

Министерство образования Российской Федерации  
Волгоградская государственная архитектурно-строительная академия

РГБ ОД

На правах рукописи  
621.181:628.518

РАМЕНСКИЙ МАКСИМ ПАВЛОВИЧ

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ  
ПРИ СГОРАНИИ ТОПЛИВА В КОТЛАХ

специальность 05.14.16. – "Технические средства и методы защиты  
окружающей среды" (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Волгоград - 2000

Работа выполнена на кафедре «МЕХАНИКА» Волжского политехнического института Волгоградского технического университета (ВПИ ВолгГТУ)

Научный руководитель - доктор технических наук,  
профессор Грига А.Д.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,  
Профессор Бойков Г.П.  
- кандидат технических наук,  
доцент Коврина О.Е.

Ведущая организация: ОАО «Красный котельщик»  
Таганрогский котельный завод

Защита диссертации состоится « 27 » июня 2000 года в 14 часов на заседании диссертационного Совета К 064.63.04 при Волгоградской государственной архитектурно-строительной академии по адресу: 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д.1 (ауд. 806, корп. В).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Волгоградской государственной архитектурно-строительной академии

Автореферат разослан " 25 " мая 2000 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
кандидат химических наук, доцент

 Остроухов С.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** состоит в защите окружающей среды от вредного воздействия выбросов, необходимости снижения эмиссии оксидов азота при сжигании топлива в энергетических котлах из-за отрицательного воздействия вредных веществ на окружающую человека среду. Защита окружающей среды от вредных выбросов - актуальнейшая проблема, особенно в районах концентрации промышленных предприятий, имеющих значительные отходы токсичных веществ.

**Цель работы** - защита окружающей среды от загрязнения соединениями азота посредством технологических и конструкторских методов при сгорании органического топлива в котлах; посредством оптимизации методов снижения выбросов  $\text{NO}_x$ ; с использованием математического моделирования, теории планирования эксперимента; создание методики наладки котла с учетом экологических, технических и экономических требований.

Для достижения поставленной цели на базе нормативного метода теплового расчета создана математическая модель котла, учитывающая изменение коэффициента тепловыделения во времени, позволяющая рассчитывать количество выбросов  $\text{NO}_x$ ; разработана методика наладки режимов работы котла на минимальные вредные выбросы, основывающаяся на положениях центрального композиционного планирования эксперимента.

**Задачи исследований** – разработка эффективной методики защиты окружающей среды в процессе наладочных испытаний котла на минимальные вредные выбросы, которая позволила бы одновременно улучшить технико-экономические показатели котла, существенно сократить объем работ при наладках котлов, обеспечить экономию рудоресурсов, средств при пуске котла; обеспечить разработку

режимных карт с необходимой для надежной эксплуатации котла аналитической, графической информацией.

**Методы исследований** включают аналитическое обобщение известных научных и технических результатов, математическое моделирование и численный эксперимент на ПЭВМ; экспериментальные исследования на энергетическом котле ТГМ-84Б с использованием современной измерительной аппаратуры; обработку экспериментальных данных с использованием методов теории планирования испытаний.

**Достоверность** результатов работы подтверждена сходимостью полученных результатов на математической модели и данных натурных испытаний котла ТГМ-84Б; сходимостью с результатами исследования аналогичного котла, полученными другими авторами; использованием общепринятого мерителя и регистрирующих приборов.

**Научная новизна работы.** Для защиты окружающей среды предложена и апробирована методика наладки котла на минимальные вредные выбросы при меньших трудозатратах с использованием положений теории планирования эксперимента.

Разработана математическая модель котла, учитывающая изменение коэффициента тепловыделения, текущей концентрации оксидов азота, температурных режимов работы от времени сгорания топлива, позволяющая анализировать различные мероприятия с целью снижения вредных выбросов.

**Практическое значение работы.** Для защиты окружающей среды разработана методика наладки котла на меньшие выбросы вредных веществ и даны рекомендации к составлению режимных карт.

Получены экспериментальные зависимости эмиссии оксидов азота от коэффициента избытка воздуха, доли газов рециркуляции, с режимов работы горелок котла на газе, мазуте, и смеси топлив.

**Внедрение результатов работы.** Создана методика наладки котла на минимальные вредные выбросы оксидов азота, программный

модели, реализованные на ПЭВМ, которые используются в учебном процессе и в практике наладки котлов ТЭЦ. Получена аналитическая и графическая информация для составления режимных карт котлов и, в частности, котла ТГМ-84Б Волжской ТЭЦ-1.

Теоретические положения диссертационной работы, а также результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе ВПИ ВолгГТУ при изучении дисциплин " Прикладная теплотехника", "Теплотехника".

**А защиту выносятся** следующие основные положения диссертации:

1) Решение задачи снижения нагрузки на окружающую среду в процессе наладки котла на минимальные выбросы оксидов азота путем использования теории планирования испытаний и математического моделирования процессов;

2) Усовершенствованная математическая модель котла для расчета температурных режимов работы, выбросов вредных веществ с целью определения оптимального сочетания параметров для минимизации количества выбросов;

3) Методика получения расширенной информации для режимных карт котлов с учетом их надежной работы и экологической обстановки.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на Всероссийской НТК " Аттестация методик и проблемы технических мерений " (Москва, 1997); на научно – технической сессии по проблемам газовых турбин (Москва, 1997); на конференции по региональной научно – технической программе " Научные, технические и экологические проблемы г. Волжского " в 1997 и 1998 годах; на III жувзовской научно – практической конференции студентов и молодых ученых г. Волжского в 1997 г.; на научно-технической конференции реконструкция энергетических котлов тепловых электростанций" (Волжский, 1998) г.; на Международной научно- технической конференции "SYSTEM PROBLEMS OF RELIABILITY, MATHEMATICAL

MODELING AND INFORMATION TECHNOLOGIES" (Москва-Сочи 1998-1999 г.); на научно-технической конференции молодых специалистов энергетиков (Краснодар, 1999 г.)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка литературы. Объем работы 138 страниц, в том числе: 131 страница основного текста, содержащего 15 таблиц на 21 страницах, список литературы из 10 наименований на 11 страницах, три приложения на 7 страницах.

### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** рассматриваются вредные соединения азота, анализируются механизмы их образования и основные особенности образования оксидов азота при сжигании газомазутного топлива.

При сжигании газа, мазута и твердого топлива в топках котла наряду с продуктами сгорания ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ ) в атмосферу поступают загрязняющие твердые (зола и сажа), а также газообразные вредные для человека и окружающей природы вещества: оксиды серы ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ), оксиды азота ( $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$ ) и другие вредные соединения.

Доля промышленных оксидов азота незначительна, но из-за неравномерного распределения в атмосферном воздухе возникают концентрации, опасные для человека, животного и растительного мира. Соединение оксидов азота и серы с атмосферной влагой приводит к кислотным дождям. Азотная кислота этих дождей превращает находящиеся в почве нитраты, которые усваиваются растениями. Ущерб, наносимый кислотными дождями природе, постройкам, памятникам архитектуры, культурным ценностям, носит глобальный характер; восстановить потери невозможно. Кроме того, оксиды азота приводят к потерям озона в приземном слое атмосферы, образованию смога. Выбросы оксидов азота тепловыми электростанциями составляют около 60 % от их общего поступления в атмосферу.

Сумму оксида азота NO и диоксида NO<sub>2</sub> обозначают как NO<sub>x</sub>. Оксид азота представляет собой ядовитый бесцветный газ, сильно действующий на кровь и нервную систему; диоксид азота- пар бурокрасного цвета, сильно действующий на дыхательные пути, лёгкие и усиливающий действие канцерогенных веществ. Диоксид азота относится ко второму классу опасности, оксид азота- к третьему классу.

Установлено, что в дымовых газах котлов содержится и гемииоксид (закись) азота N<sub>2</sub>O. Закись азота способствует усилению парникового эффекта в атмосфере и уменьшению озонного слоя Земли. Заметная концентрация гемииоксидов N<sub>2</sub>O обнаружена лишь в выхлопных газах газовых турбин. Роль гемииоксида при трансформации оксидов азота в настоящее время не вполне понятна.

Измерения показали, что в продуктах сгорания органических топлив оксиды азота составляют 97 - 98 %.

Нормативные удельные выбросы оксидов азота (концентрации в уходящих газах) отражены в ГОСТ 28269 - 88 и в Экологической программе РАО "ЕЭС России". В новых газомазутных котлах паропроизводительностью D<sub>≥</sub>420 т/ч они составляют (в пересчёте на сухой газ и избыток воздуха α=1.4) 125 мг/м<sup>3</sup> при сжигании природного газа, 185 мг/м<sup>3</sup> при сжигании мазута.

Предельно допустимые значения удельных выбросов оксидов азота для существующих газомазутных котлов той же паропроизводительности составляют 385 мг/м<sup>3</sup> при сжигании природного газа и мазута.

В тоже время реальные выбросы оксидов азота газомазутными котлами находятся в диапазоне 450 - 1500 мг/м<sup>3</sup>, в зависимости от типа котла и паропроизводительности. Следовательно, для каждого типа котла необходимо разрабатывать мероприятия для снижения вредных выбросов до уровня нормативных требований.

К настоящему времени для газомазутных котлов освоены и продолжают совершенствоваться различные способы снижения выбросов оксидов азота: технологические методы; методы очистки дымовых газов.

Методы очистки дымовых газов включают в себя около полутора десятков методов и разделяются на две подгруппы: методы очистки дымовых газов от  $\text{NO}_x$  и методы одновременной очистки от  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ . Группа методов снижения выбросов оксидов азота, называемых технологическими, основывается на механизмах образования оксидов азота при сжигании топлива в топке котла.

Механизмы образования оксидов азота в полной мере ещё не разработаны. Достаточно отметить, что имеющиеся математические модели процессов выгорания газообразного или жидкого топлива включают 140 обратимых реакций реагирования 38 исходных веществ, промежуточных и конечных продуктов реакции.

Многочисленные исследования позволяют с большой достоверностью выделить три основные группы оксидов азота, образующихся при горении: "термические", "быстрые" и "топливные".

Трудности заключаются в выделении зон образования основных групп оксидов азота и основных факторов, способствующих их образованию.

В таблице 1 представлена сводная информация о механизмах образования оксидов азота и факторах, как способствующих их образованию, так и их подавляющих.

Модель процесса горения является многофакторной и многоэкстремальной задачей, не имеющей до настоящего времени аналитического решения. В этой связи, при исследовании процессов горения в топках котлов общепринятым остается экспериментальный метод.

Широким признанием у специалистов пользуются труды авторов: И.Я. Сигала, Л.М. Цирульникова, П.В. Рослякова, С. Фенимора и других учёных.



## Оксиды азота

Таблица 1

Название	Место образования	Температура К	Механизм образования	Способствующие факторы	Факторы, подавляющие образование
Быстрые	Корень факела во фронте пламени	1000-1500	Реактивное молекулярного азота с углеводородными радикалами; образование аминов вследствие с промежуточными радикалами	Богатые смеси, низкий выход $\alpha = 0.5-0.8$ ; Локальные зоны $\alpha < 1$ разделение топлива и воздуха на начальном участке факела в специальных горелках; Увеличение температуры или скорости нагрева продуктов сгорания на начальном участке факела	Тщательное перемешивание топлива и воздуха; $\alpha = 1.03-1.05$
Топливные	Начальный участок факела	950-1300	Переход топливного азота в промежуточные радикалы с последующим окислением	Тщательное перемешивание топлива и воздуха, богатые смеси $\alpha = 0.8-0.9$ ; сильное влияние концентрации кислорода (квадратичная зависимость); Содержание азота и вид азотосодержащих в топливе	Разделение топлива и воздуха на начальном участке факела в специальных горелках; $\alpha = 1.03-1.05$ , присутствие метана
Термические	Область максимальных температур	Более 1800	Диссоциация молекул на атомы и радикалы, окисление азота воздуха, соединение атомарного азота с кислородом и гидроксидом	Рост температуры (экспоненциальная зависимость) высокая концентрация кислорода; низкий выход $\alpha = 1.05-1.35$ (в зависимости от вида сгораемого топлива); время пребывания в зоне горения (выход окислов пропорционален времени); высокая теплоемкость топлива; высокая калорийность топлива	Снижение температуры и концентрации кислорода; Уменьшение $\alpha$ до 1.03-1.05 -- из условия начала быстрого увеличения продуктов неполного сгорания (CO)

Установлено, что выход термических оксидов азота полностью определяется тремя параметрами: максимальной температурой факела  $T_{\max}$ , коэффициентом избытка воздуха горелки  $\alpha_r$  и временем пребывания в температурном диапазоне, где происходит эмиссия термических оксидов (для природного газа рассматривается температурный диапазон от  $T_{\max}$  до 1800 К).

Для практического решения вопроса о методе подавления оксидов азота применительно к конкретному котлу предложено использовать две характеристики зоны активного горения, определяющие выход термических оксидов: теплонапряжение зоны активного горения топлива (ЗАГ)  $q_{\text{нр}}$  и условное время пребывания в зоне активного горения  $\tau_{\text{нр}}$ :

$$q_{\text{нр}} = \frac{B Q_H^p}{z(a+b)z_{\text{нр}} h_{\text{нр}} + 1,5ab}$$

$$\tau_{\text{нр}} = \frac{abz_{\text{нр}} h_{\text{нр}}}{B V_{\Gamma} T_{\Gamma} / 273}$$

Из обобщения экспериментальных данных следует, что чем больше теплонапряжение ЗАГ, тем меньше время пребывания в ЗАГ и больше выход азота; чем меньше теплонапряжение в ЗАГ, тем больше время пребывания в ЗАГ и меньше выход оксидов азота.

Вторая глава работы посвящена методам снижения вредных выбросов. Все известные технологические методы снижения образования оксидов азота в топках энергетических котлов можно выделить в следующие группы: рециркуляция дымовых газов; нестехиометрическое сжигание топлива, ступенчатое сжигание; впрыскивание в топку котла воды, пара и других веществ; режимные, конструкторские методы комбинация нескольких методов.

Установлено, что основное влияние рециркуляции газов состоит в снижении максимальной температуры и концентрации реагирующей веществ, в частности, кислорода в зоне горения, растягивании зон

горения, уменьшении скорости цепных реакций образования оксидов азота. Задачей снижения вредных выбросов с помощью рециркуляции газов, как и другими методами, занимались ВТИ, ЦКТИ, институт газа АН УССР, САФ ВНИИ Промгаз, ЛПИ, МЭИ и другие организации.

В таблице 2 приведены положительные и отрицательные факторы влияния рециркуляции дымовых газов.

Нестехиометрическое сжигание топлива и его развитие - ступенчатое сжигание – В.Р. Котлер относит к методам, основанным на снижении избытка воздуха. Основная сущность этих методов заключается в том, что на начальном участке факела подается количество воздуха меньше необходимого для полного сгорания топлива, т.е.  $\alpha < 1$ . Остальное количество воздуха поступает в последующие участки факела, где происходит дожигание топлива. Предполагается, что при этом происходит подавление термических и топливных оксидов азота. Основное сгорание топлива происходит в высокотемпературной зоне  $\alpha = 0.85 - 0.95 < 1$  (восстановительная зона). Дожигание топлива в окислительной зоне с  $\alpha = 1.3 - 1.4$  характеризуется существенным снижением максимальных температур, что уменьшает образование оксидов азота.

Ввод в зону горения воды и водяного пара, относится к способу снижения образования оксидов азота за счет снижении температуры в факеле.

Кроме снижения температуры происходит перестройка температурного поля факела:  $T_{max}$  смещается к корню факела. Это вызвано интенсификацией реакции горения на начальном участке факела, в основном за счет дожигания СО. Одновременно уменьшается время пребывания в зоне горения. Все отмеченное выше предопределяет специфические требования к аппаратам ввода воды и пара в топку: по месту их расположения, дальности и качеству распыла и т. д.

## Рециркуляция дымовых газов (РДГ)

Таблица 2

Влияние РДГ	Способы подачи РДГ, степень влияния на выход $\text{NO}_x$ (+)	Положительное влияние	Отрицательное влияние
<p>Снижение максимальной температуры горения;</p> <p>Уменьшение скорости цепных реакций образования оксидов азота;</p> <p>Снижение концентраций кислорода в зоне горения;</p> <p>Растягивание зоны горения;</p> <p>Уменьшение яркости факела;</p> <p>Уменьшение доли лучистого теплообмена;</p> <p>Увеличение доли конвективного теплообмена;</p> <p>Влияние рециркуляции ослабевает с уменьшением нагрузки котла.</p> <p>Топт=520-720 К <math>\tau = 0.05-0.20</math></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- В под топком +</li> <li>- в щлицы под горелки +++</li> <li>- в кольцевой канал вокруг горелки +++</li> <li>- в дутьевой воздух +++++</li> <li>- навстречу топливо-воздушной смеси +++++</li> <li>- в природный газ ++++++</li> <li>- в кольцевой канал горелки, разделяющий воздух на центральный и периферийный +++++</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- снижение <math>\text{NO}_x</math>;</li> <li>- возможность регулировать топочные процессы (температура перегретого пара);</li> <li>- устранение локальных тепловых нагрузок;</li> <li>- снижение коррозии поверхностей нагрева;</li> <li>- возможность организовать ступенчатое сгорание при подаче РДГ в нижний ярус;</li> <li>- эффективность РДГ растёт при переходе к высокотемпературному сжиганию топлива при увеличении длины факела и снижается при уменьшении нагрузки котла.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Увеличение концентрации тяжёлых углеводородов</li> <li>- снижение КПД котла пропорционально увеличению доли <math>\tau</math></li> <li>- недопустимое повышение температуры перегретого пара</li> <li>- рост затрат электроэнергии на собственные нужды</li> <li>- дополнительные капитальные затраты</li> <li>- проблемы с обеспечением стабильного воспламенения факела, особенно при сжигании тяжёлых сортов мазута.</li> </ul>

К режимным методам относят: снижение избытка воздуха в горелках и влияние тепловой нагрузки котла.

Обобщение данных исследований на котлах большой и средней мощности показало, что зависимость выхода  $\text{NO}_x$  от нагрузки близко степенной и может быть представлена выражением:  $C_{\text{NO}_x} / (C_{\text{NO}_x})_0 = (D/D_0)^{1,25}$ . Однако, в котлах с меньшим тепловым напряжением эта зависимость более пологая.

Исследования показывают, что положительные эффекты снижения образования  $\text{NO}_x$  с помощью конструкторских методов связаны с воздействием на уровень максимальных температур, с благоприятным распределением температур и уменьшением времени пребывания в топке, то есть с воздействием на характеристики зоны активного горения.

В настоящее время считается, что основные принципы и технологические методы снижения выбросов  $\text{NO}_x$  хорошо изучены. Основная задача: отыскание оптимальных форм их технической реализации. Общепризнано, что наилучшие результаты здесь могут быть достигнуты в направлении поиска оптимального сочетания нескольких методов подавления  $\text{NO}_x$ .

**В третьей главе** приведено описание математической модели процессов сжигания топлива.

В реальных условиях факельного сжигания топлива в котлах наблюдается сложный комплекс химических, аэродинамических и теплообменных процессов. По этой причине в ВТИ, МЭИ и других организациях были предприняты попытки построения математических моделей топки котла на основе не только уравнений химической кинетики, но и широкого использования эмпирических данных.

Работы П.В. Рослякова и Л.Е. Егоровой стали дальнейшим успешным развитием расчетных методов оценки выбросов оксидов азота.

В существующих условиях проведение широкомасштабных экспериментальных исследований при реконструкции котельного

оборудования не представляется возможным, это привело к необходимости выполнения теоретического исследования на основе специально созданной математической модели топочных процессов. За основу взят нормативный метод. Модель дополнена и развита с целью возможностей расчета во времени коэффициента тепловыделения и выбросов оксидов азота.

Созданная модель позволяет выполнять расчеты величин суммарной концентрации оксидов азота, с помощью модифицированного уравнения Я.Б. Зельдовича (путем учета влияния на энергию активации температуры процесса) методом послойного зонирования:

$$\frac{CNO_x}{dt} = C_{N_2} \cdot C_{O_2} \cdot e^{\frac{1290}{R \cdot T \phi}} - \text{уравнение Я.Б. Зельдовича};$$

текущая концентрация оксидов азота:

$$CNO_{xi} = 0.291 \cdot CN_2^{0.98} \cdot CO_{2i}^{1.5} \cdot A ;$$

$$A = e^{-0.645 \cdot \ln \frac{10877}{(T_{zi} + 273)}} \cdot B ;$$

$$B = 1 + 2.1 \cdot (\ln 0.9 + r) ;$$

текущая концентрация кислорода:

$$CO_{2i} = CO_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) + \frac{CO_2}{\alpha} \cdot e^{-0.98 \cdot \tau_i} ;$$

концентрация кислорода на входе в топку:

$$CO_2 = 21 \cdot a \cdot \frac{V_B^0}{V}, \% .$$

Материальный и тепловой баланс топочного устройства выполнен в рамках общепринятых рекомендаций. При этом расчет значений энтальпии продуктов сгорания и воздуха выполнен с использованием аппроксимирующего уравнения для изобарной теплоемкости компонентов в виде полинома. Разделение исследуемого пространства на зоны осуществлялось по временному фактору, введенному путем

аппроксимации закона тепловыделения в топочном объеме с помощью уравнения Вибе И.И., с поправкой путем введения в него факторов, учитывающих влияние на скорость сгорания коэффициента избытка воздуха и степени рециркуляции газов:

$$\beta_i = 1 - e^{-6.908 \cdot \left(\frac{\tau_i}{\tau^*}\right)^{1.2 \cdot \alpha(1+r)}}$$

где  $\tau^*$  - время пребывания газов в топке.

Такое построение математической модели позволяет вводить необходимое количество зон, задавая интервал счета по времени сколь угодно малым, например, соотносясь с возможностями вычислительных средств.

В качестве варьируемых факторов модель позволяет использовать вид и состав топлива, возможно исследование процесса одновременного сжигания различных топлив при изменении их количественного соотношения; коэффициент избытка и температуру воздуха; степень рециркуляции и температуру рециркулируемых газов; геометрические параметры топки и другие аэродинамические и термодинамические параметры.

В результате расчета по математической модели получаются характеристики изменения по длине факела таких величин, как температура, скорость газов, концентрации свободного кислорода, азота, оксидов азота, а также интегральные показатели: температура на выходе из топки, суммарная концентрация оксидов азота и свободного кислорода, время пребывания газов в топке и др.

Проверка адекватности модели показала приемлемую сходимость расчетных значений с известными из литературных источников и экспериментальных данных параметрами топочных процессов.

Математическая модель котла тестировалась для условий его работы на природном газе, мазуте, а также на комбинации газа и мазута

(доле газа 80, 60, 50, 40, 20 %, всего 125 вариантов расчетов). На указанных режимах котла расход дутьевого пара увеличивался от нулевого значения до 0.4 кг за секунду, в зависимости от количества сжигаемого мазута. В таблице 3 представлены результаты расчетов с помощью разработанной математической модели на выборочных режимах работы котла ТГМ – 84.

Таблица 4

Топливо\ $\alpha$	1.05	1.10	1.15	1.20	г	G
Газ	529	533	534	535	0	0
Газ	350	360	369	376	0.2	0
Мазут	604	612	616	617	0	0
Мазут	540	548	554	558	0	0.4
Мазут	438	452	463	479	0.15	0
Мазут	397	411	420	422	0.15	0.4

Для получения аналитических зависимостей до проведения исследований на натуральных объектах использовалось ортогональное центральное композиционное планирование (ОЦКП).

Центральные композиционные планы позволяют получить зависимости в виде полинома второй степени любого из необходимых параметров котла  $Y_i$  от коэффициента избытка воздуха, доли рециркулирующих газов или вводимого пара:

$Y_i = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{i,k=1}^n a_{ik} X_i X_k + \sum_{i=1}^n a_{ii} X_i^2$ , где  $n$  – число исследуемых факторов.

Четвертая глава посвящена методике опытного исследования рабочих процессов котла. На каждой нагрузке при постоянной доле мазута проводилось не менее трех наладочных опытов с целью определения критических избытков воздуха и оптимальных режимов работы котла и вспомогательного оборудования.



Критическим считается избыток, при котором концентрация  $\text{CO}$  в дымовых газах не превышает 0.02%. Распределение воздуха и топлива по горелкам производится таким образом, чтобы во всех включенных в работу горелках поддерживались одинаковые производительность и избыток воздуха.

Исследования котла ТГМ-84 после его реконструкции с целью снижения выбросов окислов азота выполнялись в такой последовательности:

1. Определялась достоверность показаний основных расходомеров котла, тарировались газовыпускные насадки горелок. Длительность испытаний 2 часа. Количество испытаний-4.
2. Определялись присосы воздуха в топку, конвективную шахту и на участке РВП – дымосос. Определение присосов в топку проводится по методике Южтехэнерго путем создания вверху топочной камеры повышенного разряжения (до 30 мм. В. ст.). Для проведения опыта из работы выводятся регуляторы соотношения топливо-воздух и разряжения в топочной камере. Длительность испытания 3 часа, количество опытов - три.
3. Оптимальная степень рециркуляции дымовых газов определяется по сочетанию режимных параметров и факторов:
  - поддержание оптимальной температуры перегрева пара при избытках воздуха;
  - минимальная концентрация оксидов азота в дымовых газах при отсутствии химнедожога ( $\text{CO} < 0.02\%$ ), температура уходящих газов не должна превышать минимально-допустимую по условиям защиты холодных пакетов РВП от коррозии, температура перегрева пара не должна превышать 530 °С при полностью закрытых впрыскивающих пароохладителях;
  - максимальная доля рециркуляции определяется достижением одного из ограничивающих параметров или приближении к границам установки защит;

На каждом режиме работы проводилось 5-7 измерений, в итоговые данные включались среднеарифметические значения регистрируемых величин. На всех режимах работы котла обеспечивалась максимальная полнота сгорания топлива. На каждом режиме работы котла обеспечивалась стабилизация режимов горения в течение двух - трех часов.

Прибор TESTO-300 укомплектован NiCr-Ni термопарой, погрешность измерений составляет 0.5% от измеренного значения температуры. Погрешность измерения давления ( разрежения ) составляла 1.5% измеряемой величины. Потери тепла, измерения КПД котла выполнялись с разрешающей способностью 0.1%. Измерения  $O_2$ ,  $CO_2$  производились с погрешностью 0.2% с быстродействием менее 20 с. Погрешность измерения оксидов CO, NO – 5% от измеренного значения ( до 2000 ппм ), быстродействие менее 30 с.

**В пятой главе** представлены результаты испытаний котла при сжигании газа и мазута.

Типовые наладочные испытания котла ТГМ-84Б после его реконструкции проводились при работе на газе и разной паропроизводительности: 190, 210, 230, 250, 300, 320, 350 т/ч; разных коэффициентах избытка воздуха и долях рециркуляции газов (всего 29 вариантов испытаний), в каждом испытании измерялось и контролировалось около 80 параметров.

Анализ этого большого массива данных, к сожалению, не позволял установить надежные количественные соотношения влияния режимных параметров котла на загрязнения окружающей среды, не позволял получить достаточного количества информации к составлению режимных карт котла с данными о величине вредных выбросов для обоснованного расчета оплаты природоохранным организациям.

Методика составления режимных карт эксплуатации котла с минимальными выбросами оксидов азота состояла в следующем: идентифицируется математическая модель процессов при сгорании

топлива по результатам 4-6 вариантов испытаний; рассчитываются параметры котла в характерных точках факторного поля; по алгоритмам центрального композиционного планирования строится регрессионная модель котла и графики зависимостей параметров котла от факторов, определяющих режим работы.

Идентификация математической модели проводилась путем сравнения результатов испытаний с результатами расчетов по математической модели топочных процессов. С помощью уточненной модели топочных процессов котла получена дополнительная информация о параметрах в характерных точках факторного поля.

Получены следующие выражения для температуры на выходе из котла и для оксидов азота:

$$T_{\text{вых}} = -28846 + 56694\alpha + 10.03\gamma + 392.16\alpha\gamma - 26783\alpha^2 - 6436\gamma^2$$

$$\text{CNO}_x = -699.43 + 1661\alpha + 169.56\gamma + 78.43\alpha\gamma - 836.8\alpha^2 - 700.85\gamma^2$$

На рис. 1 представлена зависимость  $\text{CNO}_x$  от  $\alpha$  и  $\gamma$ . При  $\alpha = 1.04$  увеличение доли рециркулируемых газов на 1% приводит к снижению величины вредных выбросов оксидов азота на 1.2%.

При  $\alpha = 1.09$  увеличение доли рециркулируемых газов на 1% приводит к снижению величины вредных выбросов оксидов азота на 1.3%. Минимальное количество выбросов оксидов азота наблюдается при  $\alpha = 1.09$  и  $\gamma = 0.105$ . При этом секундный расход топлива также наименьший. Степень разложения оксидов азота составляет 17.8% в сравнении с режимом  $\alpha = 1.04$  и  $\gamma = 0$ .

В настоящее время обостряется проблема - использование альтернативного газу топлива: мазут, уголь. Находят применение высокоэффективные парогазотурбинные установки, работающие на низкосортных углях, мазуте и имеющие удовлетворительные экологические характеристики. С другой стороны, в последнее время

Зависимость концентрации оксидов азота от доли газов рециркуляции  
при фиксированных значениях коэффициента избытка воздуха,  
сжигание газа в котле ТГМ-84

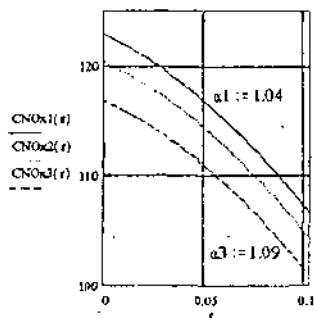


Рис. 1

Зависимость концентрации оксидов азота от коэффициента избытка  
воздуха при фиксированных значениях доли газов рециркуляции,  
сжигание мазута и газа в котле ТГМ-84

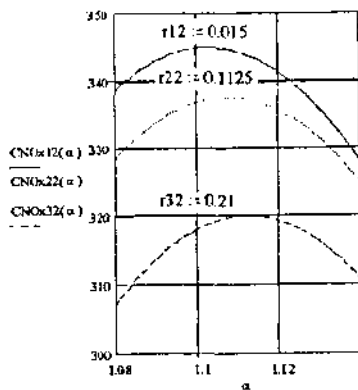


Рис. 2

интенсивно растет цена на газ, что также заставляет переходить на сжигание мазута или мазута вместе с газом.

Лабораторные испытания котла ТГМ-84Б после его реконструкции проводились при работе на мазуте и паропроизводительности 320 т/ч, разных коэффициентах избытка воздуха и долях рециркуляции газов (три варианта испытаний).

Пять вариантов испытаний проведено при паропроизводительности котла 210, 300 и 355 т/ч, когда котел работал на газе и мазуте (доля природного газа по теплу составляла 0,485 – 0,504).

Получены следующие выражения для температуры на выходе из котла для оксидов азота:

$$t_{\text{вых}} = -19697 + 37960\alpha - 60.45\gamma + 256.41\alpha\gamma - 17282\alpha^2 - 1794\gamma^2$$

$$[\text{NO}_x] = -14366 + 26695\alpha - 1325\gamma + 1197\alpha\gamma - 12111\alpha^2 - 568\gamma^2$$

На рис. 2 представлена зависимость  $\text{CNO}_x$  от  $\alpha$  и  $\gamma$ . При  $\alpha = 1.08$  увеличение доли рециркулируемых газов на 1% приводит к снижению величины вредных выбросов оксидов азота на 0,46%. Минимальное количество эмиссии оксидов азота имеет место при  $\alpha = 1.08$  и  $\gamma = 0.21$ . Степень разложения оксидов азота составляет 9,4% (в сравнении с режимом работы котла  $\alpha = 1.08$  и  $\gamma = 0$ ).

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ ПО РАБОТЕ

Эффективная методика наладки котла на минимальные выбросы оксидов азота должна учитывать не только ужесточение норм на вредные выбросы, но и технические ограничения, а также и экономические требования.

Снижения выбросов в окружающую среду можно добиться со значительно меньшими затратами за счет применения положений

теории планирования испытаний и на основе математического моделирования процессов сжигания топлива.

3. Оптимальную степень рециркуляции дымовых газов следует определять с учетом минимальной концентрации оксидов азота на выходе из котла и при отсутствии химнедожога. В тоже время следует выдерживать ограничения по температуре уходящих газов из условия защиты холодных пакетов РВП от коррозии, температуре перегрева пара при полностью закрытых впрыскивающих пароохладителях (не более 530 °С).
4. Защита окружающей среды от вредных выбросов оксидов азота путем рециркуляции дымовых газов более эффективна при сгорании газа (снижение на 18%, доля газов рециркуляции 0.1). При сгорании смеси топлив (газ-мазут) величина вредных выбросов понижается на 9% (доля газов рециркуляции 0.21).
5. Одно из радикальных и эффективных направлений снижения выхода оксидов азота – это двухступенчатое сжигание топлива, которое не ухудшает технико-экономические показатели котла.
6. Типовые наладочные испытания, в силу производственных обстоятельств, не позволяют установить надежные количественные соотношения влияния режимных параметров котла на загрязнение окружающей среды и не позволяют получить достаточного количества информации к составлению режимных карт.
7. Экономический эффект от выполненного исследования обусловлен двумя составляющими: за счет снижения выбросов оксидов азота в атмосферу (на 18% при сгорании газа и на 9% при сгорании мазута и газа) и уменьшением трудозатрат на наладку котла.

**Список научных трудов, опубликованных по теме диссертации:**

1. Грига А.Д., Раменский М.П. Контроль рабочих процессов при подаче рециркулирующих газов в топку газомазутного котла. //Тезисы докладов

всероссийской НТК "Аттестация методик и проблемы технических измерений" - М., 1997. - 1 с.

2. Грига А.Д., Раменский М.П. Организация процессов горения, уменьшение оксидов азота в продуктах сгорания. //Тезисы докладов XLIV научно – технической сессии по проблемам газовых турбин – М., 1997, с.53 – 54.

3. Грига А.Д., Староверов В.В., Раменский М.П. Эмиссия оксидов азота, математическая модель и планирование эксперимента. //Тезисы докладов конференции по региональной научно – технической программе " Научные, технические, экономические и экологические проблемы г. Волжского " - Волжский., 1997, с.20.

4. Грига А.Д., Раменский М.П. Организация процесса сгорания топлива в топке котла ТГМ-84 с целью снижения эмиссии вредных веществ. //Тезисы докладов III межвузовской научно – практической конференции студентов и молодых ученых г. Волжского-Волжский., 1997, с.157 - 159.

5. Патент на изобретение "Распылитель жидкости", заявка № 97108905 / 25(009368) от 30.05.97, ВНИИГПЭ, Грига А.Д., Раменский М.П., Староверов В.В. и другие.

6. Раменский М.П. Методы снижения вредных выбросов энергетических котлов. //Реконструкция энергетических котлов тепловых электростанций: Тематический сборник научных трудов- Волжский., 1998, с. 6-29.

7. Староверов В.В., Раменский М.П. Математическая модель топочных процессов: Тематический сборник научных трудов- Волжский., 1998, с.40 - 43.

8. Грига А.Д., Раменский М.П. Влияние коэффициента избытка воздуха и степени рециркуляции на выбросы вредных веществ энергетического котла. Планирование испытаний: Тематический сборник научных трудов- Волжский., 1998, с. 43-44.

9. Грига А.Д., Староверов В.В., Раменский М.П. Математическая модель топочных процессов: Материалы Международной научно- технической

школы и Российской научной школы "SYSTEM PROBLEMS OF RELIABILITY, MATHEMATICAL MODELING AND INFORMATION TECHNOLOGIES" –Москва- Сочи :15- 24 сентября 1998,часть 4, с. 87-88.

10. Грига А.Д., Раменский М.П., Раков Н.В. Особенности горения в топках энергетических котлов и вредные выбросы оксидов азота: Тезисы докладов конференции по региональной научно- технической программе « Научные, технологические и экологические проблемы г. Волжского» - Волжский:,1998, с. 81-82.

11. Раменский М.П. Планирование испытаний газомазутного котла для исследования его характеристик: Материалы Международной научно-технической конференции и Российской научной школы молодых ученых и специалистов "SYSTEM PROBLEMS OF RELIABILITY, MATHEMATICAL MODELING AND INFORMATION TECHNOLOGIES" –Москва - Сочи :15-29 сентября 1999,часть 5, с. 11-12.

12. Раменский М.П., Грига А.Д. Метод оптимизации снижения выбросов оксидов азота // Теплоэнергетика, 2000, N 7, с.68-71.