

На правах рукописи

ТРИНЧЕНКО
Алексей Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВИХРЕВЫХ ТОПОК ЗА СЧЕТ
РАЗЛОЖЕНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА НА КОКСОВЫХ ЧАСТИЦАХ**

Специальность 05.14.14 – Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2002

Работа выполнена на кафедре “Реакторо- и парогенераторостроение” Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ)

Научный руководитель
— доктор техн. наук, доцент *Шестаков Станислав Михайлович.*

Официальные оппоненты:
— доктор техн. наук, профессор *Бельский Александр Петрович;*
— канд. техн. наук, доцент *Филонов Александр Федорович.*

Ведущее предприятие — *ОАО "Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И.Ползунова" (НПО ЦКТИ) (Санкт-Петербург).*

Защита состоится “ 24 ” декабря 2002 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, в ауд. 411 ПГК.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан " 22 " ноября 2002 г.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.229.04.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

К.А. Григорьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Охрана окружающей среды является одной из наиболее важных задач, стоящих перед человечеством в XXI веке. Этому вопросу были посвящены международные конференции ООН: Стокгольм-72; Стокгольм-82; Рио-де-Жанейро-92; Киото-97. Они дали рекомендации по защите окружающей среды и определили пути снижения выбросов вредных веществ.

Доля тепловой энергетики в выбросах вредных веществ в атмосферу составляет 27 %. При горении топливно-воздушной смеси в топках котлов образуются оксиды азота и серы, бенз(а)пирен, оксиды углерода и твердые частицы. Оксиды азота относятся к наиболее токсичным компонентам дымовых газов. Для соответствия нормативам предельно допустимых выбросов, содержание оксидов азота в ближайшие годы должно быть снижено в 2...5 раз.

В настоящее время для выработки электроэнергии и тепла твердое топливо, в основном, сжигается в пылеугольных котлах, имеющих ряд недостатков, для снижения влияния которых можно использовать низкотемпературный вихревой (НТВ) способ сжигания твердого топлива, разработанный и исследованный под руководством д.т.н., профессора В.В.Померанцева. Дальнейшее развитие НТВ-технология получила в работах д.т.н., профессора С.М.Шестакова при сжигании дробленого топлива по схеме ЛПИ-ИТЭЦ-10, на базе которой предложено создание экологически чистой котельной установки (ЭЧКУ). Сжигание дробленого топлива происходит с высокой эффективностью при одновременном снижении выбросов оксидов азота, а многократная циркуляция топливных и золовых частиц приводит к связыванию оксидов серы с минеральной частью топлива. Поэтому использование НТВ-технологии и прежде всего схемы ЛПИ-ИТЭЦ-10 является перспективным направлением снижения выбросов вредных веществ в атмосферу.

При НТВ-сжигании в нижней вихревой зоне (НВЗ) топки циркулирует значительное количество реагирующих коксовых частиц, на поверхности которых возможно протекание реакции разложения оксидов азота, что дополнительно снижает эмиссию NO_x . Однако, до настоящего времени, этот процесс был не достаточно изучен, ввиду чего возникла необходимость проведения дополнительных исследований.

Исследования проводились в соответствии с несколькими государственными и отраслевыми научно-техническими программами, в частности, 0.01.02 “Создание новых видов оборудования для производства тепловой и электрической энергии”, ОЦ 002 “Создать и освоить на крупных ТЭЦ новое теплофикационное оборудование...”, “Освоение КАТЭКа”, “Экологически чистая энергетика” и др.

Целью работы являлось повышение экологических показателей низкотемпературных вихревых топок за счет разложения оксидов азота на коксовых частицах.

Задачами исследования являлись:

- анализ механизмов образования оксидов азота (в присутствии оксидов серы и бенз(а)пирена) в топочных камерах, сжигающих органические (преимущественно твердые) топлива;
- разработка модели генерации и разложения оксидов азота на поверхно-

сти горящих угольных частиц в условиях многократной циркуляции;

- разработка расчетной методики, ее адаптация к условиям НТВ-топки; определение достоверности методики и ее тестирование;

- разработка на основе вариантных оптимизационных расчетов рекомендаций по режимам работы НТВ-топок и конструктивным решениям их узлов, которые позволят повысить экологические показатели НТВ-топок.

Научная новизна:

- разработана методика, алгоритм и программа расчета генерации и разложения оксидов азота на поверхности циркулирующих коксовых частиц при выгорании полифракционного топлива в НТВ-топках;

- на основе расчетного анализа выявлены зависимости уровня эмиссии оксидов азота от режимных факторов: 1) фракционного состава топлива, 2) способа сжигания, 3) ступенчатого ввода воздуха, 4) степени рециркуляции дымовых газов, 5) концентрации кислорода в НВЗ НТВ-топки.

Практическая ценность:

- разработаны рекомендации по режимам работы НТВ-топок, позволяющие снизить выбросы оксидов азота на ~30 % за счет их разложения на поверхности коксовых частиц путем оптимизации фракционного состава топлива, ступенчатого ввода воздуха, ввода рециркуляции и конструктивного совершенствования узлов НТВ-топок;

- методика может быть применена для расчета и оптимизации процесса эмиссии NO_x в других топочных устройствах и энергетических установках;

- разработанные рекомендации могут быть использованы при модернизации и замене изношенного оборудования ТЭЦ, с целью повышения их экологических показателей.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечиваются применением современных методов математического моделирования, корректной оценкой погрешностей введенных допущений, удовлетворительным совпадением результатов расчетов с опытными данными по концентрациям NO_x в топочном объеме НТВ-топки, а так же с данными других авторов, полученными иными методами.

Апробация работы. Основные результаты исследований апробированы на научных конференциях:

1. Межвузовская научная конференция “Современные научные школы: перспективы развития” (С-Петербург, 1997).

2. XXVII Неделя науки СПбГТУ (С-Петербург, 1998).

3. XXVIII Неделя науки СПбГТУ (С-Петербург, 1999).

4. Научно-практическая конференция “Внедрение современных технологий энергосбережения в промышленность и коммунальное хозяйство” (С-Петербург, 1999).

5. XXIX Неделя науки СПбГТУ, (С-Петербург, 2000).

6. XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ, (С-Петербург, 2001).

7. Научно-практическая конференция “Древесные отходы - потенциальный заменитель традиционных видов топлива (уголь, мазут, газ)” (С-Петербург, 2002).

8. На семинарах кафедры “Реакторо- и парогенераторостроение” Санкт-

Петербургского государственного политехнического университета, НПО ЦКТИ им. Ползунова, Санкт-Петербургской лесотехнической академии, Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников (229 наименований), 8 приложений. Основная часть (без приложений) содержит 153 листа машинописного текста, в том числе - 72 рисунка, 9 таблиц. Общий объем работы 187 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования.

В первой главе на основе обзора литературных данных проведен анализ механизмов образования и способов подавления вредных веществ (оксидов азота NO_x , оксидов серы SO_x и бенз(а)пирена $\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) в топочных устройствах котельных установок, сжигающих органические топлива. Показано, что одним из наиболее опасных загрязнителей являются оксиды азота ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), причем основная их доля (>95 %), приходится на монооксид азота NO , а остальная часть – на диоксид NO_2 . Оксиды азота, образующиеся при сгорании органических топлив, подразделяются на "воздушные", "быстрые" и "топливные". При максимальной температуре факела менее 1800 К оксиды азота в основном (до 95 %) образуются из азота топлива. Оценено влияние на эмиссию NO_x : способа сжигания топлива, температурного уровня процесса горения, концентрации кислорода, времени пребывания продуктов сгорания в зоне максимальных температур, содержания азота в топливе.

На основе проведенного анализа методов снижения генерации NO_x показано, что наиболее перспективными являются технологические методы (режимные: снижение избытков воздуха, рециркуляция дымовых газов, впрыск влаги, разложение NO_x на коксовых частицах и конструктивные: стадийное сжигание, сжигание в кипящем (КС) и циркулирующем кипящем слое (ЦКС), использование специальных конструкций горелок и топков), которые реализуются на стадии сжигания топлива и не требуя значительных капитальных затрат, позволяют уменьшить эмиссию NO_x . К ним относится НТВ-технология и схема ЛПИ-ИТЭЦ-10, позволяющая снизить выбросы NO_x ~ на 30 %. Показаны недостатки существующих методов расчета концентрации оксидов азота в уходящих газах котлов, так как они не учитывают динамики образования и разложения NO_x . Обоснована необходимость разработки методики расчета горения топлива с учетом генерации и разложения NO_x на коксовых частицах (особенно применительно к НТВ-технологии, где для этого складываются максимально благоприятные условия).

Во второй главе проведен анализ работ ЛПИ (СПбГПУ) на котлах с НТВ-топками, которые сжигали по схеме ЛПИ ИТЭЦ-10 дробленые бурые и каменные угли (азейский, ирша-бородинский, березовский, черемховский, нерюн-

гринский, кузнецкий). Работа котлов ПК-24 ст. № 9 Иркутской ТЭЦ-10 и БКЗ-420-140-9 Усть-Илимской ТЭЦ проанализирована по результатам комплексных исследований (аэродинамики, зонального и суммарного теплообмена, процесса термомеханического разрушения частиц топлива, его горения, генерации вредных веществ), проведенных под руководством д.т.н., проф. С.М.Шестакова, и предоставленным для использования в настоящей работе. Анализ показал, что НТВ-технология сжигания дробленого топлива обеспечивает уменьшение выбросов в атмосферу оксидов азота, оксидов серы и БП.

Ввиду относительно невысоких температур в ядре горения (< 1600 К) образование “термических” оксидов азота практически не происходит, а имеющиеся NO_x образуются в основном из азота топлива. Уровень концентрации NO_x определяется содержанием азота в исходном топливе (N^f), коэффициентом конверсии азота топлива в NO_x (γ_N), величиной нагрузки и, в меньшей степени, коэффициентом избытка воздуха в топке. Высказано предположение, что пониженная эмиссия NO_x в НТВ-топках связана так же и с протеканием гетерогенной реакции разложения оксидов азота в нижней вихревой зоне (НВЗ) топки на поверхности коксовых частиц:



Анализ опубликованных работ выявил, что этот вопрос не достаточно изучен. Вследствие этого возникла необходимость проведения дополнительных исследований, направленных на изучение разложения оксидов азота в процессе горения в НТВ-топке и влияния режимных факторов (в частности фракционного состава) топлива на величину разложения NO_x .

В заключении главы сформулированы основные задачи работы.

В третьей главе представлена методика расчета процесса горения твердого топлива в НТВ-топке с учетом разложения NO_x на поверхности горящих коксовых частиц. Сложность процесса горения полифракционного топлива в НТВ-топке (особенно горения дробленого топлива), и невозможность описать его единой системой дифференциальных уравнений, приводит к необходимости разделения процесса на отдельные блоки: сложной аэродинамики НТВ-топки, стадийности процесса горения частиц топлива полифракционного состава, их разрушения под воздействием высоких температур и ударных напряжений, генерации и разложения NO_x на коксовых частицах в процессе многократной циркуляции.

Блок 1. Расчет аэродинамики НТВ-топки. НТВ-топка разбивалась на ряд характерных зон (рис.1), каждая из которых описывалась своими закономерностями движения аэродинамических потоков. При разработке принималась плоская картина течения, что допустимо, т.к. нижнее дутье расположено по всей ширине топочной камеры, а горелки по технологии ЛПИ-ИТЭЦ-10 занимают более 85 % фронта котла.

Зона I – развитие полуограниченной струи НД; для расчета использовались зависимости Шестакова С.М. и Усика Б.В. для “настильного” режима течения. Зона II – НВЗ; для ее расчета принималась модель квазитвердого тела – $\omega R = \text{const}$. Зона III – развитие горелочной струи; система плоских струй в сносном потоке (зависимости Абрамовича Г.Н.). Зона IV – верхняя вихревая зона (ВВЗ); модель квазитвердого тела – $\omega R = \text{const}$. Зона V – слабопроточная вихре-

вая зона под верхним козырьком; модель квазитвердого тела – $\omega R = \text{const}$. Скорости в областях, не охваченных I...V, рассчитывались путем линейной аппроксимации в направлениях осей x и y между соответствующими значениями на границах ближайших соседних областей.

Тестирование проведено по результатам исследований “горячей” аэродинамики котлов ПК-24 и БКЗ-420-9 (схема ЛПИ-ИТЭЦ-10). Результаты расчета векторного поля скоростей потоков в НТВ-топке котла ПК-24 представлены на рис. 2; проекции векторов – на рис. 3. Модель позволяет получить вектор \vec{W} в любой точке топочной камеры и замкнуть баланс расходов в сечениях по осям x и y .

Блок 2. Расчет траекторий движения частиц. Движение реагирующей частицы описывалось уравнением Мещерского:

$$m \frac{d\vec{V}}{d\tau} = \sum_{i=1}^k \vec{P}_i + (\vec{W}_p - \vec{V}) \frac{dm}{d\tau}, \quad (2)$$

при этом частицы топлива неправильной формы заменены на шаровые, эквивалентные по объему:

$$\delta_{\text{экв}} = \sqrt[3]{6abc/\pi}. \quad (3)$$

Расчеты траекторий движения частиц в поле скоростей, полученном в блоке 1, проводились путем численного решения уравнения (2), учитывающего влияние двух основных сил: силы аэродинамического сопротивления и силы тяжести, записанного в проекции на оси декартовой системы координат:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dv_x}{d\tau} &= \frac{cf\rho_z}{2} (w_x - v_x) \sqrt{(w_x - v_x)^2 + (w_y - v_y)^2} \\ m \frac{dv_y}{d\tau} &= \frac{cf\rho_z}{2} (w_y - v_y) \sqrt{(w_x - v_x)^2 + (w_y - v_y)^2} - mg \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где: при $Re \leq 1$ $c(Re) = 24/Re$; при $Re > 1$ – $24/Re + 4/\sqrt[3]{Re}$; при $Re > 100$ – 0,48.

Блок 3. Разрушение топливных частиц. Разрушение частиц топлива (на 2 или 4 равных по массе осколков) при ударе об ограждающие топку поверхности нагрева, рассчитывалось по экспериментальной зависимости (с учетом термических напряжений и критической скорости), полученной асп. Синицыным Н.Н.:

$$V_{\text{кр}} = (13,682 + 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot T_{\text{п}} - 265,8 \cdot d - 8,67 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \cdot d) \times \\ \times \exp((-4,4 \cdot 10^{-4} + 9,1 \cdot 10^{-15} \cdot T^{4,19} - 1,48 \cdot 10^{-12} \cdot T_{\text{п}}^{4,19} \cdot d) \cdot \tau), \text{ м/с.} \quad (5)$$

Разрушение частицы происходит в момент, когда ее скорость $V_{\text{част}}$ станет равной или больше критической скорости $V_{\text{кр}}$ при условии удара частицы.

Блок 4. Обработка рассеивочной кривой. Расход натурального твердого топлива полифракционного состава пересчитывался на эквивалентный расход шаровых частиц. Распределение частиц по фракциям описывалось формулой Розина-Раммлера-Беннета:

$$R_{0i} = \exp(-b\delta_{0i}^n), \quad (6)$$

где: b и n – опытные коэффициенты.

Размер самой крупной частицы определялся соотношением:

$$\delta_{01} = (6,9/b)^{1/n}. \quad (7)$$

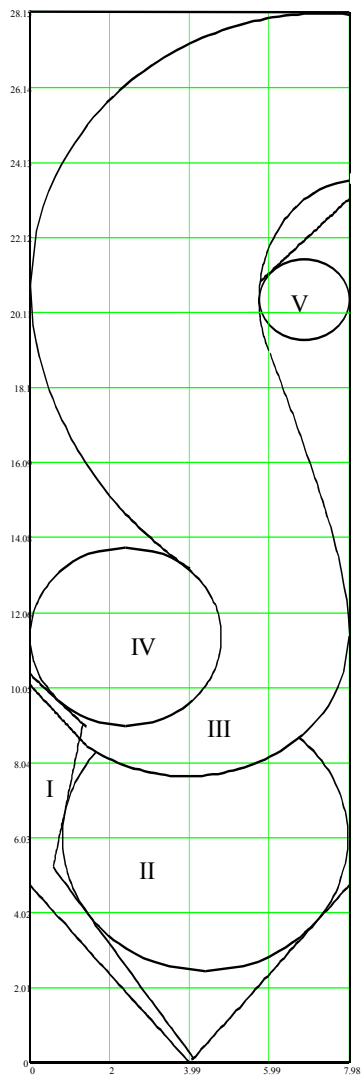


Рис. 1. Зоны течения потоков в НТВ-топке котла ПК-24 ИТЭЦ-10:
 I - струя нижнего дутья; II - нижняя вихревая зона; III - горелочная струя;
 IV - верхняя вихревая зона; V - вихрь под верхним козырьком

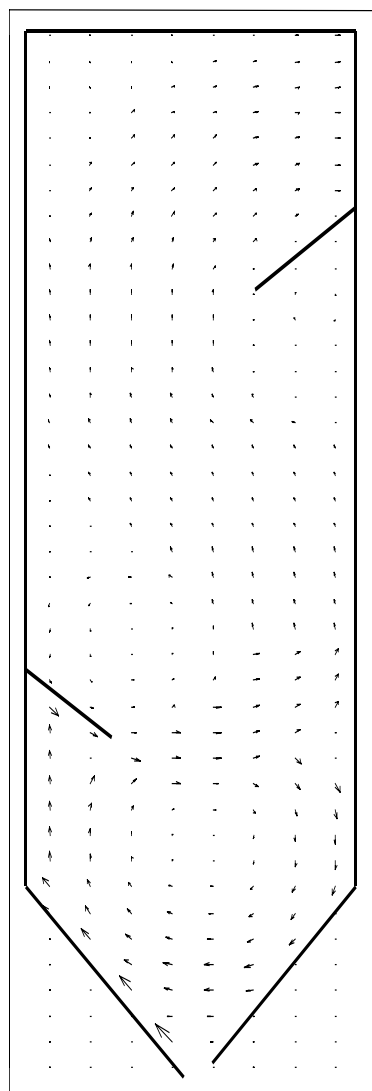


Рис. 2. Пример расчетного поля скоростей в НТВ-топке (котел ПК-24 ИТЭЦ-10, "настильный режим"):
 $W_{гор} = 15 \text{ м/с}$, $W_{н.д.} = 55 \text{ м/с}$

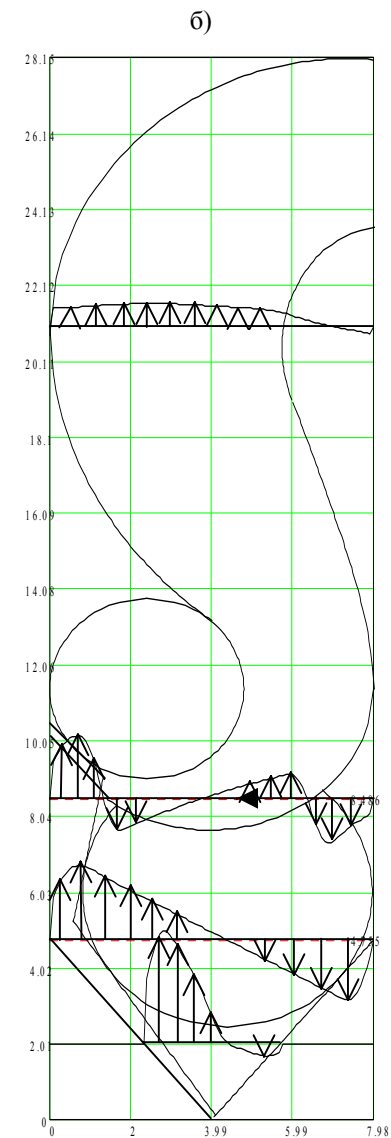
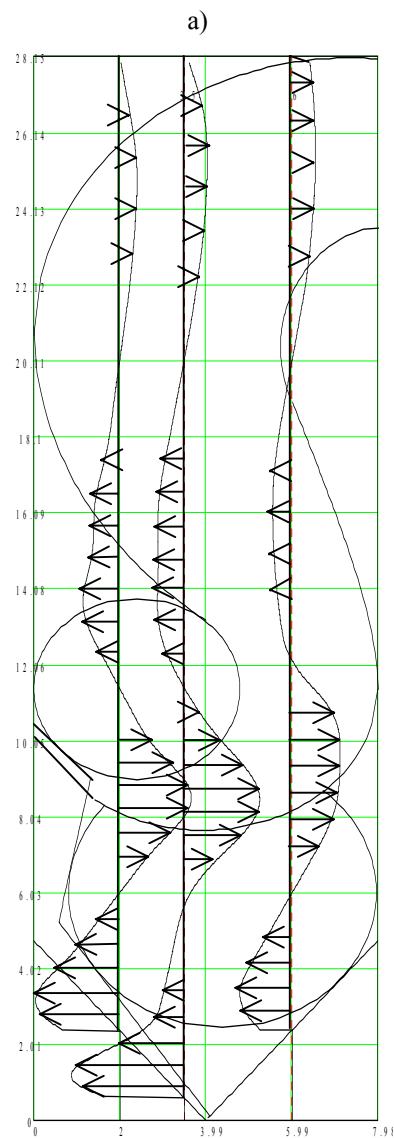


Рис.3. Пример построения проекций векторов скоростей газовых потоков в НТВ-топке котла ПК-24 в некоторых сечениях:
 а – на ось x; б – на ось y

Рассеивочная кривая разбивалась на $N = 10$ фракций, каждая из которых характеризуется своим средним диаметром: $\bar{\delta}_i = (\delta_i + \delta_{i+1})/2$.

Частота подачи частиц i -ой фракции в топку (шт/с) определяется по зависимости:

$$n_i = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{B}{\rho_T \cdot \bar{\delta}_i^3} \cdot \frac{R_i - R_{i+1}}{100}. \quad (8)$$

Для выделения фракции мелких частиц, которые сразу попадают в прямоточную часть факела, средний диаметр частиц первого промежутка выбран $\delta_1 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ м. Каждый последующий интервал был получен умножением предыдущего на коэффициент увеличения интервала $k_{инт}$, правая граница последнего – δ_{01} :

$$\sum_{N=1}^{10} \Delta \cdot k_{инт}^{N-1} = \delta_{01}, \quad (9)$$

где Δ – шаг первого интервала, м. При $N = 10$ ошибка в пересчете расхода натурального топлива на эквивалентный расход шарообразных частиц не превышает 0,1 %.

Блок 5. Расчет поля температур. Распределение температур в НТВ-топке определялось зональным тепловым расчетом путем численного решения системы балансовых уравнений, записанных для каждой из восьми зон (две по глубине и четыре по высоте топки):

$$T_i'' = \frac{(T_{ac} c B_p M_T + T_{ac} c B_p M_{ac} + T_i' c B_p M_T + T_{гв} c B_p M_{гв} + T_{хв} c B_p M_{хв}}{c B_p (M_T + M_{ac} + M_T + M_{гв} + M_{хв})} - \frac{\sigma_0 a \bar{T}_i^4 \cdot \sum F_i \psi_{ij} + \beta_i B_p Q_i^r}{c B_p (M_T + M_{ac} + M_T + M_{гв} + M_{хв})}, \text{ К}, \quad (10)$$

где: a – степень черноты зоны; $\sum F_i \psi_{ij}$ – сумма произведений поверхностей, ограничивающих зону, на коэффициенты тепловой эффективности ψ_i , м^2 ; M , T – соответственно массовые доли и температуры топочной среды, проходящей через каждую зону (M_T (T_T) – топочных газов из предстоящей по ходу газов зоны, M_{ac} (T_{ac}), $M_{гв}$ ($T_{гв}$), $M_{хв}$ ($T_{хв}$) – первичного, горячего и холодного воздуха; M_T – топлива, кг/кг); они оценивались по результатам расчетов блока 1. Величина первого приближения степени выгорания в зоне (β_i) задавалась на основании экспериментальных данных.

Коэффициенты переизлучения для плоскостей, разделяющих зоны, рассчитывались по средним температурам в зонах:

$$\psi_{ij} = 1 - (\bar{T}_i / \bar{T}_j)^4. \quad (11)$$

Тестирование результатов проведено по опытным значениям T_T'' и локальным T , полученным при комплексных исследованиях котлов ПК-24 и БКЗ-420-9. Оно показало высокую сходимость результатов для различных углей с разницей, не превышающей 2 % (рис. 4).

Блок 6. Расчет горения с учетом генерации и разложения NO_x . Модель горения частицы учитывает прогрев, сушку, выход летучих и горение коксового

остатка. Время прогрева частиц до момента воспламенения летучих определялось с использованием эмпирических зависимостей: для мелких ($\delta \leq 10^{-3}$ м) – Бабия В.И., для крупных ($\delta \geq 10^{-3}$ м) – Любова В.К. и Шестакова С.М.

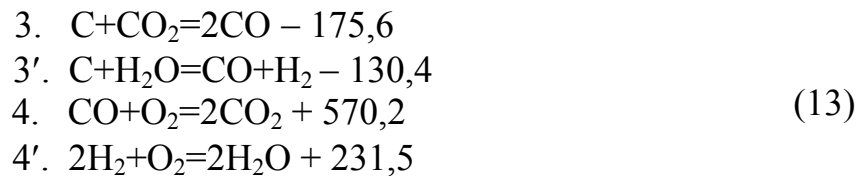
Динамика выхода летучих описывалась выражением:

$$\frac{dV}{d\tau} = \sum_{i=1}^n C_{0i} \cdot k_i, \quad (12)$$

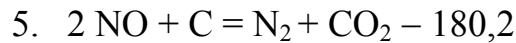
где C_{0i} и k_i – соответственно доля определенной группы реакций и константа скорости, 1/с, (считаем, что она подчиняется зависимости Аррениуса); для расчета оказалось возможным применить двухкомпонентную схему.

Для оценки времени выхода и горения летучих использовались эмпирические выражения: для мелких частиц ($\delta \leq 10^{-3}$ м) – Бабия В.И., для крупных ($\delta \geq 10^{-3}$ м) – Любова В.К. и Шестакова С.М. (рис. 5). Уменьшение плотности частиц в процессе сушки и выхода летучих веществ происходит до величины плотности сухого кокса топлива (рис. 6).

Горение коксовых частиц в НТВ-топке может быть описано набором химических реакций, предложенным Померанцевым В.В. и Шестаковым С.М., (тепловой эффект в кДж/моль):



К этому набору добавлена реакция разложения оксидов азота на коксе:



Процесс горения описан системой нелинейных дифференциальных уравнений диффузии и кинетики типа:

$$dG_j = -(D/RT)(d^2 p_j / dx^2) dx, \quad (14)$$

$$G_j = (\alpha_D / RT)(p_j - p_{j0}), \quad (15)$$

$$dG_i / d\tau = C_i \cdot k_i, \quad (16)$$

с учетом окислительных и восстановительных реакций, идущих на поверхности частицы и гомогенных реакций, протекающих в пределах ее пограничного слоя.

Для решения задачи применены понятия “приведенной пленки” ($\Delta/\delta = 1/(\text{Nu}_D - 2)$); безразмерной координаты ($\xi = x/\Delta$); критерия Семенова ($\text{Se} = (k_4 \cdot \Delta/D)^{0,5}$); диффузионно-химического критерия ($N_i = k_i/\alpha_D$); зависимости Аррениуса для констант скоростей реакций ($k_i = k_{0i} \cdot \exp(-E_i/RT)$); “полюса” с координатами $k^* = 100$ м/с, $T^* = 2600$ К; энергии активации реакций 3 и 3’ определялись из соотношений: $E_3/E_1 = 2,2$; $E_{3'}/E_1 = 1,6$ ($E_1 = 100$ кДж/моль – для кокса бурых углей), а реакций 4, 4’, 5 – на основе обработки литературных данных. При этом сделаны следующие допущения: 1. стефановский поток не оказывает существенного влияния на толщину приведенной пленки; 2. приведенная пленка рассматривается как плоская; 3. термодиффузия по толщине приведенной пленки отсутствует; 4. скорость гомогенных реакций и коэффициент диффузии рассчитываются по средней температуре приведенной пленки; 5. внутривещное реагирование не учитывается вследствие его малости; 6. для диффузии в многокомпонентной газовой смеси принят средний коэффициент диффузии; 7. тем-

пература частицы принята равной температуре потока.

Коэффициент диффузии D в многокомпонентной смеси определялся из соотношения Уилка, а коэффициенты взаимной диффузии веществ при реальных условиях по зависимости Винкельмана:

$$D_{12} = D_{012} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1,75} \cdot \frac{P_0}{P}, \quad (17)$$

где: D_{012} – коэффициент взаимной диффузии веществ при $P_0 = 101,3$ Па, $T_0 = 273$ К).

Процесс протекает в промежуточной области по схеме двойного горящего пограничного слоя ($Se > 100$), (случай “мокрой” газификации), (рис. 7).

В результате решения системы дифференциальных уравнений было получено выражение для потока углерода, исчезающего с поверхности частицы (кмоль/м²с):

$$G_c = \frac{\alpha_D}{RT} \left(\frac{N_3}{1 + N_3} p_{CO_2\Delta} + \frac{N_{3^*}}{1 + N_{3^*}} (p_{O_2\Delta} + 0.5 p_{H_2O\Delta}) + \frac{N_5}{1 + N_5} p_{NO\Delta} \right). \quad (18)$$

Убыль массы и размера частицы рассчитывалась по выражениям:

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{dm_{wf}}{d\tau} + \frac{dm_{лет}}{d\tau} + \frac{dm_c}{d\tau}, \quad (19)$$

$$\frac{dm_c}{d\tau} = -G_c \cdot M_c \cdot \pi \cdot \delta^2, \quad (20)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -\frac{2M_c}{\rho_{\text{ч}}} \cdot G_c. \quad (21)$$

где $M_c = 12$ кг/кмоль – молярная масса углерода; $f_{\text{пов}} = \pi \cdot \delta_{\text{экв}}^2$ – площадь наружной поверхности, м².

При расчете выгорания углерода твердого топлива использовалась модель “сжимающейся частицы” при условии сохранения неизменной ее плотности с введением коэффициента K^r , учитывающего относительное содержание кокса в рабочей массе топлива:

$$K^r = 1 - (W^r + A^r + V^r)/100. \quad (22)$$

Блок горения тестировался по экспериментальным данным Парамонова А.П. и Бабия В.И. Для случая сжигания топлива по схеме ППФ тестирование показало высокую сходимость результатов (с погрешностью, не выше 10 %).

Блок 7. Расчет генерации и разложения NO. Количество “топливных” оксидов азота ($T_{\text{max}} < 1800$ К), образующихся на стадии выхода летучих из топлива, находилось по схеме, предполагающей разложение азотсодержащих веществ топлива до активного атомарного азота, частично рекомбинирующего в молекулярный азот (1. $N+N=N_2$) и частично окисляющегося до NO (2. $mN+O_2=mNO$):

$$\begin{cases} \frac{dN_{2i}}{d\tau_i} = k_{01} e^{-E_1/RT_i} \frac{1}{T_i} [N_i]^2 \\ \frac{dNO_{xi}}{d\tau_i} = k_{02} e^{-E_2/RT_i} \frac{1}{T_i} [O_2]_i^v [N]_i \end{cases}, \quad (23)$$

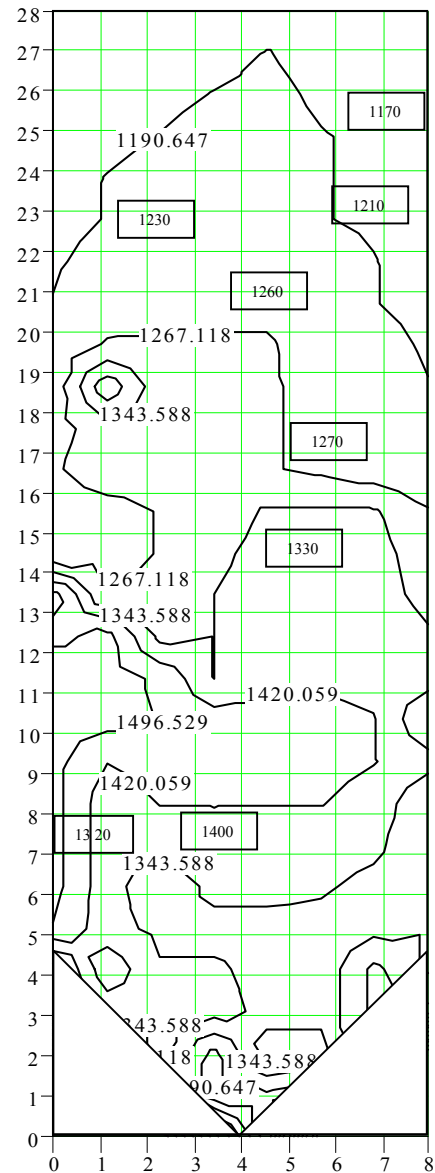


Рис. 4. Поле температур (К) в НТВ-топке котла ПК-24 ИТЭЦ-10; 1400 - экспериментальные значения

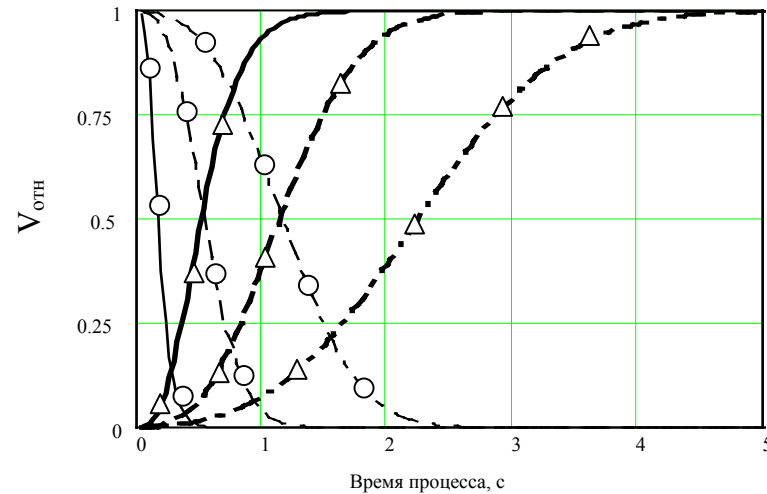


Рис. 5. Сушка (o - W/W_0^r) и выход летучих (Δ - $V_{отн}$) из частиц азейского угля в среде с температурой $T_{cp}=1500$ К:
 — — — $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м; — · — · — $\delta = 4 \cdot 10^{-3}$ м; · · · · · $\delta = 8 \cdot 10^{-3}$ м.

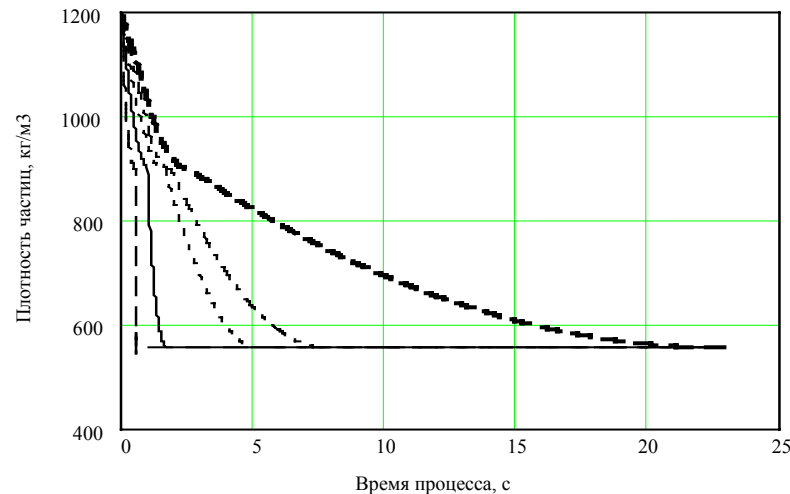


Рис. 6. Изменение плотности материала частицы в процессе сушки и выхода летучих веществ:
 — — — $\delta_1=2,5 \cdot 10^{-4}$ м; — — — $\delta_3=1,69 \cdot 10^{-3}$ м;
 · · · · · $\delta=4,07 \cdot 10^{-3}$ м; — · — · — $\delta_7=8,5 \cdot 10^{-3}$ м; — — — $\delta_9=0,016$ м

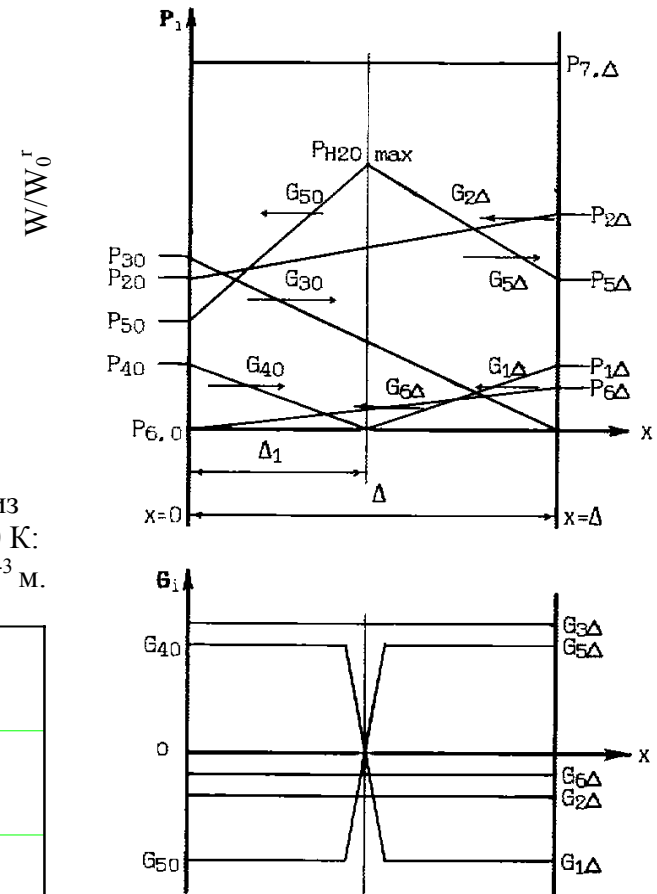


Рис. 7. Пример распределения парциальных давлений и потоков компонентов в приведенной пленке крупной коксовой частицы:
 1 – O_2 ; 2 – CO_2 ; 3 – CO ; 4 – H_2 ;
 5 – H_2O ; 6 – NO ; 7 – N_2 ;
 индекс “0” – поверхность частицы;
 индекс “Δ” – поток

где $E_1 = 4,2$ МДж/моль, $E_2 = 31,2$ МДж/моль – энергии активации соответствующих реакций; $\nu = 1,8$ – порядок реакции по кислороду (по экспериментальным данным Бабия В.И.).

Расчет показал, что образование “воздушных” оксидов азота при НТВ-сжигании не превышает 3...4 % от генерации “топливных”, что дало возможность исключить их из рассмотрения.

Распределение концентрации NO по сечению топки (без учета разложения) определялось путем численного решения (схема “против потока”) дифференциального уравнения массообмена:

$$\frac{dm_i}{d\tau} = D\nabla^2 m_i, \quad (24)$$

при наличии источников члена для каждой зоны, на которые разбивалась топочная камера (3280 зон $0,25 \times 0,25$ м).

Блок 8. Геометрия топочной камеры. Задавалась координатами точек, по которым прямыми линиями строился замкнутый контур, ограничивающий топку.

Парциальные давления основных реагирующих компонентов (O_2 , CO_2 , H_2O) при расчете горения коксовой частицы, определялись из полей концентраций, построенных на основании обработки экспериментальных данных (рис. 8 а, 8 б, 8 в), полученных в комплексных испытаниях котлов ПК-24 ст.№ 9 ИТЭЦ-10 и БКЗ-420-140-9 Усть-Илимской ТЭЦ. Поле концентрации NO (рис. 9) построено по результатам расчета. Расчет процесса горения проводился с определением количества разложившихся NO: по зонам, на 1 кг исходного топлива и на отдельно взятой частице каждой фракции с определением нового поля концентраций оксидов азота (с учетом разложения).

По разработанной методике составлен алгоритм и программа расчета. Так как программа имеет блочное построение, то это дает возможность проведения расчетов и анализа отдельных составляющих процесса горения в НТВ-топке и в различных энергетических установках путем отключения отдельных блоков или подключения новых. Например, анализ сепарационных возможностей НТВ-топки, исследование процесса термпневморазрушения частиц топлива, расчет ППФ, расчет реактора разложения NO_x в схеме ЭЧКУ и др.).

Тестирование отдельных блоков программы проводилось с использованием опытных данных различных авторов: Шестакова С.М., Парамонова А.П., Бабия В.И., Буланова Д.В., Котлера В.Р., Головиной Е.С. и др. Оно показало удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

В четвертой главе приведены результаты расчетного исследования процесса горения твердых топлив с учетом разложения оксидов азота на коксовых частицах углей, сжигавшихся в топках котлов ПК-24 ст. №9 ИТЭЦ-10 и БКЗ-420-140-9 Усть-Илимской ТЭЦ. Исходными данными для расчета являлись: состав топлива на рабочую массу, геометрия топочной камеры, расходы и скорости ввода горелочного воздуха ($W_{гор} = 10...20$ м/с) и нижнего дутья ($W_{н.д.} = 50...100$ м/с), поля концентраций основных газовых компонентов (O_2 , CO_2 , H_2O – пример представлен на рис. 8 а...8 в), характеристики полидисперсности топлива. Шаг по времени $\Delta\tau = 0,01$ оказался оптимальным. Вариантные расчеты проводились для трех гранулометрических составов: дробленого топ-

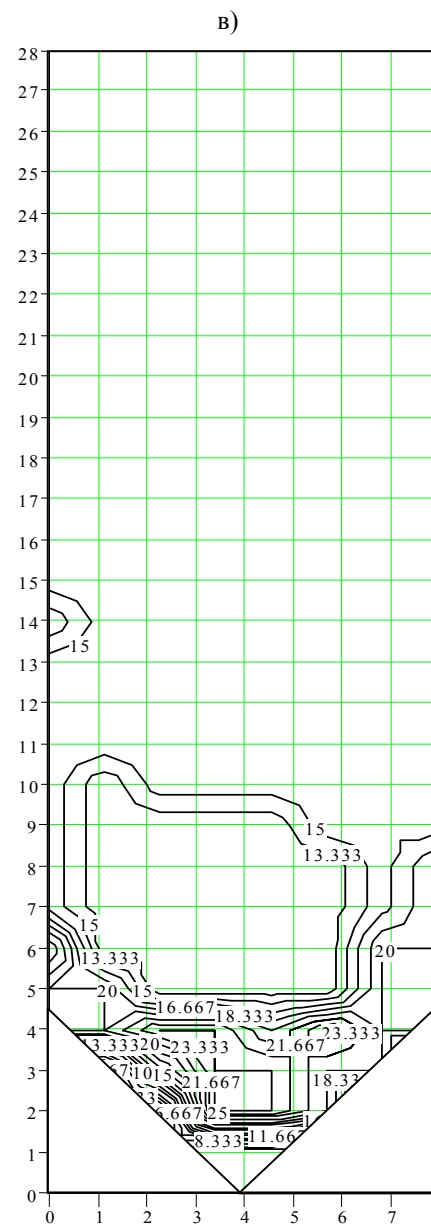
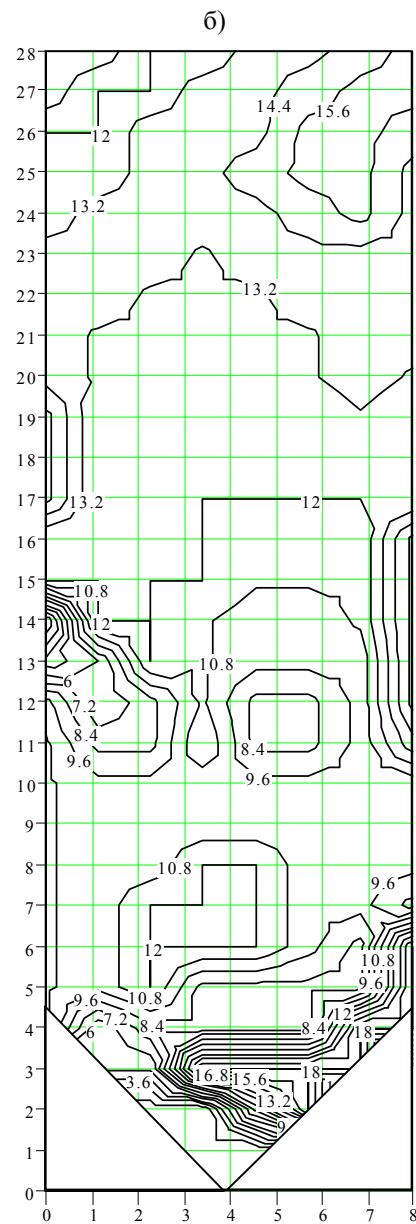
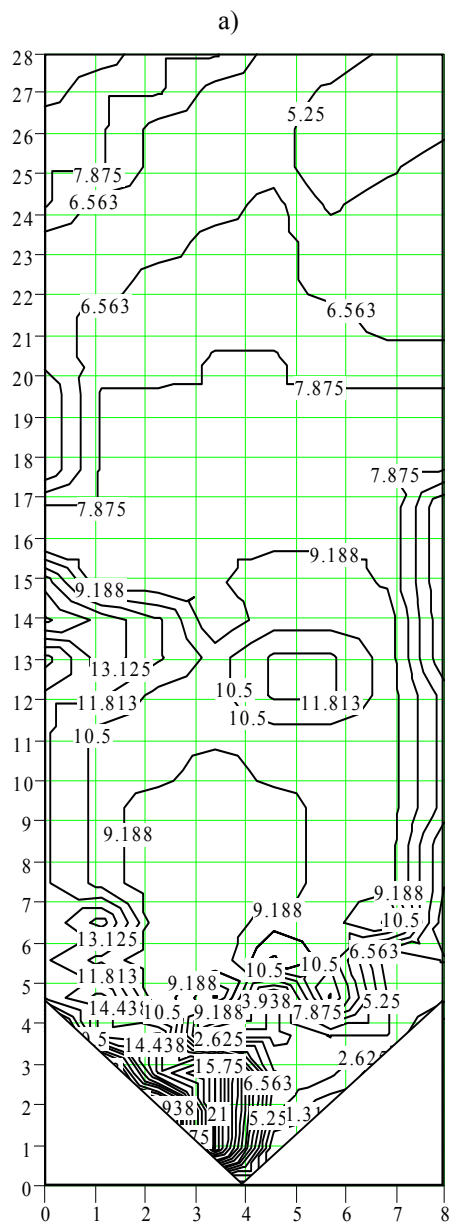


Рис. 8. Поля концентраций основных реагирующих компонентов в НТВ-топке котла ПК-24 ст. № 9 ИТЭС-10, построенные на основании экспериментальных данных, (%): а - O_2 , б - CO_2 ; в - H_2O

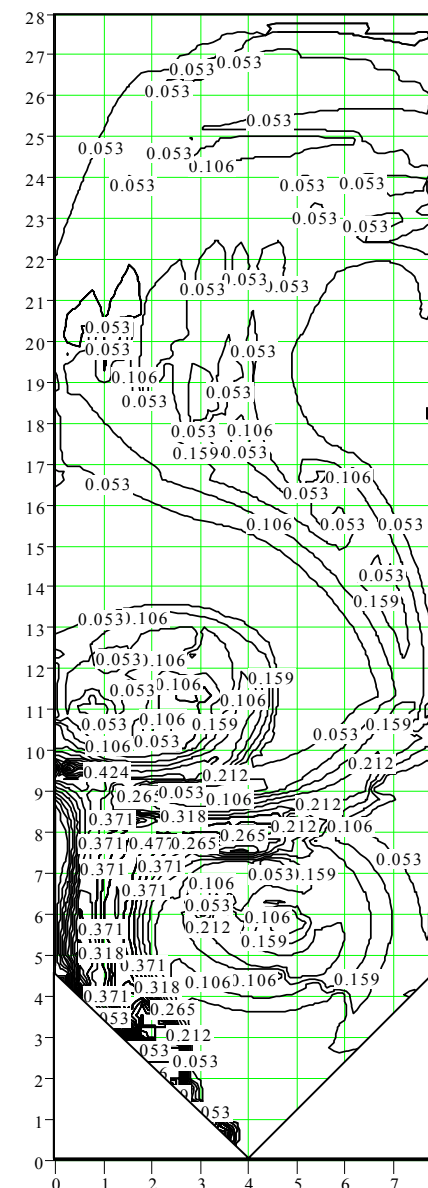


Рис. 9. Расчетное поле концентраций NO (%) при сжигании дробленого топлива в НТВ-топке котла ПК-24 без учета разложения

лива ($R_{1000} = 70...85 \%$, $R_{10000} = 1...10 \%$), пыли угрубленного ($R_{90} = 65...80 \%$, $R_{200} = 20...50 \%$) и тонкого ($R_{90} = 15...50 \%$, $R_{200} = 0,2...10 \%$) помола. Анализ результатов расчетов представлен на примере азейского бурого угля ($R_{1000} = 85\%$, $R_{10000} = 10 \%$). Обработка рассеивочной кривой исходного топлива показана на рис. 10; 11 а, б, в.

Расчет процесса термпневморазрушения частиц показал, что разрушаются частицы крупнее ($\delta > 6 \cdot 10^{-3}$) при ударе (в основном о задний скат топочной воронки) (рис. 12); при этом поверхность реагирования увеличивается на 2...5%. Анализ траекторий движения частиц показал (рис. 13), что крупные частицы ($\delta > 600 \cdot 10^{-6}$ м) накапливаются на фронтном скате НВЗ, образуя зону повышенных пристенных концентраций топливных и коксовых частиц. Горение этих частиц происходит до момента, когда под воздействием струи НД они могут быть вынесены в ПЧФ. В этой же зоне происходит основная эмиссия NO (рис. 9) – область с максимальными концентрациями NO, к ней можно отнести так же вертикальный участок под горелками.

Наибольшее количество NO разлагается на фронтном скате НВЗ (рис. 14), т.к. в этой области – наибольшие концентрации оксидов азота, а крупные частицы топлива пребывают наибольший отрезок времени всего процесса горения (рис. 13, 15). По расчетным результатам построен профиль концентраций NO в сечении выходного окна, (рис.16), которые удовлетворительно согласуются с опытными данными по концентрациям NO в уходящих газах. Расчеты показывают, что для корректного определения концентрации NO на выходе из топки, необходимо иметь несколько контрольных точек замеров для последующего усреднения (по расходу) экспериментальных результатов.

За счет разложения оксидов азота на коксовых частицах при расчете процесса горения азейского бурого угля, получено: снижение (на 28 %) концентрации NO в дымовых газах ($NO''_T = 500 \text{ мг/нм}^3$); время горения – 383 с; $q_4 = 1,4 \%$. Это удовлетворительно согласуется с опытными данными С.М.Шестакова и А.П.Парамонова.

Несмотря на большую поверхность реагирования мелких частиц ($\delta_1 = 250 \cdot 10^{-6}$ м) (рис. 11 в), доля разложившихся NO на мелких частицах (в ПЧФ) значительно меньше количества оксидов азота, разлагающихся в НВЗ НТВ-топки на крупных фракциях (рис. 17 а). Это объясняется малым временем горения мелких частиц топлива (~1,5...2 секунды) (рис. 15) и несколько меньшими концентрациями NO в ПЧФ.

Анализ разложения NO на одиночной частице каждой фракции показал (рис. 17 б), что максимум достигается на частице размером $\delta_8 = 12 \cdot 10^{-3}$ м, (с учетом разрушения). Небольшая доля суммарного количества разложившихся NO на всех частицах 8-ой фракции (по сравнению с частицами 6-ой фракции) объясняется относительно малым количеством таких частиц в исходном топливе. Следовательно, для интенсификации процесса разложения NO в НТВ-топке необходимо увеличивать долю крупных частиц с одновременным уменьшением количества мелких частиц в сжигаемом топливе. Малое количество NO, разложившихся на частицах 7-ой фракции ($\delta_7 = 1,62 \cdot 10^{-3}$ м) является следствием их разрушения и уменьшения размера, что перевело их в разряд фракций более мелких размеров, так же, как и частицу 10-й фракции ($\delta_{10} = 0,022$ м), которая

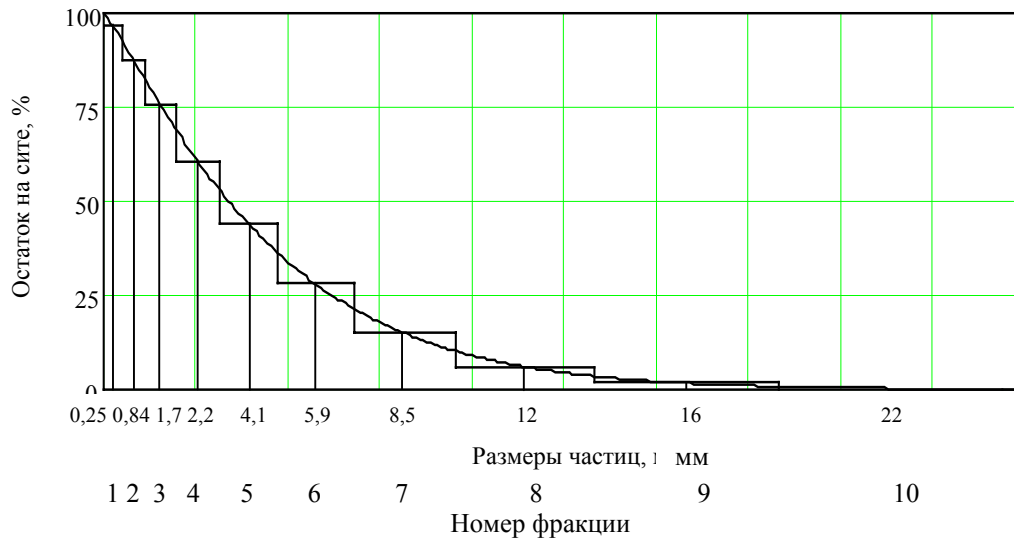


Рис. 10. Обработка рассеивочной кривой исходного топлива (азейский уголь, $W^r=25\%$, $A^r=12,8\%$, $R_{1000}=85\%$, $R_{10000}=10\%$)

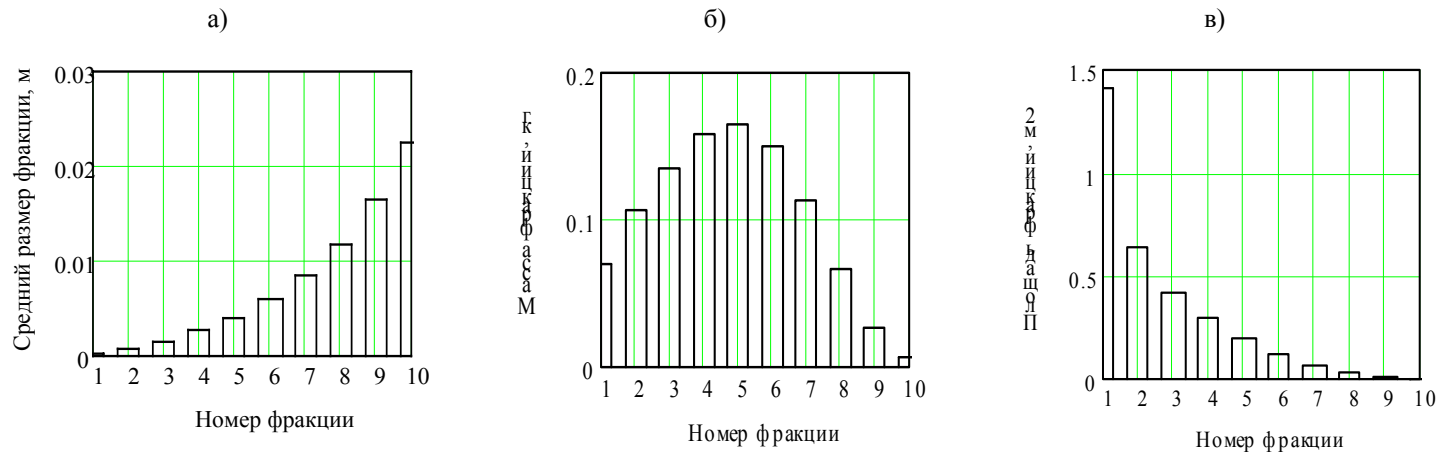
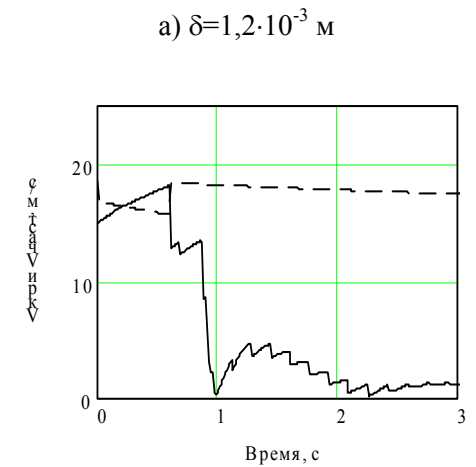
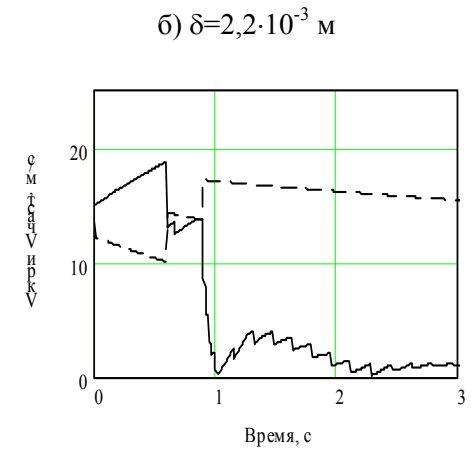


Рис. 11. Распределение исходного топлива по фракциям: а – средний размер частиц; б – масса фракций; в – площадь частиц (в расчете на 1 кг исходного топлива)



а) $\delta=1,2 \cdot 10^{-3}$ м



б) $\delta=2,2 \cdot 10^{-3}$ м

Рис. 12. Пример разрушения частиц угля в НТВ-топке котла ПК-24:

— - $V_{\text{част}}$; - - - - $V_{\text{кр}}$

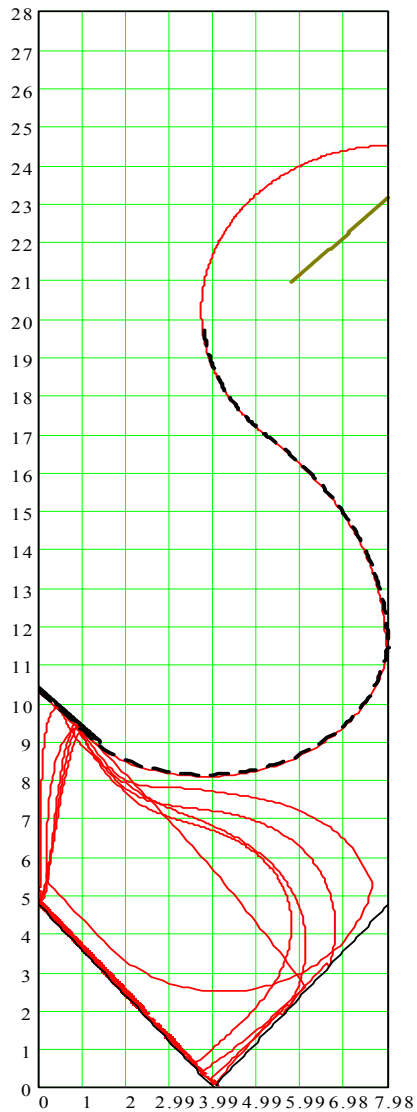


Рис. 13. Расчетные траектории движения горящих частиц в НТВ-топке котла ПК-24 (“настильный” режим):
 - - - - $\delta=2 \cdot 10^{-6}$ м; — — — — $\delta=0,016$ м

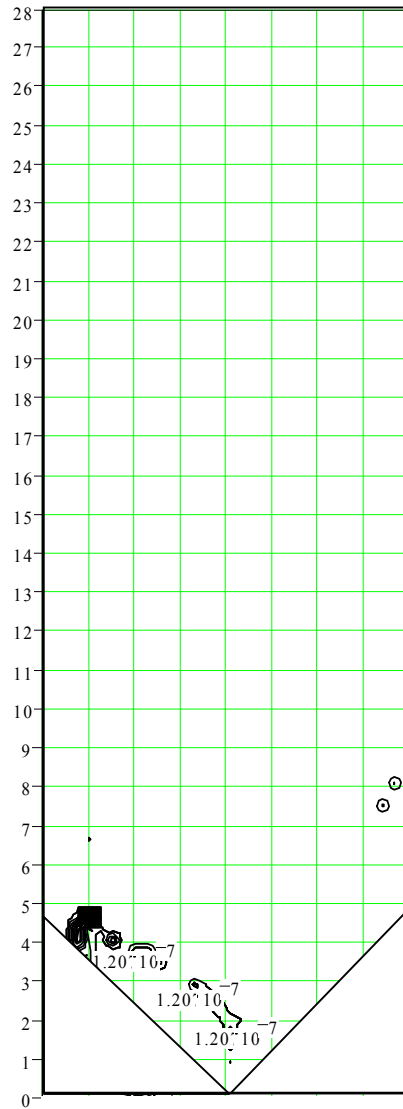


Рис. 14. Усредненное поле разложения оксидов азота (кг в элементарной ячейке 0,25×0,25×0,25 м) в НТВ-топке котла ПК-24

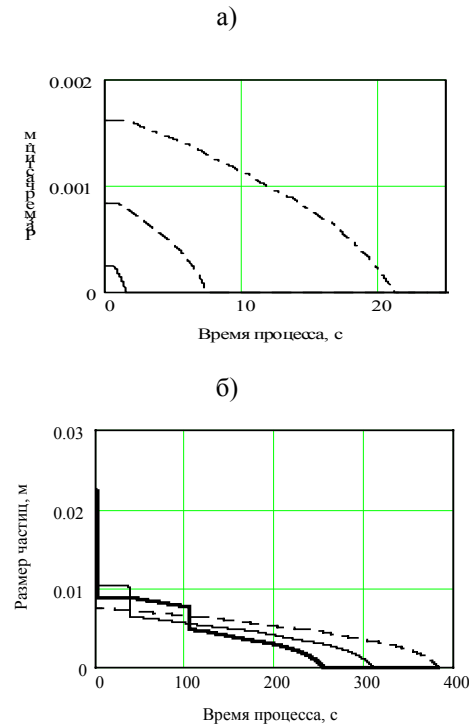


Рис. 15. Время выгорания частиц различных фракций азейского угля:
 а – мелких ($\delta < 2 \cdot 10^{-3}$);
 б – крупных ($\delta > 8 \cdot 10^{-3}$)

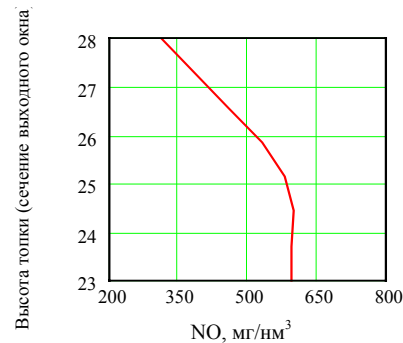


Рис. 16. Расчетный профиль концентраций NO ($\text{мг}/\text{м}^3$) в сечении выходного окна топки котла ПК-24

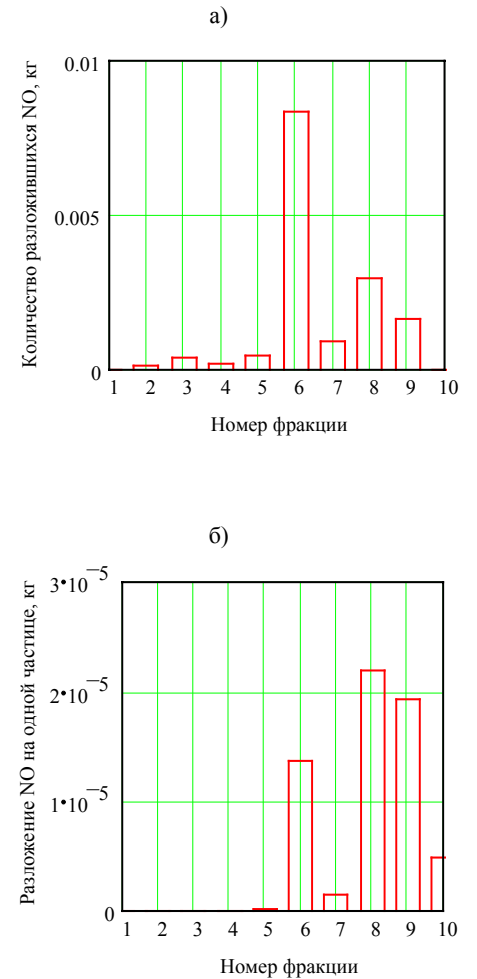


Рис. 17. Результаты расчета разложения NO на фракциях частиц 1 кг исходного топлива:
 а – на всех частицах фракции;
 б – на одиночной частице фракции

разрушалась в процессе горения 2 раза (рис. 12, 15).

На частицах $\delta = 0,835 \cdot 10^{-3} \dots 4,075 \cdot 10^{-3}$ м также происходит заметное разложение оксидов азота, однако, количество разложившихся NO значительно ниже, чем на крупных частицах. Это объясняется малым временем их пребывания в зоне максимальных концентраций NO и меньшим временем горения по сравнению с крупными частицами), но в тоже время больше, чем на мелких. Следовательно, увеличению разложения NO способствует пребывание частиц любых размеров в НВЗ (на фронтном скате топочной воронки) НТВ-топки.

Для возврата частиц в НВЗ, необходима установка надгорелочного аэродинамического козырька (котлы ПК-24, БКЗ-420-140-9) с вылетом $(0,3 \dots 0,4) \cdot b_T$; возможна так же организация аэродинамического выступа (котел БКЗ-220-100). Анализ траекторий движения частиц в котлах (рис. 13, 18) показал, что установка надгорелочного козырька является более оптимальной, (рис. 19 а, б). В этом случае вектор скорости частицы после удара о козырек направлен вглубь топки, что способствует возврату частиц в НВЗ, уменьшению механического недожога топлива и повышению разложения оксидов азота.

Комплексными исследованиями установлено существование двух режимов течения струи НД: “настильного” и “фонтанирующего”. Сравнение “настильного” (рис. 2, 3, 13) и “фонтанирующего” (рис. 20, 21) режимов показало, что при “фонтанирующем” режиме возможен резкий рост (до 10...15 %) механического недожога топлива из-за раннего выноса частиц из НВЗ и как следствие снижение разложения оксидов азота. Поэтому, для создания устойчивых восстановительных зон в НТВ-топке, целесообразна организация “настильного” режима, для чего необходимо исключение крупных частиц топлива и породы ($\delta_{\max} < 30$ мм, что соответствует ПТЭ стационарных дробилок), которые, накапливаясь на фронтном скате топочной воронки, могут привести к развороту вверх струи НД, переводу “настильного” режима течения в “фонтанирующий” и вырождению НВЗ. Максимальный размер частиц исходного топлива, подаваемого в топочную камеру, будет ограничиваться таким размером, при котором режим течения струи нижнего дутья переходит от “настильного” к “фонтанирующему”, а также начинается интенсивный провал топлива в шлаковый комод.

Оценка по разработанной методике влияния ввода рециркуляции в струю НД показала снижение генерации “топливных” NO. Так, при доли рециркуляции $r=0,15$ и содержании в рециркулирующих газах $O_2=5,25$ %, происходит дополнительное снижение на 8 % концентрации NO в уходящих газах для случая сжигания азейского угля в НТВ-топке.

Так как процесс разложения оксидов азота наиболее интенсивно протекает в НВЗ НТВ-топки на крупных частицах, необходимо увеличение доли крупных частиц в исходном топливе с одновременным снижением количества мелких фракций. Достижение этого возможно двумя путями: влиянием на фракционный состав топлива при его подготовке к сжиганию и удалением мелких фракций после его приготовления. Удаление мелких фракций из топлива возможно в системе подачи или приготовления топлива. Затем мелкие фракции целесообразно подать выше основных горелок со стороны задней стены топки, что позволит дополнительно, на 15...20 %, снизить концентрации оксидов азота

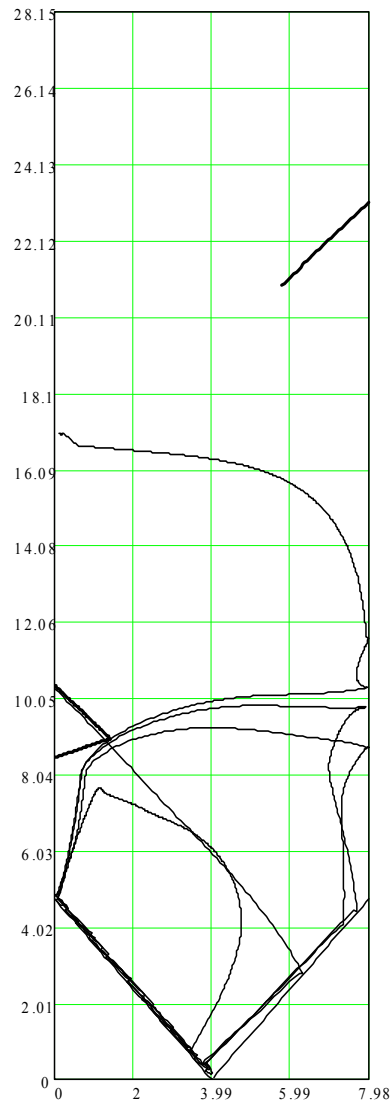


Рис. 18. Траектория движения реагирующей частицы ($\delta=1,62 \cdot 10^{-3}$ м) в случае установки аэродинамического выступа в топке котла ПК-24 (аналог котла БКЗ-220-100)

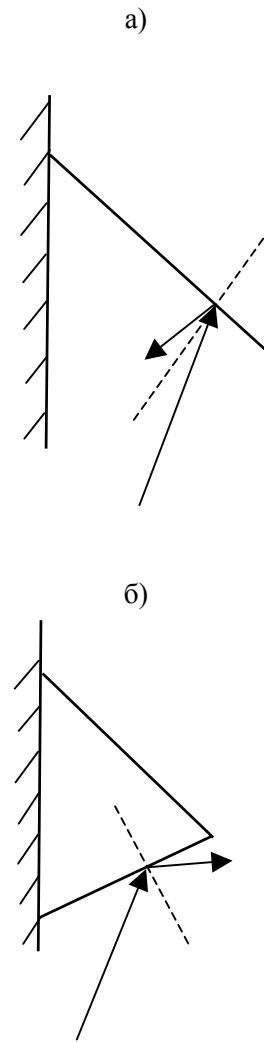


Рис. 19. Сравнение направлений движения частиц после удара: а – о надгорелочный козырек; б – об аэродинамический выступ

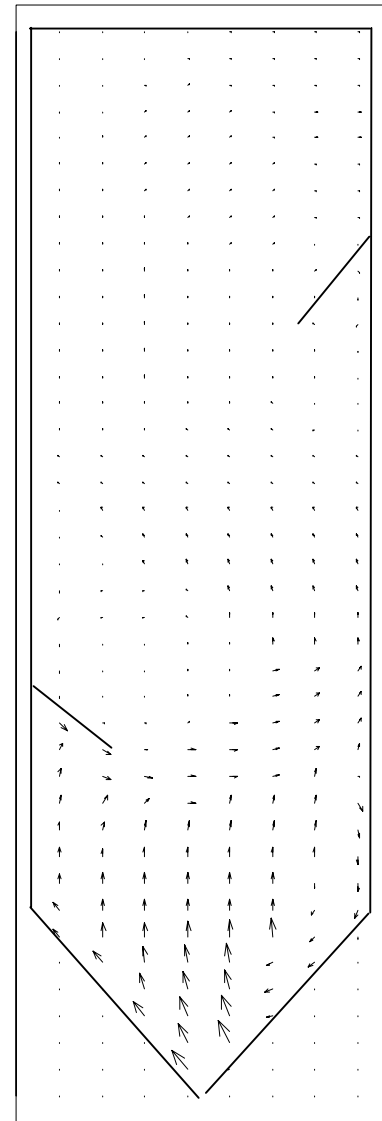


Рис. 20. Векторное поле скоростей в НТВ-топочной камере котла ПК-24, “фонтанирующий” режим

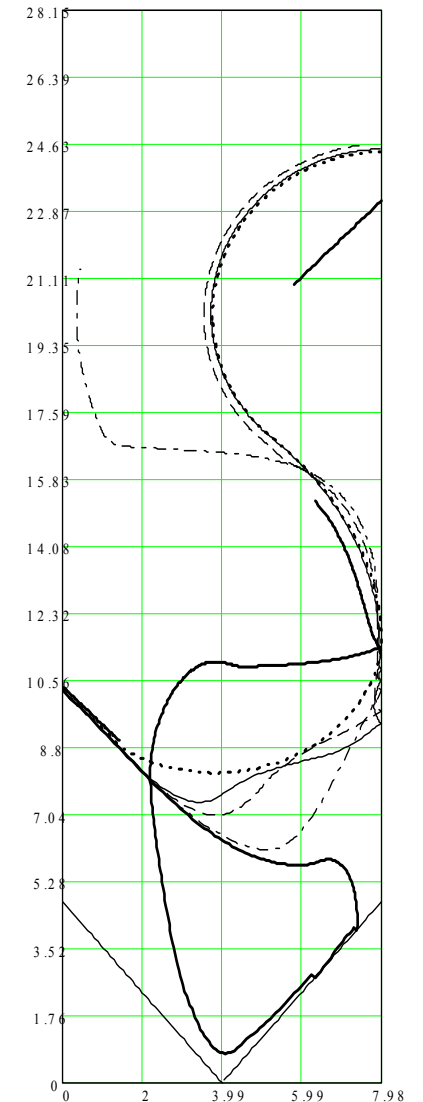


Рис. 21. Траектории движения реагирующих частиц при “фонтанирующем” режиме течения в топке котла ПК-24: - $\delta=555 \cdot 10^{-6}$ м; ——— - $\delta=656 \cdot 10^{-6}$ м; - - - - $\delta=757 \cdot 10^{-6}$ м; - · - · - $\delta=858 \cdot 10^{-6}$ м; ——— - $\delta=959 \cdot 10^{-6}$ м

в дымовых газах.

По разработанной методике проведено сравнение разложения оксидов азота при сжигании пыли угрубленного и тонкого помола. При горении грубой пыли азейского бурого угля ($R_{90}=80\%$, $R_{200}=50\%$) мелкие частицы топлива ($\delta \leq 600 \cdot 10^{-6}$ м), попадая в топочную камеру, сразу уходят в ПЧФ, а крупные ($\delta > 600 \cdot 10^{-6}$ м), разворачиваясь у задней стены топки, попадают в НВЗ. Зона максимального разложения NO на коксовых частицах располагается в НВЗ, разложение NO составляет 15 % от первоначальной эмиссии; время горения частиц – 10 с. Максимум разложения оксидов азота приходится на частицы $\delta_{10}=959 \cdot 10^{-6}$ м, что объясняется достаточно значительным временем их пребывания в НВЗ. Поэтому угрубление фракционного состава сжигаемого топлива (в пределах до размеров частиц дробленого топлива (предыдущий случай)), будет способствовать увеличению разложения NO.

При горении пыли тонкого помола ($R_{90}=50\%$, $R_{200}=0,2\%$) азейского бурого угля, горение всех частиц происходит в ПЧФ (аналог ППФ). Максимальные концентрации генерируемых оксидов азота располагаются на уровне горелок, а зоны максимального разложения NO располагаются далее по ходу факела. За время горения 1,5 с разложение NO составило 0,58 % от первоначальной эмиссии.

Аналогичным образом выполнялись расчеты горения и разложения оксидов азота для других исследуемых топлив (результаты на примере сравнения разложения оксидов азота для ирша-бородинского бурого и черемховского каменного углей представлены в табл. 1). Величина разложения NO (от первоначальной эмиссии) лежит в пределах: при сжигании дробленого топлива 20...31 %; при сжигании грубой пыли 5...15 %; при сжигании тонкой пыли 0,5...0,7 % и зависит от состава топлива (прежде всего содержания азота и углерода в рабочей массе) и кинетических констант реакции 5 системы 13.

Анализ схемы трехступенчатого сжигания по разработанной методике показал, что при вводе мелкой пыли (топливо-восстановитель) выше основных горелок (в количестве ~10 % от общего расхода) разложение NO может достигать 25...30 % (тестировалось по данным Бабия В.И., Буланова Д.В., Котлера В.Р.). Таким образом ступенчатое сжигание может рассматриваться как один из эффективных технологических методов борьбы с генерацией NO.

Для уменьшения выбросов NO_x в атмосферу разработана схема ЭЧКУ с регенератором оксидов азота, в котором, как показали расчеты, возможно дополнительное снижение (до 50 %) концентрации NO в дымовых газах за регенератором (тестировалось по опытным данным Головиной Е.С., Козловой С.Г.).

Выполнение пунктов Киотского протокола по снижению выбросов NO_x, SO_x, CO₂ возможно путем сжигания древесного топлива. Расчеты по разработанной методике разложения NO показали, что переход к факельно-слоевому способу сжигания позволяет снизить (на ~ 30 %) концентрацию генерируемых NO по сравнению со слоевым способом сжигания (тестировалось по данным автора).

В заключении сформулированы основные выводы.

1. Разработана методика, алгоритм и программа расчета процесса горения дробленого топлива с учетом разложения оксидов азота на коксовых частицах в

Таблица 1. Результаты расчетного исследования влияния фракционного состава на разложение оксидов азота при сжигании ирша-бородинского бурого и черемховского каменного углей

Фракционный состав сжигаемого топлива	Дробленое топливо		Грубая пыль		Пыль	
	$R_{1000}=85\%$ $R_{10000}=10\%$		$R_{90}=80\%$ $R_{200}=50\%$		$R_{90}=50\%$ $R_{200}=0,2\%$	
Разложение оксидов азота на фракциях ирша-бородинского бурого угля, кг/с (номер фракции - по оси абсцисс, масса разлагающихся NO – по оси ординат)						
Разложение оксидов азота на фракциях черемховского каменного угля, кг/с (номер фракции - по оси абсцисс, масса разлагающихся NO – по оси ординат)						
	Ирша-бородинский бурый уголь			Черемховский каменный уголь		
Расчетный расход топлива, кг/с	15,049			13,152		
Генерация NO, кг/с	0,049			0,046		
	дробленое т-во	грубая пыль	мелкая пыль	дробленое т-во	грубая пыль	мелкая пыль
Разложение NO в топке, кг/с	0,015	0,0056	$2,95 \cdot 10^{-4}$	0,011	0,0031	$2,52 \cdot 10^{-4}$
Снижение выбросов NO, %	31	12	0,6	25	6,6	0,54

Ирша бородинский бурый уголь: $Q_i^r=15,67$ МДж/кг, $A^r=6\%$, $W^r=33\%$, $C^r=43,7\%$, $N^r=0,6\%$;

Черемховский каменный уголь: $Q_i^r=17,89$ МДж/кг, $A^r=27\%$, $W^r=13\%$, $C^r=45,6\%$, $N^r=0,7\%$.

условиях многократной циркуляции. Она построена с учетом особенностей НТВ-сжигания: специфической аэродинамики топки, стадийности процесса горения, переменности массы и поверхности реагирования частиц топлива, сложного движения частиц, их термомеханического разрушения при ударе об ограждающие поверхности топки. Разработанная программа имеет блочный характер построения, что дает возможность отключать некоторые из имеющихся блоков или подключать новые с целью исследования отдельных стадий процесса горения и расширить область ее применения для исследования процессов генерации и разложения оксидов азота в различных технологических установках.

2. Проведенные расчетные исследования показали, что за счет разложения оксидов азота на коксовых частицах происходит дополнительное снижение (на $\sim 30\%$) концентрации NO в дымовых газах от первоначальной эмиссии. Ввиду этого НТВ-технология сжигания дробленого твердого топлива по схеме ЛПИ-ИТЭЦ-10 является эффективным технологическим методом снижения концентрации оксидов азота в топках с многократной циркуляцией

3. Вариантные расчеты (более 80 вариантов) горения топлива полифракционного состава в НТВ-топке (азейского, ирша-бородинского, березовского бурых и черемховского, нерюнгринского, кузнецкого каменных углей) позволили выявить, что максимальное количество разложившихся NO приходится на фракцию топлива $12 \cdot 10^{-3}$ м (исходный размер).

4. Анализ расчетных данных по горению шести видов исследованных углей в НТВ-топочном устройстве показал:

- максимальное разложение оксидов азота (до 30 %) достигается при “настильном” режиме течения струи НД; переход режима течения к фонтанирующему снижает разложение NO на 10...15 %;

- установка надгорелочных козырьков для организации “ δ ”-образной траектории факела позволяет увеличить разложение оксидов азота и понизить механический недожог топлива;

- ввод в поток нижнего дутья газов рециркуляции позволяет уменьшить генерацию “топливных” NO и снизить их концентрацию на 7...10 %;

- угрубление гранулометрического состава топлива от $R_{90} = 65...80\%$, $R_{200} = 20...50\%$ до $R_{1000} = 70...85\%$, $R_{10000} = 1...10\%$ увеличивает разложение NO примерно в два раза.

5. Расчеты ступенчатого сжигания топлива по схеме ППФ, проведенные по разработанной методике показали, что разложения NO на поверхности вторичного топлива может достигать 25...30 % от первоначальной эмиссии NO, поэтому ввод мелких фракций является эффективным методом снижения выбросов оксидов азота.

6. Разложение оксидов азота в регенераторе NO в схеме ЭЧКУ обеспечивает снижение до 50 % их концентрации в дымовых газах.

7. Переход к факельно-слоевому сжиганию древесного топлива, как показали результаты расчетов, обеспечивает снижение концентрации NO на 25...30 % по сравнению со слоевым способом сжигания.

8. Анализ и обобщение результатов расчетов позволили дать рекомендации по режимам работы и конструктивному оформлению узлов НТВ-топки с целью снижения выбросов оксидов азота:

- обеспечение “настильного” режима течения струи НД;
- установка надгорелочных козырьков;
- ввод рециркуляции газов в струю НД ($r = 10 \dots 15 \%$);
- вывод мелких фракций из дробленого топлива и ввод их топлива выше основных горелок со стороны задней стены топки (ступенчатое сжигание);
- исходное топливо должно иметь гранулометрический состав: $R_{1000} = 70 \dots 85 \%$, $R_{10000} = 1 \dots 10 \%$, $n=1,15$.

9. Разработанная методика может быть применена:

- для расчетов эмиссии оксидов азота при сжигании твердых топлив по НТВ-технологии (в том числе по схеме ЛПИ-ИТЭЦ-10);
- для оценки режимов работы энергетических установок с целью снижения выбросов оксидов азота;
- при оценке путей модернизации старых и создании новых котельных установок;
- для оптимизации показателей схемы ЭЧКУ с реакторами разложения NO.

10. Разработанные рекомендации могут быть применены для сжигания топлив (в т.ч. и биотоплива) по НТВ-технологии, а так же для оптимизации процесса горения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тринченко А.А., Шестаков С.М. Разложение оксидов азота на углеродном материале // XXVII Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1998. С. 76-77.

2. Тринченко А.А., Шестаков С.М. Методика расчета разложения оксидов азота на углеродном материале при низкотемпературном вихревом сжигании твердых топлив // XXVIII Неделя науки СПбГТУ. Ч. I: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 1999. С. 143-145.

3. Тринченко А.А., Шестаков С.М. Оценка влияния фракционного состава коксовых частиц на разложение оксидов азота // XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. II: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. С. 65-68.

4. Тринченко А.А. Приближенный расчет аэродинамической картины течения потоков в НТВ-топке // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч. III.: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 62-65.

5. Тринченко А.А. Оценка степени разложения NO_x на коксовых частицах при трехступенчатом сжигании топлива // XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Ч. III.: Материалы межвуз. науч. конф.- СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 65-68.

6. Шестаков С.М., Тринченко А.А., Штерн Т.Д. Сравнительный анализ двух проектов STEM перевода котельных в Ленинградской области на сжигание древесных отходов // Новости теплоснабжения. - 2001. - № 10. - С. 17-21.

7. Шестаков С.М., Тринченко А.А., Козырев Р.С. Анализ целесообразности перевода мазутных и угольных котельных на сжигание древесных отходов // Внедрение современных технологий энергосбережения в промышленность и коммунальное хозяйство. Материалы науч.-практич. конф. – СПб.: Изд-во СПбГУРП, 1999. С. 70-76.

Список условных сокращений и обозначений:

АКПК – активированная коксовая пористая крошка; БП – бенз(а)пирен; ИТЭЦ-10 – Иркутская ТЭЦ-10; КАТЭК – Канско-Ачинских топливно-энергетический комплекс; КАУ – канско-ачинские угли; КПК – коксовая пористая крошка; КС – кипящий слой; ЛПИ – Ленингр. политехн. ин-т; НВЗ – нижняя вихревая зона; НД – нижнее дутье; НТВ – низкотемпературный вихрь; ППФ – прямоточный пылеугольный факел; ПТЭ – правила технической эксплуатации; ПЧФ – прямоточная часть факела; УИТЭЦ – Усть-Илимская ТЭЦ.

Nu , Re , Se – критерии Нуссельта, Рейнольдса, Семенова; $C_{NO_x, SO_x \dots}(p)$ – концентрации (парциальные давления) газовых компонентов; $W^r, A^r, V_{лет}^{daf}$ – влажность, зольность, выход летучих (%); Q_i^r – низшая теплота сгорания топлива (МДж/кг); $R_{90}/R_{200}/\dots/R_{10000}$ – фракционный состав (%) топлива; T и $\Theta = T/T_a$ – абсолютная (К) и относительная температуры; $q_{2(3,4,5)}$ – потери тепла (%); E – кажущаяся энергия активации; R – универсальная газовая постоянная; $\bar{\gamma}_{SO_2}$ – степень связывания оксидов серы (средняя); G – количество вещества (поток вещества); Δ – толщина приведенной пленки; $m_{ч}$ – масса частицы; W, V – скорости газового потока и частиц, м/с; $V_{кр}$ – критическая скорость частиц (при разрушении); $\psi_{экр}$ – коэффициент тепловой эффективности (экранов); μ – концентрация частиц в потоке газа; $r, \delta_{ч}$ – радиус (размер) частиц; $\rho_{ч}, \rho_{г}$ – плотность частиц и газового потока, кг/м³; τ ($\Delta\tau$) – время (период времени), с.