

На правах рукописи



Визгавлюст Наталья Викторовна

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА
В ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ТОПКАХ КОТЛОВ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Старченко Александр Васильевич

Официальные оппоненты: Михайленко Сергей Ананьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», профессор кафедры тепловых электрических станций

Борzych Владимир Эрнестович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Тюменского государственного архитектурно-строительного университета»,
заведующий кафедрой информатики и информационных технологий

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
г. Кемерово

Защита состоится 22 декабря 2014 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при ФГАОУ ВО Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, корпус 8, ауд. 217

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО Национального исследовательского Томского политехнического университета и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан 21 октября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.269.13



А.С. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность: Рост потребления энергии сопровождается увеличением вредных выбросов, загрязняющих окружающую среду. При этом не менее 40% от общего количества выбрасываемых в атмосферу оксидов азота приходится на долю тепловых электрических станций (ТЭС), работающих на органическом топливе. Образование оксидов азота при горении такого топлива приводит к существенным нарушениям природного равновесия.

Необходимость не только поддерживать на приемлемом уровне экологические показатели действующего оборудования, которое в целом характеризуется высокой долей износа, но и обеспечить соответствие современным требованиям для вновь вводимых мощностей предопределяет потребность в совершенствовании и развитии расчетных методик образования вредных выбросов. Прежде всего это относится к процессам генерации оксидов азота, для расчетной оценки которых важное значение имеют кинетические модели.

Однако именно вопросы выбора и использования химических кинетических схем, их значимости для расчетных оценок образования оксидов азота применительно к численному моделированию в приложении к исследованию реальных технологий топливосжигания нуждаются в дальнейшей проработке. Учитывая особенности состояния российской теплоэнергетики и тенденции ее развития, наиболее актуальной проблема минимизации вредных выбросов азота становится для котельных установок на пылеугольном топливе.

Проведение исследований в данном направлении своевременно, поскольку современный уровень развития математического моделирования позволяет решать задачи теплоэнергетики менее затратным путем численного исследования, преимущества которого наиболее очевидны при необходимости перебора технических решений и проработке нескольких вариантов рассматриваемой проблемы.

Работа выполнялась в соответствии с основными направлениями научной деятельности Томского политехнического университета («Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов», «Развитие теоретических основ и разработка технологий производства энергии и энергоресурсосбережения в различных отраслях»), а также в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.» по мероприятию «Разработка технологии практической оценки эффективного использования непроектных органических топлив в пылеугольных камерах сгорания энергогенерирующих установок на основе численного решения и анализа физико-химических процессов горения». Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания НИР (тема 13.948.2014/К).

Целью диссертационного исследования является развитие математической модели процесса образования оксидов азота применительно к

пылеугольным топкам котлов на основе анализа кинетических схем генерации NO_x , разработка усовершенствованного пакета прикладных программ и его апробирование в численных исследованиях для оценки технических решений по внутритопочному подавлению вредных выбросов.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- теоретический и расчетный анализ используемых в расчетной практике кинетических схем химических реакций образования оксидов азота;
- разработка физической и математической модели генерации оксидов азота при сжигании угольной пыли в топках котлоагрегатов с учетом выбранной кинетической схемы;
- разработка численного метода решения трехмерных конвективно-диффузионно-кинетических уравнений, составляющих основу математической модели образования оксидов азота при сжигании пылевидного топлива;
- разработка NO_x -постпроцессора для пакета прикладных программ, тестирование на его основе используемых моделей и численного метода путем сравнения с другими кинетическими схемами генерации NO_x и с данными экспериментов при сжигании угольной пыли;
- проведение вычислительного эксперимента, позволяющего оценить влияние технологических методов снижения образования оксидов азота (изменение избытка воздуха, организация ступенчатого сжигания и т.п.), с выявлением наиболее перспективных решений для действующего котлоагрегата.

Научная новизна полученных результатов:

- разработана новая математическая модель образования оксидов азота при сжигании пылеугольного топлива в топках котлоагрегатов, отличающаяся тем, что наряду с химическими реакциями по кинетической схеме Митчелла–Тэрбелла¹ учитывает перенос компонентов конвекцией и диффузией, а также зависимость скорости выхода топливного азота из угольных частиц на стадии пиролиза от температуры и содержания летучих;
- создан NO_x -постпроцессор для пакета FIRE 3D², предназначенный для расчета локальных концентраций оксидов азота и их предшественников внутри топочного объема котла, который использует оригинальный численный метод решения трехмерных конвективно-диффузионно-кинетических уравнений;
- получены новые данные и дополнены представления о взаимосвязи параметров топочной среды с генерацией оксидов азота применительно к котлу с жидким шлакоудалением при сжигании ирша-бородинского угля;
- разработана методология применения пакета FIRE 3D с NO_x -постпроцессором (пакет FIRE 3D– NO_x) для прогнозирования и управляющего воздействия на генерацию оксидов азота в пылеугольных топках, позволяющая оптимизировать применение вариантов подавления вредных выбросов в атмосферу.

1 Mitchell J.W., Tarbell J.M. A kinetic model of nitric oxide formation during coal combustion // AIChE Journal.– 1982.– Vol.28. №2. –P.302-31.

2 Старченко А.В., Заворин А.С., Гиль А.В., Красильников С.В., Обухов С.В. Применение пакета прикладных программ Fire 3D для исследования вариантов перевода котлов на непроектное топливо // Горение твердого топлива: сб. докладов. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2006. – Ч. 1. – С. 214–220.

Практическая значимость работы:

- полученные результаты исследования и методология численного анализа образования NO_x могут применяться при проектировании и реконструкции котельных агрегатов с пылеугольными топками с целью снижения вредных выбросов;
- показана возможность применения пакета прикладных программ FIRE 3D- NO_x для решения задач при разработке и выборе вариантов технических решений по улучшению экологических характеристик для котельных установок на пылеугольном топливе;
- данные, полученные в результате численного исследования топочных процессов для котла БКЗ-320-140ПТ, могут использоваться для наладки и ведения эксплуатационных режимов, обеспечивающих минимализацию вредных выбросов с дымовыми газами.

Разработанный программный комплекс FIRE 3D- NO_x принят к использованию Барнаульским подразделением ОАО «Подольский машиностроительный завод» (ЗИО) для предпроектного анализа и выбора вариантов модернизации пылеугольных топок.

Программа для расчета концентрации монооксида азота в пылеугольных топках котлов зарегистрирована в государственном реестре программ для ЭВМ (свидетельство № 2014611378).

Методика проведенного исследования используется в учебном процессе в лекционных курсах и лабораторных практикумах по направлению 141100 «Энергетическое машиностроение» (профиль «Котлы, камеры сгорания и парогенераторы АЭС») в Томском политехническом университете.

Достоверность результатов обеспечивается применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений, согласованием расчетов с экспериментальными данными других авторов, а также с результатами, полученными по нормативному методу теплового расчета.

На защиту выносятся:

- математическая модель образования оксидов азота при сжигании пылеугольного топлива в топках котлоагрегатов;
- численный метод решения конвективно-диффузионно-кинетических уравнений и разработанный NO_x -постпроцессор;
- результаты расчетов аэротермохимических топочных процессов, полученные с использованием модернизированного пакета FIRE 3D- NO_x и разработанной технологии его применения для прогнозирования уровня NO_x в топке.

Апробация работы: основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (г. Томск, 2001г., 2003г., 2011г.), Региональной научной конференции студентов и молодых ученых «Наука. Техника. Инновации» (г. Новосибирск, 2001г.), семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (г. Томск, 2001г., г. Барнаул, 2003г.), XXVI-м Сибирском теплофизическом

семинаре (г. Новосибирск, 2002г.), Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008г., 2009г., 2012г., 2013г.), Всероссийском семинаре кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике (г. Красноярск, 2009г.), Региональной научно-технической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2009г., 2011г., 2012г.), Всероссийской молодежной конференции «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики» (г. Томск, 2012г.), Всероссийской конференции с международным участием «Горение твердого топлива» (г. Новосибирск, 2012г.).

Публикации: По теме диссертационного исследования автором опубликовано 20 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых изданиях из списка ВАК РФ и получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (98 наименований), приложения и содержит 129 страниц, 7 таблиц и 46 рисунков.

Личное участие автора характеризуется определяющим вкладом в разработку математической модели, выбор и реализацию численного метода решения, разработку NO_x -постпроцессора, дополнением пакета прикладных программ FIRE 3D постпроцессором NO_x , самостоятельным выбором исследуемых методов подавления оксидов азота, обработкой и анализом результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и решаемые для ее достижения задачи, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы.

В первой главе на основе анализа опубликованных источников охарактеризованы вредные вещества, образующиеся при сжигании энергетических топлив в камерах сгорания котлов тепловых электрических станций. Подробно рассмотрены механизмы генерации термических, «быстрых» и топливных оксидов азота. Представлен обзор способов снижения их образования при сжигании твердого топлива, рассмотрены современные кинетические схемы, а также математические модели образования оксидов азота при горении угольной пыли.

Показано, что для проведения параметрических расчетов с целью моделирования образования оксидов азота при сжигании пылеугольного топлива в топках котельных агрегатов целесообразно использовать сокращенные кинетические схемы, обеспечивающие предсказание концентрации NO в камере сгорания с требуемой точностью. Кроме кинетической схемы модель генерации оксидов азота при факельном сжигании угольной пыли должна быть обеспечена информацией о протекании процессов выхода и горения летучих топлива, догорания коксового остатка, учитывать неизотермичность, турбулентную диффузию и перенос компонентов топочной среды осредненным движением. Этим требованиям удовлетворяют модели:

Дж.В. Митчелла и Дж.М. Тэрбелла; И.Н.Гусева, Л.И.Зайчика и Н.Ю.Кудрявцева; И.К. Гуо и С.К. Чана; М. Ксю, М.Г. Карвало.

Учитывая комплексный характер вредного воздействия оксидов азота на окружающую среду, процессы их образования в соответствии с целью работы определены в качестве предмета исследования. Исходя из анализа состояния проблемы, поставлены задачи исследования.

Во второй главе описывается модель образования оксидов азота, для которой сформулированы физическая и математическая постановка задачи о горении угольных частиц в топочном объеме.

Физическая постановка задачи предполагает, что подача топливоздушная смеси и воздуха не зависит от времени, равномерно распределена по выходному сечению горелок. Поскольку топливо подвергается сушке в системе пылеприготовления, считается, что полидисперсные частицы угля поступают в горелочные устройства с влажностью $W^{nl} \leq W^{su}$. Далее частицы, попадая в высокотемпературное топочное пространство, подвергаются нагреву. Вследствие этого происходит выход летучих веществ, сгорающих в объеме, затем начинается догорание коксового остатка, в результате чего образуются монооксид и диоксид углерода. Монооксид углерода реагирует с молекулярным кислородом воздуха.

Подходящим методом для моделирования в пространственной постановке аэродинамики, горения и теплообмена в топочном устройстве, сжигающем пылеугольное топливо, является метод, совмещающий Эйлера и Лагранжевы подходы для описания движения газа и взвешенных частиц. В данной работе общие уравнения движения, теплообмена и горения в газовой фазе описаны на основе Эйлера способа, т.е. используются пространственные уравнения баланса массы, импульса, концентраций газовых компонентов и энергии для газовой смеси. Для описания движения и теплообмена одиночных частиц топлива вдоль их траектории с учетом обратного влияния дисперсной фазы на несущую среду применяется Лагранжев подход. С помощью двухпараметрической « $k-\varepsilon$ » модели турбулентности рассчитываются турбулентные характеристики газа, на которые оказывают влияние движущиеся частицы. Радиационный теплообмен представляется в рамках P1-приближения метода сферических гармоник, который показывает хорошие результаты применительно к топкам, сжигающим пылеугольное топливо.

Наиболее важные суммарные химические реакции, которые участвуют в образовании NO при сжигании угля, показаны на рис. 1. Реакции учитывают выход азотсодержащих компонентов летучих во время пиролиза угля, взаимодействие NO при гетерогенном горении кокса, образование топливных, «быстрых» и термических NO.

Следуя этой схеме, процесс образования оксидов азота может быть описан следующим образом. При быстром нагреве частицы угля происходит ее термическое разложение (пиролиз), в результате которого имеет место выход летучих компонентов и азота топлива. При этом часть связанного азота топлива (до 70–80% от всего количества) практически мгновенно (реакция 1 на рис. 1.) переходит в газовую фазу в виде цианидов. Затем происходит газофазное

горение углеводородных компонент летучих и гетерогенное догорание коксового остатка. Остаточный азот (20–30% от всего азота топлива), равномерно распределенный по частице кокса, окисляется прямо в NO со скоростью, пропорциональной скорости догорания коксового остатка (реакция 2). Образовавшиеся при выходе летучих цианиды переходят (реакция 3) в амины, которые, реагируя с O₂ (реакция 4) или NO (реакция 5), могут соответственно приводить либо к образованию оксидов азота, либо к восстановлению N₂ из NO. Кроме того важными с точки зрения конверсии оксидов азота являются реакция образования HCN в результате взаимодействия углеводородов с NO (реакция 6) и гетерогенная реакция между NO и частицей кокса (реакция 7).

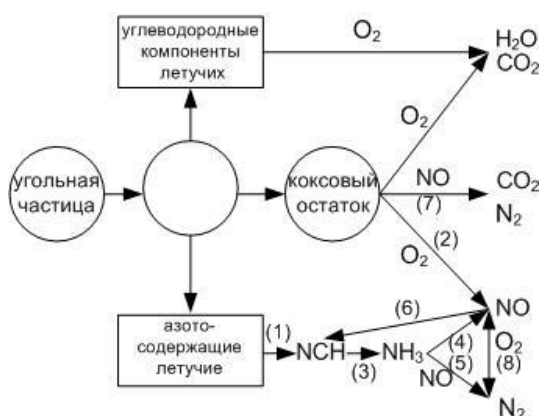


Рисунок 1 Схема суммарного кинетического механизма горения угольной частицы и образования оксидов азота (на основе модели Митчелла-Тэрбелла)

Образование оксидов азота описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \rho C_{\text{HCN}} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{\text{HCN}}}{\partial x_i} \right) + J_1 - J_3 + \frac{M_{\text{HCN}}}{M_{\text{NO}}} J_6, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho C_{\text{NH}_3} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{\text{NH}_3}}{\partial x_i} \right) - J_4 - J_5 + \frac{M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{HCN}}} J_3, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho C_{\text{NO}} U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{Sc_t} \frac{\partial C_{\text{NO}}}{\partial x_i} \right) + J_2 + \frac{M_{\text{NO}}}{M_{\text{NH}_3}} J_4 - \frac{M_{\text{NO}}}{M_{\text{NH}_3}} J_5 + J_8 - J_6 - J_7, \quad (3)$$

где C_{NH_3} – массовая концентрация NH₃; C_{HCN} – массовая концентрация цианидов HCN; C_{NO} – массовая концентрация оксидов азота NO; $M_{\text{HCN}}, M_{\text{NO}}, M_{\text{NH}_3}$ – молекулярные веса компонентов; J_1 – скорость образования HCN; J_2 – скорость выхода оксидов азота при горении коксового остатка; J_3 – скорость перехода цианидов в амины; J_4 – скорость окисления аминов до оксидов азота; J_5 – скорость восстановления молекулярного азота из NO; J_6 – скорость восстановления HCN; J_7 – скорости гетерогенной реакции конверсии оксидов азота вследствие взаимодействия с углеродом коксовой частицы; J_8 – скорость образования термических оксидов азота.

Источниковые члены уравнений (1) – (3), описывающие химические превращения азотсодержащих компонентов NO, HCN, NH₃, представляются следующим образом:

$J_1 = \frac{M_{HCN}}{M_N} \frac{a_N N^\Gamma}{V^\Gamma} J_{vap}$, где $N^\Gamma = N^P / (1 - W^P - A^P)$ – содержание азота в горючей части топлива, кг/кг; a_N – коэффициент, который определяет количество азота в летучих компонентах угля (в данной работе впервые предложено в модели Митчелла–Тэрбелла¹ для вычисления $a_N = 0,7 \cdot \gamma$, использовать формулу Л.И.Зайчика³ $\gamma = \frac{0.4861 \cdot V_0 + 3545 \exp(-10308/\theta)}{1 + 3545 \exp(-10308/\theta)}$, в которой θ – температура частицы топлива, К); J_{vap} – скорость выхода летучих;

$J_2 = \frac{M_{NO}}{M_N} \frac{N_{char}^\Gamma}{1 - V^\Gamma} J_{char}$, где $N_{char}^\Gamma = (1 - a_N - a_{ash}) N^\Gamma$, a_{ash} – доля азота топлива, оставшегося в золе (в данной работе для оценки a_{ash} впервые предполагается использовать $a_{ash} = 1 - \gamma$); J_{char} – скорость горения коксового остатка;

$$J_3 = k_3(T_g) \frac{M}{M_{O_2}} \rho_g c_{HCN} c_{O_2}; \quad J_4 = \frac{k_4(T_g) \rho_g c_{NH_3} c_{O_2} M}{M_{O_2} (1 + k_{den}(T_g) c_{O_2} M / M_{O_2})};$$

$$J_5 = k_5(T_g) \frac{M}{M_{NO}} \rho_g c_{NH_3} c_{NO}; \quad J_6 = k_6(T_g) \frac{MM_{HCN}}{M_{NO} M_{vol}} \rho_g c_{NO} c_{vol};$$

$$J_7 = k_7(T_p) \frac{\rho_p^{char} c_{NO} \rho_g}{\rho_p^0 D_p};$$

$$J_8 = 2k_0(T_g) \rho_g^2 M_{NO} \left[\frac{k_{17}(T_g) (C_{O_2} / MM_{O_2})^{0.5} (C_{N_2} / M_{N_2})}{1 + k_{-17}(T_g) C_{NO} M_{O_2} / (k_{18}(T_g) C_{O_2} M_{NO})} - \frac{k_{-17}(T_g) k_{-18}(T_g) / k_{18}(T_g) (M_{O_2} / M c_{O_2})^{0.5} (C_{NO} / M_{NO})^2}{1 + k_{-17}(T_g) C_{NO} M_{O_2} / (k_{18}(T_g) C_{O_2} M_{NO})} \right].$$

Задание граничных условий для системы (1)–(3): на входных границах – нулевые значения концентраций C_{NH_3} , C_{HCN} , C_{NO} ; на стенках и на выходных границах – равенство нулю производной от искомой величины по нормали.

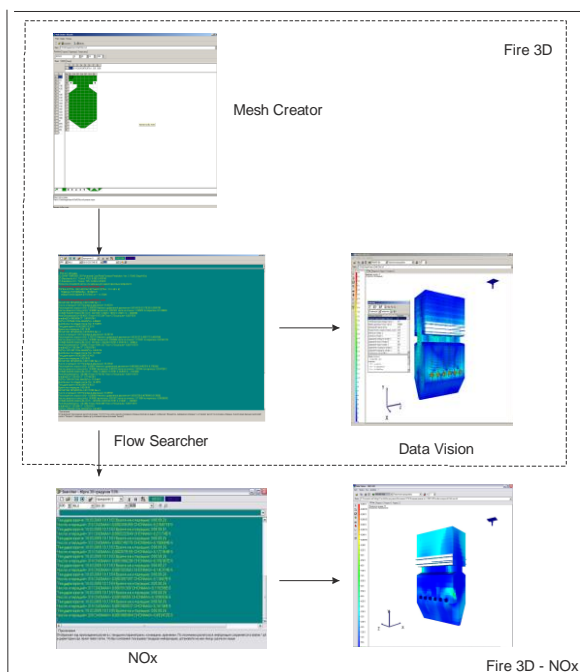
В третьей главе представлен численный метод решения системы конвективно-диффузионно-кинетических уравнений (1)–(3), который опирается на использование обеспечивающего выполнение интегральных законов сохранения метода конечного объема, монотонных, не допускающих появления нефизических (отрицательных) значений концентраций, разностных аппроксимаций конвективных, диффузионных и кинетических членов уравнений, эффективного метода решения получившихся в результате аппроксимации разностных уравнений. Оригинальность предложенного метода решения уравнений системы (1)–(3) заключается в том, что в отличие от обычно применяемых схем расщепления по физическим процессам (на первом шаге расщепления учитывается только конвективно-диффузионный перенос, на

3 Гусев И.Н., Зайчик Л.И., Кудрявцев Н.Ю. Моделирование образования оксидов азота в топочных камерах // Теплоэнергетика. – 1993. – №1. – с. 32-36.

втором – решаются уравнения химической кинетики) для решения подобных задач в данной работе численный метод строится для всех трех рассматриваемых процессов (конвекция-диффузия-кинетика) и тем самым существенно снижается проблема жесткости дифференциальных уравнений, присущая уравнениям химической кинетики.

На основе модифицированной схемы Митчелла–Тэрбелла и разработанного численного метода решения трехмерных уравнений для концентраций создана программа, которая используется в качестве постпроцессора к пакету FIRE 3D для комплексного исследования топочных процессов и оценки экологических параметров работы существующих или разрабатываемых котельных агрегатов, сжигающих пылеугольное топливо. Вследствие того, что в топке концентрация компонентов NO , HCN , NH_3 на порядки меньше концентраций O_2 , N_2 и летучих, химические реакции с их участием не оказывают существенного влияния на результаты теплового расчета топки, поэтому исследование образования оксидов азота может быть проведено «офф–лайн», т.е. после расчета аэродинамики и теплообмена в пылеугольной топке.

Структура модернизированного в части учета уровня оксидов азота в топке котла программного комплекса FIRE 3D– NO_x представлена на рис. 2.



Mesh Creator – для импорта расчетных сеток трехмерной геометрии из текстового формата;

Flow Searcher – для расчета турбулентных течений и теплообмена с возможностью применения лагранжевого подхода для описания горения и движения частиц;

Data Vision – для визуализации конечного результата вычислений дополняется механизмом образования NO_x ;

NO_x – постпроцессор NO_x .

Рисунок 2 Схема организации пакета прикладных программ FIRE 3D– NO_x

Оценка достоверности полученных результатов проводилась тестированием разработанных модели и метода решения при сжигании пыли в экспериментальной установке ВТИ (Титов С.П., Бабий В.И., Барбараш В.М.), на экспериментальных данных ТПУ (Федецкий И.И.) для котла БКЗ–220–100 (жидкое шлакоудаление, назаровский уголь) и на экспериментальных данных предприятия «Сибтехэнерго» (Серант Ф.А.) для котла ПК–39 (твердое шлакоудаление, экибастузский уголь).

Результаты тестирования показали, что построенная численная модель образования оксидов азота в пылеугольных камерах сгорания удовлетворительно предсказывает значения основных параметров как на выходе из топки, так и внутри исследуемой области.

В четвертой главе приведен анализ результатов численных исследований образования оксидов азота в топке котельного агрегата БКЗ–320–140–ПТ (рис. 3) при сжигании ирша-бородинского угля Канско-Ачинского бассейна.

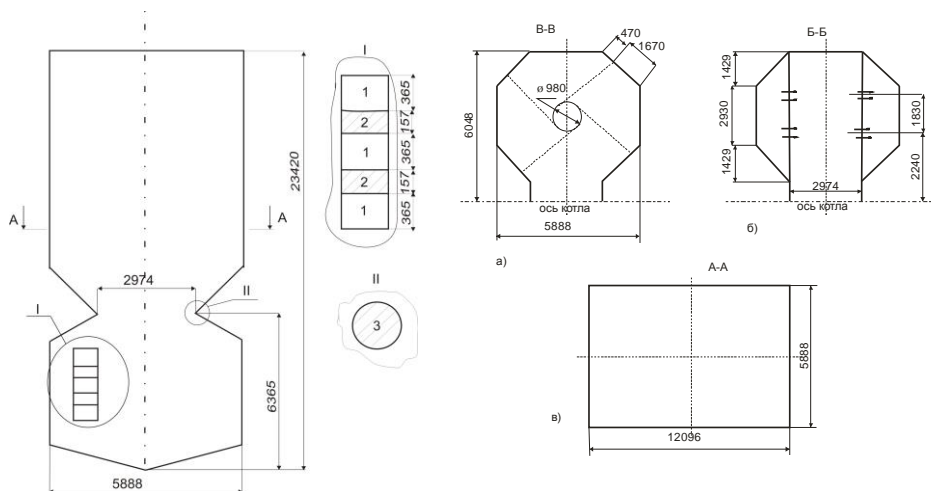


Рисунок 3 Геометрические характеристики топки котла БКЗ–320–140: а) горизонтальное сечение камеры горения на уровне горелок; б) горизонтальное сечение пережима топочной камеры; в) горизонтальное сечение камеры охлаждения
1–подача вторичного воздуха, 2–подача топливной аэросмеси, 3–подача сушильного агента

Данный котел выбран для анализа численного расчета физических процессов с помощью пакета прикладных программ FIRE 3D–NO_x по следующим соображениям. На нем было реализовано и апробировано в эксплуатационных условиях сочетание целого ряда инженерных решений по технологическому внутритопочному подавлению вредных выбросов⁴, которое обеспечило достижение предельно допустимого уровня для действующего котла с топкой жидкого шлакоудаления. Основу этих мероприятий составило внедрение системы подачи к горелкам пыли высокой концентрации под разрежением, создаваемым установленными в горелочных блоках паровыми эжекторами. После оптимизации расхода и температуры эжектирующего пара система была усовершенствована путем замены горячего воздуха в качестве транспортирующего агента на рециркулирующие дымовые газы, отбираемые после дымососов. Все это можно рассматривать как вариации ступенчатого сжигания, которое воздействует на соотношение «топливо-воздух». Кроме того был использован эффект ступенчатости за счет обычного перераспределения угольной пыли и воздуха как по ярусам щелевых горелок, так и по боковым вертикальным воздушным каналам. Дополнительными средствами подавления вредных выбросов послужили использование местоположения сбросных сопел сушильного агента, сорбентных свойств возврата уноса и др.

Не все реализованные на этом котле процессы пока доступны для имитации в пределах разработанной модели, поэтому численные исследования выполнены в пределах задач определения зависимости концентраций в

⁴ Будилов О.И., Заворин А.С. Опыт улучшения экологических характеристик тепловой электростанции. – Томск.: Изд-во «Красное знамя», 1994. – 100с.

дымовых газах оксидов азота от нагрузки котла, от избытка воздуха и от распределения топлива по ярусам горелок.

Другим немаловажным обстоятельством выбора котла в качестве объекта для численных экспериментов послужило то, что все измерения на нем проводились с участием независимых представителей авторитетных на тот период по данной проблематике организаций (СредазВНИИПромГаз, СибВТИ, Союзтехэнерго, Сибтехэнерго и др.).

При работе с ППП FIRE 3D-NO_x варьирование избытком воздуха в топке достигалось за счет изменения скорости подачи вторичного воздуха с фиксированным расходом топлива на котел, изменение нагрузки – изменением расхода топлива на котел с постоянным избытком воздуха, ступенчатое сжигание – перераспределением количества топлива по ярусам горелок при постоянных расходе топлива на котел и избытке воздуха. В качестве показателя организации ступенчатого сжигания принято отношение $\delta = V_1/V_p$, где V_1 – расход топлива на нижний ярус, V_p – расход топлива на котел.

При изменении нагрузки котла в диапазоне 220–320 т/ч концентрация оксидов азота возрастает на 120 мг/м³ (рис. 4) за счет повышения температурного уровня в топочной камере (температура на выходе из топки изменялась от 1100 °С до 1217 °С).

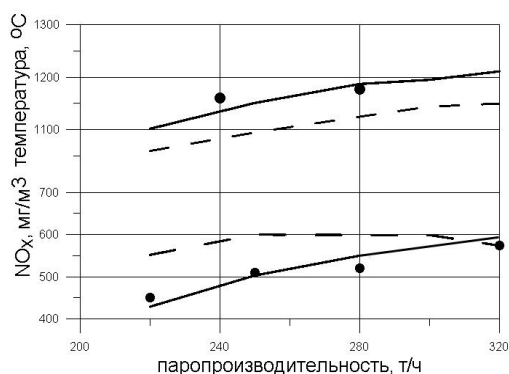


Рисунок 4 Изменение температуры на выходе из топки и концентрации NO_x от паропроизводительности:
● – измерения³,
— — — расчет с помощью ППП FIRE 3D-NO_x,
- - - расчет по нормативному методу

Результаты численного моделирования имеют достаточно близкие значения к измерениям и качественно тоже незначительно отличаются от них. Исследованный диапазон изменения нагрузки, как у всякого котла с жидким шлакоудалением ограниченный температурным уровнем, обеспечивающим надежный выход жидкого шлака, демонстрирует достаточно эффективное влияние задействованных средств подавления образования оксидов азота и дает базу для сравнения с другими варьируемыми параметрами топочного процесса.

Снижение концентрации кислорода в зоне горения топлива приводит к уменьшению образования оксидов азота как термических, так и топливных, что было доказано неоднократно при испытаниях на различных котлах. Однако применение этого метода как основного для борьбы с образованием оксидов азота может привести к появлению недожога, загрязнения поверхностей нагрева и коррозии.

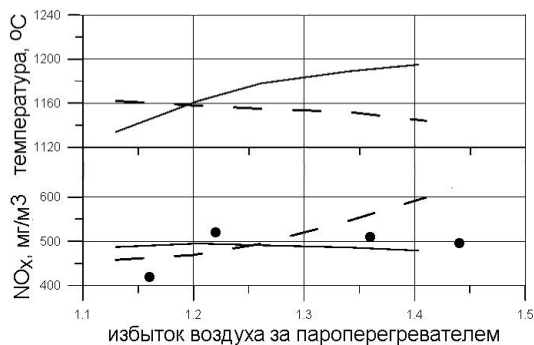


Рисунок 5 Изменение температуры на выходе из топки и концентрации оксидов азота в зависимости от избытка воздуха:

● – измерения ³,
 — — расчет с помощью ППП FIRE 3D–NO_x,
 - - - - расчет по нормативному методу

Результаты математического моделирования при изменении избытка воздуха (за пароперегревателем от 1,13 до 1,42) при постоянной нагрузке котла 300 т/ч (рис. 5) в большей степени совпадают с данными натуральных экспериментов на котле, однако концентрация оксидов азота изменяется менее существенно.

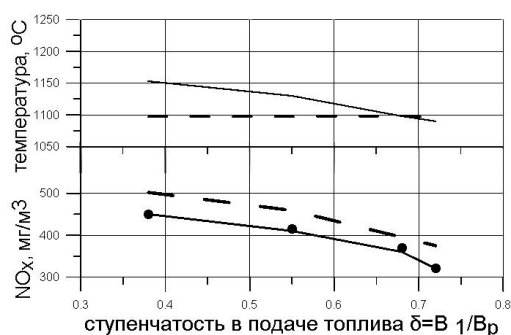


Рисунок 6 Изменение температуры на выходе из топки и концентрации оксидов азота от ступенчатости подачи топлива:

● – измерения ³,
 — — расчет с помощью ППП FIRE 3D–NO_x,
 - - - - расчет по нормативному методу

При изменении показателя распределения топлива при ступенчатом сжигании от 0,38 до 0,72 результаты численного исследования и натуральных измерений имеют достаточно близкие значения (рис. 6). Увеличение подачи топлива на нижний ярус для данного котлоагрегата является оптимальным средством подавления оксидов азота в топке: NO_x уменьшается на 20% (100–150 мг/м³).

Подход, основанный на ступенчатой организации сжигания, обеспечивает температуру в зоне горения на достаточном высоком уровне и тем самым нормальное жидкое шлакоудаление. Поэтому в отличие от других способов он может использоваться для стабилизации выбросов в сочетании с изменением нагрузки котла, компенсируя, например, таким образом образование NO_x при ее увеличении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Тестовые расчеты по выбору эффективной кинетической схемы образования оксидов азота показали, что их точность в наиболее значительной мере зависит от моделирования процесса выхода азота топлива вместе с летучими и при горении коксового остатка. С учетом этого наиболее полное описание образования оксидов азота дает кинетическая схема Митчелла–Тэрбелла, позволяющая определить локальные концентрации цианидов и аминов в топочной камере.

2. Разработанная математическая модель генерации оксидов азота при горении пылевидного топлива в топках котлоагрегатов учитывает наряду с

химическими реакциями перенос компонентов реагирующей смеси конвекцией и диффузией, а также зависимость скорости выхода топливного азота из угольных частиц на стадии пиролиза от температуры и содержания в них летучих веществ.

3. Разработанный ранее пакет прикладных программ FIRE 3D, модернизирован путем дополнения его вычислительным блоком, предназначенным для расчета локальных концентраций оксидов азота и их предшественников в объеме топки и использующим оригинальный численный метод решения трехмерных конвективно-диффузионно-кинетических уравнений.

4. Технология применения пакета FIRE 3D–NO_x с усовершенствованным вычислительным кодом является эффективным инструментом для прогнозирования генерации оксидов азота в пылеугольных топках котлов, что подтверждено результатами тестовых численных экспериментов, показавших хорошую сходимость с данными натурных измерений.

5. Вариативными вычислительными экспериментами с анализом комплекса интегральных и локальных характеристик топочной среды установлено, что для котлов, надежность работы которых определяется поддержанием необходимого уровня температуры в зоне образования и удаления шлакового расплава, наиболее результативным путем внутритопочного подавления генерации оксидов азота является реализация технологических схем ступенчатого сжигания.

6. Организация ступенчатого сжигания бурого Канско-Ачинского угля в полукотельных топках с жидким шлакоудалением типа БКЗ–320–140ПТ с рассогласованием соотношения «топливо–воздух» как по вертикали, так и по горизонтали, обеспечивает сокращение концентрации NO_x на выходе из топки на 100-150 мг/м³.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в научных журналах, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных результатов диссертаций:

1. **Иванова, Н.В.** Моделирование образования оксидов азота при горении угольной пыли в топках / Н.В. Иванова, А.В. Старченко // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 147–151.
2. **Иванова, Н.В.** Моделирование образования оксидов азота в процессах сжигания пылевидного топлива / Н.В. Иванова, А.В. Старченко // Ползуновский вестник. – 2004. – № 1. – С. 163–167.
3. **Визгавлюст, Н.В.** Моделирование образования оксидов азота в пылеугольных топках при сжигании органического топлива / Н.В. Визгавлюст // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 57–61.

Публикации в других научных изданиях

4. **Иванова, Н.В.** Моделирование кинетики образования топливных оксидов азота при горении пылевидного топлива / Н.В. Иванова, А.В. Старченко //

- Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы седьмой Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – Т. 2. – С. 66–69.
5. **Иванова, Н.В.** Моделирование образования оксидов азота при горении угольной пыли в топках / Н.В. Иванова, А.В. Старченко // Наука. Техника. Инновации: труды региональной научной конференции студентов и молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – Ч. 2. – С. 119–121.
 6. **Ivanova, N.V.** Mathematical simulation of the nitric oxides formation in power-plant fuel burning / N.V. Ivanova, A.V. Starchenko // Modern Technique and Technologies: the eight International Scientific and Practical Conference of Students. –Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2002. – P. 36–37.
 7. **Иванова, Н.В.** Численное исследование топочных процессов при сжигании пылеугольного топлива / Н.В. Иванова, А.В. Старченко, С.В. Красильников // XXVI Сибирский теплофизический семинар. – Новосибирск, 2002. – С. 225–226.
 8. **Иванова, Н.В.** Численное исследование образования оксидов азота при горении угольной пыли в топках / Н.В. Иванова, А.В. Старченко // Энергетика: экология, надежность, безопасность: материалы докладов IX Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – С. 178–182.
 9. **Визгавлюст, Н.В.** Расчет образования оксидов азота при сжигании пылеугольного топлива в топочной камере котла ПК-39-2 Ермаковской ГРЭС / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко // Современные техника и технологии: труды XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – Т. 3. – С. 345–349.
 10. **Визгавлюст, Н.В.** Образование оксидов азота в топке котла БКЗ-320-140 при сжигании непроектных топлив / А.В. Гиль, Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко // Всероссийский семинар кафедр вузов по теплофизике и теплоэнергетике. – Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2009. – С. 22.
 11. **Визгавлюст, Н.В.** Численный анализ образования оксидов азота в топке котла БКЗ-420-140 при замещении проектного топлива / Н.В. Визгавлюст, А.В. Гиль, М.В. Сафонова // Современные техника и технологии: труды XV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 3. – С. 259–260.
 12. **Визгавлюст, Н.В.** Расчет образования топливных оксидов азота при горении пылеугольного топлива с использованием различных кинетических схем / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко // Теплофизические основы энергетических технологий: материалы региональной научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009 – С. 166–172.
 13. **Визгавлюст, Н.В.** Прогнозирование образования оксидов азота при сжигании пылеугольного топлива на примере топочной камеры котла БКЗ-320-140 / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко // Теплофизические основы энергетических технологий: труды II Всероссийской научно-практической

- конференции с международным участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – С. 219–222.
14. **Визгавлюст, Н.В.** Численное исследование образования оксидов азота в топочной камере котла БКЗ-320-140 от избытка воздуха / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко, А.В. Гиль // Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы XVII Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: СПБ Графикас, 2011. – С. 108–109.
 15. **Визгавлюст, Н.В.** Численное исследование влияния избытка воздуха на образование оксидов азота в топочной камере котла БКЗ-320-140 / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко, А.В. Гиль // Горение твердого топлива: труды VIII Всероссийской конференции с международным участием. – Новосибирск: Изд-во ИТ СО РАН, 2012. – С. 41.
 16. **Визгавлюст, Н.В.** Численное исследование образования оксидов азота в топке котла БКЗ-320-140 / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко, А.В. Гиль, А.А. Васильев // Теплофизические основы энергетических технологий: труды III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – С. 183–187.
 17. **Визгавлюст, Н.В.** Исследование образования оксидов азота в топке котла БКЗ-320-140 / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко, А.В. Гиль, А.А. Васильев // Химическая физика и актуальные проблемы энергетики: труды Всероссийской молодежной конференции. – Томск: ТПУ, 2012. – С. 60–61.
 18. **Визгавлюст, Н.В.** Численное исследование образования оксидов азота в топке котла БКЗ-320-140 от паропроизводительности / А.А. Васильев, С.П. Дубровин, Н.В. Визгавлюст // Современные техника и технологии: труды XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – Т. 3. – С. 161–162.
 19. **Визгавлюст, Н.В.** Численное моделирование образования оксидов азота при ступенчатой подаче топлива в топку котла БКЗ-320-140 / А.А. Васильев, С.П. Дубровин, Н.В. Визгавлюст // Современные техника и технологии: труды XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – Т. 3. – С. 199–200.
 20. **Визгавлюст, Н.В.** Программа для расчета концентрации монооксида азота в пылеугольной топке котлоагрегата / Н.В. Визгавлюст, А.В. Старченко // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014611378. Бюлл. прогр. – 2014. – № 1.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Подписано к печати «___» «___». 2014.
Формат 60 x 84 / 16 . Бумага офсетная.
Плоская печать. Усл. печ.л._____.
Уч.- изд. л. _____ Тираж _____ экз.
Заказ № _____. Цена свободная.
ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ № 1 от 18.08.94 .
Типография, 634034, Томск, пр. Ленина, 30.

