

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СЖИГАНИЯ
ТОПЛИВ С УМЕРЕННЫМ КОНТРОЛИРУЕМЫМ ХИМИЧЕСКИМ НЕДОЖОГОМ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

Москва 2010

Работа выполнена на кафедре Парогенераторостроения Московского энергетического института (технического университета). Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Росляков Павел Васильевич
Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Зройчиков Николай Алексеевич
кандидат технических наук, старший научный сотрудник Тугов Андрей Николаевич
Ведущая организация: Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского (ОАО "ЭНИН")

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном мире большое внимание уделяется состоянию окружающей среды и её защите. Одним из важных факторов, влияющих на окружающую среду, является качество атмосферного воздуха. ТЭС выбрасывают в атмосферу целый ряд вредных веществ. С учётом разной токсичности и количества этих выбросов наибольший вред окружающей среде при сжигании на ТЭС природного газа наносят оксиды азота. По сравнению с ними урон, наносимый другими вредными веществами, такими как монооксид углерода СО и бенз(а)пирен БП, намного меньше.

В настоящее время на ТЭС применяются многочисленные методы снижения оксидов азота. Они позволяют снизить выбросы оксидов азота в атмосферу до 40-90%. Однако практика внедрения технологических (внутритопочных) мероприятий по снижению оксидов азота на действующих котлах выявила ряд негативных моментов, связанных с тем, что старые конструкции топочных устройств не обеспечивали оптимального сочетания условий для подавления образования оксидов азота и полного выгорания топлива. В результате внедрение технологических мероприятий на таких котлах, как правило, сопровождалось снижением КПД (за счёт увеличения недожога и температуры уходящих газов), уменьшением надёжности работы (из-за увеличения температуры газов на выходе из топки, увеличения интенсивности шлакования) и меньшей эффективностью снижения выбросов NOx по сравнению с новыми котлами. Кроме того, внедрение таких внутритопочных мероприятий, как стадийное, ступенчатое сжигание, рециркуляция продуктов сгорания, на действующих котлах требовало значительного объёма реконструкций и, как следствие, высоких материальных затрат.

Большинство котлов, эксплуатируемых в России в настоящее время, вводилось в строй до конца 80-х годов. Они подходят к выработке своего паркового ресурса. Внедрять дорогие способы снижения выбросов оксидов азота на них не рационально. А отсутствие финансового стимулирования делает внедрение природоохранных мероприятий экономически невыгодным. Следовательно, одним из главных факторов внедрения способов снижения NOx в России является их стоимость.

Поэтому перед научно-техническим сообществом поставлена задача разработки и внедрения малозатратных быстрореализуемых экологически безопасных способов сжигания топлив, которые при внедрении на действующем оборудовании не вызывают снижения эффективности и надёжности работы котлов. Вновь разработанные способы снижения оксидов азота должны иметь низкие капитальные и эксплуатационные затраты, быть просты в обслуживании и иметь возможность внедрения силами собственного персонала станции.

Особую актуальность представляют способы сжигания топлив, позволяющие не только значительно снизить эмиссию оксидов азота, но и повысить КПД котла. К таким способам относится сжигание топлив с умеренным контролируемым недожогом, исследованию и внедрению которого и посвящена данная работа.

Цели работы:

- Разработка и комплексные экспериментальные исследования малозатратного быстрореализуемого экологически безопасного способа снижения NOx при сжигании всех видов топлива.
- Расчётно-теоретическое исследование механизмов снижения выбросов вредных веществ и определение максимально достижимого уровня снижения оксидов азота.
- Обобщение и анализ экспериментальных данных и работы котлов для разработки практических рекомендаций по внедрению предложенного способа сжигания и повышению его эффективности.

Научная новизна полученных автором результатов заключается в следующем:

1. Показано, что сжигание топлив с умеренным недожогом позволяет обеспечить снижение выбросов оксидов азота на 20-40 %; при этом, несмотря на увеличение концентрации продуктов недожога топлива, суммарная вредность продуктов сгорания снижается в 1,3-2 раза в зависимости от вида сжигаемого топлива.

2.С помощью расчётно-теоретических исследований выявлено, что снижение выбросов оксидов азота происходит в результате уменьшения скоростей реакций образования NO по расширенному механизму Я.Б. Зельдовича за счёт снижения концентрации O₂ в зоне горения. Максимальная теоретически возможная степень снижения эмиссии NO_x в случае идеального перемешивания достигает 65%.

3.Определено, что сжигание топлив с умеренным недожогом приводит к увеличению эффективности работы котла за счёт увеличения КПД брутто на 0,5-1 % и снижению затрат на собственные нужды на 0,01-0,05 %.

4.Показано, что данный способ сжигания не ухудшает надёжность работы поверхностей нагрева котла. Достоверность и обоснованность результатов работы обеспечиваются применением широко апробированных программных продуктов, удовлетворительным совпадением расчетных и экспериментальных данных, тщательной тарировкой и калибровкой измерительных средств, использованием современных методов обработки и обобщения экспериментальных данных.

Практическая ценность работы.

1.Предложен способ сжигания, позволяющий снизить NO_x на 2040 %.

2.Способ апробирован и внедрён на различных котлах паропроизводительностью от 75 до 500 т/ч при сжигании различных видов топлива. Его реализация не требует больших капитальных и временных затрат, может быть произведена силами собственного персонала ТЭС.

3.Разработаны практические рекомендации по внедрению способа при сжигании на паровых и водогрейных котлах при использовании различных видов топлива.

4.Внедрение данного способа при сжигании природного газа даёт экономию средств в 0,5-2 млн. руб. в год на каждые 100 т/ч паропроизводительности котла.

5.Показано, что для эффективного внедрения способа необходимо оснащение котла системой непрерывного анализа компонентов продуктов сгорания.

Личный вклад автора заключается в:

- разработке предложенного способа сжигания топлив;
- выполнении расчётно-теоретических и экспериментальных исследований;
- проведении анализа и обобщении результатов численных и натурных экспериментов;
- разработке практических рекомендаций по внедрению сжигания топлив с умеренным контролируемым недожогом на газомазутных и пылеугольных котлах.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались на:

1.XIV-XVI Международных научно-технических конференциях «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»; МЭИ, Москва, 2008 - 2010 г.

2.XXXVII неделе науки СПбГПУ «Всероссийской межвузовской научной конференции студентов и аспирантов»; Санкт-Петербург, 2008.

3.На заседаниях кафедры Парогенераторостроения МЭИ (ТУ), 2009 и 2010 г.

По результатам выполненных исследований опубликованы 3 статьи и 4 доклада на научных конференциях.

Автор защищает результаты теоретических и экспериментальных исследований, их обобщение и практические рекомендации по внедрению сжиганию топлив с умеренным контролируемым недожогом.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы, включающего 122 наименования. Общий объём диссертации составляет 154 страницы. Работа содержит 63 рисунка и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации говорится об актуальности работы, дана общая характеристика исследуемых проблем, сформулированы задачи и цели, дано краткое описание работы.

В первой главе приведен обзор литературных источников, посвященных механизмам образования оксидов азота в топках котлов. Произведено описание характерных особенностей традиционного сжигания топлив, вызывающих повышенное образование NO_x. Показаны проблемы снижения выбросов оксидов азота в котлах, заканчивающих вырабатывать свой парковый ресурс.

Выполнен обзор различных технологических способов снижения выбросов оксидов азота. Отмечено, что внедрение внутритопочных мероприятий по снижению NO_x на старых котлах может привести к снижению КПД котла за счёт повышения температуры уходящих газов и повышению содержания продуктов химического и механического недожога топлива. Вместе с этим возможно снижение надёжности работы поверхностей работы котла, вызванное повышением температуры на выходе из топочной камеры, которое происходит за счёт затягивания процесса горения топлива.

Приведены результаты внедрения отдельных мероприятий на различных котлах. Показано, что эффективность одних и тех же мероприятий для разных котлов может заметно отличаться. Отмечено, что наиболее привлекательными для ТЭС, в сложившейся экономической ситуации, являются малозатратные воздухоохраные мероприятия.

В конце главы дается постановка задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке способа сжигания топлив с умеренным недожогом и проведения комплексных экспериментальных исследований, включающих в себя определение взаимосвязи оксидов азота с продуктами недожога топлив на натурном оборудовании и определения влияния способа сжигания на экологическую безопасность работы котла.

В работе производились исследования сжигания топлив с умеренным недожогом на различных паровых котлах паропроизводительностью от 75 до 500 т/ч БКЗ-75-3,9ГМ, ЦКТИ-75-3,9, ТП-150, ТГМ-84Б, ТПЕ-430, ТГМ-96Б и водогрейных котлах КВГМ-180-150 и ПТВМ-100 при сжигании природного газа. Исследования способа сжигания жидкого топлива с умеренным химическим недожогом проводились на котлах БКЗ-75-3,9ГМ, ЦКТИ-75-3,9 и ТПЕ-430. Сжигание твёрдого топлива с химическим недожогом осуществлялось на котле ЦКТИ-75-3,9. Для корректного сравнения результатов экспериментов в данной работе концентрации измеренных веществ приводились к стандартным условиям в пересчете на сухие газы: температура 0 С, давление 101,3 кПа и избыток воздуха в газах =1,4.

Реализация способа сжигания топлив с умеренным недожогом является логическим продолжением способа сжигания с малыми избытками воздуха и реализуется путем снижения количества организованно подаваемого воздуха в топку. Как известно, с уменьшением количества кислорода в факеле происходит подавление образования термических и топливных оксидов азота. По этой же причине будет наблюдаться рост концентраций продуктов химического недожога.

Уменьшение избытка воздуха одновременно сопровождается снижением потерь теплоты с уходящими газами q_2 и увеличением потерь теплоты с химическим q_3 и механическим q_4 недожогом. В результате КПД котла в зависимости от уровня недожога может увеличиваться или уменьшаться.

Известно, что концентрации различных примесей в продуктах сгорания самым тесным образом связаны между собой. Изменение режима сжигания топлив приводит к увеличению содержания одних примесей при одновременном снижении эмиссии других. На рис. 1 приводятся результаты практических внедрений сжигания топлив с химическим недожогом на работающем оборудовании при сжигании различных видов топлива. Представленные данные показывают устойчивое снижение концентрации оксидов азота в уходящих газах котлов при снижении коэффициента избытка воздуха.

Степень снижения оксидов азота NO_x , % определялась следующим образом:

$$\Delta NO_x = \frac{NO_x^0 - NO_x'}{NO_x^0} \cdot 100 \% , (2.1)$$

где NO_x^0 начальная концентрация оксидов азота в продуктах сгорания, мг/м³; NO_x' концентрация оксидов азота после внедрения способа снижения оксидов азота, мг/м³.

Для каждого из исследованных котлов NO_x была различной. В большинстве случаев при снижении избытка воздуха от режимных (по режимной карте) реж до критических значений kr (избытка воздуха, при котором появляется химический недожог, т.е. начинает наблюдаться СО в продуктах сгорания) NO_x составляет 1020%. Дополнительное уменьшение, при котором концентрация СО в продуктах сгорания повышается до 300 мг/м³, что допускается ГОСТ Р 50831-95 (см. рис. 1) даёт дополнительное снижение выхода NO_x ещё на 1020%. Для большинства котлов итоговое снижение концентрации оксидов азота лежит в пределах 2040%. Последнее зависит от множества факторов: коэффициента избытка воздуха, при котором осуществлялось сжигание топлива, технического состояния котла, теплонапряжения топочного сечения q_F , нагрузки котла и многого другого. Значительное снижение эмиссии NO_x (до 65%) при сжигании природного газа с умеренным недожогом на котле ТПЕ-430 (см. рис. 1б), скорее всего, связано со значительными колебаниями нагрузки котла. Во время проведения испытания она изменялась в пределах 30 т/ч, что составляет значительную величину.

Общим для всех приведенных случаев является наличие продуктов химического недожога, контролируемых по концентрации СО в дымовых газах. Поэтому в качестве одного из показателей эффективности метода можно принять концентрацию СО в уходящих газах котла. Изучение влияния продуктов химнедожога топлив на концентрацию оксидов азота происходило путем рассмотрения взаимосвязи концентраций NO_x и СО, представленной на рис. 1 для исследованных котлов.

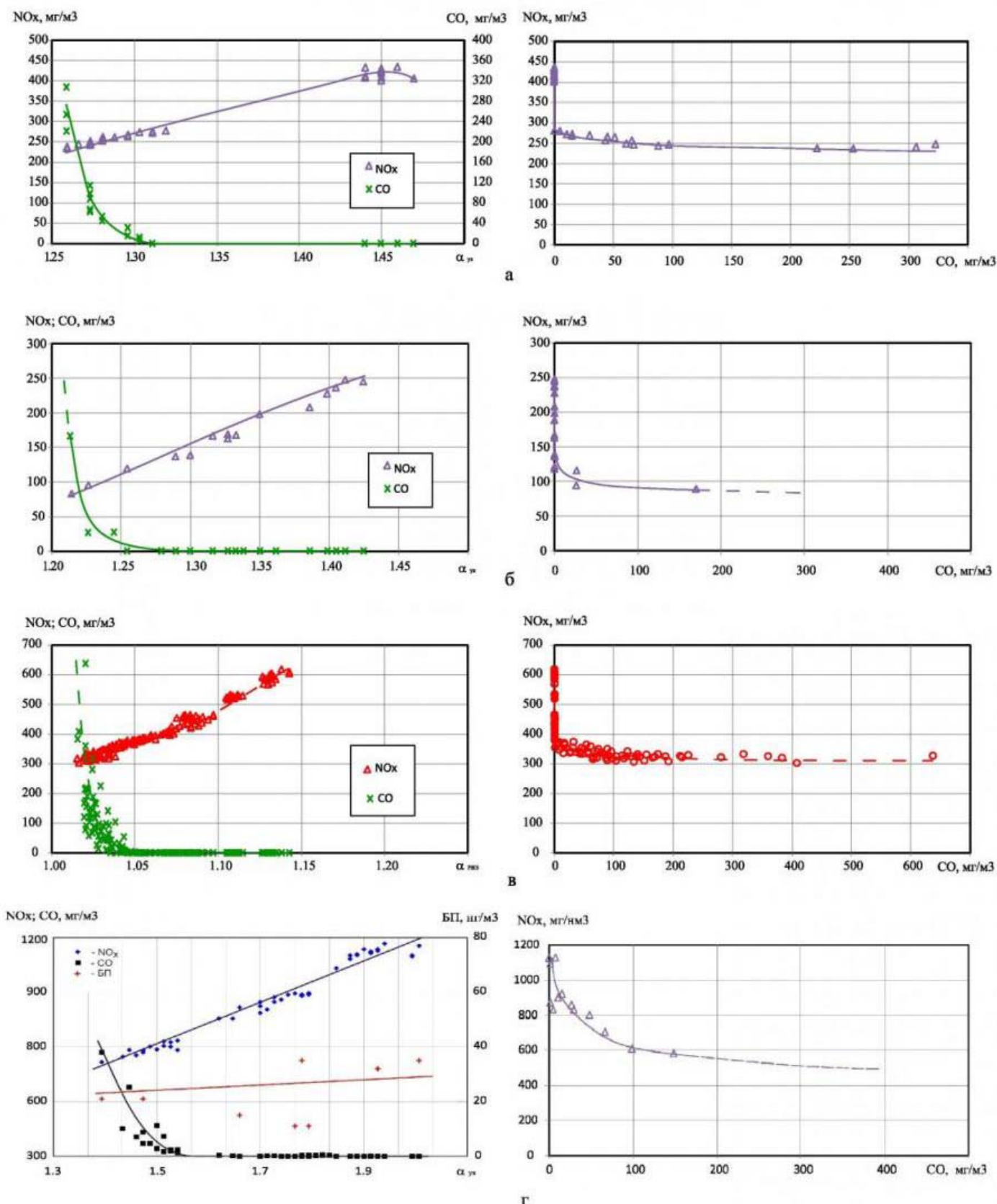


Рис.1. Зависимость эмиссии оксидов азота и монооксида углерода от коэффициента избытка воздуха:

А-котёл БКЗ-75-3,9ГМ (станц. №14 ТЭЦ ЧМЗ г. Глазова) при сжигании природного газа, $D=75$ т/ч;

б-котёл ТПЕ-430 (Е-500-140-560КТ) при сжигании природного газа, $D=390-420$ т/ч;

в-котёл ТГМ-96Б (Е-480-13,8-560ГМ) при сжигании природного газа, $D=485$ т/ч; г1 котёл ЦКТИ-75-3,9 при сжигании каменного угля, $D=73$ т/ч

Из приведенных зависимостей $NO_x=f(CO)$ видно, что основное снижение концентрации оксидов азота происходит при умеренном недожоге при уровне концентраций CO в уходящих газах до 100 мг/м³. С появлением продуктов недожога в дымовых газах влияние CO на NOx претерпевает значительные изменения. С ростом концентрации CO в дымовых газах можно заметить тенденцию к последующему уменьшению NOx.

Как известно, CO не является единственным продуктом неполного горения топлива. В дымовых газах котлов

могут присутствовать и другие вредные для человека и окружающей среды продукты недожога топлива. К ним относится довольно большая группа, состоящая из полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) – веществ, которые обладают канцерогенной и мутагенной активностью. Ниже проводится исследование содержания этих веществ в дымовых газах при сжигании топлив с химическим недожогом, которые контролируются по содержанию бенз(а)пирена БП, принадлежащего к I классу опасности.

Часто из-за сложностей инструментальных измерений БП о его содержании на практике косвенно пытаются судить по концентрациям оксида углерода СО, поскольку оба вещества являются продуктами химического недожога топлива. Считается, что при отсутствии СО (или его незначительной концентрации в пределах 10 мг/м³) в уходящих газах котлов содержание БП в них пренебрежимо мало. В этой связи, необходимо убедиться в том, что при сжигании топлив с умеренным недожогом при концентрации СО в уходящих газах до 300-400 мг/м³ не произойдёт резкого увеличения концентрации вредных ПАУ.

Результаты экспериментальных исследований влияния сжигания топлива с умеренным недожогом на концентрацию бенз(а)пирена в уходящих газах котла ЦКТИ-75-3,9 приведены на рис. 1г при сжигании каменного кузнечного угля. В целом, эти результаты повторяют полученные данные при сжигании с умеренным недожогом природного газа и мазута.

Результаты экспериментов показали отсутствие прямой зависимости между выходом СО и БП (рис. 2). При росте концентрации монооксида углерода в продуктах сгорания рост концентрации бенз(а)пирена происходит нелинейно. При начальном росте концентрации СО в уходящих газах от 0 до 20-30 мг/м³ наблюдается скачкообразное увеличение выхода БП. После этого рост концентрации БП в продуктах сгорания замедляется и становится незначительным. И в определённом диапазоне значений концентраций СО (до 300-400 мг/м³) в уходящих газах содержание БП остаётся примерно на одном уровне, который зависит от вида сжигаемого топлива и конструктивных особенностей котла.

Результаты исследований зависимости NO_x от БП, проводившихся при сжигании мазута на котле ЦКТИ-75-3,9 приводятся на рис. 3. Из результатов исследований видно, что основное снижение эмиссии оксидов азота до 250 мг/м³ (около 45%) происходит при значении концентрации БП в уходящих газах меньше чем 15 нг/м³. При этом концентрация монооксида углерода не превышает 20-50 мг/м³.

В результате проведённых экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что реализация на котлах способа сжигания топлив с умеренным недожогом, при которых концентрация СО в уходящих газах котла находится в пределах, установленных ГОСТ Р 50831-95, не вызывает существенного роста концентрации бенз(а)пирена. При этом концентрация БП находится на уровне ниже 100 нг/м³. Это подтверждают результаты, полученные при исследованиях сжигания топлив в пределах умеренного недожога (см. рис. 1г и 3). Из них видно, что основное снижение NO_x происходит при незначительном росте концентрации БП.

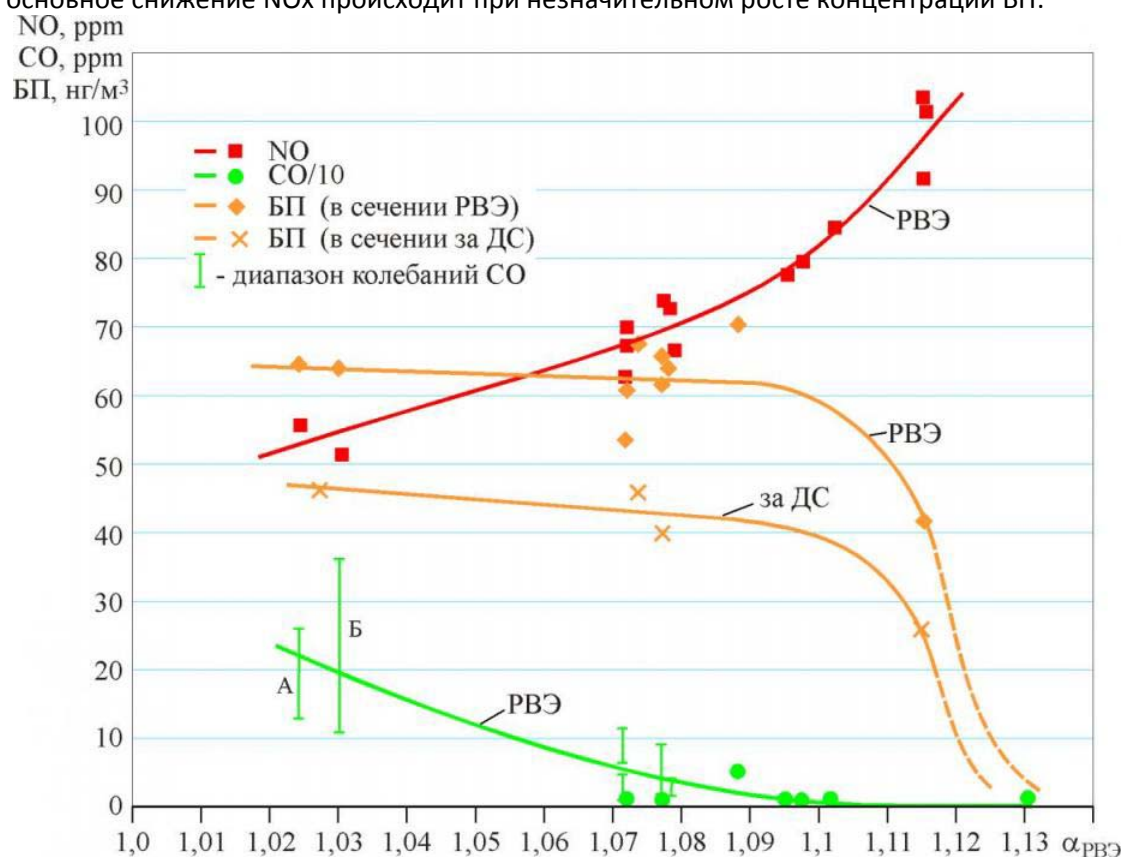


Рис. 6. Влияние избытков воздуха на содержание вредных примесей в сечении РВЭ и за ДС (в пересчете на $\alpha = 1,4$)

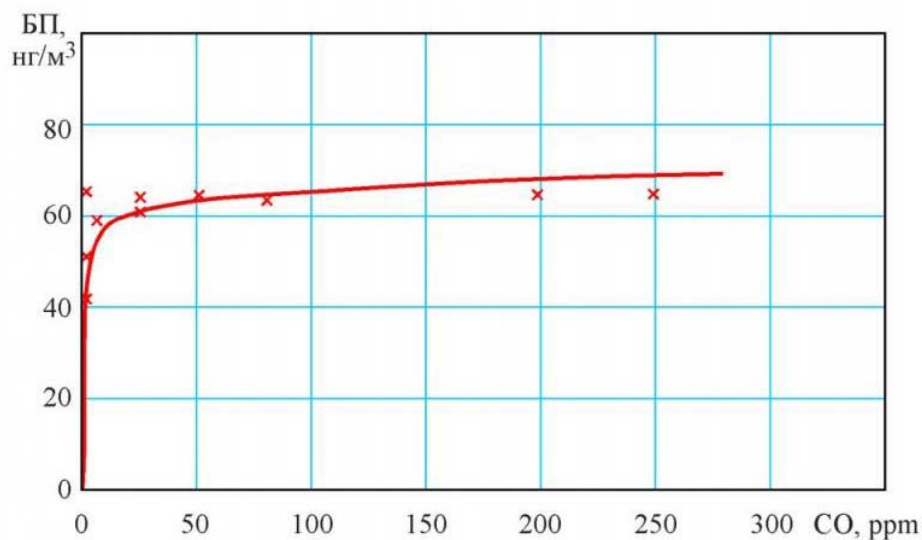


Рис. 7. Зависимость содержания CO и БП в сечении РВЭ
(в пересчете на $\alpha = 1,4$) котел ТПЕ-430 (ст. №5), $D_{\text{пе}} = 365-375$ т/ч

Рис.2. Зависимость концентрации БП от CO в сечении РВЭ котла ТПЕ-430 (Е-500-140-560КТ) при сжигании природного газа, $D=365-375$ т/ч

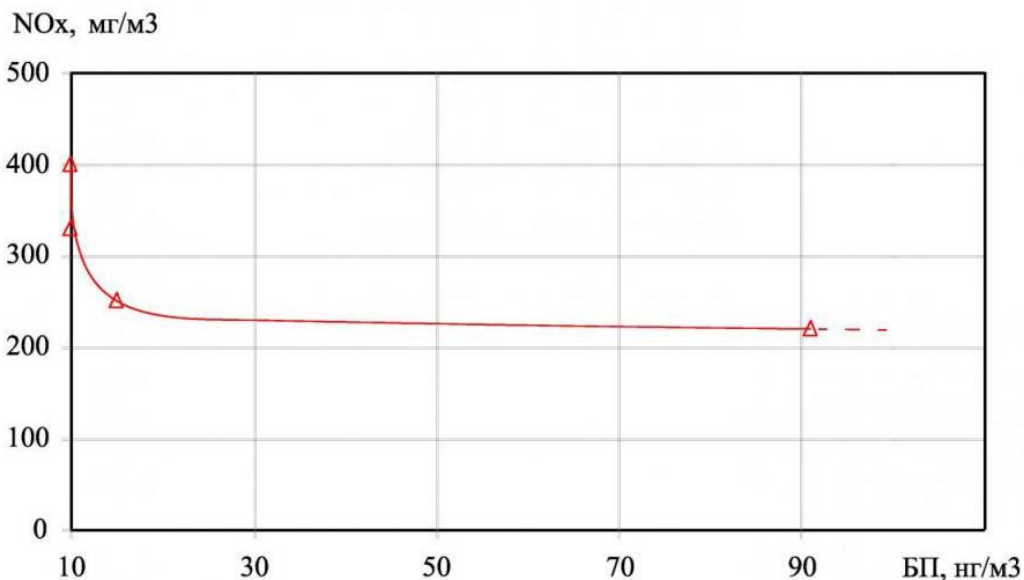


Рис.3. Зависимость концентрации NOx от БП в уходящих газах ЦКТИ-75-3,9 при сжигании мазута, $D=75$ т/ч

Объективно оценить экологическую безопасность режима сжигания топлива можно только с учётом массового выброса и токсичности каждой вредной примеси, содержащейся в уходящих газах котла, выбрасываемых в атмосферу. В качестве относительного критерия для оценки и сравнения "экологичности" (экологической безопасности) режима сжигания топлива может быть использован суммарный показатель вредности уходящих газов Π , который сопоставляет и суммирует вредное воздействие различных примесей, содержащихся в дымовых газах. Он определяется как сумма частных показателей вредности Π_i , характеризующих удельное количество вредного вещества и его относительную токсичность:

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i \quad (2)$$

В свою очередь частные показатели вредности Π_i характеризуют удельное количество вредного вещества и его относительную токсичность и представляют собой количество граммов вредной примеси m_i , образовавшейся при сжигании одного грамма топлива, отнесенное к относительной теплоте сгорания топлива и к относительной токсичности вредной примеси:

$$\Pi_i = \frac{m_i \cdot (1 - \eta)}{\frac{Q_i^*}{(Q_i^*)_{\text{ут}}} \cdot \frac{\text{ПДК}_{\text{ж.р.}}}{(\text{ПДК}_{\text{ж.р.}})_{\text{зоны}}}}, \quad (3)$$

где Q_i^* , $(Q_i^*)_{\text{ут}}$ – теплота сгорания соответственно рассматриваемого и условного топлив, МДж/кг (МДж/м³);

ПДКм.р_i, (ПДКм.р)зо_i – максимально разовые предельно допустимые концентрации соответственно *i*-ой примеси и зо_i, мг/м³ (при этом токсичность зо_i твердых топлив приравнена к таковой для нетоксичной пыли ПДКм.р = 0,5 мг/м³); – степень очистки дымовых газов от *i*-ой примеси перед их выбросом в атмосферу (в долях).

Результаты расчётов частных и суммарного показателей вредности для котла БКЗ-75-3,9ГМ (станц. №13 ТЭЦ ЧМЗ г. Глазова) представлены на рис. 4. Они чётко показывают, что суммарный показатель вредности в основном определяется частным показателем вредности оксидов азота. При традиционном сжигании природного газа частный показатель вредности NO_x вносит более 99,9% вклада в П. И лишь только с уменьшением избытка воздуха общий вклад частных показателей вредности продуктов неполного горения (СО и БП) увеличивается до 2-3%. При этом характерно, что значение суммарного показателя вредности продуктов сгорания П уменьшается в 1,32 раза в зависимости от вида сжигаемого топлива. Это подтверждается проведёнными ранее исследованиями.

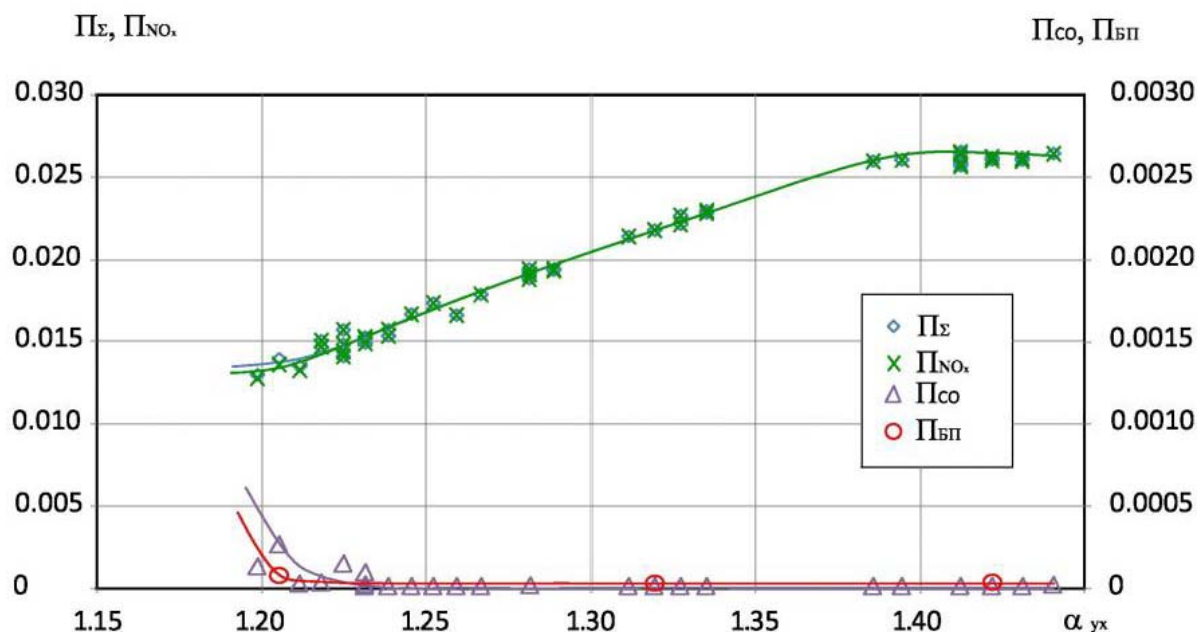


Рис.4. Зависимость суммарного П и частных П_і от коэффициента избытка воздуха в уходящих газах котла БКЗ-75-3,9ГМ (станц. №13 ТЭЦ ЧМЗ г. Глазова) при сжигании природного газа, D=75 т/ч

Отдельно следует отметить тот факт, что при сжигании топлив с умеренным недожогом в пределах установленных норм с концентрацией СО менее 300 мг/м³, происходит монотонное снижение суммарного показателя вредности продуктов сгорания. Отсутствие минимального значения П на рис. 4 свидетельствует о том, что снижение организованно подаваемого воздуха в топку котла в рамках сжигания топлив с умеренным недожогом, улучшает экологическую безопасность режима сжигания топлива за счет снижения эмиссии оксидов азота.

Третья глава посвящена расчётно-теоретическим исследованиям механизма образования и подавления оксидов азота при сжигании топлив с недожогом, определению максимально возможного уровня снижения выхода NO_x и поиску наиболее эффективных приёмов реализации предложенного способа сжигания.

Численные эксперименты проводились с помощью пакета прикладных программ (ППП) «Расчёт образования оксидов серы и азота при сжигании органических топлив» (РОСА-2), разработанного на кафедре ПГС МЭИ и предназначенного для кинетических расчётов процессов сжигания органических топлив и динамики образования оксидов азота (NO, NO₂, N₂O) и серы (SO₂, SO₃). Кинетическая модель горения, реализованная в ППП РОСА-2, описывает по времени (квазиодномерная задача) реагирование в процессах горения и охлаждения продуктов сгорания 38 химических компонентов по 280 химическим реакциям в зависимости от состава топлива, состава и количества окислителя, условий теплообмена, режимных условий и др.

В численном эксперименте моделировалось сжигание природного газа в котле БКЗ-420. В качестве исходных данных брались результаты, полученные из тепловых расчётов и экспериментальных замеров температур по длине факела Т_ф. При проведении расчётов были приняты допущения об идеальное перемешивание топлива, воздуха и продуктов сгорания, отсутствии присосов по газовоздушному тракту котла, линейном законе изменения температуры по длине факела и газового тракта котла Т(). Принятые в численном эксперименте изменение профиля температур вдоль газовом тракте котла представлены в таблице 1.

Таблица 1

Характерные точки профиля температур в газоходе котла

	0, мс	T0*, К	max, мс	Tmax**, К	т'', мс	Tт''***, К	yx, мс	Tyx****, К
0,90	0	600	585	1966	1591	1511	5250	388
0,95	0	600	553	2004	1556	1506	4974	388
1,00	0	600	525	2047	1525	1502	4725	388
1,05	0	600	500	2050	1500	1500	4500	388
1,10	0	600	477	2000	1432	1490	4295	388
1,15	0	600	457	1950	1370	1480	4109	388
1,20	0	600	438	1900	1313	1470	3938	388

* T0 – температура горячего воздуха;

** Tmax – максимальная температура продуктов сгорания;

*** Tт'' – температура газов на выходе из топки;

**** Tyx – температура уходящих газов.

Результаты численного эксперимента, представленные на рис. 5, показывают, что максимум концентрации NO при сжигании природного газа достигается при сжигании с избытком воздуха $\tau=1,05$, близком к традиционному значению для случая сжигания природного газа. Со снижением от 1,05 до 1,0 происходит уменьшение NO на 65%, а при дальнейшем уменьшении сначала, до 0,95, а затем и до 0,9 происходит снижение концентрации NO до 102 мг/м³. Отрицательным моментом сжигания топлив при таких избытках воздуха является чрезвычайно высокий химический недожог топлива, о чем свидетельствуют высокие концентрации CO в пределах от 10000 до 20000 мг/м³. Потери с химическим недожогом при этом составляют 515%. Поэтому такие режимы сжигания даже при концентрации NO в продуктах сгорания близких к нулю не могут быть рекомендованы для сжигания.

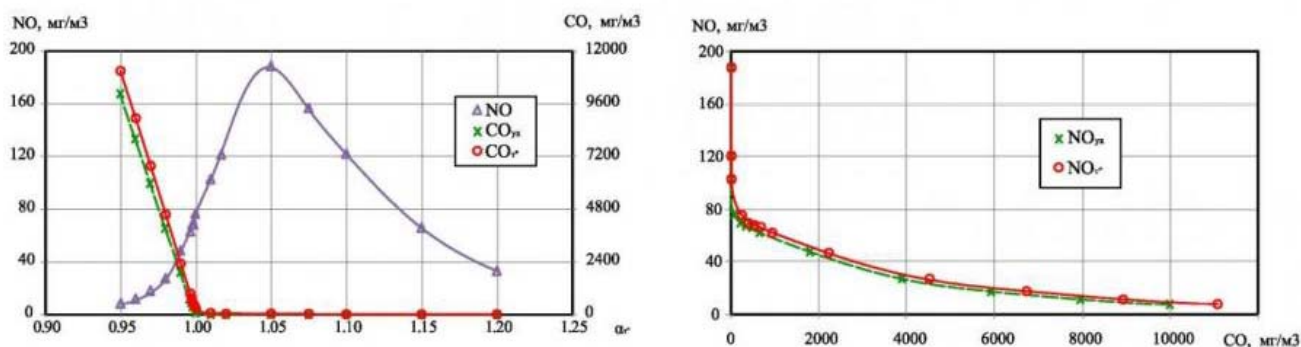


Рис.5. Зависимость эмиссии оксидов азота и монооксида углерода от коэффициента избытка воздуха при идеальном смешении топлива и воздуха в различных сечениях газового тракта котла

Нормативный предел CO в 300 мг/м³ (в соответствии с ГОСТ Р 50831-95) достигается при снижении до 0,998. Это значит, что для получения приемлемого недожога необходимо сжигать топливо с коэффициентом избытка воздуха, близким к стехиометрическому значению. Однако этот вывод справедлив при условии идеального перемешивания в зоне горения.

Как видно из рис. 5 при дальнейшем увеличении химического недожога происходит снижение NO практически до 0. Однако, с ростом содержания CO в продуктах сгорания происходит изменение наклона кривой $NO=f(CO)$. Это говорит о том, что эффективность снижения NO с увеличением недожога сверх умеренных значений падает.

Результаты сравнения численного эксперимента с опытными данными для данного диапазона CO проводились в соответствии с выражением:

$$\xi_{NO} = \frac{NO}{NO_0} \cdot 100\% \quad (3)$$

где NO – относительная эмиссия оксидов азота, NO – текущая концентрация оксидов азота, NO0 – значение концентрации оксида азота при традиционном сжигании. Результаты сравнения натурного и численного экспериментов, представленные на рис. 6, продемонстрировали их качественное совпадение. Большой эффект снижения выхода NO в численном эксперименте при сжигании газа с умеренным недожогом по сравнению с опытными данными объясняется условиями идеального перемешивания. Естественно, что на практике до-

биться этого не представляется возможным, поэтому эффект внедрения способа на котлах ТГМ-84Б и БКЗ-75-3,9ГМ составляет 20 и 40% против 65% для идеального случая сжигания топлива.

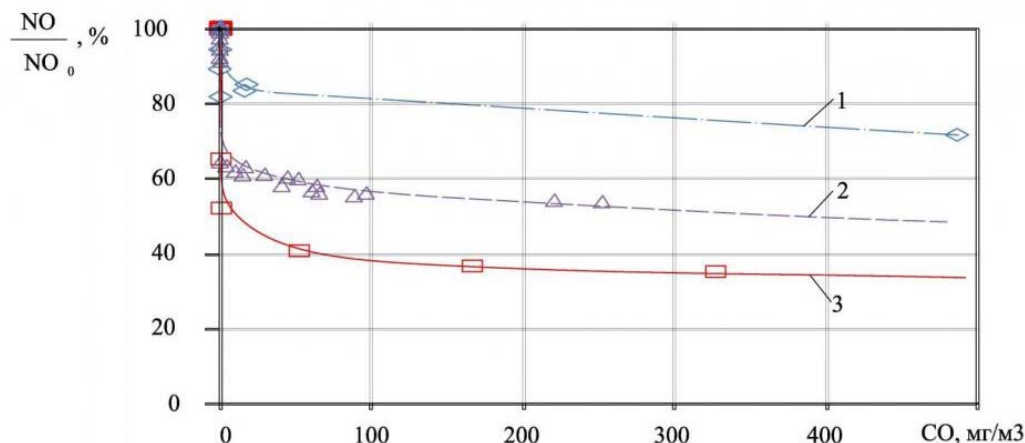


Рис.6. Относительная эмиссия оксидов азота при сжигании природного газа;

1 – котёл ТГМ-84Б, 2 – котёл БКЗ-75-3,9ГМ, 3 – котёл БКЗ-420 (численный эксперимент)

Из вышесказанного следует, что чем лучше предварительное перемешивание топлива и воздуха, тем больше эффективность подавления эмиссии оксидов азота при внедрении сжигания топлив с умеренным химическим недожогом.

Для детального изучения кинетики процессов горения в численных экспериментах рассматривались также интегралы скоростей реакций:

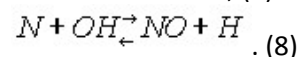
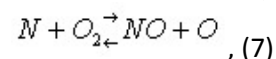
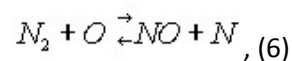
$$I = \int_0^{\tau_p} W_i d\tau, \quad (4)$$

где W_i - скорость химической реакции; τ - время процесса горения. С помощью интегралов скоростей химических реакций производится оценка вклада последних в процессы образования или расходования отдельных веществ.

Доля каждой реакции в суммарном процессе образования или восстановления оксидов азота в расчетных исследованиях оценивалось как отношение интеграла скорости конкретной (i -ой) реакции к сумме интегралов скоростей всех n реакций соответственно образования или восстановления NO:

$$\Delta = \frac{\int_0^{\tau_p} W_i d\tau}{\sum_{j=1}^n \int_0^{\tau_p} W_j d\tau} \quad (5)$$

Анализ результатов относительного вклада реакций в образование монооксида азота показывает (см. рис. 7), что подавляющая часть NO образуется по расширенному механизму Я. Б. Зельдовича:



Эта картина наблюдается как при традиционном сжигании, так и при сжигании топлив с химическим недожогом при <1 . И лишь при сильном недостатке кислорода растёт вклад быстрых оксидов азота (см. реакцию 10 на рис. 7). Это происходит из-за уменьшения значения суммарного интеграла реакций образования NO.

Рост относительного вклада реакции $N + OH \rightarrow NO + H$ (реакция 3 на рис. 7) в образование оксидов азота со снижением объясняется участием в окислительном процессе гидроксила OH, снижение концентрации которого, в зоне высоких температур происходит непропорционально снижению концентрации кислорода.

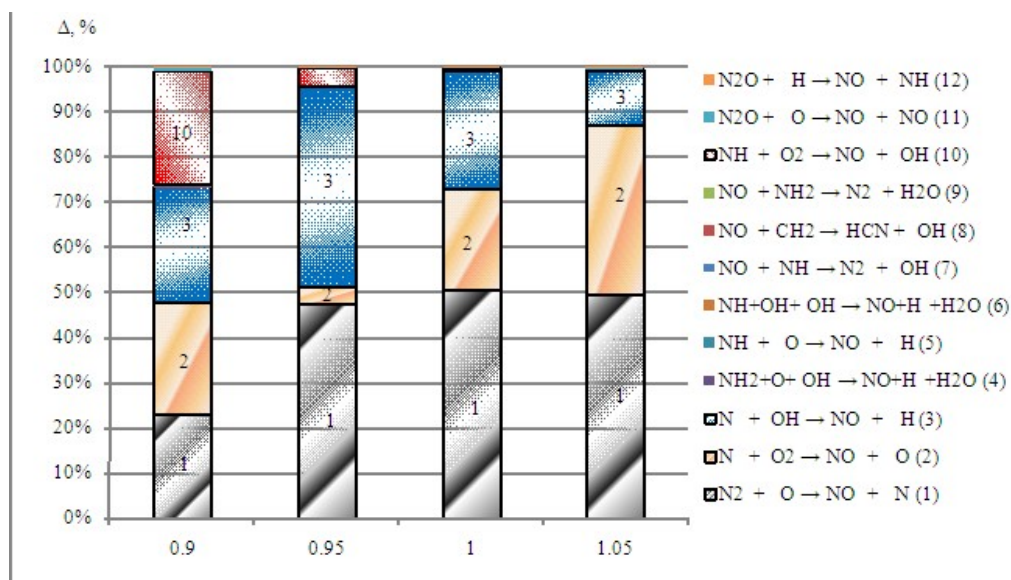


Рис.7. Относительный вклад интегралов химических реакций в образование NO

Расчёты показали, что при снижении избытка воздуха от 1,05 до 1,0 сумма реакций интегралов образования NO уменьшается в 3,25 раза, в то время как сумма интегралов реакций расходования NO при этом становится меньше в 2,8 раз. Объективно судить об изменении образования отдельного вещества можно по отношению разностей суммарных интегралов реакций образования и расходования данного вещества. Для NO при переходе от сжигания с 1,05 до 1,0 оно снижается в 3,3 раза. Значит, уменьшение образования NO происходит именно благодаря уменьшению скоростей традиционных реакций расширенного механизма Я.Б. Зельдовича. Существенного восстановления NO до N_2 при снижении количества воздуха и обогащения факела топливом не наблюдается.

Четвертая глава посвящена разработке критериев эффективности способа сжигания и практических рекомендаций по его внедрению. В главе также проводятся результаты исследований влияния сжигания топлив с умеренным недожогом на надёжность работы элементов котла.

Снижение избытков воздуха наряду со снижением суммарного показателя вредности дымовых газов одновременно сопровождается уменьшением потерь теплоты с уходящими газами q_2 и увеличением потерь теплоты с химическим q_3 и механическим q_4 недожогом. По изменению этих потерь можно судить об изменении КПД котла, а значит и расходе топлива.

Расчёт потерь с уходящими газами q_2 , % производился по выражению:

$$q_2 = \frac{(J_{yx} - \alpha_{yx} \cdot I_{xe}) \cdot (100 - q_4)}{Q_p}, \quad (8)$$

здесь J_{yx} – энтальпия уходящих газов, кДж/кг (м3); α_{yx} – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах, I_{xe} – энтальпия холодного воздуха, кДж/кг (м3); Q_p – располагаемое тепло кДж/кг (м3) топлива

ва $Q_p = Q_i^r + Q_{в.ж} + i_{тл}$. Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг (м3), $Q_{в.ж}$ – тепло, внесённое в котёл воздухом, при подогреве последнего вне котла, кДж/кг (м3); $i_{тл}$ – физическое тепло топлива, кДж/кг (м3).

Расчёт потерь с химическим недожогом q_3 , % осуществлялся следующим образом:

$$q_3 = \frac{3018 \cdot 4186 \cdot (V_g + (\alpha_{yx} - 1) \cdot V_e) \cdot C_{CO} \cdot 10^{-6}}{Q_p \cdot R} \cdot 100\% \quad (9)$$

где 3018 – теплота сгорания CO, ккал/м3; V_g , V_e – объёмы сухих продуктов сгорания и воздуха соответственно, м3/кг (м3) (в нормальных условиях); C_{CO} – концентрация монооксида углерода в уходящих газах, ppm; R – коэффициент, учитывающий долю потери теплоты вследствие химической неполноты сгорания топлива, обусловленный содержанием CO в продуктах сгорания: для твёрдых топлив $R=1$; для газа $R=0,5$; для жидких топлив $R=0,65$.

Результаты исследований изменения потерь q_2 и q_3 от избытка воздуха при сжигании природного газа на котле БКЗ-75-3,9ГМ приведены на рис. 8.

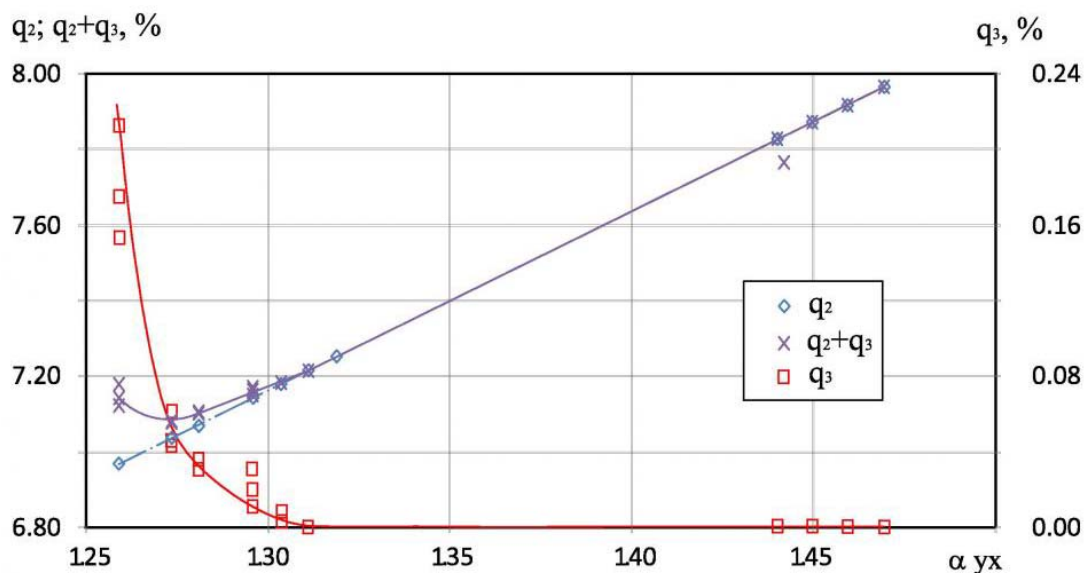


Рис.8. Зависимость потерь с уходящими газами q_2 и химическим недожогом q_3 от коэффициента избытка воздуха в уходящих газах котла БКЗ-75-3,9ГМ (станц. №14 ТЭЦ ЧМЗ г. Глазова) при сжигании природного газа, $D=75$ т/ч

Проведенные эксперименты показали, что при снижении до определённых значений рост потерь с химическим недожогом меньше, чем снижение потерь с уходящими газами. Поэтому минимальные суммарные потери теплоты с уходящими газами и химическим недожогом (q_2+q_3), а значит и минимальный расход топлива на котёл, наблюдаются в области пониженных избытков воздуха при сжигании топлив с умеренным химическим недожогом, при наличии СО в уходящих газах котла до 100 мг/м³.

Избыток воздуха, при котором наблюдается минимум суммы потерь с уходящими газами и от химической неполноты сгорания, в дальнейшем будет называться эффективным избытком воздуха и обозначаться эфф.

При снижении коэффициента избытка воздуха от кр до эфф рост q_3 мал вследствие небольшой концентрации продуктов химического недожога в уходящих газах. Эксперименты на котлах показали, что при снижении избытка воздуха от кр до эфф снижение потерь q_2 преобладает над ростом потерь q_3 .

Результаты исследований показывают, что для разных котлов минимуму суммы (q_2+q_3) соответствуют потери с химическим недожогом, равные 0,04-0,06 %. Этой величине химического недожога соответствует концентрация СО в уходящих газах от 50 до 100 мг/м³.

В общем случае коэффициент полезного действия котла, по обратному балансу рассчитывается следующим образом:

$$\eta = 100 - q_2 - q_3 - q_4 - q_5 - q_6, \% \quad (9)$$

где q_5 потери от наружного охлаждения, %; q_6 потери со шлакоудалением, %. При сжигании природного газа и мазута q_4 и q_6 полагаются равными нулю.

Результаты расчёта КПД котла БКЗ-75-3,9ГМ (см. рис. 1а и 8) по полученным в ходе исследований экспериментальным данным приведены на рис. 9а при сжигании природного газа в зависимости от коэффициента избытка воздуха концентрации СО в уходящих газах. Со снижением коэффициента избытка воздуха во всех случаях наблюдается рост коэффициента полезного действия до достижения своего максимального значения при эфф. При дальнейшем снижении ниже эфф наблюдается довольно резкое падение КПД, пропорциональное росту концентрации продуктов химического недожога в продуктах сгорания.

По сравнению с сильной зависимостью КПД от изменения коэффициента избытка воздуха, особенно при значениях меньше эфф, зависимость КПД от концентрации СО в уходящих газах в области умеренного недожога топлив в пределах ГОСТ Р 50831-95 (СО 300 мг/м³) намного слабее.

Проведённые по результатам экспериментов расчёты показали, что для котлов затраты на тягу и дутьё ЭТид значительно зависят от характеристик приводов тягодутьевых машин и меняются в довольно больших пределах от 0,2-0,8% до 2% в зависимости от нагрузки и режима сжигания. Снижение затрат на тягу и дутьё составляет от 0,01-0,03% до 0,05% (меньшее сокращение затрат соответствует меньшему первоначальному значению ЭТид).

Практические исследования показали, что с увеличением концентрации СО в пределах 300-400 мг/м³ показатель суммарной вредности продуктов сгорания монотонно уменьшается (см. рис. 4). Однако максимальная эффективность работы котла достигается при меньших концентрациях СО от 50 до 200 мг/м³, которым соответствует избыток воздуха эфф. В этой связи необходимо определить критерий оптимальности режима сжигания топлив с умеренным недожогом, который бы отражал экологическую безопасность и эффективность работы котла. В качестве такого критерия можно использовать эксплуатационные затраты станции. Применительно к эксплуатационным издержкам повышение КПД будет означать снижение расхода топлива, и, как

следствие, уменьшение платы станции за использованное топливо ST. Экологическую безопасность работы котла можно перевести в эксплуатационные издержки станции путём подсчёта платы станции за выброс вредных веществ в атмосферу SBB.

В рамках данной работы годовые эксплуатационные затраты для исследуемых котлов рассчитывались как сумма годовых затрат на топливо ST и на плату за вредные выбросы в атмосферу SBB. При этом плата за топливо принималась равной 2230 руб за 1000 м³ природного газа (установленные цены в I квартале 2009 г.). Расчет годовой платы за выбросы NO_x, CO и БП производился в соответствии с постановлением правительства РФ от 12 июня 2003 г. № 344. Расчетные суммарные годовые эксплуатационные затраты $S = ST + SBB$ для котла БКЗ-75-3,9ГМ при работе на природном газе представлены на рис. 9б.

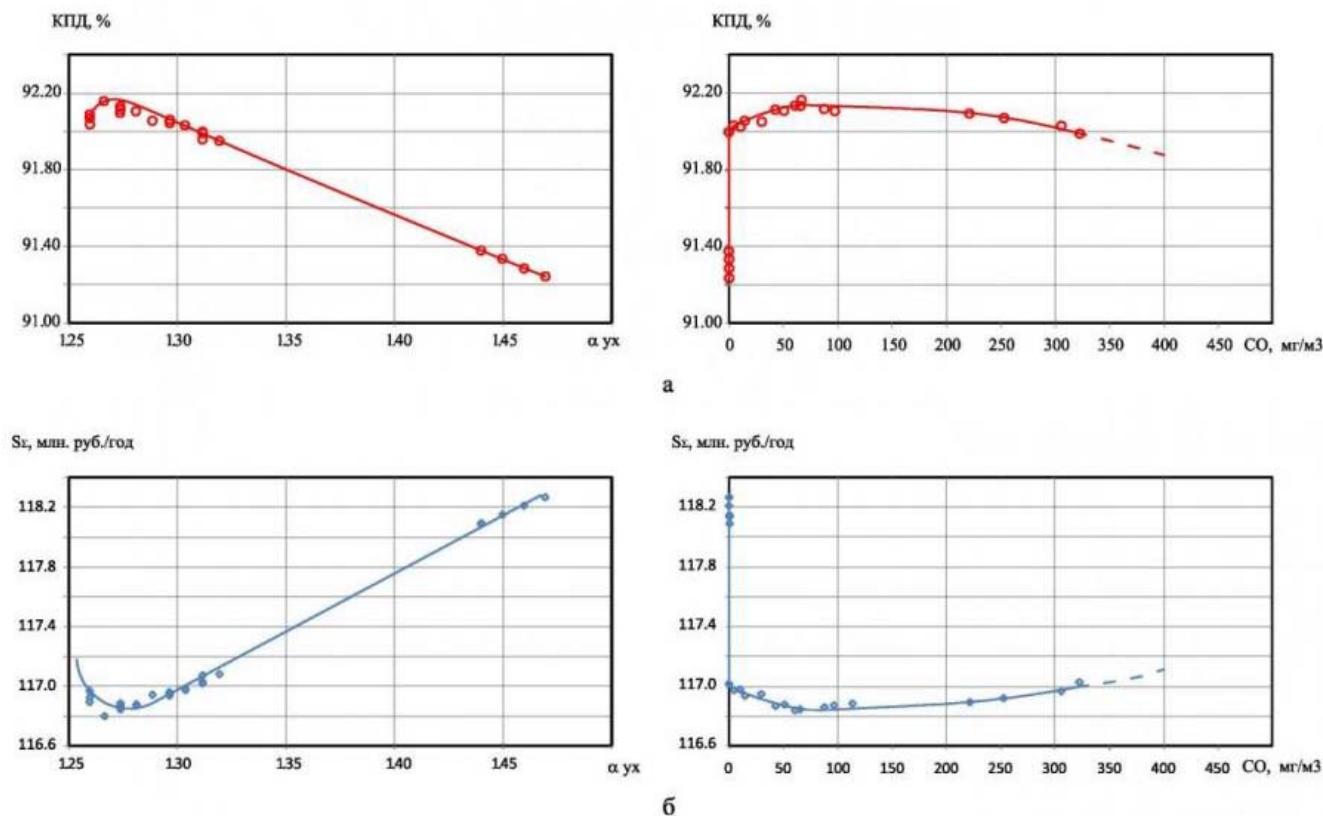


Рис. 9. Показатели эффективности работы котла БКЗ-75-3,9ГМ (станц. №14 ТЭЦ ЧМЗ г. Глазова) при сжигании природного газа от избытка воздуха и концентрации CO в уходящих газах: а КПД; б S

Сравнение результатов, полученных для разных котлов, показывает, что максимумы КПД и минимумы суммарных эксплуатационных затрат S имеют место при практически одинаковых избытках воздуха и величинах химического недожога, которые характеризуются при сжигании природного газа концентрацией CO в уходящих газах от 50 до 100 мг/м³ (в автореферате представлены данные расчёта КПД и S для котла БКЗ-75-3,9ГМ при сжигании природного газа на рис. 9а и 9б). Это объясняется тем, что годовая плата за выбросы вредных веществ в атмосферу SBB при существующих нормативах составляет не более 0,02% от суммарных годовых эксплуатационных затрат S. Таким образом минимум суммарных эксплуатационных затрат станции совпадает с минимальным расходом топлива и максимумом КПД (рис. 9). Избыток воздуха, при котором наблюдается минимум затрат S, одновременно отражающих экологическую безопасность и эффективность работы котла, можно назвать оптимальным избытком воздуха опт.

В этой связи, при существующих ценах на топливо и нормативах платы за выбросы основным критерием определения оптимальных режимных условий для реализации способа сжигания природного газа с умеренным недожогом на любом котле является эффективность его работы. Оптимальный избыток воздуха опт по условиям экологичной и эффективной работы котла будет совпадать с избытком воздуха эфф, при котором наблюдается максимум КПД котла.

Для оценки влияния нормативных платежей за выбросы вредных веществ в атмосферу на выбор оптимальных режимных условий при реализации предложенного способа сжигания с умеренным недожогом в данной работе были произведены расчеты суммарных годовых эксплуатационных затрат для различных вариантов. В первом варианте нормативы платы за выбросы были увеличены по сравнению с действующими в настоящее время в 10 раз, а во втором варианте – в 100 раз. В обоих вариантах стоимость топлива принималась неизменной (рис. 10).

Как и ожидалось, с увеличением нормативов платы за выбросы и, соответственно, годовых затрат S_{вв} произошло смещение минимума суммарных годовых эксплуатационных затрат S в область меньшей концентра-

ции NOx, а значит и большей концентрации CO в уходящих газах котла, т.е. в сторону увеличения недожога. При этом увеличение нормативов платы за выбросы в 10 раз практически не сказалось на расположение минимума расчетной зависимости показателя S от концентрации CO.

При увеличении платежей за выбросы в 100 раз данная зависимость в области своего минимума стала более пологой, а сам минимум S сместился в область более высокой концентрации CO в уходящих газах – от 100 до 200 мг/м³ (рис. 10). В этом случае суммарные годовые платы за выбросы S_{вв} будут составлять примерно 2 % суммарных годовых эксплуатационных затрат S.

Поэтому при реализации способа сжигания топлив с умеренным недожогом следует поддерживать содержание CO в продуктах сгорания на уровне 50-100 мг/м³. При этом главным критерием для определения оптимальных режимных условий реализации данного способа сжигания (т.е. оптимальных величин) следует считать достижение максимума КПД котла.

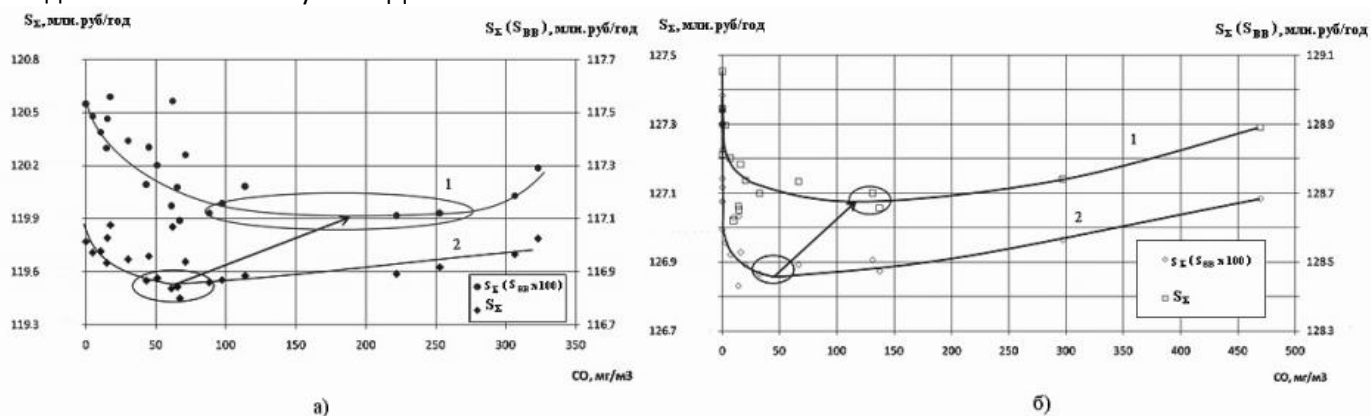


Рис.10. Зависимость суммарных годовых эксплуатационных затрат электростанции S от концентрации CO в уходящих газах котла при сжигании природного газа:

а– котёл БКЗ-75-3,9ГМ (станц. №14 ТЭЦ ЧМЗ г. Глазова), D = 75 т/ч;

б–котёл ЦКТИ-75-3,9, D = 82 т/ч;

1 – при нормативной плате за выброс вредных веществ в атмосферу;

2 – при увеличении платы за выбросы вредных веществ в атмосферу в 100 раз

В пользу принятого критерия говорит и прогнозируемое увеличение цен на топливо, при котором доля стоимости топлива в суммарных эксплуатационных затратах возрастёт ещё больше. Как показывают проведённые исследования, характер изменения зависимости КПД от избытка воздуха и CO остаётся одинаковым при сжигании всех видов топлива. Следовательно, результаты, полученные при сжигании природного газа, можно распространить на сжигание жидкого и твёрдого топлив и использовать этот критерий при сжигании с умеренным недожогом мазута и угля, цены на которые уже сейчас или в обозримом будущем будут больше, чем цена за природный газ.

При сжигании топлив с умеренным недожогом при избытке воздуха меньше, чем опт (при концентрации CO в 300-400 мг/м³) расход топлива начнёт расти, издержки станции начнут повышаться. Следовательно, для осуществления максимально эффективной работы котла необходимо контролировать и поддерживать концентрацию CO в уходящих газах котла на уровне 50-100 мг/м³ при сжигании природного газа и 75-200 мг/м³ при сжигании мазута.

Необходимость поддержания CO в указанных узких диапазонах концентрации, меньших нормативных значений умеренного недожога, для обеспечения оптимальной работы котла заставляет контролировать содержание монооксида углерода в продуктах сгорания. Поэтому данный метод снижения оксидов азота получил название сжигания топлив с контролируемым химическим недожогом.

Проведенные исследования показали, что предложенный способ сжигания топлив с умеренным контролируемым недожогом может быть рекомендован для внедрения на действующих котлах докритического давления паропроизводительностью до 500 т/ч не только для снижения эмиссии оксидов азота, но для повышения эффективности их работы при сжигании всех видов топлива. Он позволяет не только уменьшить выбросы NOx на 20–40%, но и несколько повысить КПД брутто и нетто котла (на 0,5–1 %) за счет снижения потерь теплоты с уходящими газами и затрат энергии на собственные нужды. Так при сжигании природного газа экономия средств на топливо и выбросы вредных веществ составляет 0,5–2 млн. руб. в год на каждые 100 т/ч паропроизводительности котла.

Анализ результатов экспериментов показал, что для эффективного внедрения способа сжигания необходимо произвести уплотнение топki, поверку штатных приборов, устранить перекосы в топливовоздушных трактах. Последнее позволяет оптимизировать процесс сжигания топлива и уменьшить выход CO и БП. Далее можно проводить режимно-наладочные испытания, в ходе которых определяются значения критических кр, допустимых рабочих доп и оптимальных опт избытков воздуха на различных нагрузках, разрабатываются режимные карты котлов.

В результате проведённых исследований определена оптимальная концентрация монооксида углерода СО в уходящих газах, при которой будет наблюдаться максимальная эффективность работы котла. Для разных котлов при сжигании природного газа она изменяется в диапазоне 50-100 мг/м³ и 75-200 мг/м³ - при сжигании мазута.

В ходе проведённых исследований определён рабочий диапазон концентраций СО в уходящих газах, при котором происходит незначительное отклонение КПД от положения максимума (в пределах 0,05%). Для природного газа он составил от 25 до 250 мг/м³, и от 25 до 250-300 мг/м³ для мазута.

В проведённых в работе исследованиях было выяснено, что температура на выходе из топки при сжигании топлива с химическим недожогом по сравнению с традиционным сжиганием топлива меняется незначительно. Следовательно, при сжигании твёрдого топлива с умеренным недожогом не будет повышаться интенсивность шлакования топочных экранов и других поверхностей нагрева котла.

Проведённые исследования по замеру температуры стенок металла труб ширм и горячего конвективного пакета котла ТПЕ-430 при сжигании природного газа с умеренным недожогом показали, что с уменьшением температура металла труб практически не меняется. Следовательно, надёжность работы поверхностей котла при сжигании с умеренным недожогом снижаться не будет.

Для эксплуатации котла с максимальным КПД и большей эффективности подавления эмиссии оксидов азота необходима система непрерывного контроля состава продуктов сгорания для постоянного поддержания заданного соотношения топливо/воздух, в том числе и во время переходных процессов.

Для эффективного внедрения режимов с умеренным контролируемым недожогом необходима организация непрерывного анализа состава дымовых газов одновременно в режимном (за поворотной камерой) и контрольном (за воздухоподогревателем) сечениях газового тракта котла (контроль концентраций О₂ и СО). Известно, что образование оксидов азота полностью завершается в топочной камере и далее по газовому тракту их массовый расход и концентрация практически не меняются. Поэтому контроль содержания NO_x может быть организован в любом из указанных сечений газового тракта, где обеспечивается наибольшая представительность результатов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан малозатратный способ сжигания топлив с умеренным контролируемым недожогом, повышающий эффективность и экологическую безопасность работы котлов.

2. Экспериментальные исследования данного способа сжигания показали возможность снижения эмиссии оксидов азота NO_x на действующих котлах на 20-40 % в зависимости от вида сжигаемого топлива и режимных условий. При этом концентрации монооксида углерода СО в уходящих газах за счёт химического недожога ниже установленных ГОСТ Р 50831-95 уровней.

3. Несмотря на некоторое увеличение содержания продуктов недожога топлива (СО до 100-200 мг/м³ и бенз(а)пирена БП до 70-100 нг/м³) суммарная вредность продуктов сгорания при реализации способа сжигания с умеренным недожогом за счёт заметного снижения эмиссии NO_x уменьшается в 1,3-2 раза.

4. Расчётно-теоретические исследования показали, что снижение выбросов оксидов азота происходит в результате подавления образования термических NO_x по расширенному механизму Я.Б. Зельдовича. При этом максимальный уровень снижения эмиссии оксидов азота для случая идеального перемешивания достигает 65% при сжигании природного газа.

5. Оптимальные условия реализации предложенного способа достигаются при умеренном химическом недожоге при концентрации СО в уходящих газах от 50 до 200 мг/м³ в зависимости от вида сжигаемого топлива. При этом КПД котла достигает своего максимума за счёт снижения потерь с теплотой уходящих газов котла q₂ и увеличивается на 0,5-1% по сравнению с обычными режимами сжигания.

6. Предложенный способ сжигания был внедрён и апробирован на разных газомазутных и пылеугольных котлах паропроизводительностью от 75 до 500 т/ч и доказал свою эффективность и надёжность.

7. В результате анализа экспериментальных данных и работы котлов были разработаны практические рекомендации по реализации предложенного способа на действующих котлах паропроизводительностью до 500 т/ч при сжигании разных видов топлива.

Основное содержание работы представлено в следующих публикациях:

8. Эффективное сжигание топлив с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, И.Л. Ионкин, К.А. Плешанов // Теплоэнергетика. 2009. №1. С. 20-23.

9. Внедрение сжигания топлива с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, К.А. Плешанов // Новое в российской электроэнергетике. 2010. №1. С. 12-30.

10. Оптимальные условия для сжигания топлива с контролируемым химическим недожогом / П.В. Росляков, К.А. Плешанов, И.Л. Ионкин // Теплоэнергетика. 2010. №4. С. 17-22.

11. Сжигание различных видов топлива с контролируемым химическим недожогом / Плешанов К.А.; Росляков, П.В. // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика // Четырнадцатая Междунар. научн.-техн. конф. студ. и

асп: Тез. докл. Т.З. -М. : МЭИ, 2008.

12.Сжигание топлива с контролируемым химическим недожогом / Плешанов К.А., Росляков П.В. // XXXVII неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научн. конф студ. и асп. Ч. III. СПб.: Изд-во Политехн. унт-та, 2008.

13.Высокоэффективное сжигание топлива с контролируемым химическим недожогом / Плешанов К.А., Росляков, П.В. // Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика // Пятнадцатая Междунар. научн.-техн. конф. студ. и асп: Тез. докл. Т.З. -М.: МЭИ, 2009.

14.Численные исследования процесса сжигания топлив с химическим недожогом / Плешанов К.А., Росляков, П.В. // Радиоэлектроника, Электротехника и Энергетика // Шестнадцатая Междунар. научн.-техн. конф. студ. и асп: Тез. докл. Т.З. -М.: МЭИ, 2010. С. 286-288.

Подписано к печати

Печ. л. Тираж 100 Заказ

Отпечатано в Полиграфическом Центре МЭИ (ТУ)