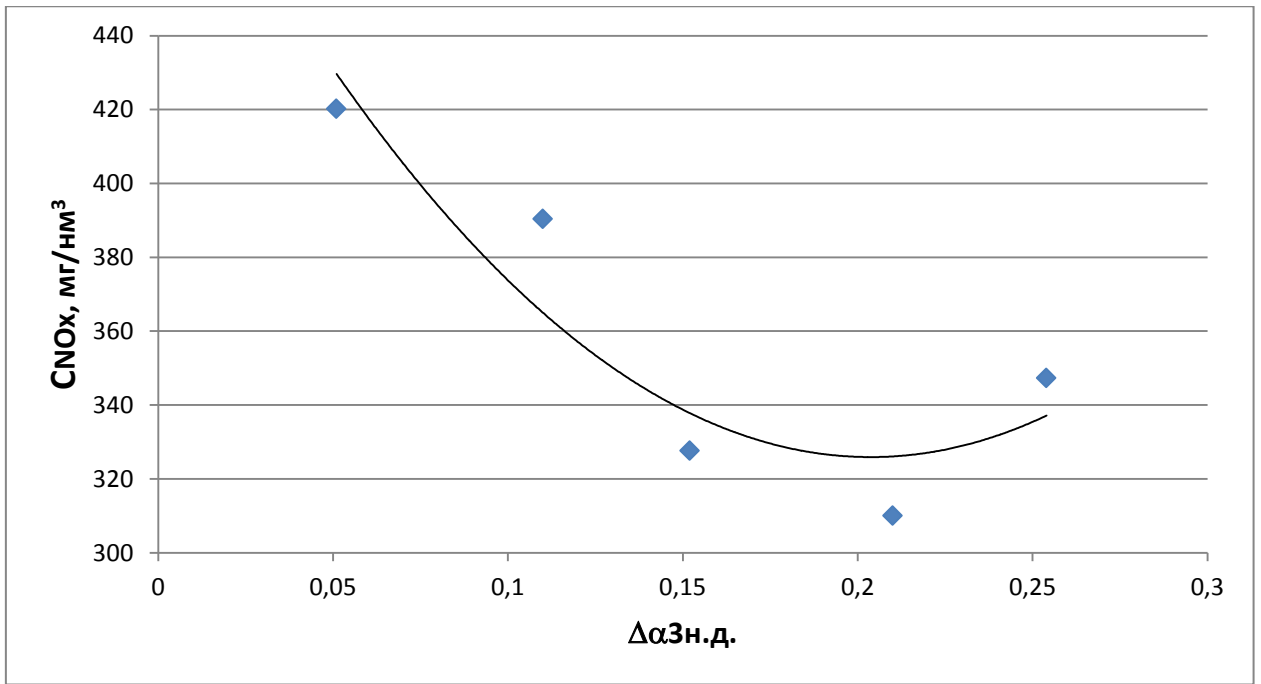


Рисунок 3.2.2 Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах в пересчете  $\alpha_T=1,4$  от доли расхода воздуха на нижнее дутье (D=70-75т/ч)

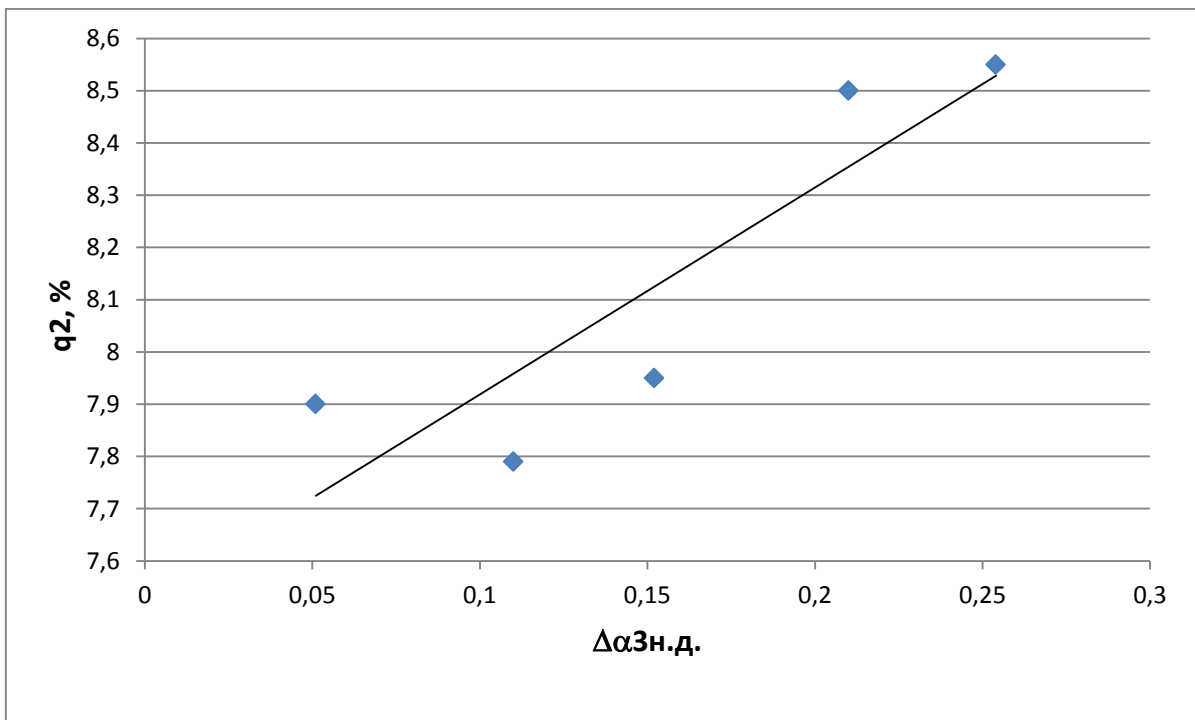


Рисунок 3.2.3 Зависимость потери тепла с уходящими газами от доли расхода воздуха на нижнее дутье (D=70-75т/ч)

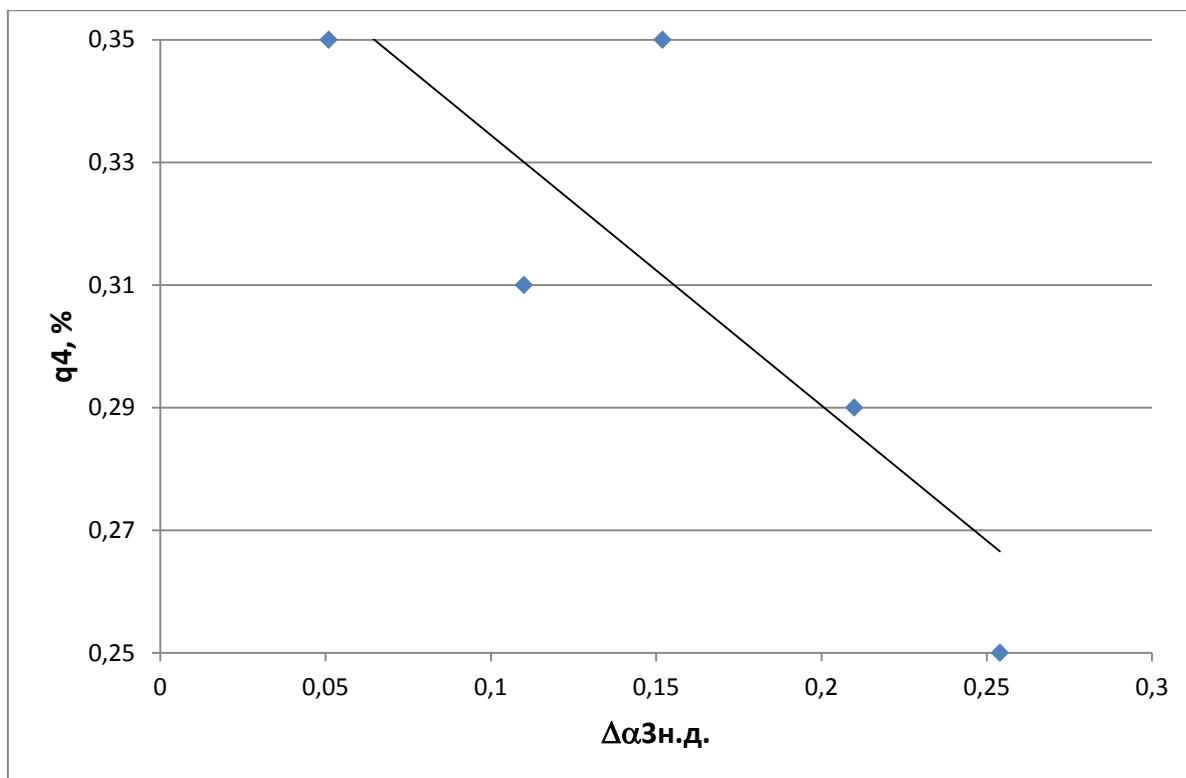


Рисунок 3.2.4 Зависимость потери тепла с механической неполнотой сгорания топлива от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=70-75$ т/ч)

Таблица 3.2.2 Серия опытов №2 распределение долей расхода воздуха при нагрузках 70-75т/ч

Параметры	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
$D$	75т/ч	75т/ч	75т/ч	70т/ч	70т/ч
$\alpha_T$	1,252	1,251	1,253	1,251	1,254
$\Delta\alpha_T$	0,051	0,051	0,053	0,054	0,052
$\Delta\alpha_1$	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
$\Delta\alpha_2$	0,35	0,32	0,25	0,25	0,24
$\Delta\alpha_{3з.д.}$	0,11	0,14	0,13	0,12	0,13
$\Delta\alpha_{3н.д.}$	0,051	0,11	0,15	0,21	0,25
$q_2$	8,55	7,61	7,95	7,41	7,65
$q_4$	0,25	0,29	0,35	0,29	0,35
$C_{NOx}$	420,4	385,2	377,1	342,2	355,3
$\eta_{брутто}$	91,11	91,54	90,91	92,1	91,15

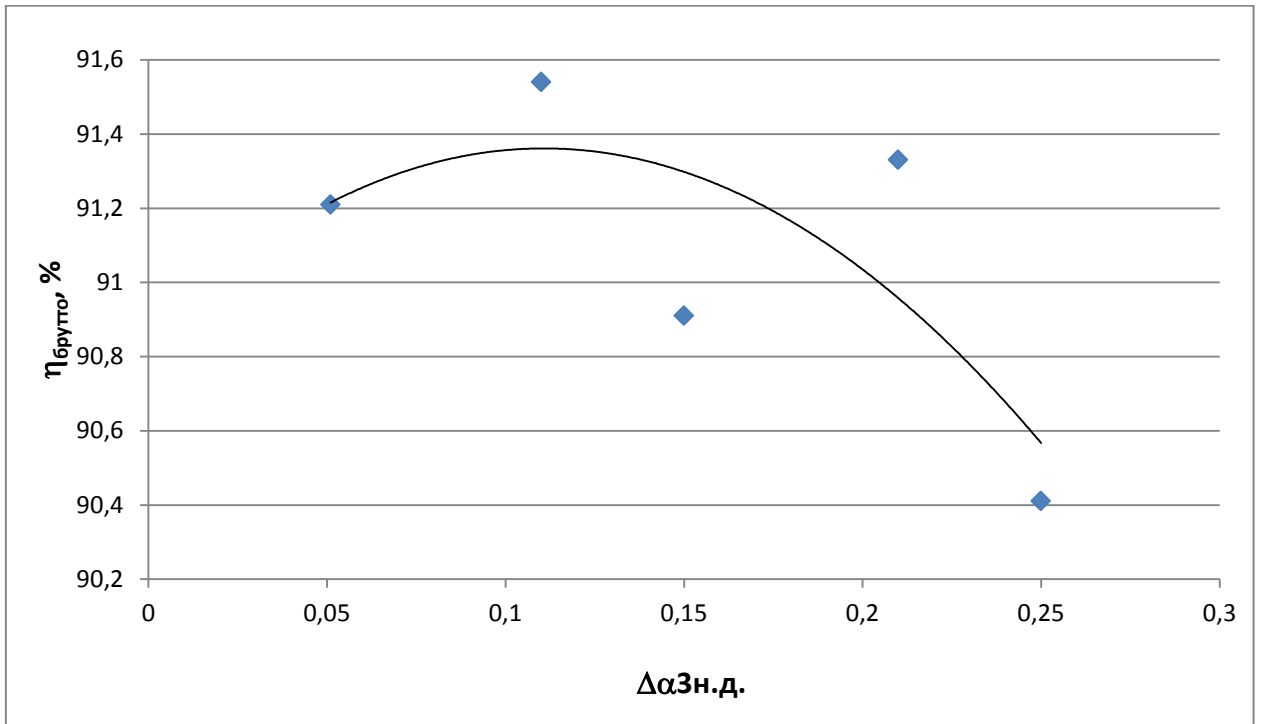


Рисунок 3.2.5 Зависимость КПД брутто от доли расхода воздуха на нижнее дутье при  $\Delta\alpha_{з.д.} = 0,1$  ( $D=70-75$ т/ч)

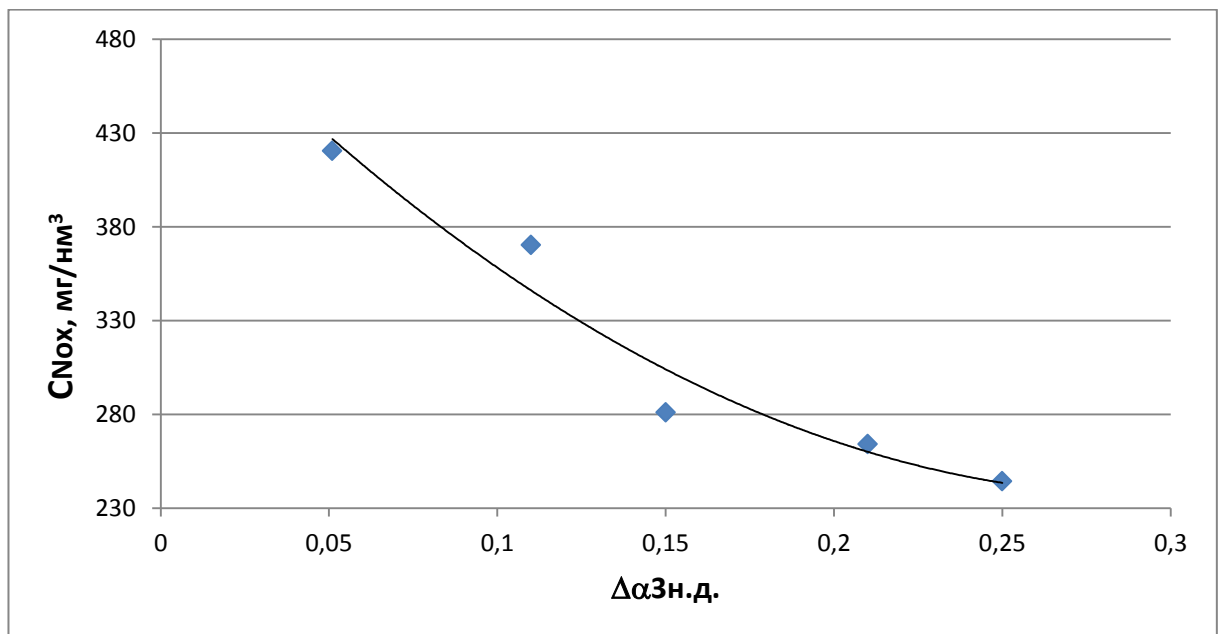


Рисунок 3.2.6 Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах в пересчете  $\alpha_{т}=1,4$  от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=70-75$ т/ч)

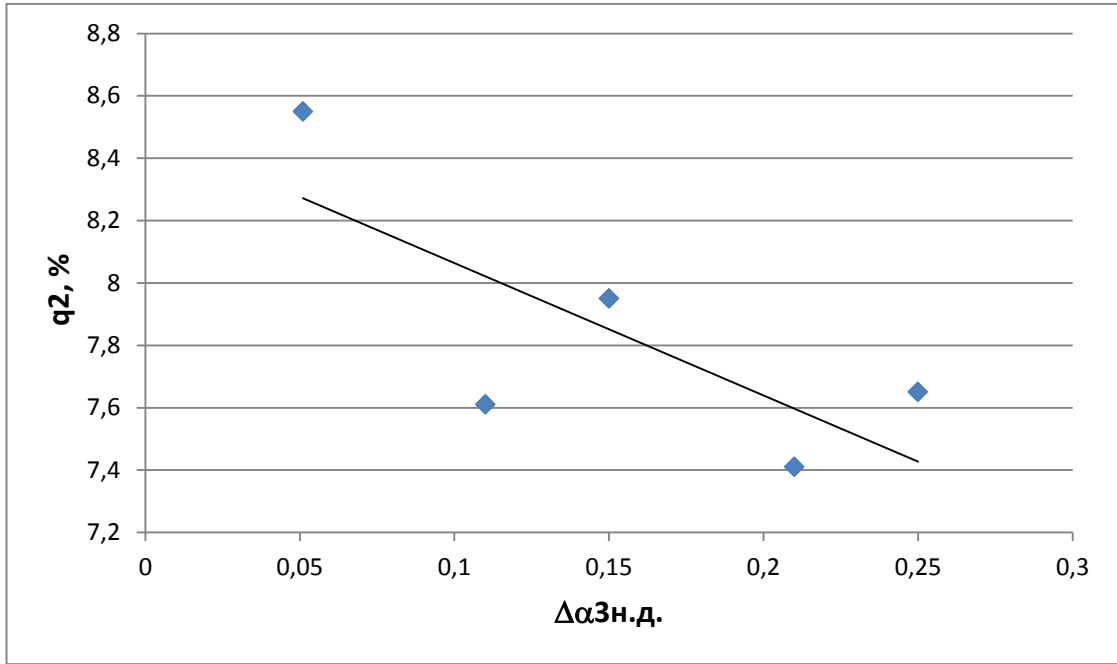


Рисунок 3.2.7 Зависимость потери тепла с уходящими газами от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=70-75$ т/ч)

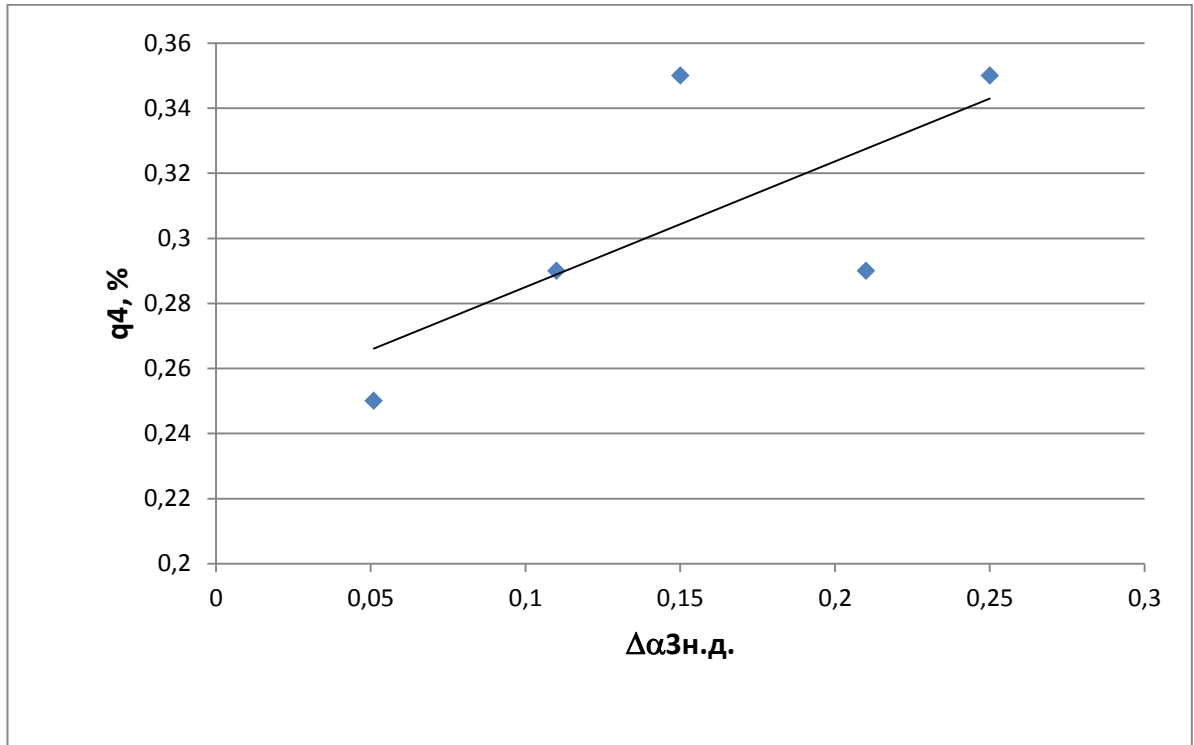


Рисунок 3.2.8 Зависимость потери тепла с механической неполнотой сгорания топлива от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=70-75$ т/ч)

Таблица 3.2.3 Серия опытов №3 распределение долей расхода воздуха при нагрузках 65-70т/ч

Параметры	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
D	71т/ч	72т/ч	71т/ч	65т/ч	65т/ч
$\alpha_T$	1,251	1,252	1,253	1,251	1,254
$\Delta\alpha_T$	0,054	0,053	0,051	0,054	0,052
$\Delta\alpha_1$	0,55	0,53	0,53	0,53	0,53
$\Delta\alpha_2$	0,35	0,31	0,25	0,25	0,21
$\Delta\alpha_{3з.д.}$	0,051	0,052	0,054	0,054	0,051
$\Delta\alpha_{3н.д.}$	0,05	0,11	0,15	0,21	0,25
q2	8,04	7,71	8,15	7,79	8,55
q4	0,36	0,29	0,35	0,31	0,25
C <sub>NOx</sub>	420,4	399,4	382,2	377,1	370,3
$\eta_{брутто}$	90,82	91,21	90,72	91,13	90,44

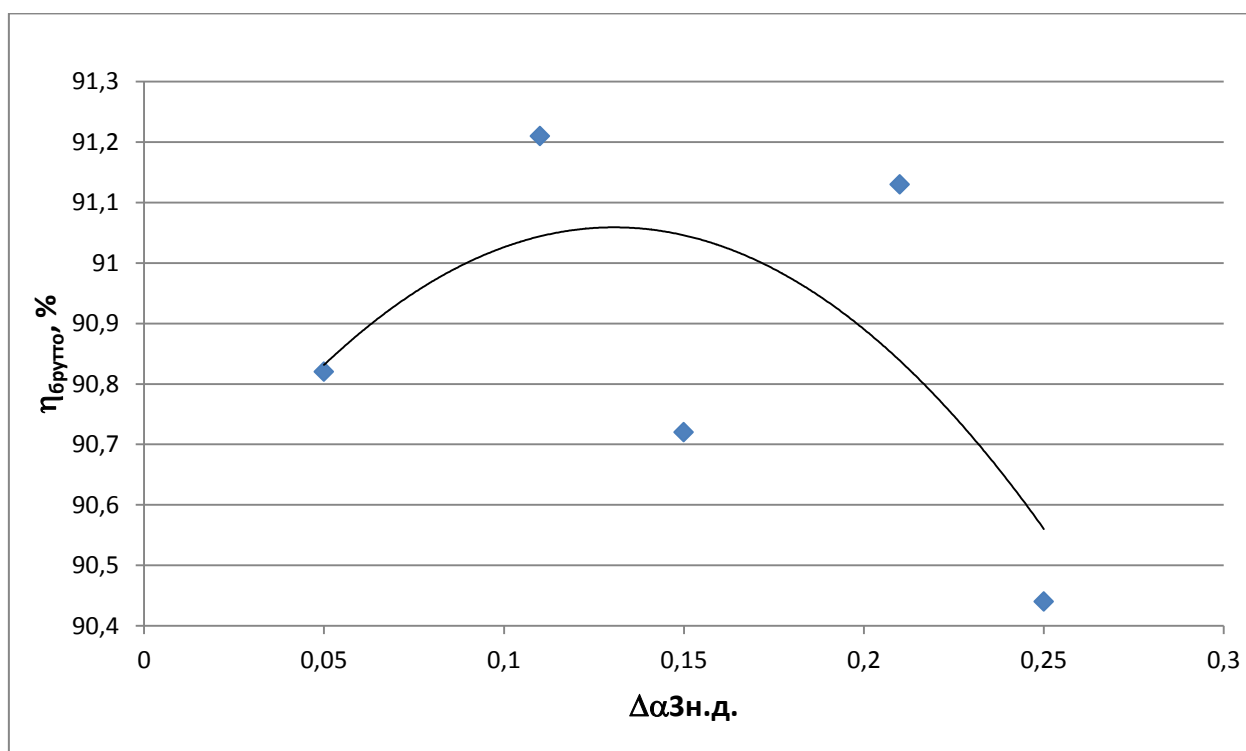


Рисунок 3.2.9 Зависимость КПД брутто от доли расхода воздуха на нижнее дутье при  $\Delta\alpha_{3з.д.} = 0,5$  (D=65-70т/ч)

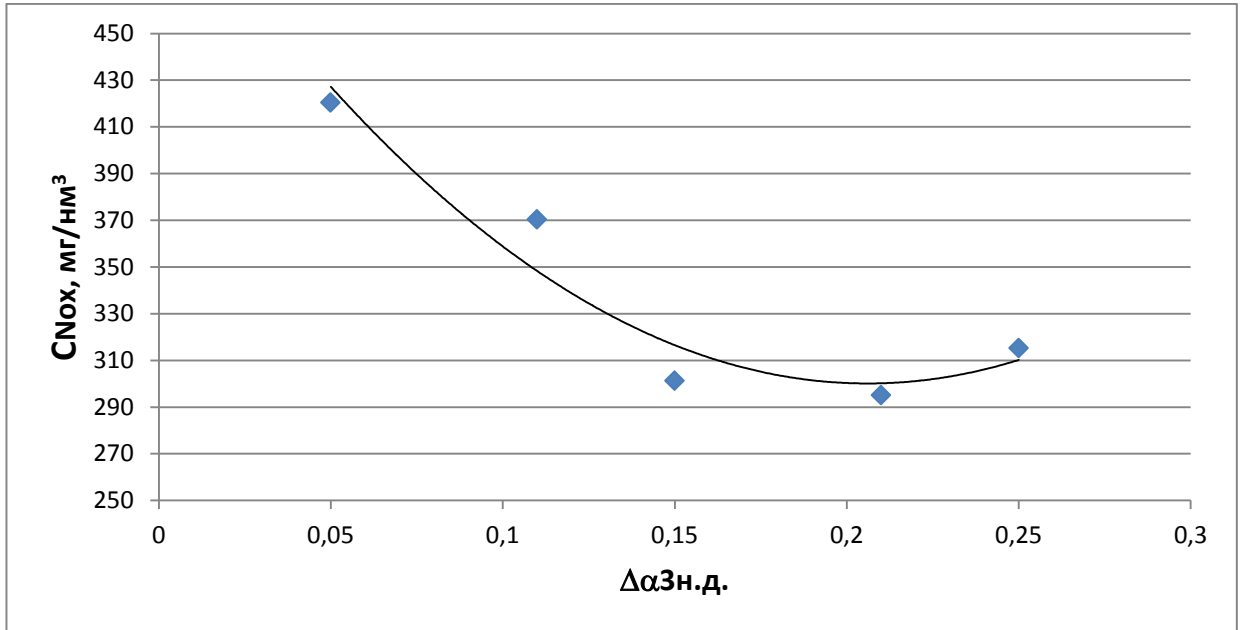


Рисунок 3.2.10 Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах в пересчете  $\alpha_T=1,4$  от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=65-70$ т/ч)

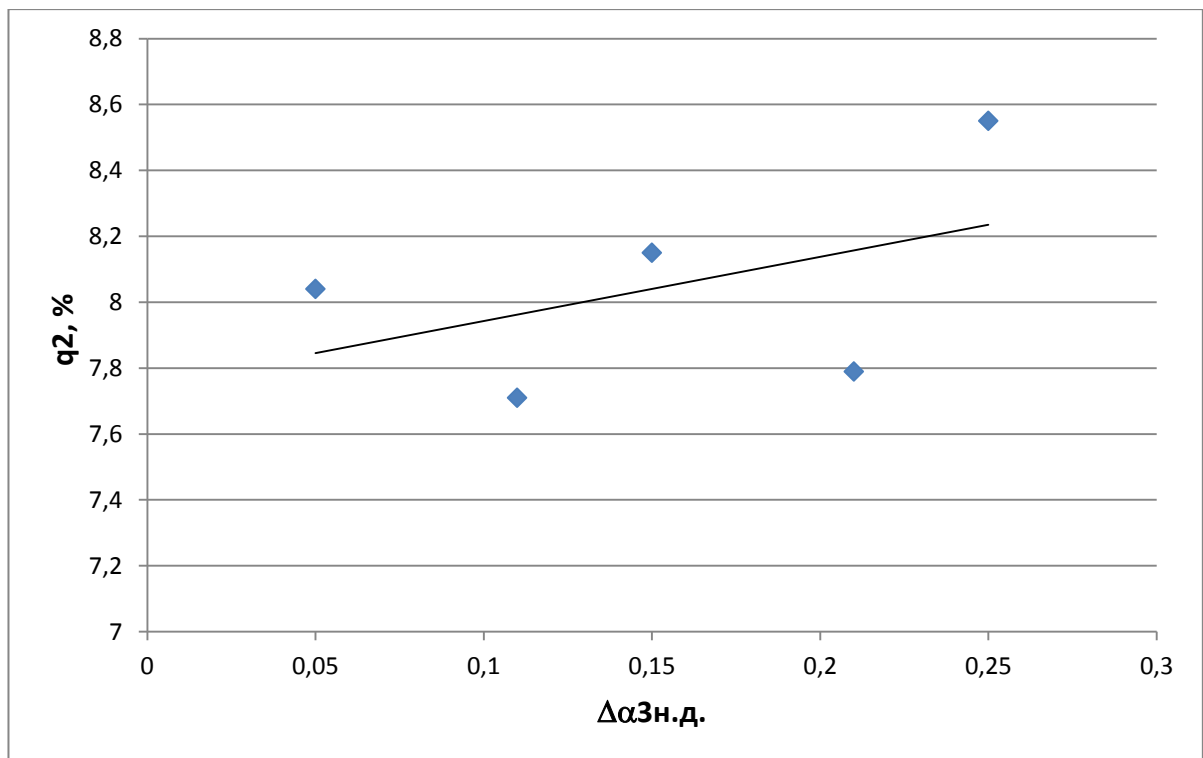


Рисунок 3.2.11 Зависимость потери тепла с уходящими газами от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=65-70$ т/ч)



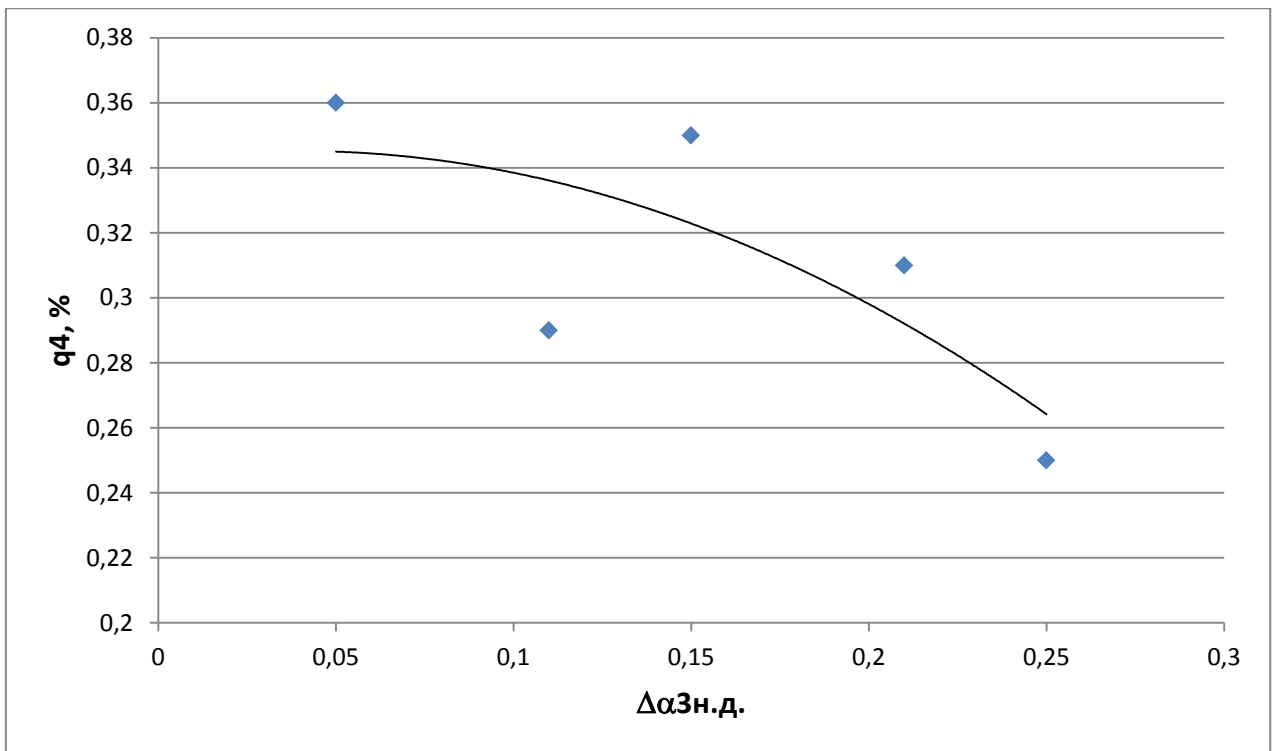


Рисунок 3.2.12 Зависимость потери тепла с механической неполнотой сгорания топлива от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=65-70$ т/ч)

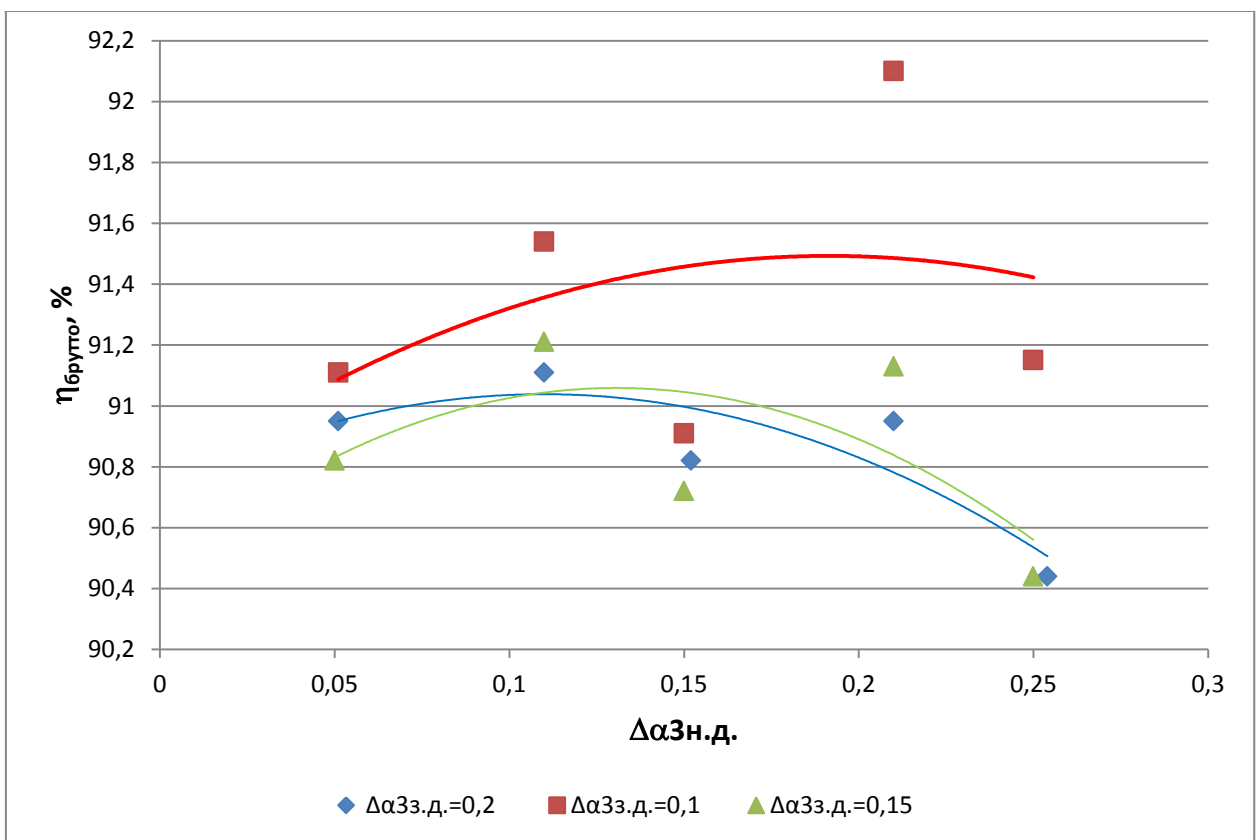


Рисунок 3.2.13 Сравнение серий опытов зависимости КПД брутто от доли воздуха на нижнее дутье при нагрузке 65-75т/ч

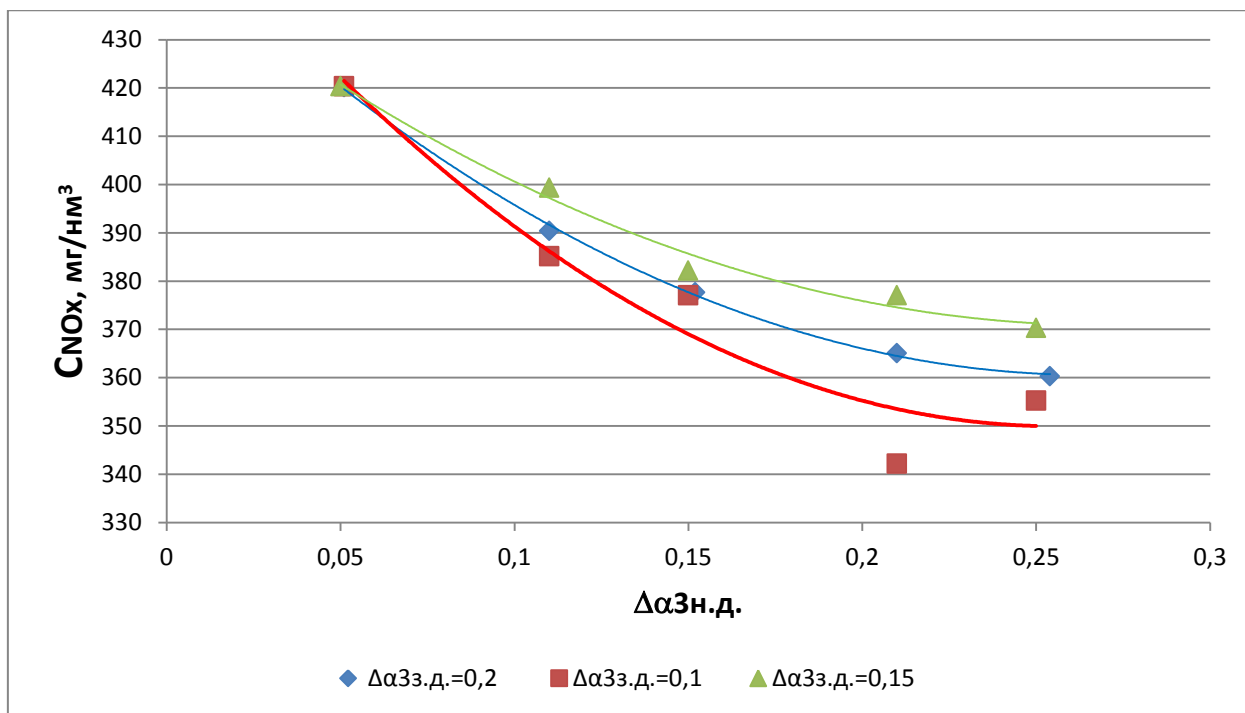


Рисунок 3.2.14 Сравнение серий опытов зависимости содержания оксидов азота в дымовых газах от доли воздуха на нижнее дутье при нагрузке 65-75т/ч

Анализируя рисунки 3.2.13 и 3.2.14 можно сделать вывод, что максимальное КПД брутто и содержание оксидов азота в котле БКЗ 75-39ФБ достигается в серии опытов №2 при  $\Delta\alpha_{Зн.д.}=0,2$ , параметры котла при этой серии опытов сведены в таблицу 3.2.7.

### 3.3 Исследование влияния доли воздуха нижнего дутья на снижение оксидов азота в пределах нагрузки 50-60 т/ч.

Таблица 3.3. Серия опытов №1 распределение долей расхода воздуха при нагрузках 50-55т/ч

Параметры	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
D	51т/ч	53т/ч	52т/ч	55т/ч	57т/ч
$\alpha_T$	1,25	1,25	1,25	1,253	1,25

$\Delta\alpha_T$	0,05	0,05	0,05	0,051	0,05
$\Delta\alpha_1$	0,65	0,65	0,65	0,651	0,65
$\Delta\alpha_2$	0,35	0,353	0,35	0,354	0,35
$\Delta\alpha_{3з.д.}$	0,21	0,15	0,11	0,05	0
$\Delta\alpha_{3н.д.}$	0,05	0,11	0,15	0,21	0,25
q2	8,41	9,79	9,11	8,06	8,35
q4	0,3	0,21	0,35	0,29	0,25
$C_{NOx}$	420,1	400,4	390,1	373,2	355,3
$\eta_{брутто}$	90,75	90,81	90,55	90,65	90,41

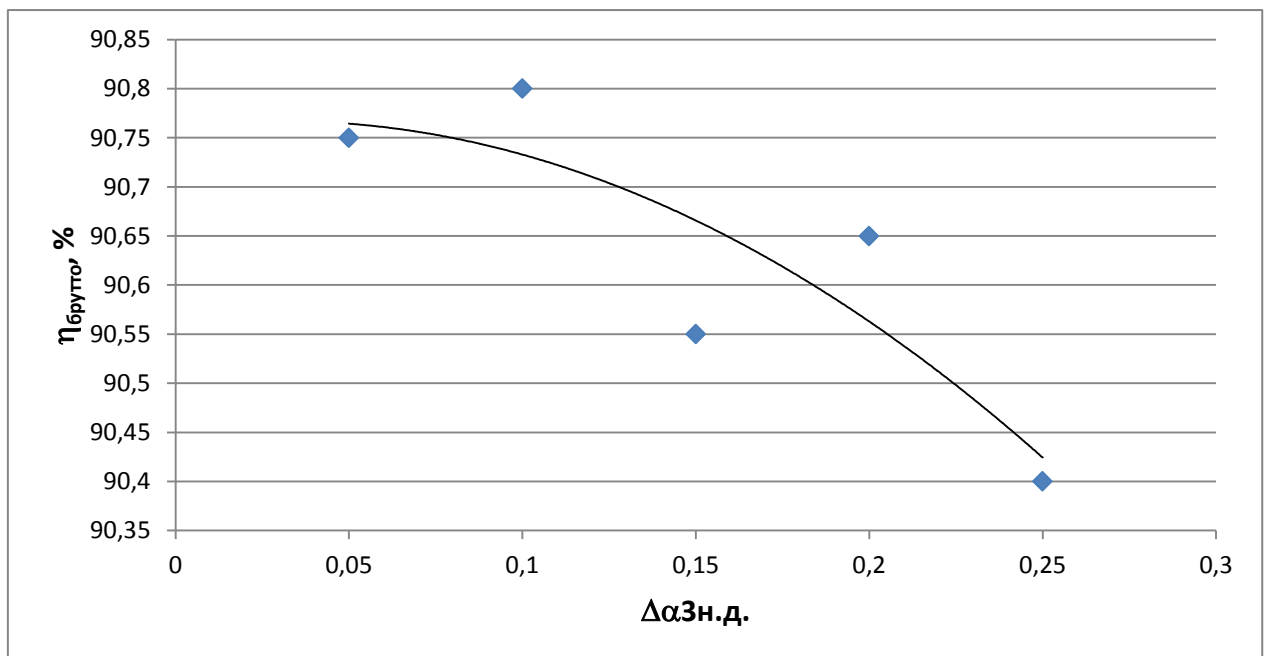


Рисунок 3.3.1 Зависимость КПД брутто от доли расхода воздуха на нижнее дутье при  $\Delta\alpha_{3з.д.} = 0-0,2$  ( $D=50-55$ т/ч)

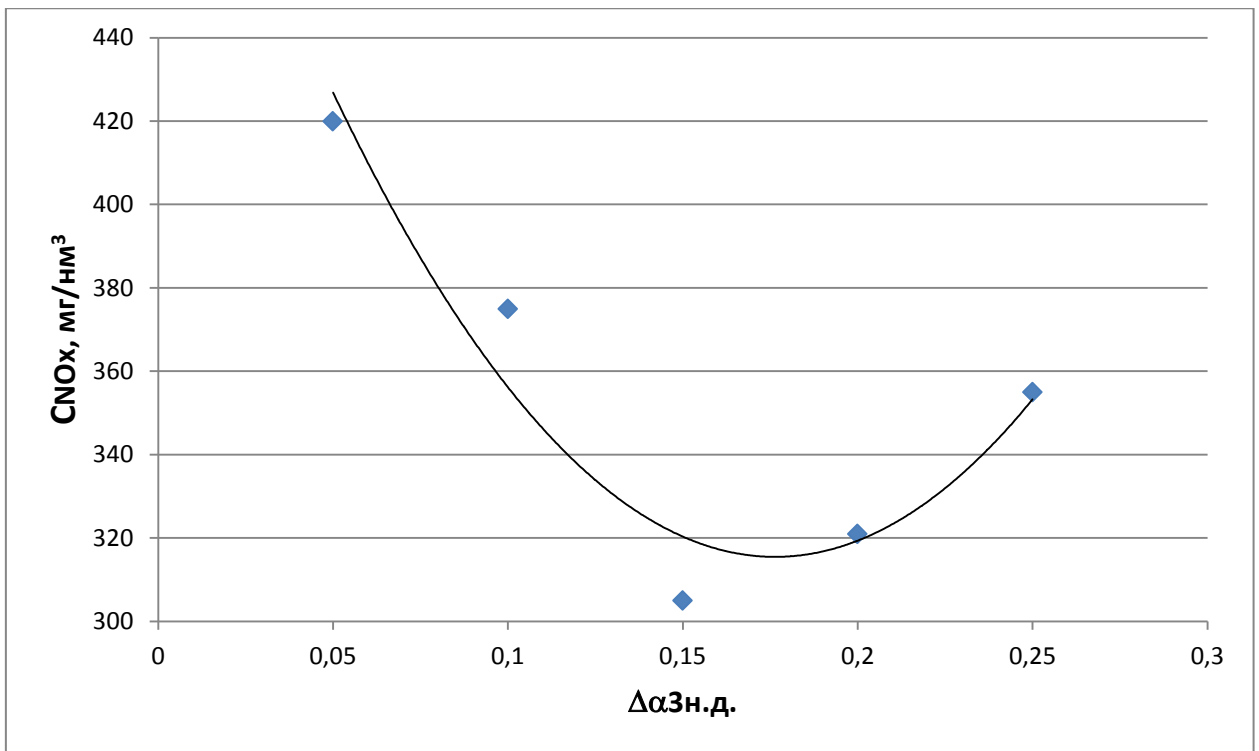


Рисунок 3.3.2 Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах в пересчете  $\alpha_T=1,4$  от доли расхода воздуха на нижнее дутье (D=50-55т/ч)

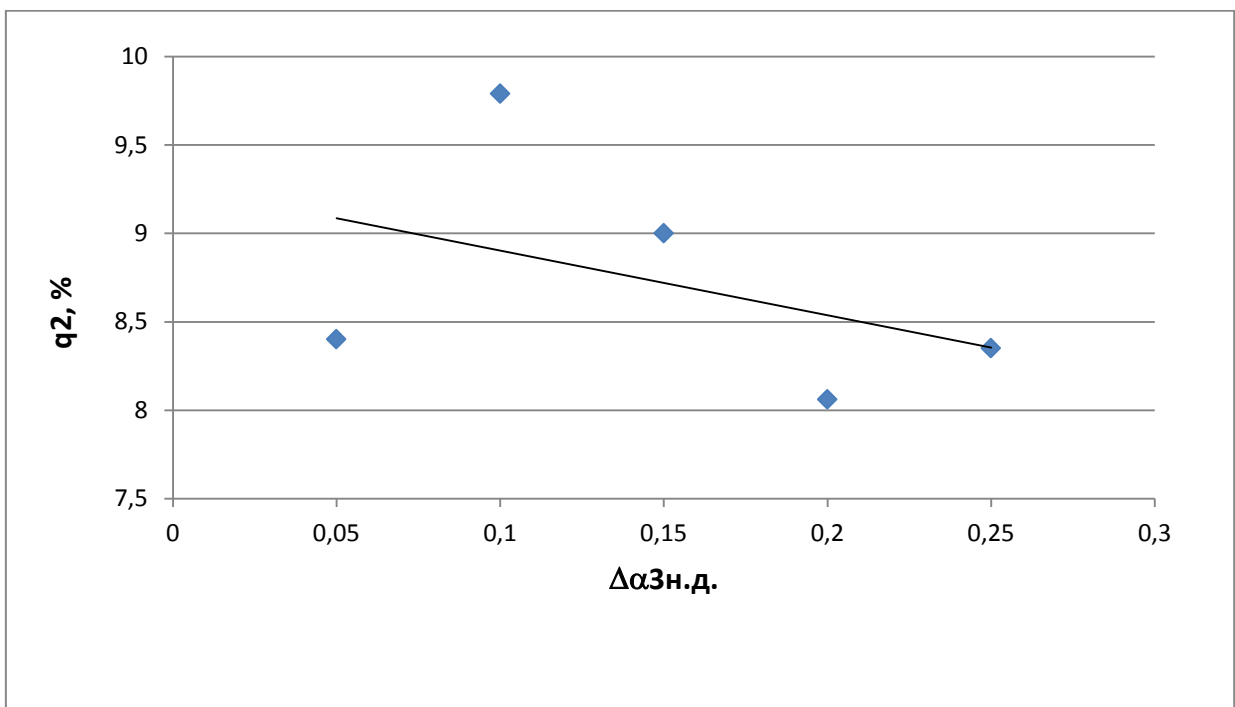


Рисунок 3.3.3 Зависимость потери тепла с уходящими газами от доли расхода воздуха на нижнее дутье (D=50-55т/ч)

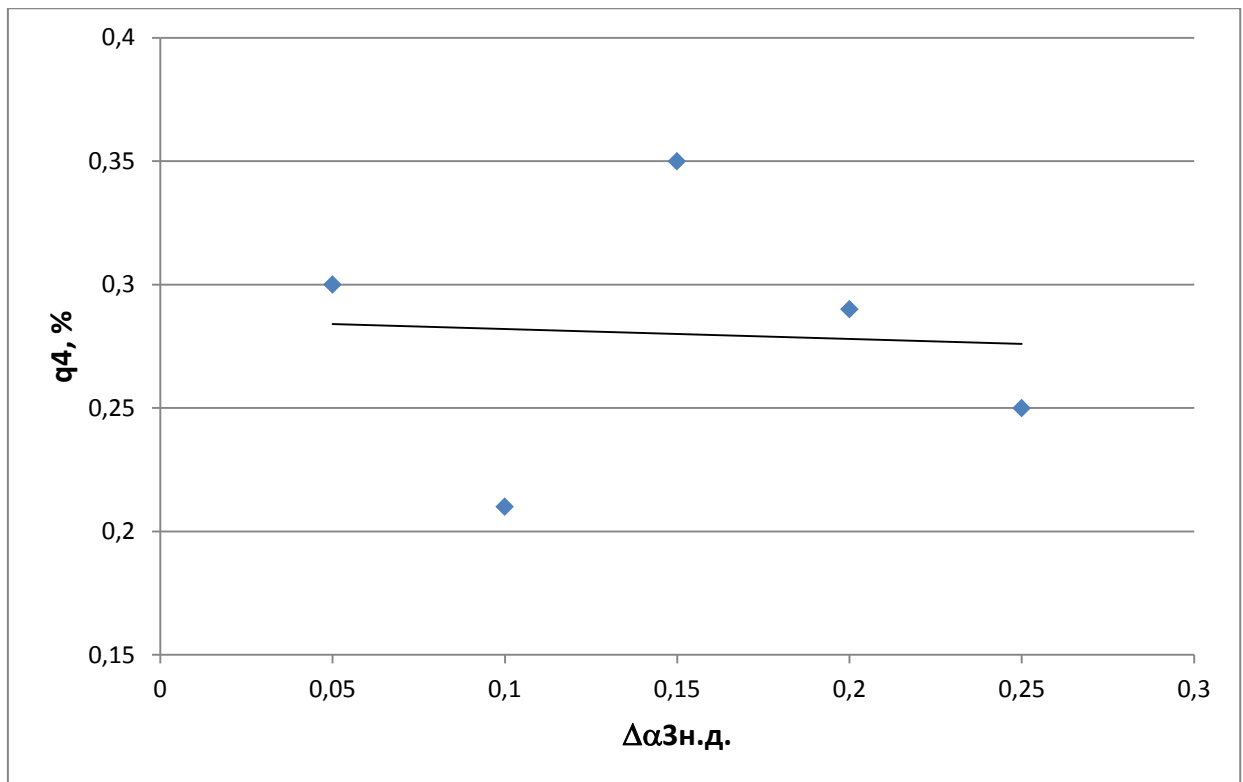


Рисунок 3.3.4 Зависимость потери тепла с механической неполнотой сгорания топлива от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=50-55$ т/ч)

Таблица 3.3.2 Серия опытов №2 распределение долей расхода воздуха при нагрузках 50-55т/ч

Параметры	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
$D$	51т/ч	53т/ч	53т/ч	56т/ч	58т/ч
$\alpha_T$	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
$\Delta\alpha_T$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$\Delta\alpha_1$	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65
$\Delta\alpha_2$	0,35	0,33	0,25	0,25	0,21
$\Delta\alpha_{3з.д.}$	0,11	0,13	0,12	0,12	0,14
$\Delta\alpha_{3н.д.}$	0,05	0,11	0,15	0,21	0,25
$q_2$	7,55	7,36	7,9	7,54	8,5
$q_4$	0,45	0,34	0,42	0,36	0,31
$NO_x$	440,1	399,4	382,2	365,4	380,1
$\eta$	91,1	91,3	90,7	91,1	90,2

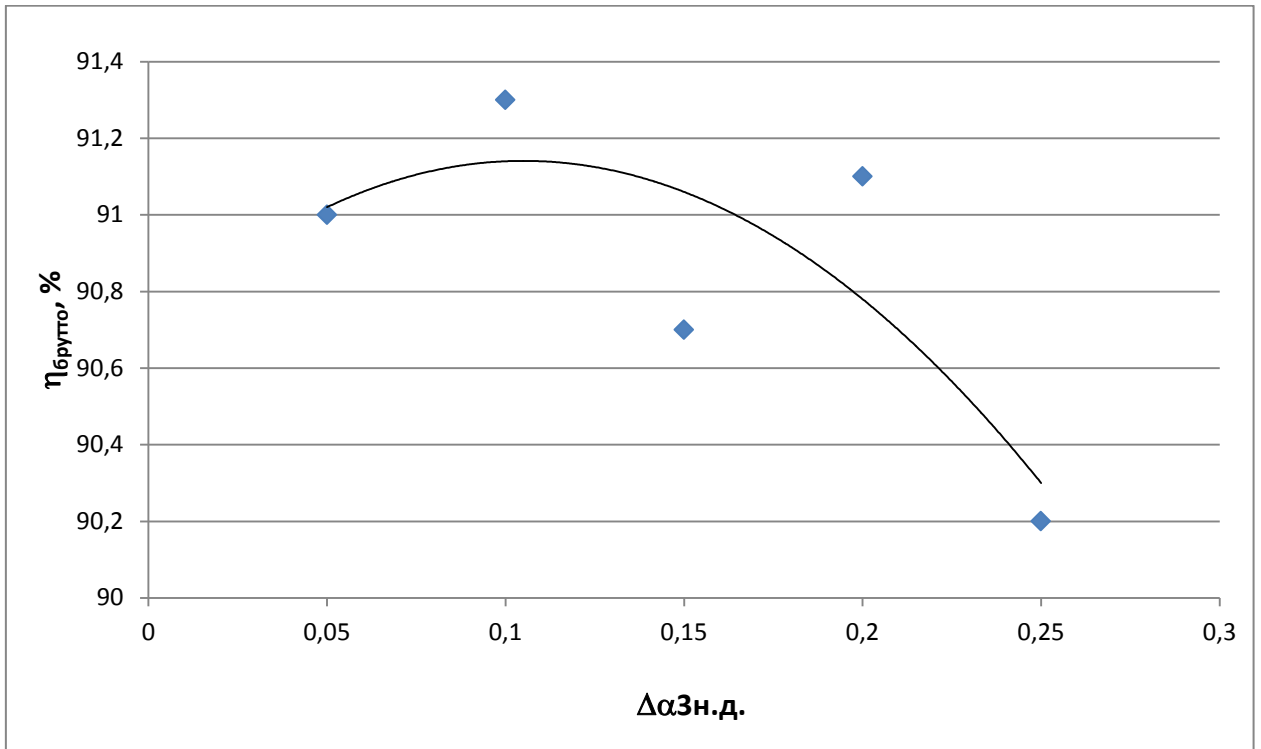


Рисунок 3.3.5 Зависимость КПД брутто от доли расхода воздуха на нижнее дутье при  $\Delta\alpha_{Зн.д.} = 0,1$  ( $D=50-55$ т/ч)

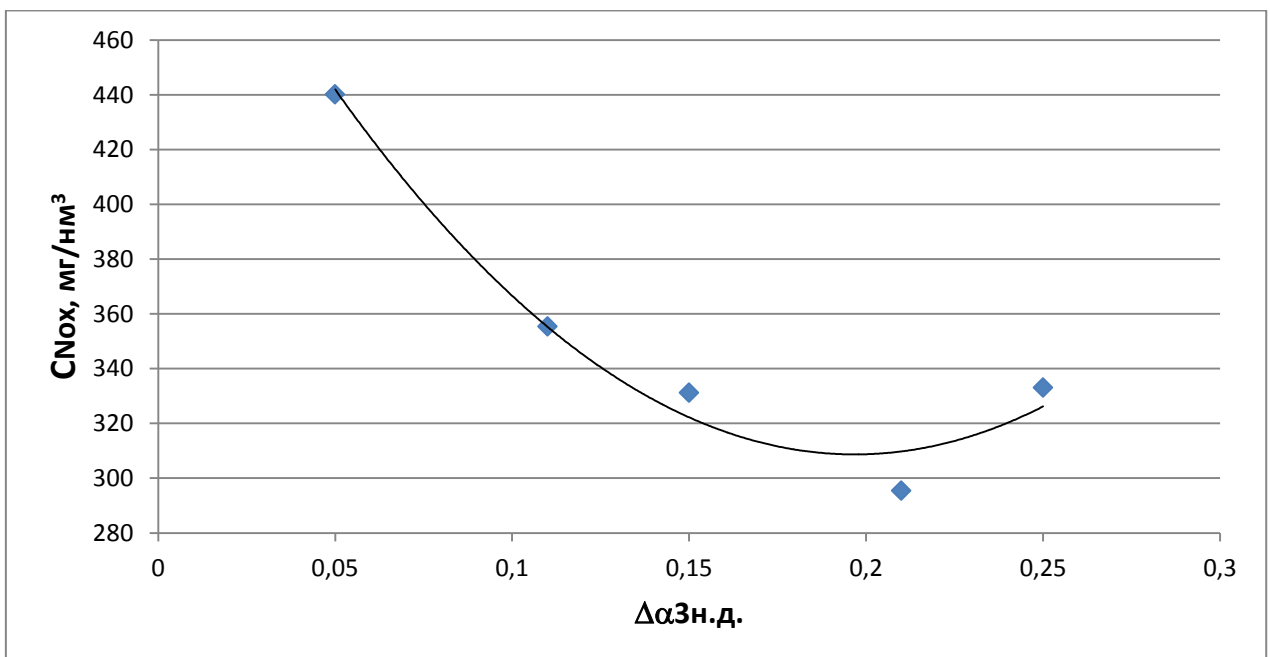


Рисунок 3.3.6 Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах в пересчете  $\alpha_T=1,4$  от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=50-55$ т/ч)

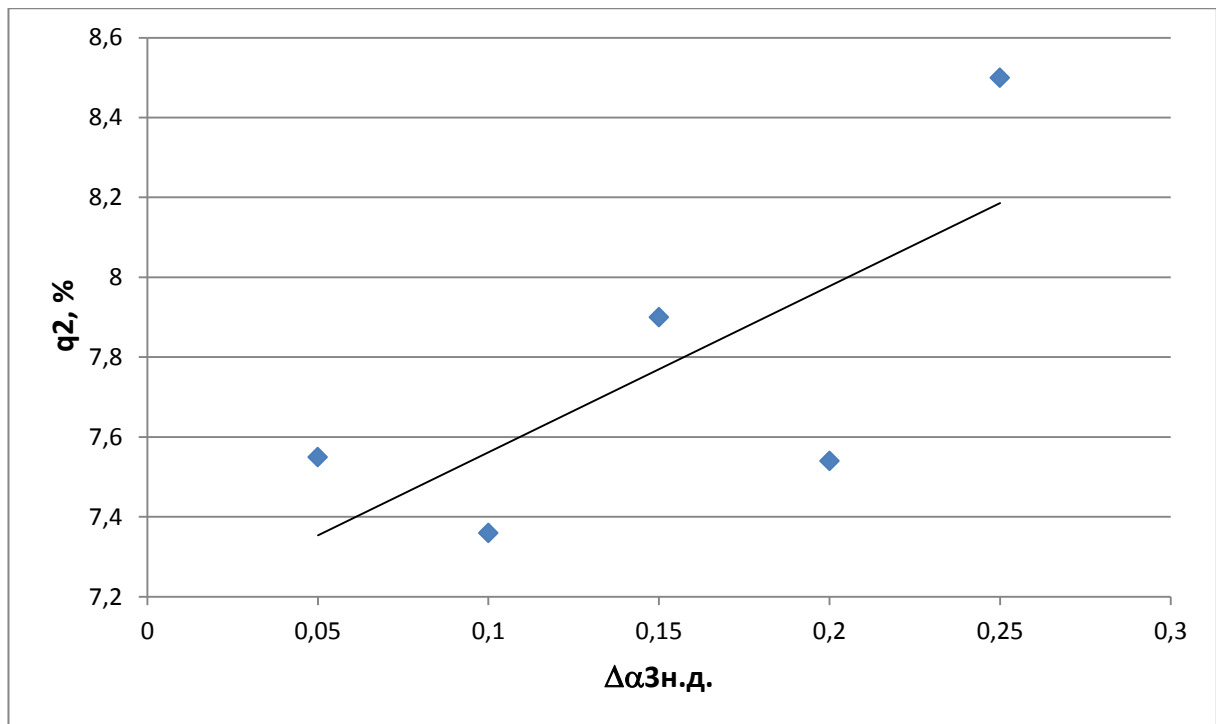


Рисунок 3.3.7 Зависимость потери тепла с уходящими газами от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=50-55\text{т/ч}$ )

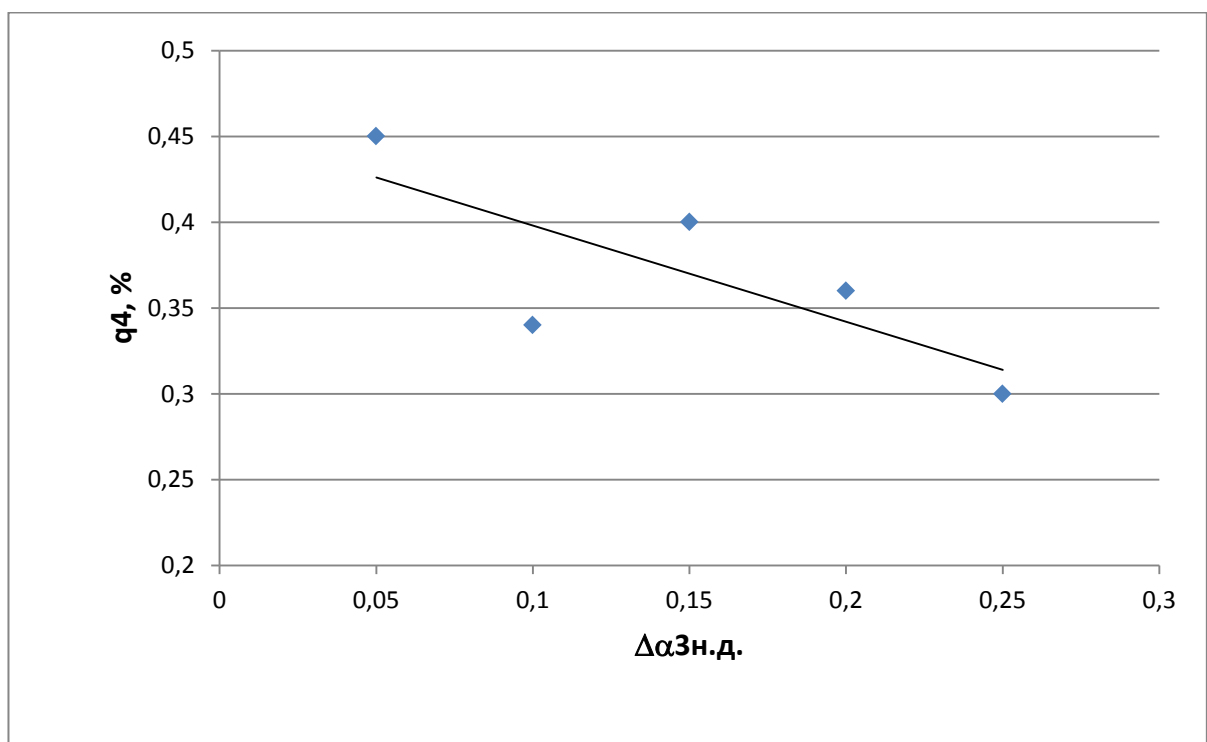


Рисунок 3.3.8 Зависимость потери тепла с механической неполнотой сгорания топлива от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=50-55\text{т/ч}$ )

Таблица 3.3.3 Серия опытов №3 распределение долей расхода воздуха при нагрузках 55 – 60т/ч

Параметры	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5
D	56т/ч	55т/ч	57т/ч	62т/ч	61т/ч
$\alpha_T$	1,251	1,252	1,254	1,251	1,254
$\Delta\alpha_T$	0,051	0,052	0,051	0,054	0,052
$\Delta\alpha_1$	0,653	0,654	0,651	0,651	0,652
$\Delta\alpha_2$	0,35	0,31	0,25	0,25	0,21
$\Delta\alpha_{3з.д.}$	0,052	0,053	0,051	0,054	0,054
$\Delta\alpha_{3н.д.}$	0,05	0,11	0,15	0,21	0,25
q2	8,04	7,76	8,15	7,79	8,55
q4	0,36	0,24	0,35	0,31	0,25
C <sub>NOx</sub>	420,11	405,31	399,41	387,12	390,14
$\eta_{\text{брутто}}$	90,81	91,11	90,51	90,94	90,23

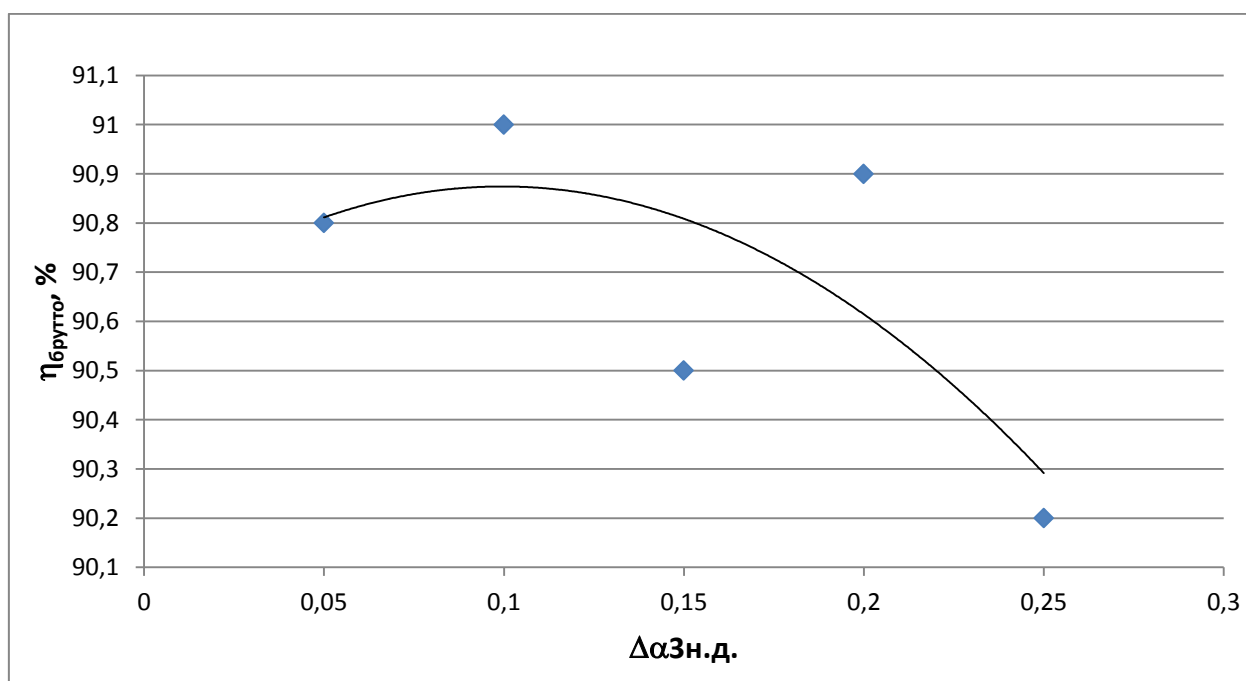


Рисунок 3.3.9 Зависимость КПД брутто от доли расхода воздуха на нижнее дутье при  $\Delta\alpha_{3з.д.} = 0,5$  (D=55-60т/ч)



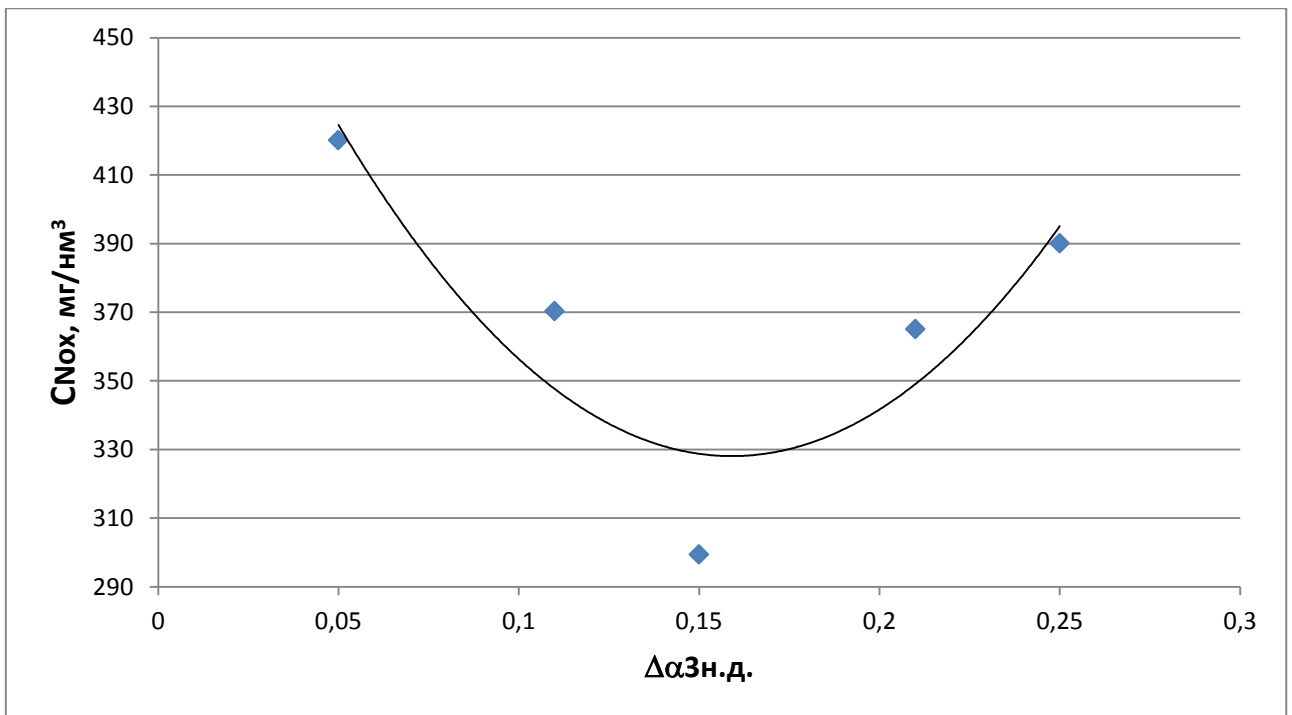


Рисунок 3.3.10 Зависимость содержания оксидов азота в дымовых газах в пересчете  $\alpha_T=1,4$  от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=55-60$ т/ч)

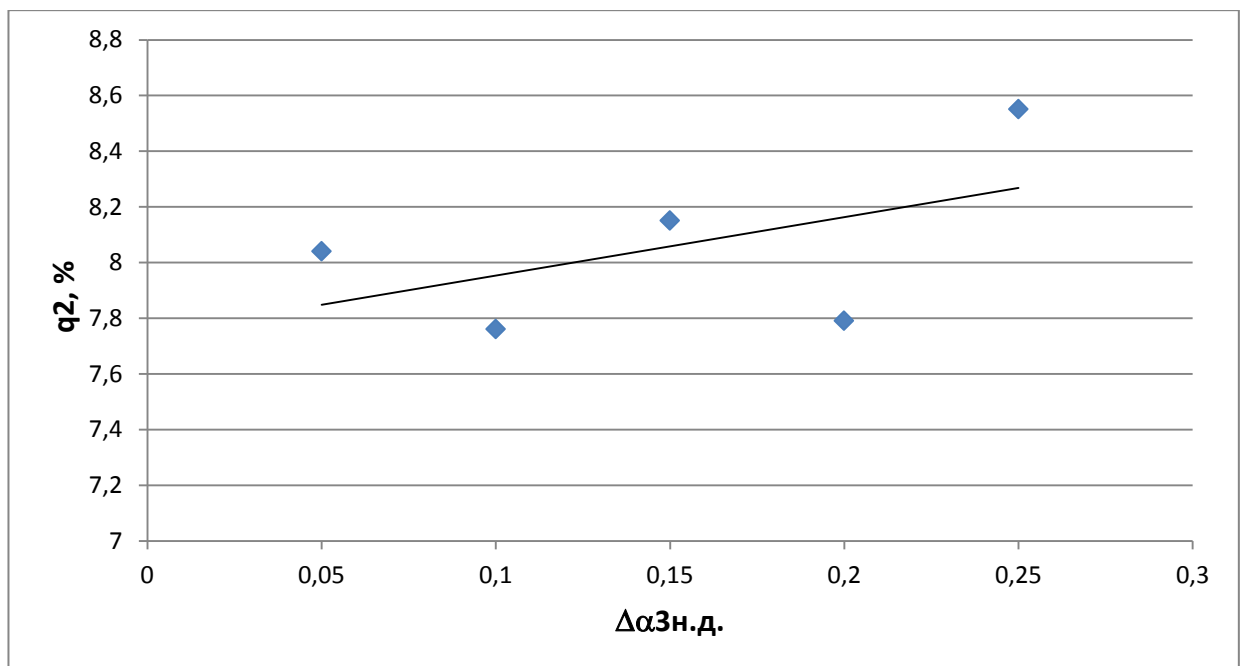


Рисунок 3.3.11 Зависимость потери тепла с уходящими газами доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=55-60$ т/ч)

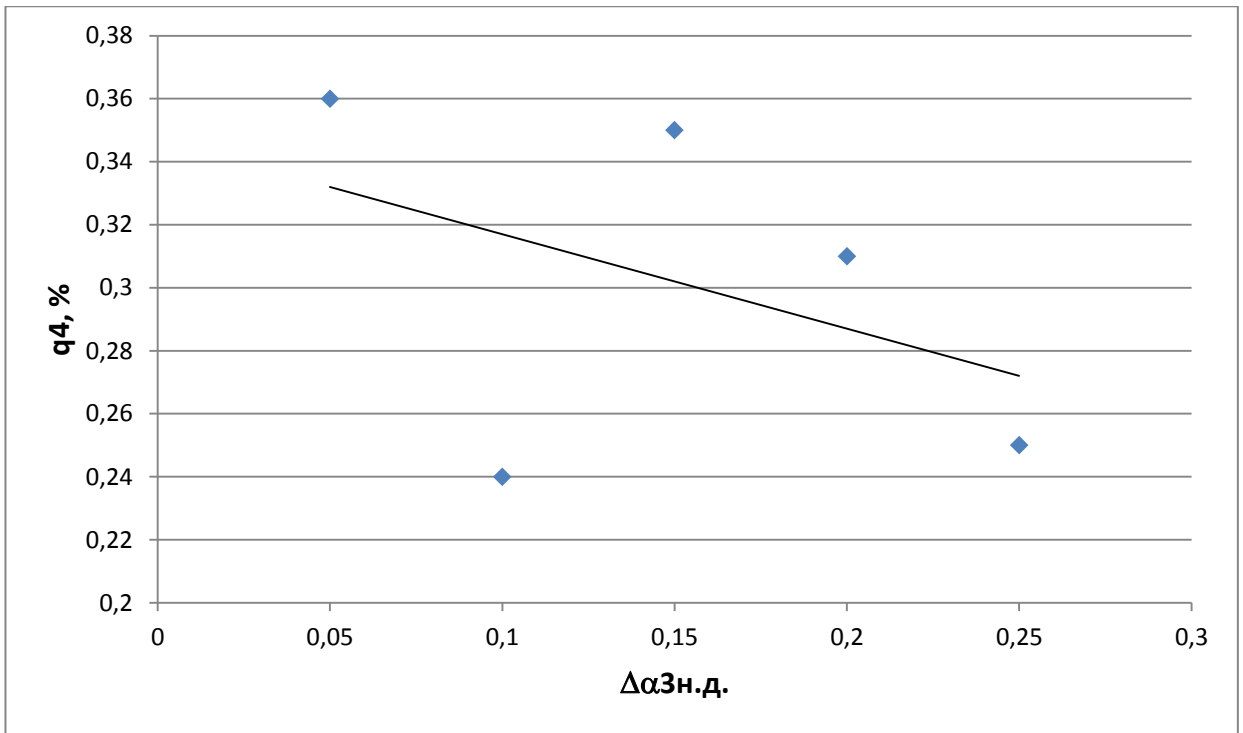


Рисунок 3.3.12 Зависимость потери тепла с механической неполнотой сгорания топлива от доли расхода воздуха на нижнее дутье ( $D=55-60\text{т/ч}$ )

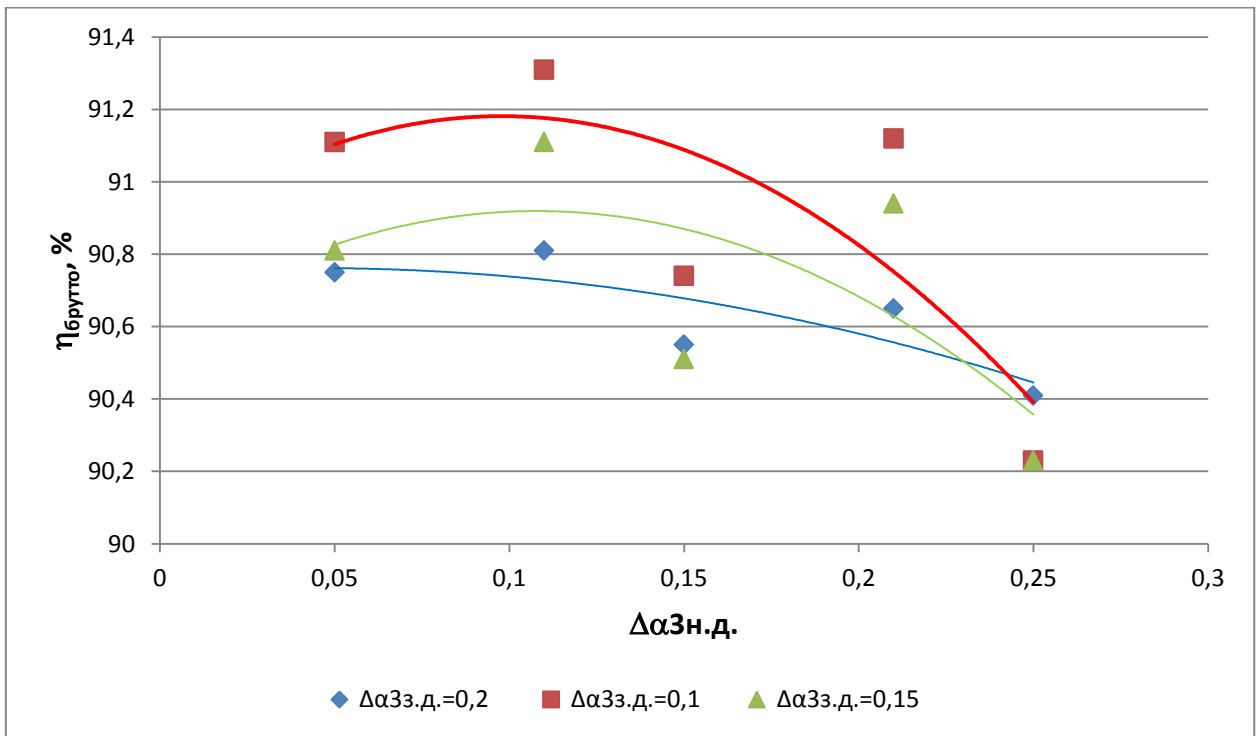


Рисунок 3.3.13 Сравнение серий опытов зависимости КПД брутто с доли воздуха на нижнее дутье при нагрузке 50-60т/ч

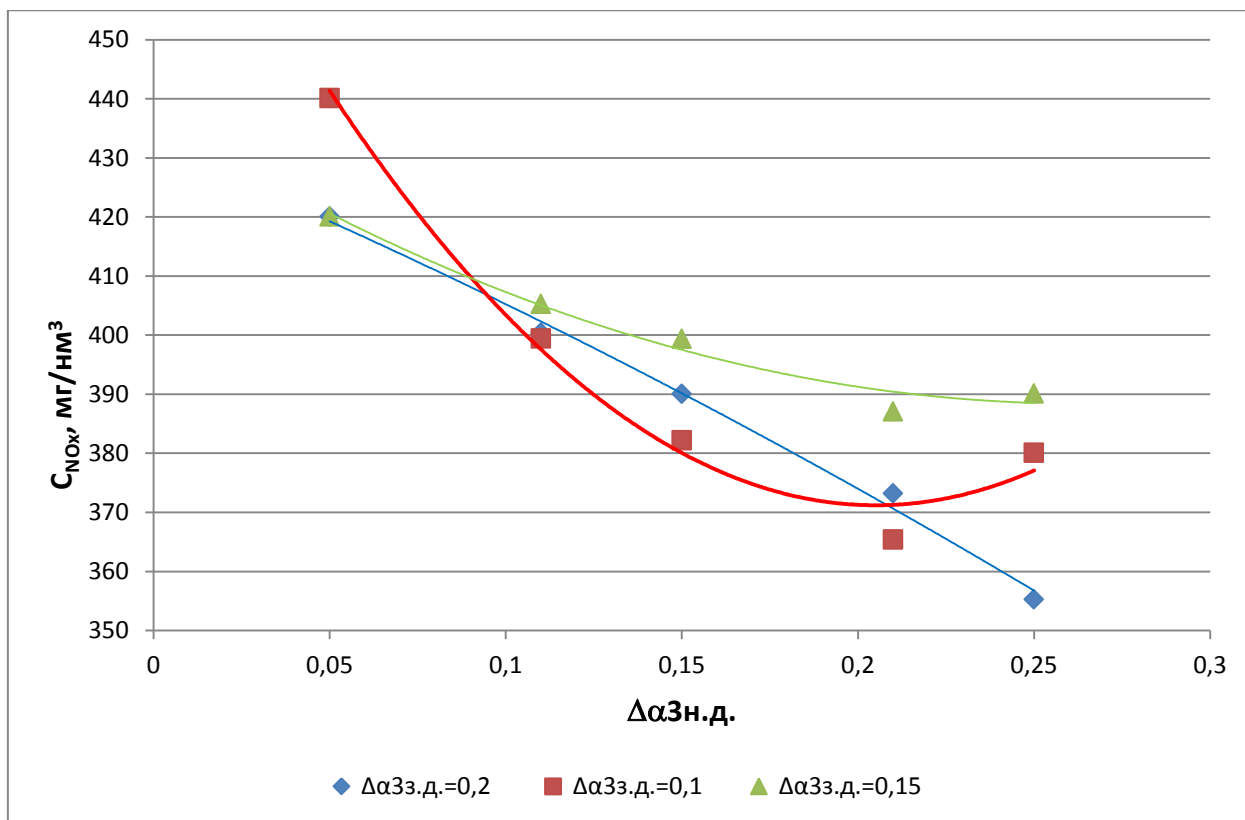


Рисунок 3.3.14 Сравнение серий опытов зависимости содержания оксидов азота в дымовых газах с доли воздуха на нижнее дутье при нагрузке 50-60т/ч

Анализируя рисунки 3.27 и 3.28 можно сделать вывод, что максимальное КПД брутто и минимальное содержание оксидов азота в котле БКЗ 75-39ФБ достигается в серии опытов №2 при  $\Delta\alpha_{Зн.д.}=0,2$ , параметры котла при этой серии опытов сведены в таблицу 3.7.

### 3.4 Исследование зависимости снижения оксидов азота от третичного дутья при изменении коэффициента избытка воздуха

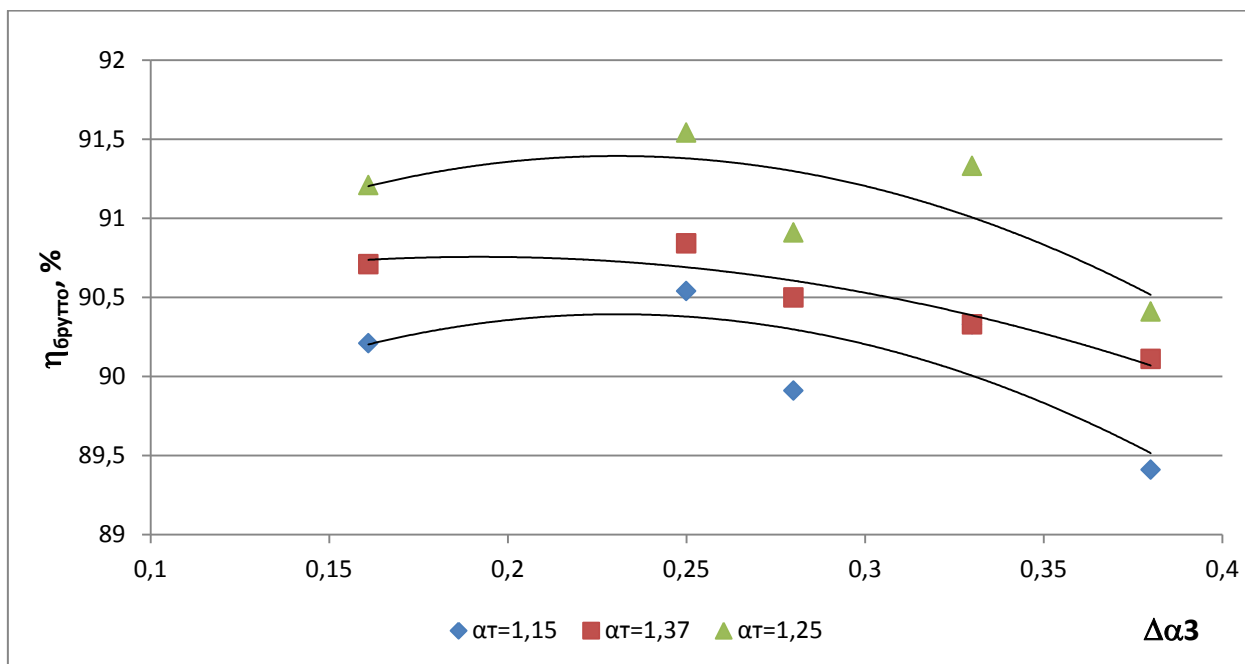


Рисунок 3.4.1 Сравнение зависимости КПД брутто котла БКЗ 75-39 ФБ от доли воздуха третичного дутья

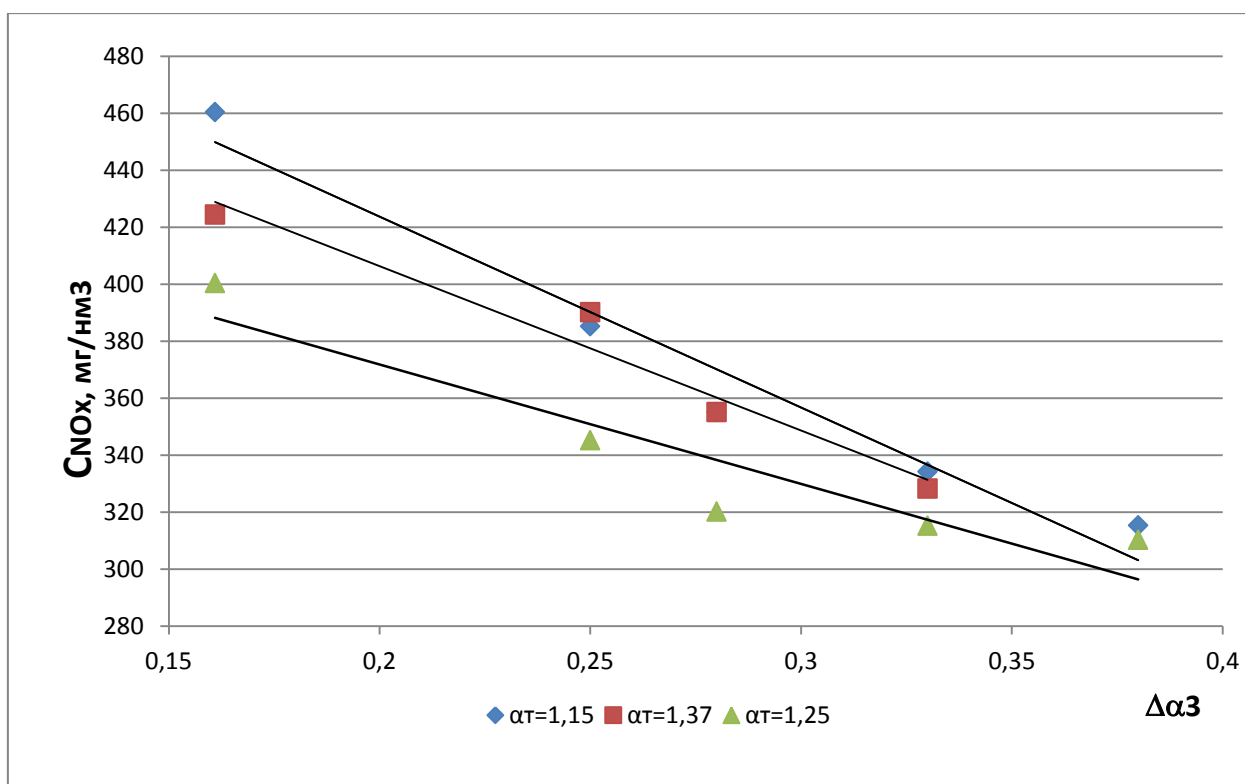


Рисунок 3.4.2 Сравнение зависимости содержания оксидов азота в дымовых газах от доли воздуха третичного дутья

Анализируя рисунки 3.4.1 и 3.4.2 можно сделать вывод, что оптимальное значение коэффициента избытка воздуха для реконструированного котла БКЗ 75-39ФБ на низкотемпературное, вихревое сжигание топлива равно  $\alpha_T=1,25$ . При увеличении и уменьшении  $\alpha_T$  замечено уменьшение КПД брутто котла и увеличение содержания оксидов азота в дымовых газах.

Принято решение не проводить далее испытаний котла при коэффициентах избытка воздуха  $\alpha_T=1,1-2,0$  в пределах нагрузок 50–60т/ч.

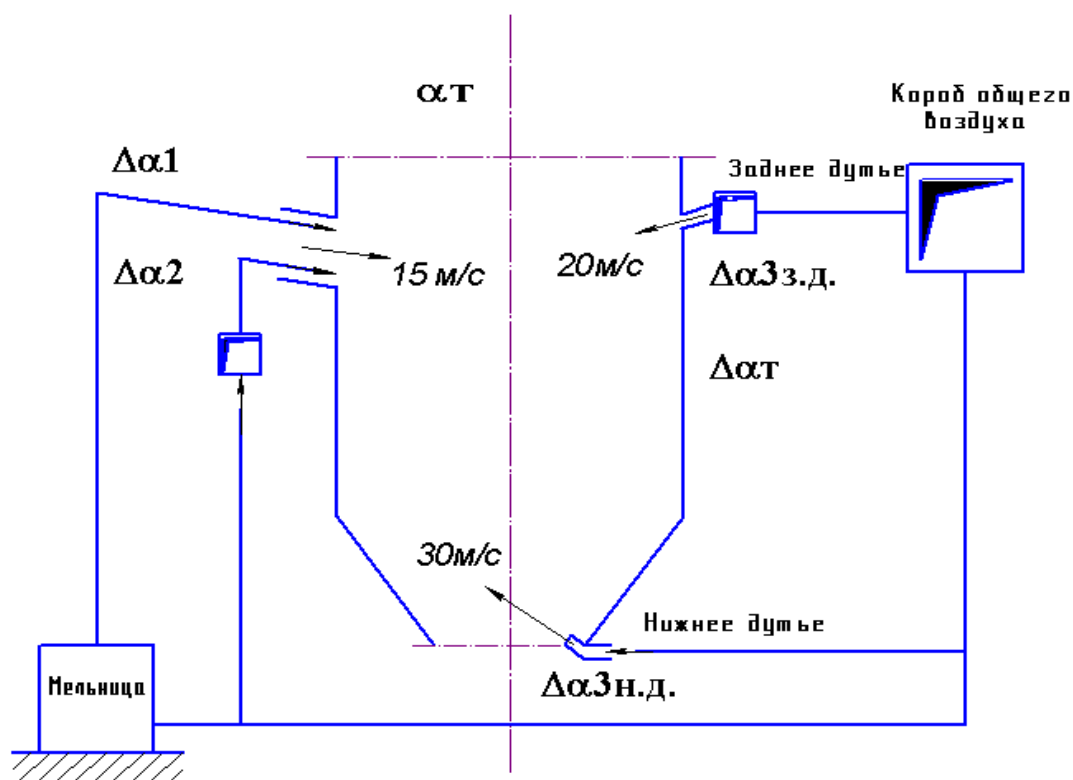


Рисунок 3.4. Рациональное распределение долей расхода воздуха на котле БКЗ 75-39ФБ [114-116]

Специальные испытания реконструированного котла проводились с целью выявления зависимости доли третичного дутья на параметры режимной карты котла. Замеры проводились прибором ДАГ-500 и ДАГ-510. Результаты измерений приведены в табл. 3.4.4 и изображены на рисунке 3.4.3

Таблица 3.4.4– Показатели работы котла [109-124]

Нагрузка котла в пределах, т/ч		Коэффициент избытка воздуха за котлом, $\alpha$	Концентрация оксидов азота, мг/нм <sup>3</sup>	$q_4$	$q_2$	КПД котла (брутто)
50-60		1,25	380	0,36	7,54	91,3
65-75		1,25	360	0,29	7,41	91,5
Нагрузка котла в пределах, т/ч	Доля первичного воздуха, $\Delta\alpha_1$	Доля вторичного воздуха, $\Delta\alpha_2$	Доля третичного воздуха, $\Delta\alpha_3 = \Delta\alpha_{3н.д.} + \Delta\alpha_{3з.д.}$		Присосы в топку, $\Delta\alpha_4$	
			Нижнее дутье, $\Delta\alpha_{3н.д.}$	Заднее дутье, $\Delta\alpha_{3з.д.}$		
50-60	0,53	0,25	0,15	0,12	0,07	
65-75	0,52-0,55	0,25	0,2-0,25	0,13	0,05	

### 3.5 Зависимость температура уходящих газов от нагрузки котла до и после рационального распределения долей воздуха на котле.

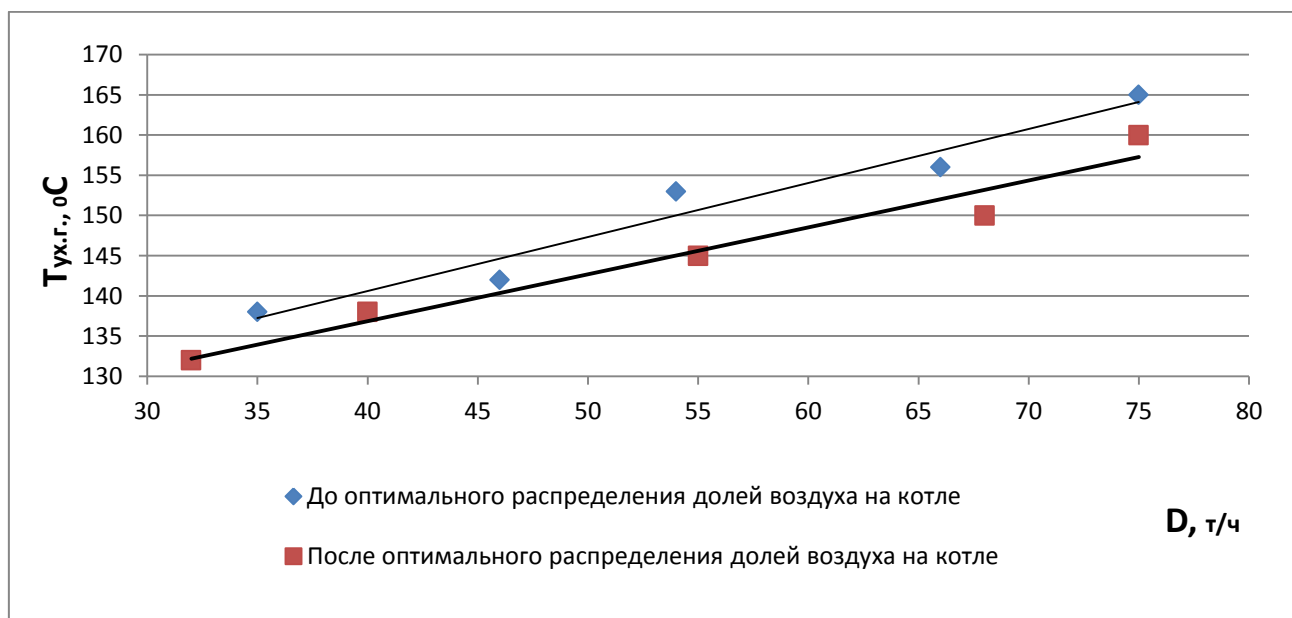


Рисунок 3.5.1 – Зависимость температура уходящих газов от нагрузки котла до и после оптимального распределения долей воздуха на котле

При работе котла БКЗ-75-39ФЕ ст. №1 отмечено некоторое снижение температуры газов на выходе из топки на 50-100°С. Измерения температур проводились оптическим пирометром. Наблюдаемое снижение температуры на выходе из топки объясняется повышением интенсивности процессов

теплообмена в поверхностях "холодной" воронки за счет оптимального распределения долей воздуха на котле изображенных на рисунке 3.4.3. Наблюдения за работой котла проводились и после режимно-наладочных испытаний. Они показали, что режим работы котла оказывается неустойчивым к подаче вторичного воздуха. Отклонение от указанных значений в режимной карте приводило к смещению факела вправо, влево или же к наложению его на задний экран топки и, как следствие, шлакованию нижней части заднего экрана. Снижение температуры на выходе из топки котла в свою очередь повлияло на снижение температуры уходящих газов, изображенное на рисунке 3.5.1., что благотворно отразилось на технико-экономических показателях котла.

### 3.6 Зависимость содержания оксидов азота от коэффициента избытка воздуха в горелке.

Режимно-наладочные испытания проводились при двух пределах нагрузок 50-60 т/ч и 65-75 т/ч по методике описанной в разделе II п.2.4. Испытания проведены по второму классу точности, что дает возможность определения КПД котла с точностью до  $\pm 2-3\%$ . Результаты испытаний приведены в Приложениях А и Б;

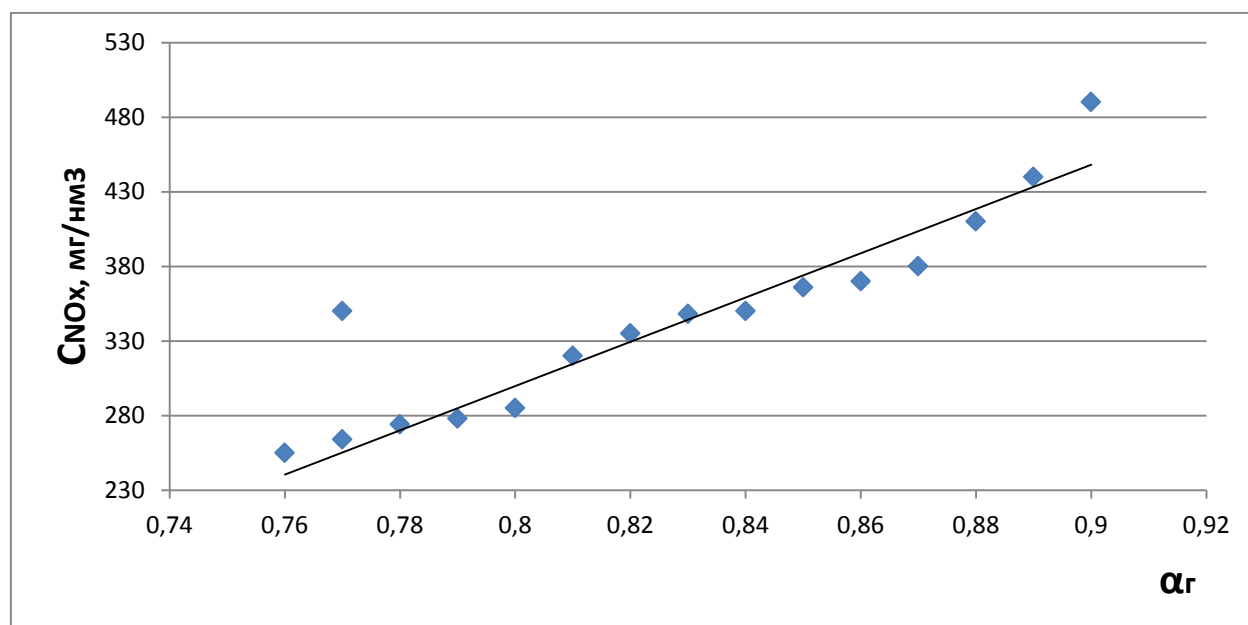


Рисунок 3.6.1 – Зависимость содержания оксидов азота от коэффициента избытка воздуха в горелке

Анализируя рисунок 3.4.6 мы видим, что все описанные ранее режимы укладываются в одну зависимость от коэффициента избытка воздуха в горелке, что не противоречит результатам исследований на других котлах. Для обеспечения минимальной величины содержания оксидов азота для данного котла без снижения КПД брутто рекомендуем принять коэффициент избытка воздуха в горелке  $\alpha_r=0,77$ .

Изучая работу котла №1 и данные инструментальных замеров следует отметить, что организация низкотемпературного ступенчатого сжигания в целом снижает содержание оксидов азота на 10-12%. Достижимый эффект снижения в образовании оксидов азота объясняется образованием в топочной камере зон горения, отличающихся избытком воздуха и уровнем температур. Сущность этого метода подавления оксидов азота заключается в том, что кроме основной зоны горения в топке образуются восстановительная и дожигательная зона. 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, в третью зону подается остальной воздух необходимый для полного сгорания топлива с использованием сопел, расположенных на задней стене топочной камеры на уровне основных горелок.



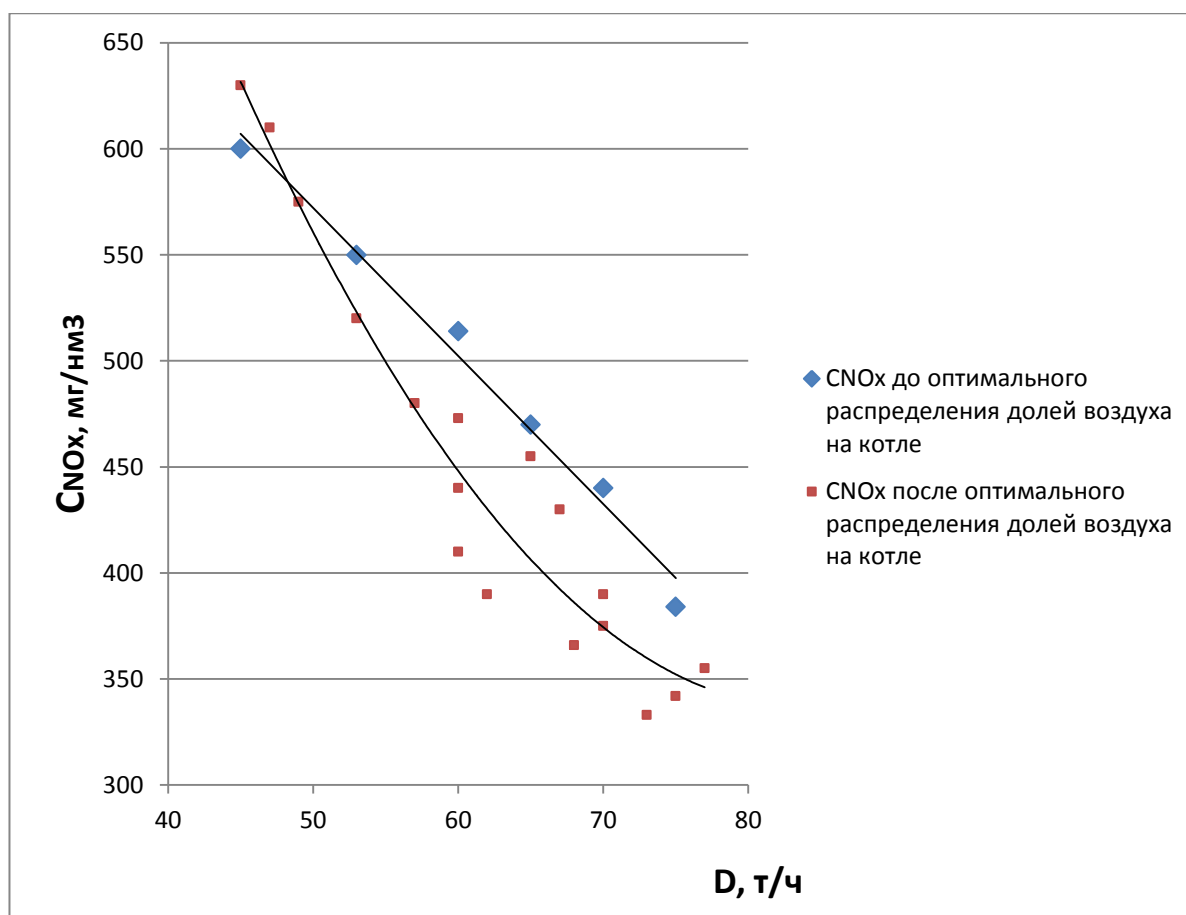


Рисунок 3.6.2 – Зависимость содержания оксидов азота в уходящих газах от нагрузки котла БКЗ 75-39ФБ

### 3.7 Зависимость содержания бенз(а)пирена и $\text{NO}_x$ от коэффициента избытка воздуха в условиях рационального распределения долей воздуха на котле.

После перевода котла на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание, при сравнении расчетных данных и экспериментальных данных, содержание оксидов азота уменьшилось на 10-12%, а содержание Бенз(а)пирена не увеличилось (рис.3.7.1). Содержание бенз(а)пирена рассчитывалось по методике «СО 153-34.02.316-2003 Методические рекомендации по расчету выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций» и экспериментальным путем.

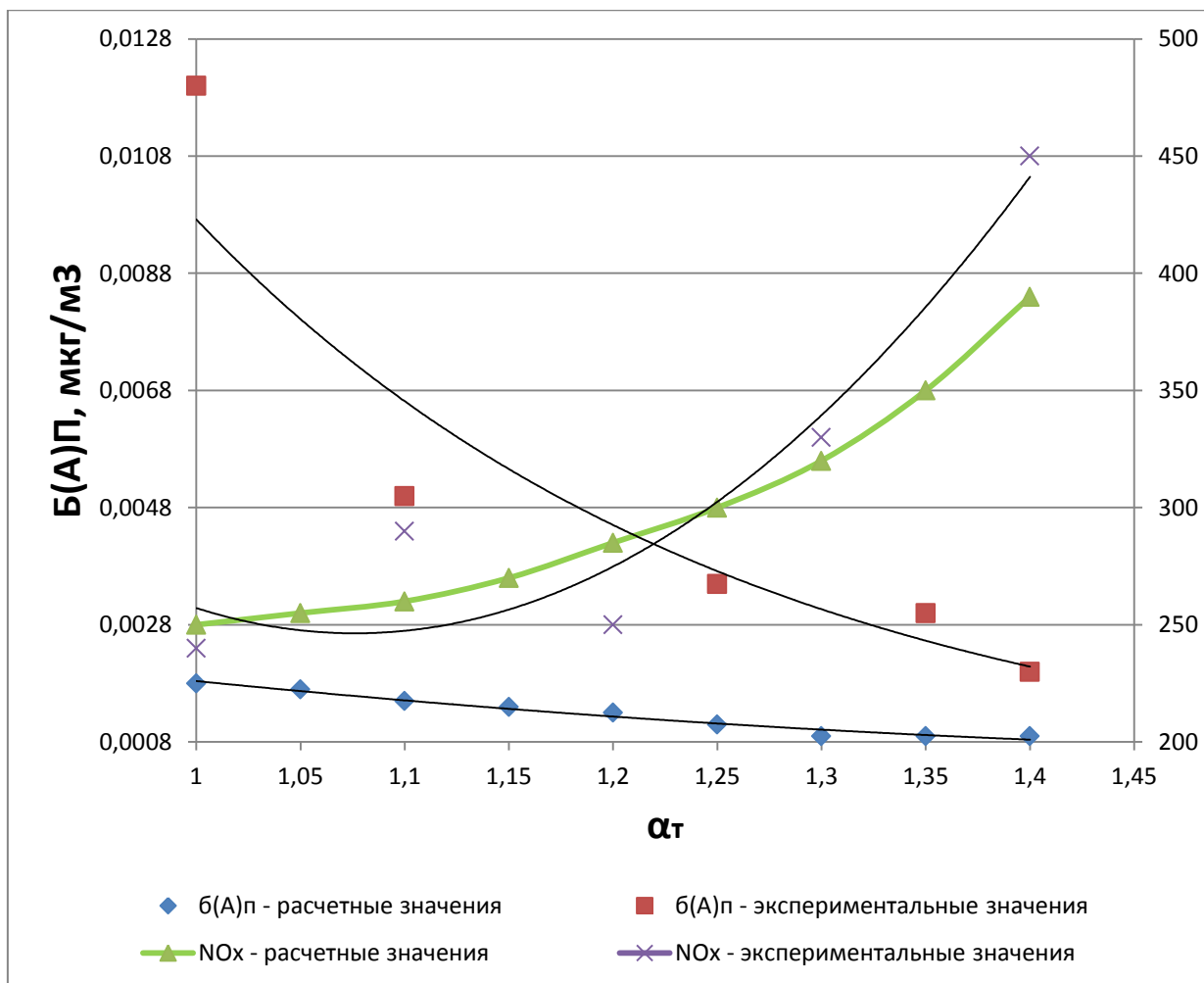


Рисунок 3.7.1 – зависимость содержания бенз(а)пирена и NO<sub>x</sub> от коэффициента избытка воздуха после реконструкции

## 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:  $\Delta\alpha_{\text{Зн.д.}} = 0,2$ ,  $\Delta\alpha_{\text{Зз.д.}} = 0,1$ .

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

## РАЗДЕЛ IV. Эксергетический анализ объекта исследований

### 4.1 Исследование степени совершенствования процесса горения при рациональном распределении долей воздуха в котле.

Для разработки и обоснования методики оценки проектных решений реконструкции промышленных котельных на базе эксергетического анализа работы оборудования, позволяющая снизить, объем режимно-наладочных испытаний котельного оборудования была исследована степень совершенствования процесса после рационального распределения долей воздуха.

Величины, входящие в состав уравнения эксергетического баланса, могут служить для определения КПД исследуемого энергетического процесса. Этот КПД носит название эксергетического КПД в отличие от термического КПД, рассчитываемого при помощи составляющих энергетического баланса [94- 124].

В обоих случаях общий принцип расчёта КПД: нужно составить дробь, в числитель которой подставляются составляющие баланса, выражающие полезный эффект процесса, а в знаменатель – те составляющие, которые определяют расходы, связанные с проведением процесса. Однако способы расчёта числителя и знаменателя дроби различны при определении эксергетического и термического КПД.

При расчёте термического КПД не учитывается различное качество разных видов энергии и способов её проявления. В связи с этим термический КПД является только показателем, позволяющим сравнить однотипные процессы, но не определяет степени совершенствования процесса.

Так, например, коэффициент полезного действия парового котла имеет значение, лишь немного меньше единицы (0,8-0,9), а термический КПД парового цикла значительно меньше единицы (0,3-0,4). По существу количество энергии, сообщённой в котле циркулирующему рабочему телу, не

намного меньше химической энергии сжигаемого топлива, но качество энергии произведенного пара намного ниже качества энергии топлива.

При расчёте эксергетического коэффициента полезного действия, как полезный эффект, так и расходы, связанные с проведением процесса, выражаются при помощи эксергии или работы, благодаря правильной оценке качества различных видов энергии эксергетический КПД является мерой степени совершенства процесса. Чем меньше необратимость рассматриваемых изменений, тем большую величину имеет этот КПД. В пределе для идеального обратимого процесса он равняется единице.

Лучше всего определение эксергетического КПД обосновывать на сравнении реального процесса с идеальным обратимым. Тогда, эксергетический КПД является отношением эксергии привода обратимого идеального процесса к эксергии привода исследуемого реального процесса.

В паросиловой установке полезным эффектом работы котла является приращение эксергии циркулирующего рабочего тела.

Чтобы установить наиболее выгодный путь увеличения совершенствования исследуемого процесса, следует сравнить потери эксергии в отдельных звеньях процесса, а поэтому изучить возможности уменьшения тех потерь, которые наиболее, заметно влияют на совершенство процесса. При этом следует взвесить не только возможности изменения звеньев процесса с наибольшей обратимостью, но и возможность влияния на величину потерь эксергии.

Важнейшее применение эксергетического баланса основано на сравнении эксергетического КПД однотипных процессов и на сравнении потерь эксергии, происходящих в отдельных звеньях исследуемого процесса.

Низкий эксергетический КПД может свидетельствовать о том, что общий принцип, на котором основан данный тепловой процесс, выбран не

наилучшим образом, поскольку даже при совершенной конструкции не удаётся избежать большой необратимости.

В случае парового котла низкое значение эксергетического КПД вызвано, прежде всего, необратимостью сгорания и необратимостью теплообмена между продуктами сгорания и циркулирующим рабочим телом. Первую из этих потерь можно уменьшить путём повышения параметров топлива и окислителя (например, подогрев продуктами сгорания воздуха); уменьшение второй потери можно достигнуть повышением средней температуры циркулирующего тела в котле. Но наилучшие результаты будут получены, если вообще исключить сжигание. Это означает, что наилучшим решением было бы изменить принцип использования химической энергии топлива.

При составлении эксергетического баланс процесса сгорания наиболее удобно пользоваться отношением химического эксергии к теплотворной способности, которая главным образом зависит от влажности топлива.

Паровой котёл является звеном котельной, в которой имеют место наибольшие потери эксергии. Обычно эксергетический КПД в 2 раза меньше термического КПД парового котла. Это говорит о том, что термодинамические преобразования котла далеки от совершенства, хотя высокое значение термического КПД, достигающие даже около 90 %, об этом не говорит. Среди необратимых явлений, являющихся причиной небольшого эксергетического КПД котла, основную роль играют необратимая химическая реакция сгорания топлива и необратимый теплообмен.

Для приближенных практических расчетов отношение эксергии топлива к низшей теплоте сгорания топлива имеет вид:

$$ex_m = x \cdot Q_H^P, \text{ ккал/кг}, \quad (4.1)$$

где  $x$  – отношение термического КПД котла к эксергетическому КПД котла;  
 $Q_H^P$  – низшая теплота сгорания топлива,  $Q_H^P = 4013$  ккал/кг.

Эксергию теплоты продуктов сгорания топлива, образующихся в топке котла определяем по формуле:

$$ex_{\Gamma} = Q_H^P \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right), \text{ ккал/кг} \quad (4.2)$$

где  $T_0$  - температура окружающего воздуха,  $T_0 = 293^{\circ}\text{K}$ ;

$T_k$  - калориметрическая температура горения топлива.

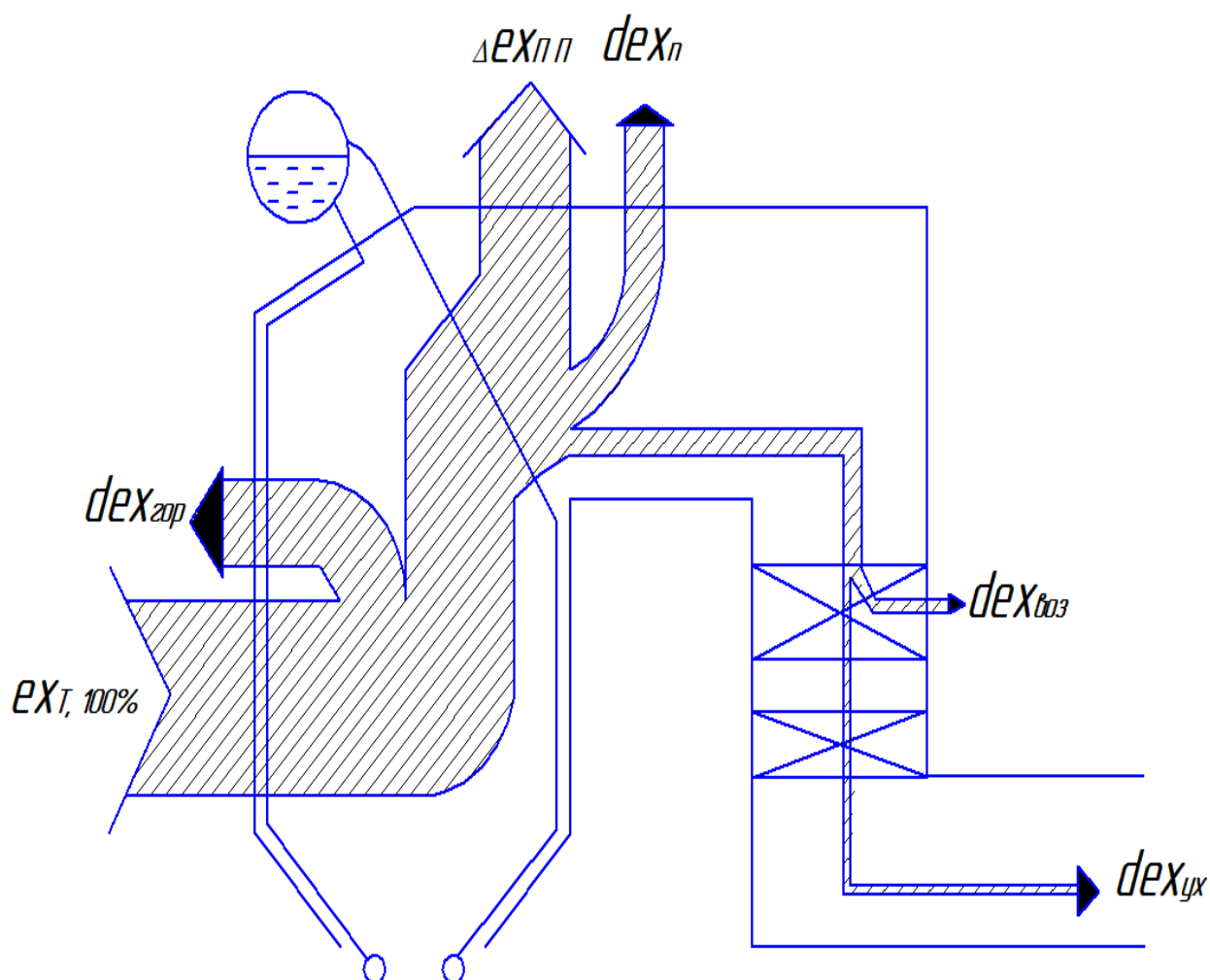


Рис. 4.1.1 - Эксергетический баланс котельного агрегата БКЗ 75-39ФБ после оптимального распределения долей воздуха [109, 117, 124]

Потери при адиабатном горении (без учета потери эксергии за счет теплообмена топки с окружающей средой) определяем по формуле:

$$dex_{гор} = ex_m - ex_{г}, \text{ ккал/кг} \quad (4.3)$$

или в %

$$dex_{гор} = \frac{100 \cdot (ex_m - ex_{г})}{ex_m}, \% \quad (4.4)$$

Уменьшение эксергии продуктов сгорания за счет теплообмена в нагревательно – испарительной части котла определяем по формуле:

$$\Delta ex_{г}^{HI} = 1,295 \cdot V_{г} \cdot \left( c_{г} \cdot (t_{к} - t_{yx}) - T_0 \cdot c_{г} \cdot \ln \frac{T_{к}}{T_{yx}} \right), \text{ ккал/кг} \quad (4.5)$$

где  $t_{к}$  – калориметрическая температура дымовых газов;

$t_{yx}$  – температура уходящих газов;

Приращение эксергии в процессе превращения воды в перегретый пар определяем по формуле:

$$\Delta ex_{III} = \frac{D}{B} \cdot ((h_{III} - h_{IIB}) - T_0 \cdot (S_{III} - S_{IIB})), \text{ ккал/кг} \quad (4.6)$$

где  $S_{III}$ ,  $S_{IIB}$  - удельная энтропия перегретого пара и питательной воды, определяем по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара;  $h_{III}$ ,  $h_{IIB}$  - теплосодержание перегретого пара и питательной воды,

или в %:

$$\eta_{ex}^{ка} = \frac{\Delta ex_{III}}{ex_m} \cdot 100\% \quad (4.7)$$

Потерю эксергии от теплообмена по водопаровому тракту определяем по формуле:

$$dex_{II} = \Delta ex_{г}^{HI} - \Delta ex_{III}, \text{ ккал/кг} \quad (4.8)$$

или в %:

$$dex_{II} = \frac{100 \cdot (\Delta ex_{г}^{HI} - \Delta ex_{III})}{ex_m}, \quad (4.9)$$

Потеря эксергии продуктов сгорания за счет теплообмена в воздухоподогревателе определяем по формуле:



$$\Delta ex_G'' = 1,295 \cdot V_G \cdot \left( c_G \cdot (t'_{yx} - t_{yx}) - T_0 \cdot c_G \cdot \ln \frac{T'_{yx}}{T_{yx}} \right), \quad (4.10)$$

Увеличение эксергии воздуха в воздухоподогревателе определяется по формуле:

$$\Delta ex_{\text{воз}} = 1,293 \cdot \alpha_T \cdot V^0 \cdot \left( c_{\text{воз}} \cdot (t_{\text{воз}} - t_0) - T_0 \cdot c_{\text{воз}} \cdot \ln \frac{T_{\text{воз}}}{T_0} \right), \quad (4.11)$$

Потеря эксергии за счет теплообмена в воздухоподогревателе определяем по формуле:

$$dex_{\text{воз}} = \Delta ex_G'' - \Delta ex_{\text{воз}}, \quad (4.12)$$

или в %:

$$dex_{\text{воз}} = \frac{(\Delta ex_G'' - \Delta ex_{\text{воз}}) \cdot 100}{ex_m}, \quad (4.13)$$

Составим эксергетический баланс котельного агрегата и определим потерю эксергии с уходящими газами:

$$ex_m = \Delta ex_{III} + dex_{Гор} + dex_{II} + dex_{\text{воз}} + ex_{yx}, \quad (4.14)$$

Отсюда

$$ex_{yx} = ex_m - (\Delta ex_{III} + dex_{Гор} + dex_{II} + dex_{\text{воз}}), \quad (4.15)$$

или в %:

$$ex_{yx} = \frac{ex_{yx}}{ex_m} \cdot 100\%, \quad (4.16)$$

Определим среднетермодинамическую температуру при теплоподводе:

$$T_t = \frac{h_{III} - h_{IIb}}{S_{III} - S_{IIb}}, \quad (4.17)$$

Эксергетический КПД котельного агрегата определяем через среднетермодинамическую температуру:

$$\eta_{ex}^{ка} = \eta_{ка} \cdot \frac{Q_H^P}{ex_m} \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_t} \right). \quad (4.18)$$

Расчёт эксергетического КПД котла произведём на 40, 60 и 75 т/ч до реконструкции и после рационального распределения долей воздуха в котле

[94-124]. Результат расчёта эксергетических показателей сведём в таблицу 4.5.1 и 4.5.2.

Таблица 4.1.1 - Расчёт эксергетического КПД котла БКЗ 75-39 ФБ до рационального распределения долей воздуха в котле

Наименование	Обозначение	Ед.изм.	Производительность котла		
			40т/ч	50÷60т/ч	65÷75т/ч
Низшая теплота сгорания топлива	Qp н	ккал/кг	3696,9	3696,9	3696,9
Эксергия теплоты продуктов сгорания	ex m	ккал/кг	3423,1	3391,6	3360,8
Температура окружающего воздуха	To	К	293	293	293
Температура окружающего воздуха	Tк	С	17,56	17,2	17,98
Температура калориметрическая	Tк	К	1980,56	1981,2	1999,2
Эксергия теплоты продуктов сгорания	ex г	ккал/кг	3150,0	3150,2	3157,2
Потери при адиабатном горении	dex гор.	ккал/кг	273,1	241,5	203,6
то же в процентах	dex гор.	%	36,54	36,3	36,18
Уменьшение эксергии продуктов сгорания	Δex г ни	ккал/кг	1812,36	2693,76	3434,61
Приращение эксергии в процессе	Δexпп	ккал/кг	1454,75	1469,57	1465,36
то же в процентах	Δexпп	%	10,14	10,34	10,41
Потеря эксергии от теплообмена	dex п.	ккал/кг	357,61	1224,19	1282,33
то же в процентах	dex п.	%	2,31	7,90	8,28
Уменьшение эксергии продуктов сгорания ВЗП1	Δex" г	ккал/кг	313,88	462,55	571,30
Увеличение эксергии воздуха в ВЗП	Δex воз	ккал/кг	136,06	136,89	172,83
Потеря эксергии за счёт теплообмена в ВЗП	dex воз	ккал/кг	177,81	325,66	398,47
то же в процентах	dex воз	%	1,24	2,29	2,83
Эксергия уходящих газов	exух.	ккал/кг	1433,66	435,99	347,11
то же в процентах	exух.	%	10,00	3,07	2,46
Среднединамическая температура	Tt		515,24	515,24	515,24
Эксергетический КПД котла	ηэкс. КА		39,77	40,10	39,84

Таблица 4.1.2 - Расчёт эксергетического КПД котла БКЗ 75-39 ФБ после рационального распределения долей воздуха в котле

Наименование	Обозначение	Ед.изм.	Производительность котла		
			40т/ч	50÷60т/ч	65÷75т/ч
Низшая теплота сгорания топлива	Q <sub>p н</sub>	ккал/кг	3696,9	3696,9	3696,9
Эксергия теплоты продуктов сгорания	e <sub>x m</sub>	ккал/кг	3360,8	3300,8	3271,6
Температура окружающего воздуха	T <sub>о</sub>	К	293	293	293
Температура окружающего воздуха	T <sub>к</sub>	С	17,5	17,5	17,8
Температура калориметрическая	T <sub>к</sub>	К	1805,55	1805,519	1773,899
Эксергия теплоты продуктов сгорания	e <sub>x г</sub>	ккал/кг	3097,0	3097,0	3086,3
Потери при адиабатном горении	d <sub>ex гор.</sub>	ккал/кг	263,8	203,8	185,3
то же в процентах	d <sub>ex гор.</sub>	%	35,78	35,18	35,53
уменьшение эксергии продуктов сгорания	Δe <sub>x г ни</sub>	ккал/кг	1583,28	2347,92	2865,90
Приращение эксергии в процессе	Δe <sub>xпп</sub>	ккал/кг	1462,74	1479,69	1471,95
то же в процентах	Δe <sub>xпп</sub>	%	10,39	10,70	10,74
Потеря эксергии от теплообмена	d <sub>ex п.</sub>	ккал/кг	120,54	868,23	1393,95
то же в процентах	d <sub>ex п.</sub>	%	0,78	5,61	9,00
Уменьшение эксергии продуктов сгорания ВЗП1	Δe <sub>x" г</sub>	ккал/кг	351,37	519,10	644,02
Увеличение эксергии воздуха в ВЗП	Δe <sub>x воз</sub>	ккал/кг	134,42	134,42	168,42
Потеря эксергии за счёт теплообмена в ВЗП	d <sub>ex воз</sub>	ккал/кг	216,95	384,68	475,60
то же в процентах	d <sub>ex воз</sub>	%	1,54	2,78	3,47
Эксергия уходящих газов	e <sub>xух.</sub>	ккал/кг	1632,83	760,45	170,08
то же в процентах	e <sub>xух.</sub>	%	9,60	3,50	1,24
Среднединамическая температура	T <sub>t</sub>		515,24	515,24	515,24
Эксергетический КПД	η <sub>экс. КА</sub>		39,91	40,23	40,02

## Выводы

Анализируя рисунок 4.1.2 можно сделать вывод, что в условиях рационального распределения долей воздуха в котле, эксергетический КПД котла увеличивается за счет снижения потери эксергии, которое мы видим на рисунке 4.1.3, где изображена зависимость при необратимом процессе горения топлива от нагрузки котла и за счет снижения потери эксергии с уходящими газами, которое изображено на рисунке 4.1.4. Из этого следует, что степень совершенствования процесса не уменьшается.

Из вышеизложенного следует, что 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.

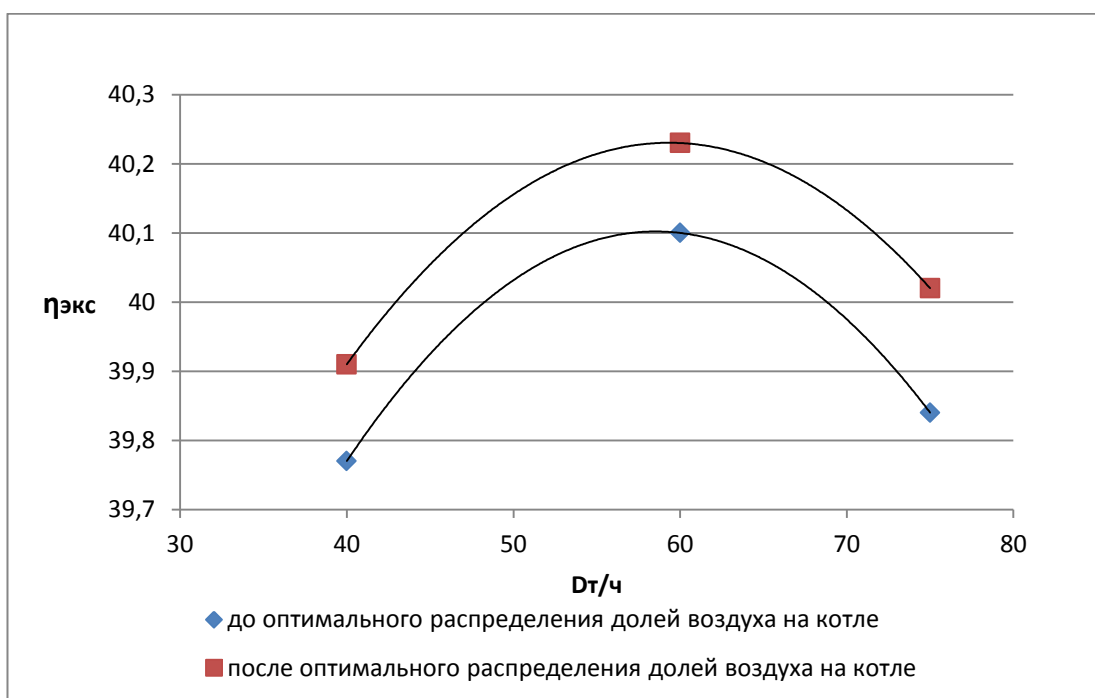


Рисунок 4.1.2 Сравнение эксергетических КПД до и после рациональных распределений долей воздуха в котле

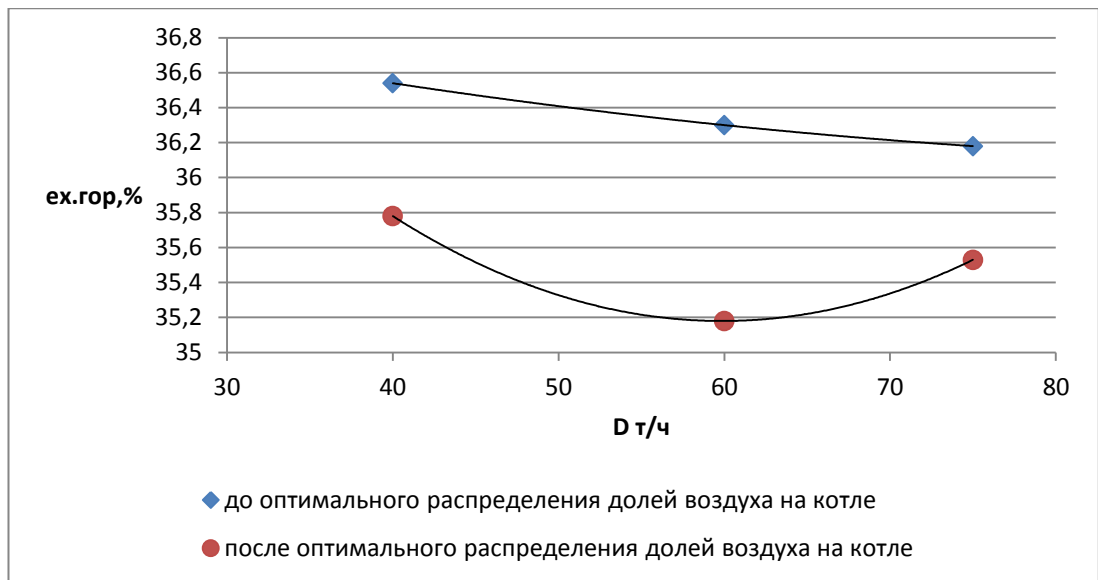


Рисунок 4.1.3 – Зависимость потери эксергии при горении топлива от нагрузки котла

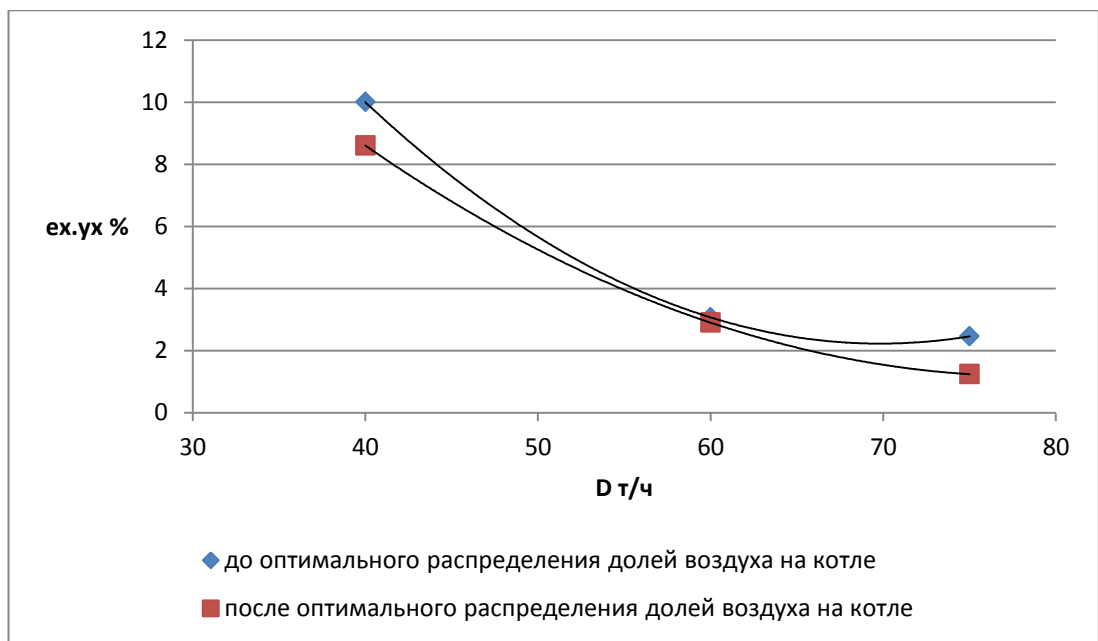


Рисунок 4.1.4 – Зависимость потери эксергии с уходящими газами от нагрузки котла

## **РАЗДЕЛ V. Экономический анализ перевода котлоагрегатов средней мощности на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание на примере котла БКЗ 75-39ФБ**

### **5.1 Показатели мощности котла.**

Величина основных производственных фондов, как правило, определяет производственную мощность (производительность) любых энергетических объектов на промышленных предприятиях.

Производственная мощность - потенциальная способность предприятия (цеха, участка, рабочего места) производить максимальное количество определенной продукции или выполнять определенный объем работ в течение определенного периода времени (часа, года) при условии:

- а) применения самой передовой технологии;
- б) должного технического оснащения;
- в) полного устранения аварий;
- г) необходимого материально-технического обеспечения;
- д) обеспеченности производственным и необходимым; управленческим персоналом;
- е) полного использования рабочего времени.

В энергетике мощности измеряются:

- ✓ для электроэнергетических объектов в кВт и МВт;
- ✓ для объектов теплоэнергетики в т пара/ч и в Гкал/ч.

Большинство энергетических мощностей исчисляются за час. Энергетическая производительность зависит еще от одного, не указанного выше условия - объема и мощности, требуемых потребителям. Также как и в энергосистемах в промышленной энергетике мощности исчисляются за 1 ч.

Выработка тепловой энергии в котельной отличается от полезного отпуска на величину расхода тепла на собственные нужды и потерь. Значения коэффициентов расхода на собственные нужды и потерь согласуем с результатами расчета тепловой схемы котельной.

Для полной характеристики полезной работы котла необходимо определить дополнительные затраты на расход электроэнергии за год, расход топлива, на отпуск теплоты и другие.

Таблица 5.1 - Производственные показатели

Наименование	Обозначение	Ед. измерения	До реконструкции	После реконструкции
Производительность котла	Д	т/ч	75	75
Температура уходящих газов	тух.г.	С	141	113
Выработанное тепло за год	Q <sub>выр.год</sub>	ГДж	276564	276564
КПД котла	ηк	-	91,5	91,6
Годовой расход топлива	В год	т/год	120736,30	119874,17
Выброс оксидов азота	М аз.	т/год	161,98	104,90

## 5.2 Расчёт проектной стоимости перевода котла БКЗ 75-39-ФБ на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание.

Для определения затрат на перевод котла на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание мы определяем величину необходимых капитальных вложений, включающих в себя капитальные вложения на составление проекта работ, а так же сметную стоимость [105-106]. На составление проектных работ закладываем 100 тыс. руб. [97-104].

Сметная стоимость составляет 188, 564 тыс. руб. Она состоит из сметной стоимости строительных работ, сметной стоимости оборудования и монтажных работ.

### Локальный сметный отчет

Сметная стоимость \_\_\_188,564 тыс.руб

строительных работ 127,265 тыс.руб

монтажных работ 32,535 тыс.руб

Средства на оплату труда 37,023 тыс.руб

сметная трудоемкость 292,13 чел.час

Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на \_\_\_2011 г.

Таблица 5.2 Локальный сметный отчет

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.	Стоимость единицы,руб				Общая стоимость,руб			
					Всего	В том числе			Всего	В том числе		
						Осн. З/п	Эк. Маш	З/пМех		Осн. З/п	Эк. Маш	З/пМех
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Раздел 1. Изготовление</b>												
1	ТЕР38-01-006-01	Листовые конструкции массой до 0,5 тон	1 т конструкции	0,36 4032 364,032\1000	11866,8	1740	3677	154	4319,9	633,56	1338,69	55,94
2		Шина "30"	М.п.	43	32,15				1382,45			
3		Уголок УГМ-4	Шт.	136	7,12				968,32			
3,8	ТЕР45-08-001-01	Разборка кладки нормальной из глинянного обыкновенного кирпича	1 м3 кладки	0,22 8 0,6* 0,5* 0,38	782,57	90,9	692	39,3	178,43	20,73	157,7	8,96



				*2								
3,3	ТЕР09-05-006-01	Резка стального профилированного настила	1 м реза	4,4	39,4	7,07	1,07		173,36	31,11	4,71	
4	ТЕР20-01-002-12	Прокладка воздуховодов из листовой оцинкованной стали и алюминия класса П (плотные) толщиной: 0,7мм, периметром до 3200 мм	100 м2 поверхность	0,30 2 30,2 /100	1645,48	813	156	4,61	496,94	245,48	47,04	1,39
5	ТЕР20-01-002-11	Прокладка воздуховодов из листовой оцинкованной стали и алюминия класса П (плотные) толщиной: 0,7мм, периметром до 2400мм	100 м2 поверхность	0,33 33/ 100	1832,69	1006	149	4,16	604,79	331,85	49,04	1,37
6		<b>Скоба</b>	<b>Шт</b>	<b>60</b>	<b>5,12</b>				<b>307,2</b>			
	ТЕР26-01-001-01	Изоляция трубопроводов конструкциями теплоизоляционными комплектами на основе цилиндров минераловатных на синтетическом связующем	1 м3 изоляции	4,70 4	2719,33	414	113		12791,7	1947,13	530,6	
Итого прямые затраты по разделу с учетом индексов, в текущих ценах									97161	36259	10625	764,3
Накладные расходы									36191			
Сметная прибыль									26448			
№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.	Стоимость единицы, руб			Общая стоимость, руб				
					Всего	В том числе		Всего	В том числе			
						Осн. З/п	Эк. Маш		З/пМех	Осн. З/п	Эк. Маш	З/пМех
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		Итого прямые затраты по разделу с учетом индексов, в текущих ценах							97161	36259	10625	764,32
		Накладные расходы							36191			
		Сметная прибыль							26448			
		<b>Итого по разделу 1 Изготовление</b>							<b>159800</b>			
		<b>ИТОГИ ПО СМЕТЕ</b>										
		Итого прямые затраты по смете с учетом индексов, в текущих ценах							97161	36259	10625	764,32
		Накладные расходы							36191			
		Сметная прибыль							26448			
		<b>Итого по смете:</b>										
		Итого строительные материалы							127265			

		Итого монтажные работы						32535			
		Итого						159800			
		В том числе:									
		Материалы						50277			
		Машины и механизмы						10625			
		ФОТ						37023			
		Накладные расходы						36191			
		Сметная прибыль						26448			
		НДС 18%						28764			
		<b>Всего по смете</b>						<b>188564</b>			

Итого капитальные вложения (без НДС), необходимые нам для перевода котла на низкотемпературное ступенчатое вихревое сжигание, составляют:

$$K = K_{np} + K_{см} = 100000 + 159800 = 259,8 \text{ тыс. руб (5.2.1)}$$

### 5.3 Расчёт экономических показателей котлоагрегата в условиях рационального распределений долей воздуха.

Для определения эффективности проекта необходимо произвести расчёт экономических показателей, для чего необходимо рассчитать сумму затрат реконструированного котла, которая включает:

- снижение затрат на топливо
- снижение платы за выбросы загрязняющих веществ
- дополнительные затраты на электроэнергию
- дополнительные амортизационные отчисления на полное восстановление
- налог на имущество

Для определения общих экономических показателей реконструкции котла необходимо задаться следующими нормативами:

Год начала реализации проекта — 2011г

Срок строительства - 6 мес

Период нормальной эксплуатации -15 лет

Ставка дисконтирования - 10 %

Налог на имущество - 2,2 %.

Налог на добавленную стоимость (НДС) - 18 %

Налог на прибыль - 20%.

Дополнительные затраты на электроэнергию на вспомогательное оборудование:

$$C_э = Э_{год}^{CH} \cdot Ц_э = 656445 \cdot 0,45668 = 299,8 \text{ руб/год} \quad (5.3.1)$$

где  $Э_{год}^{CH}$ -годовой расход электроэнергии на вспомогательное оборудование котла, кВт·ч;

$Ц_э$ -тариф на электроэнергию,  $Ц_э=0,45668$  тыс.руб/кВт·ч

(Приложение №3 к приказу РЭК от 18.12.2009 №282).

Дополнительные амортизационные отчисления:

$$C_A = K \cdot 0,0667 = 306,6 \cdot 0,0667 = 20,4 \text{ тыс. руб/год} \quad (5.3.2)$$

Налог на имущество:

$$C_з = N_{им} \cdot C_{ср.г.} = 2,2 \cdot C_{ср.г.}, \text{ тыс. руб/год} \quad (5.3.3)$$

Где  $C_{ср.г.}$ -среднегодовая стоимость ОФ, тыс руб.

$N_{им}$ -налог на имущество,  $N_{им}=2,2\%$

Снижение затрат на топливо:

$$C_T = V_{год}^H \cdot Ц_T = 862,14 \cdot 0,571 = 492,28 \text{ тыс. руб/год} \quad (5.3.4)$$

Где  $V_{год}^H$ -годовой расход топлива, т;

$Ц_T$ -цена топлива, тыс.руб/т. $Ц_T=0,571$  тыс.руб/т.

Определим норматив платы за выбросы в атмосферу загрязняющих веществ

№344-п от 12.06.2003:

$$H_{SO_2} = 40 \text{руб/т}$$

$$H_{зола} = 103 \text{руб/т}$$

$$H_{NO} = 52 \text{руб/т}$$

$$H_{CO_2} = 0,6 \text{руб/т}$$

Снижение платы за выбросы загрязняющих веществ:

$$C_{з.в.} = 1,68 \cdot K_{эс} \cdot K_{инд} \cdot (C_{зола} + C_{SO_2} + C_{NO_2} + C_{CO}) \quad (5.3.5)$$

Где  $K_{эс}$  - коэффициент экологической ситуации,  $K_{эс}=1,5$ ;

$K_{инд}$  - коэффициент удорожания платы за выбросы,  $K_{инд}=1,4$ ;

$C_{зола}$  - плата за выброс веществ, определяемых по формуле:

$$C_{з.в.} = M_{з.в.} \cdot H_{зв}, \text{ где}$$

$M_{з.в.}$  - масса загрязняющего вещества в пределах ПДВ

Результат расчёта технико-экономических показателей проектируемой реконструкции котла БКЗ 75-39 ФБ для удобства сводим в таблицы.

#### 5.4 Определение срока окупаемости проекта.

Источники финансирования реконструкции котла БКЗ 75-39 ФБ:

Затраты на реконструкцию (с НДС) - 306,6 тыс. руб.

Инвестиции в виде собственного капитала (100%) - 306,6тыс.руб.

Таблица 5.4.1 - Расчет амортизационной составляющей издержек

Годы		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Периоды		строит е- льство	эксплуатация					
Норма амортизации	6,67	0	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
Стоимость основных фондов, тыс. руб		0	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6
Стоимость ОФ на начало года, тыс. руб			306,6	286,1	265,7	245,2	224,8	204,3

Стоимость ОФ на конец года, тыс. руб			286,1	265,7	245,2	224,8	204,3	183,9
Среднегодовая стоимость ОФ, тыс. руб			296,3	275,9	255,4	235,0	214,5	194,1
Амортизация нарастающим итогом, тыс. руб		0	20,4	40,9	61,3	81,8	102,2	122,7

Продолжение таблицы 5.4.1

Годы	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Периоды	эксплуатация								
Норма амортизации	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
Стоимость основных фондов, тыс. руб	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6	306,6
Стоимость ОФ на начало года, тыс. руб	183,9	163,4	143,0	122,5	102,1	81,6	61,2	40,7	20,3
Стоимость ОФ на конец года, тыс. руб	163,4	143,0	122,5	102,1	81,6	61,2	40,7	20,3	0,0
Среднегодовая стоимость ОФ, тыс. руб	173,7	153,2	132,8	112,3	91,9	71,4	51,0	30,5	10,1
Амортизация нарастающим итогом, тыс. руб	143,1	163,6	184,0	204,5	224,9	245,4	265,8	286,3	306,7

Таблица 5.4.2 - Изменение производственных издержек

Годы		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Периоды		строите льство	эксплуатация					
Снижение затрат на топливо, тыс. руб		0	492,3	492,3	492,3	492,3	492,3	492,3
Снижение затрат за выбросы, тыс. руб		0	121,3	121,3	121,3	121,3	121,3	121,3
Дополнительные затраты на электроэнергию, тыс. руб		0	299,8	299,8	299,8	299,8	299,8	299,8
Дополнительные затраты на амортизацию, тыс. руб	6,67%	0	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
Суммарные снижение издержки, тыс. руб		0	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3
НДС к затратам, тыс. руб		0	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8
Итого затраты с НДС			346,1	346,1	346,1	346,1	346,1	346,1

Продолжение таблицы 5.4.2

Годы	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Периоды	эксплуатация								
Снижение затрат на топливо, тыс. руб	492,3	492,3	492,3	492,3	492,3	492,3	492,3	492,3	492,3
Снижение затрат за выбросы, тыс. руб	121,3	121,3	121,3	121,3	121,3	121,3	121,3	121,3	121,3
Дополнительные затраты на электроэнергию, тыс. руб	299,8	299,8	299,8	299,8	299,8	299,8	299,8	299,8	299,8
Дополнительные затраты на амортизацию, тыс. руб	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4	20,4
Суммарные снижение издержки, тыс. руб	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3
НДС к затратам, тыс. руб	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8
Итого затраты с НДС	346,1	346,1	346,1	346,1	346,1	346,1	346,1	346,1	346,1

Таблица 5.4.3 - Отчет о прибылях и убытках

Годы		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Периоды		строите льство	эксплуатация					
Снижение производственных издержек, тыс. руб		0	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3
Налог на имущество, тыс. руб			6,5	6,1	5,6	5,2	4,7	4,3
Налогооблагаемая прибыль, тыс. руб			286,8	287,3	287,7	288,2	288,6	289,1
Налог на прибыль, тыс. руб	20 %		57,4	57,5	57,5	57,6	57,7	57,8
Чистая прибыль, тыс. руб			229,5	229,8	230,2	230,5	230,9	231,3
Чистый денежный поток, тыс. руб			249,9	250,3	250,6	251,0	251,3	251,7

Продолжение таблицы 5.4.3

Годы	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Периоды	эксплуатация								
Снижение производственных издержек, тыс. руб	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3	293,3
Налог на имущество, тыс. руб	3,8	3,4	2,9	2,5	2,0	1,6	1Д	0,7	0,2
Налогооблагаемая прибыль, тыс. руб	289,5	290,0	290,4	290,9	291,3	291,8	292,2	292,7	293,1
Налог на прибыль, тыс. руб	57,9	58,0	58,1	58,2	58,3	58,4	58,4	58,5	58,6
Чистая прибыль, тыс. руб	231,6	232,0	232,3	232,7	233,1	233,4	233,8	234,1	234,5
Чистый денежный поток, тыс. руб	252,1	252,4	252,8	253,1	253,5	253,9	254,2	254,6	254,9

Таблица 5.4.4 - Показатели коммерческой эффективности инвестиций

Годы		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Периоды		строите- льство	эксплуатация					
Чистый поток денежных средств, тыс. руб		-306,6	249,9	250,3	250,6	251,0	251,3	251,7
Чистый денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб		-306,6	-56,7	193,6	444,2	695,2	946,6	1198,3
Дисконтированный чистый денежный поток, тыс. руб		-278,7	206,5	188,0	171,2	155,8	141,9	129,2
Дисконтированный денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб		-278,7	-72,2	115,9	287,0	442,9	584,8	713,9

Продолжение таблицы 5.4.4

Годы	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Периоды	эксплуатация								
Чистый поток денежных средств, тыс. руб	252,1	252,4	252,8	253,1	253,5	253,9	254,2	254,6	254,9
Чистый денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб	1450,3	1702,8	1955,5	2208,7	2462,2	2716,0	2970,3	3224,9	3479,8 v
Дисконтированный чистый денежный поток, тыс. руб	117,6	107,1	97,5	88,7	80,8	73,5	66,9	60,9	55,5
Дисконтированный денежный поток нарастающим итогом, тыс. руб	831,5	938,6	1036,0	1124,8	1205,5	1279,1	1346,0	1407,0	1462,4



## Вывод:

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 = 1462,44тыс.руб

Индекс доходности: DPI = 5.8 %

Внутренняя норма доходности:

$$IRR = r_1 + \frac{f(r_1)}{f(r_1) - f(r_2)} \cdot (r_2 - r_1) \quad (5.4.1)$$

В результате автоматического расчёта ВНД составляет 82%.

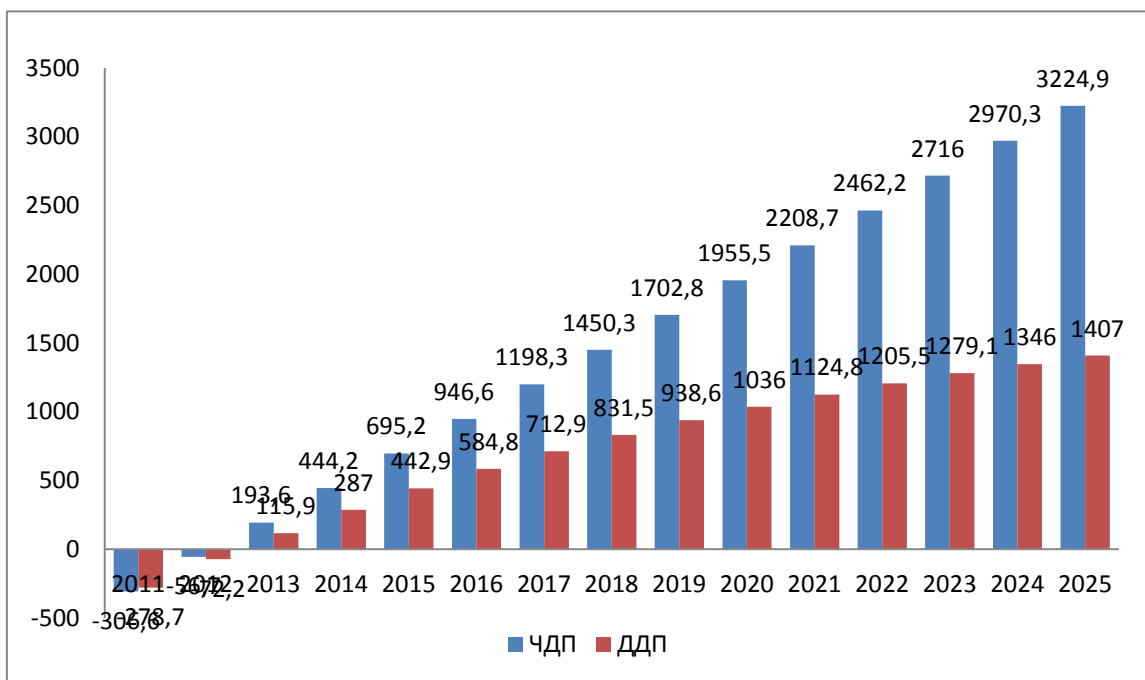


Рисунок 5.4.1 Изменение ЧДП и ДДП

## 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:  $\Delta\alpha_{3н.д.} = 0,2$ ,  $\Delta\alpha_{3з.д.} = 0,1$ .

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.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скалкин, Ф.В. Энергетика и окружающая среда/ Ф.В. Скалкин, А.А.Канаев, И.З. Копп. - Л.Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1981.- 280 с.
2. Цирульников, Л.М. Охрана воздушного бассейна и пути уменьшения токсичности выбросов газомазутных котлов / Л.М.Цирульников, В.Г.Коюхов, Р.А. Кадыров. - М.: ВНИИГазпром 1975.-51 с.
3. Сигал, И.Я. Развитие и задачи исследований по изучению условий образования окислов азота в топочных процессах / И.Я.Сигал // Теплоэнергетика.-1983. -№9.- С. 5-10.
4. Янковский, А.Б. Основные положения Энергетической стратегии России на период до 2020 г./ А.Б. Янковский, А.М. Мастепанов, В.В. Бушуев и др. // Теплоэнергетика. - 2002. - №1.- С. 2-8.
5. Котлер, В.М. Новые исследования механизма образования окислов азота в США / В.М. Котлер // Теплоэнергетика.- 1983.- №6. С. 73-74.
6. Беликов, С.Е. различные схемы ступенчатого сжигания как средство снижения выбросов оксидов азота / С.Е. Беликов, В.Р. Котлер // Известия Академии промышленной Экологии.- 2005. №1.- С.57-59
7. Спейшер, В.А. Обезвреживание промышленных выбросов дожиганием / В.А. Спейшер.- Энергоатомиздат, 1986.- 305 с.
8. Шупарский, А.И. и др. Уменьшение вредных выбросов в атмосферу при сжигании мазутоводоизвестковой суспензии / А.И. Шупарский, и др. // Энергетика. - 1986. №1. - С. 93-95.
9. Цирульников, Л.М. Сокращение выброса оксидов азота применением трехступенчатого сжигания газа и мазута / Л.М. Цирульников // Теплоэнергетика.- 1988. № 8. -С.8-12.
10. Долбня, Ю.А. Пути сокращения вредных выбросов на электростанциях, сжигающих канскоачинские угли / Ю.А. Долбня и др. // Реф. ж.- Энергетика.- 1989. № 1.-С. 34-36

11. Калинин, Д.С. Обессеривание дымовых газов котельных установок / Д.С. Калинин, В.Я. Калинина // Реф.ж. – Энергетика.- 1989. № 1. - С.12-16
12. Котлер, В.М. Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  при сжигании кузнецких каменных углей / В.М. Котлер и др. // Теплоэнергетика.- 1988. №4. - С.20-22
13. Барышев, В. И. Снижение выбросов  $\text{NO}_x$  с помощью регулируемого остаточного химического недожига / В. И. Барышев и др. // - Теплоэнергетика.- 1987. № 12.- С. 24-27.
14. Горбаненко, А.Д. Влияние конструкции и компоновки горелок на содержание вредных веществ в дымовых газах / Горбаненко А.Д. и др. // Теплоэнергетика.- 1982. № 4.- С. 15-17.
15. Котлер, В.М. Новый метод снижения выбросов  $\text{NO}_x$  пылеугольных ТХ Японии / В.М. Котлер // Теплоэнергетика.- 1987. № 5.- С.72-74.
16. Ходаков, Ю.С. Использование СНКВ-технологии для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  котельными установками / Ю.С. Ходаков, А.А. Алфеев, О.М. Саркисов, В.В. Дикоп // Экология и промышленность России.-2003. №11.-С.18-23
17. BOFA System Retrofit for  $\text{NO}_x$  Emission Reduction at Sines Unit 4 / M.D. Maloney, T.A. Naja, S. Sen et al. // Modern Power System. 2006. №7. P. 13—14
18. Котлер В.Р. Усовершенствованный метод двухступенчатого сжигания топлива. Теплоэнергетика. 2007. №2
19. Бабий, В.Ф. Современные теплоэлектростанции как источник загрязнения атмосферного воздуха канцерогенными полициклическими ароматическими углеводородами и оксидами азота / В.Ф. Бабий // Материалы МНГС. ВНИИГИ.- 1986. № 10.- С. 24-38.
20. Лисицын, И.И. Промышленные исследования некоторых способов подавления окислов азота при пылеугольном сжигании углей Сибири / И.И. Лисицын // Теплоэнергетика. -1988. № 8.- С. 17-19.
21. Чернышев, Г.И. Повышение эффективности методов уменьшения образования  $\text{NO}_x$  в топках котлов / Г.И. Чернышев и др. //Теплоэнергетика.- 1981. №6.- С. 30-32.

22. Обзор методов снижения вредных выбросов в атмосферу с дымовыми газами котельных установок / Kline Michael // Elec.world.-1988. №5. –С.33-37
23. Котлер, В.Р. Реализация и эффективность технологических методов подавления оксидов азота на ТЭС / В.Р. Котлер, Ю.П. Енякин // Теплоэнергетика.-1994. №6.-С. 2-9
24. Котлер, В.Р. Проблема выбросов  $\text{NO}_x$  на угольных электростанциях США / В.Р. Котлер // Теплоэнергетика.-1998. №3.- С.72-77
25. Бабий, В. И. Влияние предварительного подогрева угольной пыли на выход топливных окислов азота / В. И. Бабий, Ц. И. Алавердов, В. М. Барбараш, Г. В. Канаева // Теплоэнергетика. 1983. № 6. С. 10-12.
26. Hiltunen M.  $\text{NO}_x$  Abatement in Ahlstrom Pyroflow Circulating fluidized Bed Boilers // Presented at the II Intern. Conf. On CFB, 14-18 March, 1988. Compienge, France.
27. Suzuki T., Hirose R., Takemura M. Comparison of  $\text{NO}_x$  Emissions between Laboratory modeling and Full Scale Pyroflow Boiler / Presented at the III Intern. Conf. On CFB, 15-18 Oct., 1990. Nagoya, Japan.
28. Роджерс, Л. У. Снижение выбросов оксидов азота точечными методами / Л. У. Роджерс, Т. А. Морисс // Теплоэнергетика. 1994. № 6. С. 11-15.
29. Росляков, П. В. Основные закономерности конверсии оксидов азота в топках и камерах сгорания / П. В. Росляков, Бэйцзин Чжун // Теплоэнергетика. 1994. № 8. С. 18-22.
30. Росляков, П. В. Природа эмиссии быстрых оксидов азота при сжигании органических топлив / П. В. Росляков, Бэйцзин Чжун // Теплоэнергетика. 1994. № 1. С. 71-75.
31. Сарв, Г. Образование и подавление оксидов азота в стационарных системах сжигания / Г. Сарв, И. Дж. Кампобенедетто // Электрические станции. 1994. № 5. С. 60-65.
32. Росляков, П. В. Способ ступенчатого сжигания органических топлив с восстановлением оксидов азота / П. В. Росляков, А. В. Буркова // Тез. докл. на

всесоюзн. конф. по теплообмену в парогенераторах. Новосибирск, 1990. С. 106-107.

33. Титов, С. П. Исследование образование NOx из азота топлива при горении пыли каменных углей / С. П. Титов, В. Й. Бабий, В. М. Барбараш // Теплоэнергетика. 1980. № 3. С. 64-67.

34. Сигал, И. Я. Развитие и задачи исследований по изучению условий образования окислов азота в топочных процессах / И. Я. Сигал // Теплоэнергетика. 1983. № 9. С. 5-10.

35. Minghou Xu, et al. Modelling NOx emissions during staged combustion // International Journal of Energy Research. Vol.3, 1999, p.683-693.

36. Зигмунд. Выбросы NOx из промышленных котлов: перспективные способы борьбы с ними / Зигмунд, Тэрнер. // Энергетические машины и установки. 1974. № 1. С. 1-7.

37. Мунц, В. А. Образование оксидов азота при сжигании твердых топлив / В. А. Мунц, Ю. Г. Лекомцева, А. П. Баскаков // Теплоэнергетика. 1997. № 12. С. 26-30.

38. Росляков, П. В. Расчет образования топливных оксидов азота при сжигании азотосодержащих топлив / П. В. Росляков // Теплоэнергетика. 1986. № 1. С. 31-41.

39. Кузнецов, А. П. Внутреннее реагирование при горении углей в области высоких температур / А. П. Кузнецов, М. С. Оренбах // Горение твердого топлива. Новосибирск: Наука, 1974. С. 99—107.

40. Оренбах, М. С. Исследование причин и расчет внутреннего горения / М. С. Оренбах, А. П. Кузнецов, В. А. Злобинский // Горение твердого топлива. Новосибирск: Наука, 1974. С. 107-123.

41. Кнорре, Г. Ф. Топочные процессы / Г. Ф. Кнорре. М.-Л: Госэнергоиздат, 1959. С. 10-20.

42. Дубровский, В. А. Использование результатов изучения механизма образования натрубных отложений для обеспечения безшлаковой работы поверхностей нагрева / В. А. Дубровский, О. Н. Едемский // Проблемы загрязнения и очистки наружных поверхностей паровых котлов. Батуми, 1988. С. 3-6.

43. G.Hesselmann. Reburn – A Coallaborative Approach to Research. Technological Development and Demonstration in Europe // Report presented at «Technologies and Combustion For a Clean Environment». 12-15 July, 1999, Lisbon, Portugal.

44. Mitsui Babcock: Assessing the cost-effectiveness of different NOx reducing techniques to meet required levels. October 2004.

45. Radway J. E., Boyce T. Reduction of Coal Ash Deposits with magnesia Treatment / Combustion (USA). 1978. 49. N 10. P. 24-30.

46. Wittingham J. One-day meeting: High temperature corrosion and deposits by fuel impurities / Journal Institute of Fuel. 1971. Vol 44. N 365. P. 316-318.

47. Кефер Р.Г., Пузанов И.С.- Тр. конф. по вопросам геологии, физ. хим. свойств и применения природных цеолитов.Тбилиси, 1985, с.288-290.

48. Гаприндашвили В.Г., Кордзахия Н.М. Тр. конф. по вопросам геологии, физ.- хим. свойств и применения природных цеолитов. Тбилиси, 1985, с.291-292.

49. Кац Б.М., Малиновский Е.К. Длубовский Р.М., Тарасевич Ю.И.- Журн. прикладной химии, 1984, № 7, с. I509-I5I3.

50. Eumoto Hiromachi- Nuel.Technol., 1986, 75, № I, p.96-108.

51. Кац Б.М., Малиновский Е.К. - Журн.прикладной химии,1984, № 9, с.2107-2110.

52. Панов В.П., Терещенко Л.Я., Серов А.В. - Химическая промышленность; 1985, № 12, с.738-739.

53. Циклонные топки, под ред. Кнорре Г.Ф. и Наджарова М.А. Госэнергоиздат, 1958, 216 с.



54. Померанцев В.В. и др. Создание, освоение и испытание вихревой топки для фрезерного торфа с многократной циркуляцией частиц. Отчет ЛПИ, 1970, № 4254, 6180.

55. Померанцев В.В. и др. Освоение и исследование низкотемпературных методов сжигания сланца с многократной циркуляцией частиц, Отчет ЛПИ-ТПИ, Ленинград, 1984.

56. Грибков А.М., Гаврилов Е.И. Выбор оптимальных размеров дымовых труб и внешних газоходов.- М.: МЭИ, 1986.

57. Волков Э.П. и др. Определение ПДВ ТХ. - М.: МЭИ, 1986.

58. Методика определения валовых выбросов вредных веществ в атмосферу от котлов тепловых электростанций МТ 34-70-010-83. Мамрукова Л. А. и др. - М.: Союзтехэнерго, 1984.

59. Трёмбовля В.И., Фигнер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок, М: Энергоатомиздат, 1991.

60. Тепловой расчёт котлов (нормативный метод), издание 3-е, переработанное и дополненное, НПО ЦКТИ-ВТИ,С-П.,1998.

61. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов, под редакцией Э.Х.Вербовицкого и Н.Г.Жмерика, НПО ЦКТИ-ВТИ,С-П.,1996.

62. Беспалова С.У., Ганашов Н.Н. Охрана воздушного бассейна от выбросов ТХ. - Томск: ТПИ; 1985.

63. Енякин Ю.П., Котлер В. Р. Технологические методы сокращения выбросов оксидов азота. Энергетик, 1990, № 7.

64. Усиков Н.В. Усовершенствование электрофильтров для пылеугольных котлов. Теплоэнергетика. 1986, № 9.

65. Белун В.Г. Ермаков В.В., Шумилов Т.И. Оптимизация режимов стряхивания электродов электрофильтров. Энергетик, 1989, №3.

66. Даманский С.Г., Шеменир М.Ф.. Повышение эффективности работы электрофильтров кондиционированием дымовых газов. Энергетик, 1986, № 2.

67. Когай Г.Н., Палатник И.Б. Температурно-влажностное кондиционирование дымовых газов перед электрофильтрами. Энергетик, 1988, № 6.
68. Кропп Л.И., Чеханов Г.С. Развитие технологий очистки дымовых газов ТЭС. Теплоэнергетика, 1991, № 4.
69. Кропп Л.И., Чеханов Г.С., Ходаков Ю.С., Шмиголь И.Н. Мероприятия для достижения предельно-допустимых выбросов ТЭС, сжигающих канско-ачинские угли. Теплоэнергетика, 1986, № 6.
70. А. с. № 1765223 СССР, МКИ F23 К 1/00. Пылеконцентратор / В. А. Дубровский, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Оpubл. 30.09.92. Бюл. № 36.
71. А. с. № 1483175 СССР, МКИ F23 К 1/00. Делитель-пылеконцентратор / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Оpubл. 30.05.92. Бюл. № 20.
72. А. с. № 1393995 СССР, МКИ F23 К 1/00. Делитель-пылеконцентратор Дубровского / В. А. Дубровский. Оpubл. 07.05.83. Бюл. № 17.
73. А. с. № 1521987 СССР, МКИ F23 К 1/00. Котельный агрегат / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов, Г. П. Кобелева, В. М. Иванников. Оpubл. 15.11.89. Бюл. № 42.
74. А. с. № 1751605 СССР, МКИ F23 К 1/00. Делитель-пылеконцентратор / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, С. М. Куликов, Е. А. Бойко, М. З. Зарипов. Оpubл. 30.07.92. Бюл. № 28.
75. А. с. № 1751604 СССР, МКИ F23 К 1/00. Делитель-пылеконцентратор / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, Е. А. Бойко, С. М. Куликов. Оpubл. 30.07.92. Бюл. № 28.
76. А. с. № 1740884 СССР, МКИ F23 К 1/00. Пылеконцентратор / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов, И. С. Деринг. Оpubл. 15.06.92. Бюл. № 22.
77. А. с. № 1740885 СССР, МКИ F23 К 1 /00. Пылеконцентратор / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, С. М. Куликов, Е. А. Бойко, М. З. Зарипов. Оpubл. 15.06.92. Бюл. № 22.

78. А. с. № 1751604 СССР, МКИ F23 К 1/00. Делитель-пылеконцентратор / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, Е. А. Бойко, С. М. Куликов. Опубл. 30.07.92. Бюл. № 28.

79. А. с. № 1830436 СССР, МКИ F23 К 1/00. Система пылеприготовления котла / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 30.07.93. Бюл. № 28.

80. А. с. № 1805268 СССР, МКИ F 23 К 1/00. Пылеконцентратор / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 30.03.93. Бюл. № 12.

81. А. с. № 1815504 СССР, МКИ F23 К1/00. Пылеконцентратор / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 15.06.93. Бюл. № 18.

82. А. с. № 1270490 СССР, МКИ F23 К 1/00. Циклонная топка / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин. Опубл. 15.11.86. Бюл. №42.

83. А. с. № 1332099 СССР, МКИ F23 С5/32. Циклонная топка / В. А. Дубровский, Ж. Л. Евтихов, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин. Опубл. 23.08.87. Бюл. №31.

84. А. с. № 1379570 СССР, МКИ F23 С5/32. Циклонная топка / В. А. Дубровский, И. С. Деринг, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 25.04.86. Бюл. № 9.

85. А. с. № 1413359 СССР, МКИ F23 С5/32. Циклонная топка / В. А. Дубровский, И. С. Деринг, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 02.07.86. Бюл. № 28.

86. А. с. № 2079781 СССР, МКИ F23 С5/32. Циклонная топка / В.А. Дубровский, Ю. В. Видин, И. С. Деринг, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 20.05.97. Бюл. № 14.

87. А. с. № 1280267 СССР, МКИ F23 С5/08. Топка / В. А. Дубровский, С.А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Опубл. 30.12.86. Бюл. № 48.

88. А. с. № 1320592 СССР, МКИ F23 C5/08. Топка / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Оpubл. 30.12.87. Бюл. № 24.

89. А. с. № 1714293 СССР, МКИ F23 C5/08. Топка / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Оpubл. 23.02.92. Бюл. № 7.

90. А. с. № 1298480 СССР, МКИ F23 C5/08. Топка котла / В. А. Дубровский, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Ж. Л. Евтихов. Оpubл. 23.03.87. Бюл. №11.

91. А. с. № 1379569 СССР, МКИ F23 C5/08. Топка котла / В. А. Дубровский, И. С. Деринг, С. А. Михайленко, Г. А. Потехин, Б. А. Яцевич, Ж. Л. Евтихов. Оpubл. 07.03.88. Бюл. № 9.

92. Патент № 1740869 СССР, МКИ F23 C5/08. Топочное устройство / В. А. Дубровский, И. С. Деринг, С. А. Михайленко, Ж. Д. Евтихов, Е. А. Бойко, Г. А. Потехин. Оpubл. 20.04.88. Бюл. № 22.

93. Патент № 2064128 СССР, МКИ F23 C5/08. Топка котла / В. А. Дубровский, Ю. В. Видин, Ж. Л. Евтихов, В. А. Харламов. Оpubл. 20.07.96. Бюл. № 20.

94. Алексеев, Г.Н. Общая теплотехника / Г.Н. Алексеев.-М.: Высшая школа, 1980. – 551с.

95. Бродянский, В.М. Эксергия потока вещества при изменении параметров окружающей среды / В.М. Бродянский, Н.В. Калинин// Инж. физ. журн., 1996. - 286с.

96. Бродянский, В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В.М. Бродянский. – М.: Энергия, 1973.- 296с.

97. Захаров, Н.Д. Эксергия органических топлив / Н.Д. Захаров // Изв. Вузов. Энергетика.- 1970. №9. - С.63-67

98. Шаргут, Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 280с.

99. Мелентьев, Л. А. Системные исследования в энергетике / Л. А. Мелентьев. М.: Наука, 1983. 456 с.

100. Методические рекомендации по оценке эффективности проектов (вторая редакция). М.: Экономика. 2000. 421 с.
101. Глебов, Природоохранительные мероприятия в тепловой энергетике России // Энергетика. 1994. № 6. С. 7—11.
102. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. РД 34.02.305-98. Офиц. издание. АООТ ВТИ, 1998.37 с.
103. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. Государственный комитет по охране окружающей среды. 1999.
104. Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений. СНиП 1.04.03-85. М.: Стройиздат, 1987.82 с.
105. Положение об оценке эффективности инвестиционных проектов при размещении на конкурсной основе централизованных инвестиционных ресурсов бюджета развития РФ (в ред. Пост. Правительства от 25.05.98 № 467),
106. Практические рекомендации по оценке эффективности и разработке инвестиционных проектов и бизнес-планов в электроэнергетике (с типовыми примерами). - М., 2000.
107. Лебедев, В.М. Технико-экономическая эффективность реконструкции промышленно-отопительных котельных в ТЭЦ малой мощности / В.М. Лебедев, С.В. Приходько, В.З. Дмитриев, И.В. Матвеев // Промышленная энергетика, 2012. - № 12. – С. 23–27.
108. Султангузин И.А. Снижение энергопотребления и вредного воздействия на окружающую среду выбросов коксохимического и сталеплавильного производства при их оптимизации / И.А. Султангузин, М.В. Исаев, С.Ю. Курзанов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2010. - №12. – С.56-60.

109. 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. Сер. Техника и технологии, 5 (2014 7) 624–632;

110. Жуйков, А.В. Совершенствование процесса вихревого сжигания канско-ачинских углей с учетом снижения оксидов азота / А. В. Жуйков, А. И. Матюшенко // Вестник ИрГТУ, 2014. – № 6.– С. 71-73;

111. 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;

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

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

114. 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; 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.

115. 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; заявитель и патентообладатель Жуйков Андрей Владимирович. – 2010154596/28; заявл. 30.12.10; опубл. 20.05.2011, Бюл. № 4.

116. Патент на полезную модель № 116203 РФ, МПК<sup>7</sup> F23C 5/00 Низкоэмиссионная 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.

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

118. 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;

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

120. 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.

121. Жуйков, А. В. Один из способов снижения  $\text{NO}_x$  / А. В. Жуйков // Бенардосовские чтения: доклады XVI Международной НТК. - Иваново, 2011. – С. 130-133;

122. Жуйков, А. В. Методы снижения  $\text{NO}_x$  на ТЭС Великобритании, США и Португалии / А. В. Жуйков, Ю. В. Видин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: материалы XII Всероссийской НПК. – Красноярск: МВДЦ «Сибирь», 2011. – С. 100–104;

123. 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;

124. 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;



**Сводная ведомость обработки результатов испытаний котла БКЗ 75-39ФБ ст. №1 в пределах от 50 до 60 т/ч после перевода на низкотемпературное вихревое сжигание при рациональном распределении долей воздуха в котле**

№ п/п	Наименование	Обозначение	Един. измерения	Способ получения величин	Нагрузки		
					Серия опытов 1	Серия опытов 2	Серия опытов 3
	Паропроизводительность	Д	т/ч	Из результатов испытаний	53	58	56
<b>ТОПЛИВО</b>							
Ирша-Бородинский уголь							
1	Марка	B <sub>2</sub>					
2	Влажность рабочего топлива	W <sup>p</sup>	%	по данным анализа	28,59	28,59	28,59
3	Зольность рабочего топлива	A <sup>p</sup>	%	по данным анализа	6,17	3,17	6,17
4	Низшая теплота сгорания рабочего топлива	Q <sub>н</sub> <sup>p</sup>	ккал/кг	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	4041	4041	4041
5	Содержание летучих на горючую массу	V <sup>r</sup>	%	Справочные данные	48	48	48
<b>Элементарный состав рабочего топлива</b>							
6	Содержание углерода	C <sup>p</sup>	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	46,64	46,64	4,64
7	Содержание водорода	H <sup>p</sup>	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	3,26	3,26	3,26
8	Содержание серы	S <sup>p</sup>	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,26	0,26	0,26
9	Содержание азота	N <sup>p</sup>	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,65	0,65	0,65
10	Содержание кислорода	O <sup>p</sup>	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	14,47	14,47	14,47
11	Величина K <sup>p</sup>	K <sup>p</sup>	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	46,74	46,74	46,74
12	Топливная характеристика	β	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,07	0,07	0,07
13	Тонкость помола по остатку на сите R <sub>90</sub> ммт «А»	R <sub>90</sub> <sup>A</sup>	%	Из результатов испытаний	-	33	38
14	То же ммт «Б»	R <sub>90</sub> <sup>B</sup>	%	Из результатов	51	47	56

				испытаний			
15	Часовой расход топлива	B	кг/ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	5578	7300	10891
16	Видимое тепловое напряжение топочного объема	$Q/V_T$	ккал/м <sup>3</sup> *ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	49649	64976	96939
17	Приведенная влажность топлива	W <sup>п</sup>	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	7,07	7,07	7,07
18	Топочный объем	V <sub>T</sub>	м <sup>3</sup>	Из конструктивных характеристик	454	454	454
<b>ВОДА и ПАР</b>							
19	Давление пара в барабане котла	P <sub>б</sub>	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	39.4	40	40.5
20	Давление пара за пароперегревателем	P <sub>пп</sub>	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	39	39	39
21	Температура перегретого пара	t <sub>пп</sub>	°C	Средняя из испытаний	440	440	440
22	Теплосодержание перегретого пара	i <sub>пп</sub>	ккал/кг	Диаграмма i-s	789.8	789.8	789.8
23	Давление питательной воды	P <sub>пв</sub>	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	57	59	62
24	То же после автомата питания	P <sub>пв</sub>	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	39.6	40.3	41
25	Температура питательной воды	t <sub>пв</sub>	°C	Средняя из испытаний	102	102	102
26	Теплосодержание питательной воды	i <sub>пв</sub>	ккал/кг	Диаграмма i-s	102,1	102,1	102,1
27	Теплосодержание котловой воды	i <sub>кв</sub>	ккал/кг	Диаграмма i-s	257,4	258,4	259,2
28	Расход питательной воды	D <sub>пв</sub>	т/ч	Средний из испытаний	47	52	57
29	Процент продувки	P <sub>пр</sub>	%	Средний из испытаний	3,9	4,5	3,0
30	Расход продувочной воды	D <sub>пр</sub>	т/ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,17	1,8	1,8
<b>ВОЗДУХ</b>							
31	Барометрическое давление воздуха	B	мм рт.ст.	Среднее из испытаний	750	747	742
32	Температура общего воздуха	t <sub>хв</sub>	°C	Средняя из испытаний	27	29	30
33	Температура воздуха на входе в ВЗП	t <sub>взп</sub>	°C	Средняя из испытаний	42	52	50
34	Динамический	H <sub>д</sub> <sup>хв</sup>	мм в.ст.	Средний из испытаний	1,0	1,3	2,5

	напор общего воздуха						
35	Расход общего воздуха при $t=20^{\circ}\text{C}$ , $B=760$ мм рт.ст	$V_B$	$\text{м}^3/\text{ч}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	36091	40926	56484
36	Давление воздуха после вентилятора	$H_{\text{ст. в}}$	мм в.ст.	Среднее из испытаний	85	85	135
37	Температура воздуха после ВЗП	$t_{\text{гв}}$	$^{\circ}\text{C}$	Средняя из испытаний	290	295	335
38	Температура первичного воздуха на левую горелку	$t_{\text{гв}}^{1\text{л}}$	$^{\circ}\text{C}$	Средняя из испытаний	-	290	335
39	Температура первичного воздуха на правую горелку	$t_{\text{гв}}^{1\text{пр}}$	$^{\circ}\text{C}$	Средняя из испытаний	290	290	330
40	Температура вторичного воздуха на левую горелку	$t_{\text{гв}}^{2\text{л}}$	$^{\circ}\text{C}$	Средняя из испытаний	290	293	335
41	Температура вторичного воздуха на правую горелку	$t_{\text{гв}}^{2\text{пр}}$	$^{\circ}\text{C}$	Средняя из испытаний	290	293	330
42	Динамический напор первичного воздуха на левую горелку	$H_{\text{д}}^{1\text{л}}$	мм в.ст	Средний из испытаний	-	7,0	10,0
43	Динамический напор первичного воздуха на правую горелку	$H_{\text{д}}^{1\text{пр}}$	мм в.ст	Средний из испытаний	14,5	11,0	16,5
44	Динамический напор вторичного воздуха на левую горелку	$H_{\text{д}}^{2\text{л}}$	мм в.ст	Средний из испытаний	1,1	2,0	3,0
45	Динамический напор вторичного воздуха на правую горелку	$H_{\text{д}}^{2\text{пр}}$	мм в.ст	Средний из испытаний	2,5	2,2	3,1
46	Удельный вес общего воздуха	$\gamma_{\text{хв}}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,16	1,14	1,13
47	Удельный вес первичного воздуха слева	$\gamma_{\text{гв}}^{1\text{л}}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	-	0,61	0,56
48	Удельный вес первичного воздуха справа	$\gamma_{\text{гв}}^{1\text{пр}}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,61	0,61	0,61
49	Удельный вес	$\gamma_{\text{гв}}^{2\text{л}}$	$\text{кг}/\text{м}^3$	Рассчитано по формуле	0,62	0,62	0,62

	вторичного воздуха слева			(список литературы [59-61])			
50	Удельный вес вторичного воздуха справа	$\gamma_{гв}^{2пр}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,62	0,61	0,57
51	Давление первичного воздуха слева	$H_{ст}^{1л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	-	6	8
52	Давление первичного воздуха справа	$H_{ст}^{1пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	10	10	10
53	Давление вторичного воздуха слева	$H_{ст}^{2л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	90
54	Давление вторичного воздуха справа	$H_{ст}^{2пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	95
55	Давление третичного воздуха слева	$H_{ст}^{3л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	10	10	15
56	Давление третичного воздуха справа	$H_{ст}^{3пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	10	10	15
57	Давление воздуха после ВЗП слева	$H_{ст}^{ВЗП л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	90
58	Давление воздуха после ВЗП справа	$H_{ст}^{ВЗП пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	95
59	Расход первичного воздуха слева (t=20°C, давление 760 мм рт.ст.)	$v_v^{1л}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	-	9486	10980
60	Расход первичного воздуха справа (t=20°C, давление 760 мм рт.ст.)	$v_v^{1пр}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	13195	11444	13546
61	Расход вторичного воздуха слева (t=20°C, давление 760 мм рт.ст.)	$v_v^{2л}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	5850	6010	6295
62	Расход вторичного воздуха справа (t=20°C, давление 760 мм рт.ст.)	$v_v^{2пр}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	6824	6387	7330
63	Площадь поперечного сечения воздуховода первичного воздуха слева	$F^{1л}$	м <sup>2</sup>	Измерена	0,52	0,52	0,52
64	Площадь поперечного сечения	$F^{1пр}$	м <sup>2</sup>	Измерена	0,52	0,52	0,52

	воздуховода первичного воздуха справа						
65	Площадь поперечного сечения воздуховода вторичного воздуха слева	$F^{2п}$	$m^2$	Измерена	0,41	0,41	0,41
66	Площадь поперечного сечения воздуховода первичного воздуха справа	$F^{2пр}$	$m^2$	Измерена	0,41	0,41	0,41
67	Площадь поперечного сечения воздуховода нижнего дутья слева	$F_{нд}^л$	$m^2$	Измерена	0,12	0,12	0,12
68	Площадь поперечного сечения воздуховода нижнего дутья справа	$F_{нд}^{пр}$	$m^2$	Измерена	0,12	0,12	0,12
69	Площадь поперечного сечения воздуховода на всасе дутьевого вентилятора	$F$	$m^2$	Измерена	2,3	2,3	2,3
70	Коэффициент тарировки воздуховода первичного воздуха слева	$K^{1л}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,66	0,66	0,66
71	Коэффициент тарировки воздуховода первичного воздуха справа	$K^{1пр}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,64	0,64	0,64
72	Коэффициент тарировки воздуховода вторичного воздуха слева	$K^{2л}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,97	0,97	0,97
73	Коэффициент тарировки воздуховода вторичного воздуха справа	$K^{2пр}$	-	Средний из рез-ов тарировки	1,01	1,01	1,01
74	Коэффициент тарировки воздуховода на всасе дутьевого вентилятора	$K_{хв}$	-	Средний из рез-ов тарировки	1,1	1,1	1,1
75	Коэффициент тарировки	$K_{нд}^л$	-	Средний из рез-ов тарировки	1,08	1,08	1,08

	воздуховода нижнего дутья слева						
76	Коэффициент тарифовки воздуховода нижнего дутья справа	$K_{нд}^{пр}$	-	Средний из рез-ов тарифовки	1,18	1,18	1,18
77	Температура воздуха нижнего дутья слева	$t_{нд}^л$	°С	Средняя из рез-ов испытаний	256	295	330
78	Температура воздуха нижнего дутья справа	$t_{нд}^{пр}$	°С	Средняя из рез-ов испытаний	284	289	335
79	Давление воздуха нижнего дутья слева	$H_{ст}^л$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	61	57	75
80	Давление воздуха нижнего дутья справа	$H_{ст}^{пр}$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	58	57	65
81	Динамический напор воздуха нижнего дутья слева	$H_{ст}^{ндл}$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	4,0	4,5	12,3
82	Давление воздуха нижнего дутья справа	$H_{ст}^{ндпр}$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	3,6	4,0	9,8
83	Удельный вес воздуха нижнего дутья лева	$\gamma_{нд}^л$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	0,66	0,61	0,57
84	Удельный вес воздуха нижнего дутья справа	$\gamma_{нд}^{пр}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	0,62	0,61	0,57
85	Расход воздуха нижнего дутья слева( $t=20^{\circ}\text{C}$ , давление 760 мм рт.ст.)	$V_{нд}^л$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	3217	2982	4844
86	Расход воздуха нижнего дутья справа( $t=20^{\circ}\text{C}$ , давление 760 мм рт.ст.)	$V_{нд}^{пр}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	2956	3079	4254
<b>ГАЗЫ</b>							
87	Разрежение в топке	$S^т$	мм в.ст	Среднее из испытаний	2,5	2,5	2,0
88	Разрежение за пароперегреват елем	$S^{пп}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	5,0	5,0	5,0
89	Разрежение перед золоуловителе м	$S^{з\text{у}}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	68	56	79
90	Разрежение перед	$S^д$	мм в.ст	Среднее из испытаний	77	65	96

	дымососом						
91	Разрежение за дымососом	$S^{нд}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	30	24	18
92	Сопروتивление котла	$\Delta S^к$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	2,5	2,5	3,0
93	Сопротивление водяного экономайзера	$\Delta S^{вэ}$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	63	51	74
94	Сопротивление золоуловителя	$\Delta S^{зу}$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	9	9	17
95	Перепад разрежения, создаваемый дымососом	$\Delta S^д$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	43	41	78
96	Общее сопротивление газового тракта	$\Delta S$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	74,5	62,5	94
97	Динамический напор газов слева	$H_{дл}^л$	мм в.ст	Средний из испытаний	2	2	3,5
98	Динамический напор газов справа	$H_{дл}^{сп}$	мм в.ст	Средний из испытаний	5	6,3	9,5
99	Коэффициент тарировки газохода слева	$K_{дл}^л$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,9	0,9	0,9
100	Коэффициент тарировки газохода справа	$K_{дл}^{сп}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,9	0,9	0,9
101	Площадь поперечного сечения газохода слева	$F_{г}^л$	м <sup>2</sup>	Измерена	1,69	1,69	1,69
102	Площадь поперечного сечения газохода справа	$F_{г}^{сп}$	м <sup>2</sup>	Измерена	1,69	1,69	1,69
103	Температура газов за пароперегреват елем	$t_{г}^{пп}$	°С	Средняя из испытаний	358	400	450
104	Температура газов перед золоуловителе м	$t_{г}^{зу}$	°С	Средняя из испытаний	114	120	125
105	Температура уходящих газов	$t_{уг}$	°С	Средняя из испытаний	109	110	113
106	Удельный вес уходящих газов	$\gamma_{уг}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,93	0,93	0,91
107	Расход газов слева	$V_{г}^л$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	35482	35578	47499
108	Расход газов справа	$V_{г}^{сп}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	56482	63215	78343

109	Общий расход газов	$V_r$	$m^3/ч$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	91648	98793	125842
110	Содержание $RO_2$ за котлом	$RO_2^k$	%	Среднее из испытаний	10,4	14,0	15,0
111	Содержание $RO_2+O_2$ за котлом	$RO_2^k+O_2^k$	%	Среднее из испытаний	20,3	20,0	19,8
112	Содержание CO за котлом	$CO^k$	%	Газоанализатор ДАГ510	200	200	200
113	Содержание $N_2$ за котлом	$N_2^k$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	79,6	80,0	80,1
114	Коэффициент избытка воздуха за котлом	$\alpha^k$	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,25	1,25	1,25
115	Содержание $RO_2$ перед золоуловителем	$RO_2^{3y}$	%	Среднее из испытаний	10,0	13,3	14,2
116	Содержание $RO_2+O_2$ перед золоуловителем	$RO_2^{3y}+O_2^{3y}$	%	Среднее из испытаний	20,4	20,0	19,9
117	Содержание CO перед золоуловителем	$CO^{3y}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0	0	0
118	Содержание $N_2$ перед золоуловителем	$N_2^{3y}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	79,6	80,0	80,1
119	Коэффициент избытка воздуха перед золоуловителем	$\alpha^{3y}$	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,96	1,45	1,36
<b>НАГРУЗКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ</b>							
120	Ток электродвигателя дымососа	$I_d$	А	Средний из испытаний	175	169	175
121	Ток электродвигателя дутьевого вентилятора	$I_{дв}$	А	Средний из испытаний	131	131	142
122	Ток электродвигателя мельницы «А»	$I_m^A$	А	Средний из испытаний	-	15,5	16
123	Ток электродвигателя мельницы «Б»	$I_m^B$	А	Средний из испытаний	15,5	15	16
124	Ток электродвигателя питателя мельницы «А»	$I_{псу}^A$	А	Средний из испытаний	-	5,0	6,0
125	Ток электродвигателя питателя мельницы «Б»	$I_{псу}^B$	А	Средний из испытаний	4,0	4,5	4,5



126	Напряжение сети	$U_c$	В	Среднее из испытаний	390	380	370
127	Мощность, потребляемая эл/дв. дымососа	$N_d$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	98,0	92,21	92,97
128	Мощность, потребляемая эл/дв. дутьевого вентилятора	$N_{дв}$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	79,55	77,51	81,8
129	Мощность, потребляемая эл/дв. мельницы «А»	$N_m^A$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	-	131,9	136,1
130	Мощность, потребляемая эл/дв. мельницы «Б»	$N_m^B$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	131,9	127,6	136,1
<b>ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС</b>							
131	Содержание горючих в шлаке	$C_{ш}$	%	Среднее из испытаний	0,38	0,1	0,33
132	Содержание горючих в уносе	$C_{ун}$	%	Среднее из испытаний	1,85	1,35	1,65
133	Содержание золы в шлаке	$A_{ш}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	99,62	99,9	99,97
134	Содержание золы в уносе	$A_{ун}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	98,15	98,65	98,35
135	Доля золы топлива в шлаке	$a_{ш}$	%	Из материалов испытаний	10	10	10
136	Доля золы топлива в уносе	$a_{ун}$	%	Из материалов испытаний	90	90	90
137	Потери тепла от механической неполноты сгорания со шлаком	$q_4^{ш}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,004	0,001	0,003
138	Потери тепла от механической неполноты сгорания с уносом	$q_4^{ун}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,40	0,44	0,45
139	Потери тепла от механического недожога	$q_4$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,31	0,42	0,36
140	Поправочный множитель, учитывающий потери тепла от механического недожога	$A$	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,99	0,99	0,99
141	Потери тепла	$q_3$	%	Рассчитано по формуле	0	0	0

	от химического недожога			(список литературы [59-61])			
142	Потери тепла в окружающую среду	$q_5^{\text{ном}}$	%	Из материалов испытаний	0,76	0,76	0,76
143	Потери тепла в окружающую среду при испытываемой нагрузке	$q_5$	%	Из материалов испытаний	0,8	0,8	0,8
144	Теоретически необходимое для горения количество воздуха	$V_0$	нм <sup>3</sup> /кг	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	4,54	4,54	4,54
145	Теплосодержание уходящих газов	$I_{yx}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	331,7	268,9	265,0
146	Температура холодного воздуха	$t_{xв}$	°С	Из материалов испытаний	27	29	30
147	Теплосодержание холодного воздуха	$I_{xв}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	38,6	41,5	42,9
148	Потери тепла с уходящими газами	$q_2$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	8,5	7,9	7,54
149	Коэффициент полезного действия котла(брутто)	$\eta^{\text{бр}}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	90,23	90,74	91,3

Приложение Б.

**Сводная ведомость обработки результатов испытаний котла БКЗ 75-39ФБ ст. №1 в пределах от 65 до 75 т/ч после перевода на низкотемпературное вихревое сжигание при рациональном распределении долей воздуха в котле**

№ п/п	Наименование	Обозначение	Един. измерения	Способ получения величин	Нагрузки		
					Серия опытов 1	Серия опытов 2	Серия опытов 3
	Паропроизводительность	Д	т/ч	Из результатов испытаний	75	68	71
<b>ТОПЛИВО</b>							
Ирша-Бородинский уголь							
1	Марка	$B_2$					
2	Влажность рабочего топлива	$W^p$	%	по данным анализа	28,59	28,59	28,59
3	Зольность рабочего топлива	$A^p$	%	по данным анализа	6,17	3,17	6,17
4	Низшая теплота	$Q_n^p$	ккал/кг	Рассчитано по формуле (список литературы [59-	4041	4041	4041

	сгорания рабочего топлива			61])			
5	Содержание летучих на горючую массу	$V^r$	%	Справочные данные	48	48	48
Элементарный состав рабочего топлива							
6	Содержание углерода	$C^p$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	46,64	46,64	4,64
7	Содержание водорода	$H^p$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	3,26	3,26	3,26
8	Содержание серы	$S^p$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	0,2	0,26	0,26
9	Содержание азота	$N^p$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	0,65	0,65	0,65
10	Содержание кислорода	$O^p$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	14,47	14,47	14,47
11	Величина $K^p$	$K^p$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	46,74	46,74	46,74
12	Топливная характеристика	$\beta$	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	0,073	0,073	0,073
13	Тонкость помола по остатку на сите $R_{90}$ ммт «А»	$R_{90}^A$	%	Из результатов испытаний	-	33	38
14	То же ммт «Б»	$R_{90}^B$	%	Из результатов испытаний	51	47	56
15	Часовой расход топлива	$B$	кг/ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	7500	9400	10891
16	Видимое тепловое напряжение топочного объема	$Q/V_T$	ккал/м <sup>3</sup> *ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	64976	85976	96939
17	Приведенная влажность топлива	$W^п$	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59- 61])	7,07	7,07	7,07
18	Топочный объем	$V_T$	м <sup>3</sup>	Из конструктивных характеристик	454	454	454
ВОДА и ПАР							
19	Давление пара в барабане котла	$P_6$	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	39,4	40	40,5
20	Давление пара за пароперегреват елем	$P_{пп}$	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	39	39	39
21	Температура перегретого пара	$t_{пп}$	°С	Средняя из испытаний	440	440	440
22	Теплосодержан ие перегретого пара	$i_{пп}$	ккал/кг	Диаграмма i-s	789,8	789,8	789,8

23	Давление питательной воды	$P_{пв}$	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	57	59	62
24	То же после автомата питания	$P_{пв}''$	кг/см <sup>2</sup>	Среднее из испытаний	39,6	40,3	41
25	Температура питательной воды	$t_{пв}$	°С	Средняя из испытаний	102	102	102
26	Теплосодержание питательной воды	$i_{пв}$	ккал/кг	Диаграмма i-s	102,1	102,1	102,1
27	Теплосодержание котловой воды	$i_{кв}$	ккал/кг	Диаграмма i-s	257,4	258,4	259,2
28	Расход питательной воды	$D_{пв}$	т/ч	Средний из испытаний	61	67	72
29	Процент продувки	$P_{пр}$	%	Средний из испытаний	3,9	4,5	3,0
30	Расход продувочной воды	$D_{пр}$	т/ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,17	1,8	1,8
<b>ВОЗДУХ</b>							
31	Барометрическое давление воздуха	$B$	мм рт.ст.	Среднее из испытаний	750	747	742
32	Температура общего воздуха	$t_{хв}$	°С	Средняя из испытаний	27	29	30
33	Температура воздуха на входе в ВЗП	$t_{взп}$	°С	Средняя из испытаний	42	52	50
34	Динамический напор общего воздуха	$H_{д}^{хв}$	мм в.ст.	Средний из испытаний	1,0	1,3	2,5
35	Расход общего воздуха при $t=20^{\circ}\text{C}$ , $B=760$ мм рт.ст	$V_{в}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	40926	45926	56484
36	Давление воздуха после вентилятора	$H_{ст. в}$	мм в.ст.	Среднее из испытаний	85	85	135
37	Температура воздуха после ВЗП	$t_{гв}$	°С	Средняя из испытаний	290	295	335
38	Температура первичного воздуха на левую горелку	$t_{гв}^{1л}$	°С	Средняя из испытаний	-	290	335
39	Температура первичного воздуха на правую горелку	$t_{гв}^{1пр}$	°С	Средняя из испытаний	290	290	330
40	Температура вторичного воздуха на левую горелку	$t_{гв}^{2л}$	°С	Средняя из испытаний	290	293	335
41	Температура вторичного воздуха на	$t_{гв}^{2пр}$	°С	Средняя из испытаний	290	293	330

	правую горелку						
42	Динамический напор первичного воздуха на левую горелку	$H_d^{1л}$	мм в.ст	Средний из испытаний	-	7,0	10,0
43	Динамический напор первичного воздуха на правую горелку	$H_d^{1пр}$	мм в.ст	Средний из испытаний	14,5	11,0	16,5
44	Динамический напор вторичного воздуха на левую горелку	$H_d^{2л}$	мм в.ст	Средний из испытаний	1,1	2,0	3,0
45	Динамический напор вторичного воздуха на правую горелку	$H_d^{2пр}$	мм в.ст	Средний из испытаний	2,5	2,2	3,1
46	Удельный вес общего воздуха	$\gamma_{хв}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,16	1,14	1,13
47	Удельный вес первичного воздуха слева	$\gamma_{гв}^{1л}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	-	0,61	0,56
48	Удельный вес первичного воздуха справа	$\gamma_{гв}^{1пр}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,61	0,61	0,61
49	Удельный вес вторичного воздуха слева	$\gamma_{гв}^{2л}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,62	0,62	0,62
50	Удельный вес вторичного воздуха справа	$\gamma_{гв}^{2пр}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,62	0,61	0,57
51	Давление первичного воздуха слева	$H_{ст}^{1л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	-	6	8
52	Давление первичного воздуха справа	$H_{ст}^{1пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	10	10	10
53	Давление вторичного воздуха слева	$H_{ст}^{2л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	90
54	Давление вторичного воздуха справа	$H_{ст}^{2пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	95
55	Давление третичного воздуха слева	$H_{ст}^{3л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	10	10	15
56	Давление третичного воздуха справа	$H_{ст}^{3пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	10	10	15
57	Давление воздуха после ВЗП слева	$H_{ст}^{ВЗП л}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	90
58	Давление воздуха после	$H_{ст}^{ВЗП пр}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	70	60	95

	ВЗП справа						
59	Расход первичного воздуха слева ( $t=20^{\circ}\text{C}$ , давление 760 мм рт.ст.)	$v_{\text{в}}^{1\text{л}}$	$\text{м}^3/\text{ч}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	-	9486	10980
60	Расход первичного воздуха справа ( $t=20^{\circ}\text{C}$ , давление 760 мм рт.ст.)	$v_{\text{в}}^{1\text{пр}}$	$\text{м}^3/\text{ч}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	13195	11444	13546
61	Расход вторичного воздуха слева ( $t=20^{\circ}\text{C}$ , давление 760 мм рт.ст.)	$v_{\text{в}}^{2\text{л}}$	$\text{м}^3/\text{ч}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	6355	6677	6895
62	Расход вторичного воздуха справа ( $t=20^{\circ}\text{C}$ , давление 760 мм рт.ст.)	$v_{\text{в}}^{2\text{пр}}$	$\text{м}^3/\text{ч}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	6824	6387	7330
63	Площадь поперечного сечения воздуховода первичного воздуха слева	$F^{1\text{л}}$	$\text{м}^2$	Измерена	0,52	0,52	0,52
64	Площадь поперечного сечения воздуховода первичного воздуха справа	$F^{1\text{пр}}$	$\text{м}^2$	Измерена	0,52	0,52	0,52
65	Площадь поперечного сечения воздуховода вторичного воздуха слева	$F^{2\text{л}}$	$\text{м}^2$	Измерена	0,41	0,41	0,41
66	Площадь поперечного сечения воздуховода первичного воздуха справа	$F^{2\text{пр}}$	$\text{м}^2$	Измерена	0,41	0,41	0,41
67	Площадь поперечного сечения воздуховода нижнего дутья слева	$F_{\text{нд}}^{\text{л}}$	$\text{м}^2$	Измерена	0,12	0,12	0,12
68	Площадь поперечного сечения воздуховода нижнего дутья справа	$F_{\text{нд}}^{\text{пр}}$	$\text{м}^2$	Измерена	0,12	0,12	0,12
69	Площадь	$F$	$\text{м}^2$	Измерена	2,3	2,3	2,3

	поперечного сечения воздуховода на всасе дутьевого вентилятора						
70	Коэффициент тарировки воздуховода первичного воздуха слева	$K^{1л}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,66	0,66	0,66
71	Коэффициент тарировки воздуховода первичного воздуха справа	$K^{1пр}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,64	0,64	0,64
72	Коэффициент тарировки воздуховода вторичного воздуха слева	$K^{2л}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,97	0,97	0,97
73	Коэффициент тарировки воздуховода вторичного воздуха справа	$K^{2пр}$	-	Средний из рез-ов тарировки	1,01	1,01	1,01
74	Коэффициент тарировки воздуховода на всасе дутьевого вентилятора	$K_{хв}$	-	Средний из рез-ов тарировки	1,1	1,1	1,1
75	Коэффициент тарировки воздуховода нижнего дутья слева	$K_{нд}^{л}$	-	Средний из рез-ов тарировки	1,08	1,08	1,08
76	Коэффициент тарировки воздуховода нижнего дутья справа	$K_{нд}^{пр}$	-	Средний из рез-ов тарировки	1,18	1,17	1,18
77	Температура воздуха нижнего дутья слева	$t_{нд}^{л}$	°С	Средняя из рез-ов испытаний	256	295	330
78	Температура воздуха нижнего дутья справа	$t_{нд}^{пр}$	°С	Средняя из рез-ов испытаний	284	289	335
79	Давление воздуха нижнего дутья слева	$H_{ст}^{л}$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	61	57	75
80	Давление воздуха нижнего дутья справа	$H_{ст}^{пр}$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	58	57	65
81	Динамический напор воздуха нижнего дутья слева	$H_{ст}^{ндл}$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	4,0	4,5	12,3

82	Давление воздуха нижнего дутья справа	$H_{ст}^{ндпр}$	мм в.ст	Среднее из рез-ов испытаний	3,6	4,0	9,8
83	Удельный вес воздуха нижнего дутья лева	$\gamma_{нд}^л$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,66	0,61	0,57
84	Удельный вес воздуха нижнего дутья справа	$\gamma_{нд}^{пр}$	кг/м <sup>3</sup>	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,62	0,61	0,57
85	Расход воздуха нижнего дутья слева(t=20°C, давление 760 мм рт.ст.)	$V_{нд}^л$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	3217	2982	4844
86	Расход воздуха нижнего дутья справа(t=20°C, давление 760 мм рт.ст.)	$V_{нд}^{пр}$	м <sup>3</sup> /ч	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	2956	3079	4254
<b>ГАЗЫ</b>							
87	Разрежение в топке	$S^т$	мм в.ст	Среднее из испытаний	2,5	2,5	2,0
88	Разрежение за пароперегреват елем	$S^{пп}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	5,0	5,0	5,0
89	Разрежение перед золоуловителе м	$S^{з\у}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	68	56	79
90	Разрежение перед дымососом	$S^д$	мм в.ст	Среднее из испытаний	77	65	96
91	Разрежение за дымососом	$S^{з\д}$	мм в.ст	Среднее из испытаний	30	24	18
92	Сопротивление котла	$\Delta S^к$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	2,5	2,5	3,0
93	Сопротивление водяного экономайзера	$\Delta S^{в\э}$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	63	51	74
94	Сопротивление золоуловителя	$\Delta S^{з\у}$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	9	9	17
95	Перепад разрежения, создаваемый дымососом	$\Delta S^д$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	43	41	78
96	Общее сопротивление газового тракта	$\Delta S$	мм в.ст	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	74,5	62,5	94
97	Динамический напор газов слева	$H_{дг}^л$	мм в.ст	Средний из испытаний	2	2	3,5
98	Динамический напор газов справа	$H_{дг}^{пр}$	мм в.ст	Средний из испытаний	5	6,3	9,5
99	Коэффициент тарировки	$K_{дг}^л$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,9	0,9	0,9



	газохода слева						
100	Коэффициент тарировки газохода справа	$K_{дг}^{пп}$	-	Средний из рез-ов тарировки	0,9	0,9	0,9
101	Площадь поперечного сечения газохода слева	$F_{г}^{л}$	$m^2$	Измерена	1,69	1,69	1,69
102	Площадь поперечного сечения газохода справа	$F_{гл}^{пп}$	$m^2$	Измерена	1,69	1,69	1,69
103	Температура газов за пароперегреват елем	$t_{г}^{пп}$	$^{\circ}C$	Средняя из испытаний	358	400	450
104	Температура газов перед золоуловителе м	$t_{г}^{зв}$	$^{\circ}C$	Средняя из испытаний	114	120	125
105	Температура уходящих газов	$t_{уг}$	$^{\circ}C$	Средняя из испытаний	109	110	113
106	Удельный вес уходящих газов	$\gamma_{уг}$	$кг/м^3$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,93	0,93	0,91
107	Расход газов слева	$V_{г}^{л}$	$м^3/ч$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	35482	35578	47499
108	Расход газов справа	$V_{г}^{пп}$	$м^3/ч$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	56482	63215	78343
109	Общий расход газов	$V_{г}$	$м^3/ч$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	91648	98793	125842
110	Содержание $RO_2$ за котлом	$RO_2^к$	%	Среднее из испытаний	10,4	14,0	15,0
111	Содержание $RO_2+O_2$ за котлом	$RO_2^к+O_2^к$	%	Среднее из испытаний	20,3	20,0	19,8
112	Содержание CO за котлом	$CO^к$	%	Газоанализатор ДАГ510	200	200	200
113	Содержание $N_2$ за котлом	$N_2^к$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	79,6	80,0	80,1
114	Коэффициент избытка воздуха за котлом	$\alpha^к$	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,88	1,39	1,29
115	Содержание $RO_2$ перед золоуловителе м	$RO_2^{зв}$	%	Среднее из испытаний	10,0	13,3	14,2
116	Содержание $RO_2+O_2$ перед золоуловителе м	$RO_2^{зв}+O_2^{зв}$	%	Среднее из испытаний	20,4	20,0	19,9
117	Содержание CO перед золоуловителе м	$CO^{зв}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0	0	0
118	Содержание $N_2$	$N_2^{зв}$	%	Рассчитано по формуле	79,6	80,0	80,1

	перед золоуловителем			(список литературы [59-61])			
119	Коэффициент избытка воздуха перед золоуловителем	$\alpha^{зв}$	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	1,25	1,25	1,25
<b>НАГРУЗКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ</b>							
120	Ток электродвигателя дымососа	$I_d$	А	Средний из испытаний	175	169	175
121	Ток электродвигателя дутьевого вентилятора	$I_{дв}$	А	Средний из испытаний	131	131	142
122	Ток электродвигателя мельницы «А»	$I_m^A$	А	Средний из испытаний	-	15,5	16
123	Ток электродвигателя мельницы «Б»	$I_m^B$	А	Средний из испытаний	15,5	15	16
124	Ток электродвигателя питателя мельницы «А»	$I_{псу}^A$	А	Средний из испытаний	-	5,0	6,0
125	Ток электродвигателя питателя мельницы «Б»	$I_{псу}^B$	А	Средний из испытаний	4,0	4,5	4,5
126	Напряжение сети	$U_c$	В	Среднее из испытаний	390	380	370
127	Мощность, потребляемая эл/дв. дымососа	$N_d$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	98,0	92,21	92,97
128	Мощность, потребляемая эл/дв. дутьевого вентилятора	$N_{дв}$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	79,55	77,51	81,8
129	Мощность, потребляемая эл/дв. мельницы «А»	$N_m^A$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	-	131,9	136,1
130	Мощность, потребляемая эл/дв. мельницы «Б»	$N_m^B$	кВт	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	131,9	127,6	136,1
<b>ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС</b>							
131	Содержание горючих в шлаке	$C_{ш}$	%	Среднее из испытаний	0,38	0,1	0,33
132	Содержание горючих в уносе	$C_{ун}$	%	Среднее из испытаний	1,85	1,35	1,65
133	Содержание золы в шлаке	$A_{ш}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	99,62	99,9	99,97
134	Содержание	$A_{ун}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	98,15	98,65	98,35

	золы в уносе						
135	Доля золы топлива в шлаке	$a_{ш}$	%	Из материалов испытаний	10	10	10
136	Доля золы топлива в уносе	$a_{ун}$	%	Из материалов испытаний	90	90	90
137	Потери тепла от механической неполноты сгорания со шлаком	$q_4^{ш}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,004	0,001	0,003
138	Потери тепла от механической неполноты сгорания с уносом	$q_4^{ун}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,35	0,35	0,29
139	Потери тепла от механического недожога	$q_4$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,35	0,25	0,29
140	Поправочный множитель, учитывающий потери тепла от механического недожога	A	-	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,99	0,99	0,99
141	Потери тепла от химического недожога	$q_3$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0	0	0
142	Потери тепла в окружающую среду	$q_5^{ном}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,76	0,76	0,76
143	Потери тепла в окружающую среду при испытываемой нагрузке	$q_5$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	0,8	0,8	0,8
144	Теоретически необходимое для горения количество воздуха	$V_0$	нм <sup>3</sup> /кг	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	4,54	4,54	4,54
145	Теплосодержание уходящих газов	$I_{yx}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	331,7	268,9	265,0
146	Температура холодного воздуха	$t_{хв}$	°С	Из материалов испытаний	27	29	30
147	Теплосодержание холодного воздуха	$I_{хв}$	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	38,6	41,5	42,9
148	Потери тепла с уходящими газами	$q_2$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	7,95	8,55	7,41
149	Коэффициент полезного действия котла(брутто)	$\eta^{бр}$	%	Рассчитано по формуле (список литературы [59-61])	90,9	91,2	91,5



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

**"Крам3Энерго"**  
ООО «Крам3Энерго»

Адрес:  
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ, 660111, Г.КРАСНОЯРСК, УЛ. ПОГРАНИЧНИКОВ, 42, СТР. 36  
Телефон: (391) 224-99-00, 226-70-36  
Факс: (391) 226-70-39

№ 294

от 26.05.2011г.

## А К Т

г. Красноярск

«25» мая 2011 г.

Настоящий акт составлен комиссией в составе : технического директора ООО «Крам3Энерго» Оголь В.Г., начальника котельного цеха Мальчик С.В. и начальника ПТО Михайленко А.В. По определению эффективности использования результатов диссертационной работы Жуйкова А.В., посвященной вопросам снижения оксидов азота на котлах работающих на бурых углях и патента на полезную модель №104670 (заявка №2010154596).

Результаты замеров ЦЛАТИ оксидов азота на котлоагрегате БКЗ-75/39ФБ (станционный № 2, протокол анализов № 63с-ПВ от 21 мая 2011г.) показали снижение выбросов оксидов азота на 24,8% по сравнению с аналогичным периодом 2010г.

Таким образом комиссия считает работы в данном направлении перспективными и рекомендует к применению на котлоагрегатах подобного типа.

Технический директор

Начальник котельного цеха

Начальник ПТО



 В.Г. Оголь

 С.В. Мальчик

 А.В. Михайленко

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

SIBERIAN  
FEDERAL  
UNIVERSITY



СИБИРСКИЙ  
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

660041, Россия, Красноярск, проспект Свободный, 79  
телефон (391) 244-82-13, факс (391) 244-86-25  
http://www.sfu-kras.ru e-mail: office@sfu-kras.ru

№ \_\_\_\_\_  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
В. И. Колмаков  
2011 г.



### АКТ

#### о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс

Комиссия в составе:

Председатель - доцент, начальник инновационно-методического управления СФУ Смолин А. Ю.

Члены комиссии: д.т.н., проф., директор ПИ СФУ Бойко Е. А.,  
д.т.н., проф., декан ТЭФ ПИ СФУ, зав. кафедрой ТЭС Михайленко С. А.,  
д.т.н., проф., зав. кафедрой ТТиГГД ПИ СФУ Кулагин В.А.

составили настоящий акт о том, что результаты научных исследований, проведенных Жуйковым Андреем Владимировичем на тему: «Совершенствование процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей», внедрены в учебный процесс. Основные результаты диссертации включены в курс лекций «Защита окружающей среды», «Котельные установки и парогенераторы», «Теплотехнологические процессы и загрязняющие выбросы», для студентов ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» направления подготовки «Теплоэнергетика», обучающихся по основным образовательным программам подготовки магистров и бакалавров.

Председатель комиссии

Смолин А. Ю.

Члены комиссии

Бойко Е. А.

Михайленко С. А.

Кулагин В. А.

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ СФУ**

660074, Красноярск, ул. Киренского, 26  
Тел.: (3912) 912-101, 44-19-02  
факс: (3912) 43-06-92  
E-mail: [info@krgtu.ru](mailto:info@krgtu.ru)  
ОГРН 1022402137460, ОКПО 02067913  
ИНН/КПП 2463011853/246331001

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор Потехнического  
института СФУ, профессор

  
**В. Н. Тимофеев**



№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Об использовании научных результатов

**Акт**

**об использовании результатов диссертационной работы Жуйкова Андрея Владимировича «Совершенствование процесса низкотемпературного ступенчатого вихревого сжигания канско-ачинских углей», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Работа А. В. Жуйкова посвящена актуальным проблемам ресурсосбережения и экологической безопасности в топливно-энергетическом комплексе. Для обеспечения потребности народного хозяйства России в тепловой и электрической энергии в стране создана мощная система централизованного тепло- и энергоснабжения потребителей, ориентированная, в основном, на использование традиционного органического топлива (угля, нефтепродуктов и природного газа). В настоящее время, в связи со значительной выработкой основных месторождений и истощением запасов нефти и газа, а также все увеличивающейся продажей их за рубеж, возрастает роль твердого топлива в топливно-энергетическом балансе страны. Уголь в перспективе будет занимать ведущее положение в мире как источник электрической и тепловой энергии, поскольку его ресурсы на Земле многократно превышают суммарные запасы нефти и газа.

В тоже время экологические проблемы, возникающие при использовании угольного топлива, требуют разработки и внедрения новых эффективных с экономической и экологической точек зрения угольных технологий, которые обеспечат существенный экономический эффект с максимально высокой полнотой использования добытого топлива.

Кандидатская диссертация А. В. Жуйкова посвящена вопросам снижения оксидов азота на энергетических котлах работающих на бурых углях. Получены результаты, позволяющие увеличить полноту сгорания топлива на базе современной технологии его сжигания, и существенно снизить вредные выбросы в окружающую среду. В процессе ее выполнения автором разработаны уникальные экспериментальные установки, методики экспериментальных исследований, создан современный контрольно-измерительный комплекс, позволившие получить научно обоснованные и достоверные результаты по различным направлениям исследования. Созданное оборудование, методики экспериментального и теоретического исследования, приборная база составили основу ныне действующей на теплоэнергетическом факультете научно-исследовательской лаборатории.

Данные результаты, методы математического моделирования и расчета технологического оборудования используются в Политехническом институте СФУ при проведении научно-исследовательских работ.

**Декан теплоэнергетического факультета, докт. техн. наук, профессор**



  
**С.А. Михайленко**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 104670**

**НИЗКОЭМИССИОННАЯ ВИХРЕВАЯ ТОПКА**

Патентообладатель(ли): **Жуйков Андрей Владимирович (RU)**

Автор(ы): **Жуйков Андрей Владимирович (RU), Кулагин Владимир Алексеевич (RU), Федченко Михаил Петрович (RU), Нагимулина Светлана Алексеевна (RU)**

Заявка № **2010154596**

Приоритет полезной модели **30 декабря 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **20 мая 2011 г.**

Срок действия патента истекает **30 декабря 2020 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*



*Б.П. Симонов*



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 109527

**НИЗКОЭМИССИОННАЯ ВИХРЕВАЯ ТОПКА**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011124187

Приоритет полезной модели 15 июня 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 20 октября 2011 г.

Срок действия патента истекает 15 июня 2021 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **109 527** (13) **U1**

(51) МПК  
F23C 5/00 (2006.01)



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) **ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011124187/28, 15.06.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
15.06.2011

Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 15.06.2011

(45) Опубликовано: 20.10.2011 Бюл. № 29

Адрес для переписки:  
660074, г.Красноярск, ул. Киренского, 26,  
СФУ, ОПОИЗИС

(72) Автор(ы):

Жуков Андрей Владимирович (RU),  
Кулагин Владимир Алексеевич (RU),  
Федченко Михаил Петрович (RU),  
Яковенко Андрей Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ) (RU)

(54) **НИЗКОЭМИССИОННАЯ ВИХРЕВАЯ ТОПКА**

(57) Формула полезной модели

Низкоэмиссионная вихревая топка, содержащая камеру сгорания с установленной на ее стенке по меньшей мере одной наклоненной горелкой, с холодной воронкой призматической формы, имеющей щелевое устье, образованное скатами стенок нижней части камеры сгорания, и размещенным под устьем холодной воронки устройством ввода нижнего дутья, при этом горелка выполнена по меньшей мере в виде двух расположенных друг над другом каналов для подачи топливоздушный смеси, каждый из каналов снабжен устройством для регулирования соотношения «топливо-воздух», а эти устройства выбраны так, что отношение количества воздуха к количеству топлива для вышерасположенного канала всегда оказывается больше, чем для нижерасположенного канала, отличающаяся тем, что горелка с каналами для подачи топливоздушный смеси и устройство ввода нижнего дутья находятся в одной вертикальной плоскости и направлены вверх.

RU 109527 U1



# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 116203

### НИЗКОЭМИССИОННАЯ ВИХРЕВАЯ ТОПКА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ) (RU)*

Автор(ы): *Жуйков Андрей Владимирович (RU)*

Заявка № 2011149438

Приоритет полезной модели **05 декабря 2011 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **20 мая 2012 г.**

Срок действия патента истекает **05 декабря 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

*Б.П. Симонов*

