

## Численное исследование выгорания топливных частиц при факельном сжигании с вводом вторичного топлива

М. А. Хабарова\* А. А. Тринченко†

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
институт энергетики и транспортных систем*

*Россия, 195251, Санкт - Петербург, Политехническая ул., д. 29*

*(Статья поступила 20.06.2019; Подписана в печать 09.09.2019)*

Энергетика является фундаментом для развития и существования промышленного сектора любой страны. На сегодняшний день значительную долю в выработке электроэнергии занимает угольная генерация, важным показателем которой является экология производства. В работе выполнена оценка снижения вредного воздействия угольных электростанций на окружающую среду при применении технологии стадийного сжигания твердого топлива полифракционного состава. На основании численного исследования топочного процесса сделана оценка эффекта от внедрения рассматриваемой технологии в паровой энергетический котел с технологией факельного сжигания. Согласно разработанным подходам определены: уровень температур дымовых газов во высоте топочной камеры с учетом ввода вторичного топлива; показатели процесса горения на различных его стадиях; траектории движения горящих угольных частиц; динамика изменения концентрации оксидов азота по высоте топки, механическая неполнота сгорания топлива, уточнены значения показателей эффективности работы установки. Согласно современным подходам диффузионно-кинетической теории горения разработаны алгоритм, математическая модель и компьютерная программа расчета процесса горения угольного топлива полифракционного состава с учетом ввода вторичного топлива. Модель учитывает сложные физико-химические преобразования, происходящие в процессе горения угля, и может быть использована как на стадии проектирования новых установок, так и при модернизации существующих котлоагрегатов.

PACS: 02.60.Cь

УДК: 504.064.47.

Ключевые слова: паровой котел, топочный процесс, горение твердого топлива, неполнота сгорания, оксиды азота.

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие энергетического комплекса любой страны является основополагающим фактором для развития ее промышленности и экономики в целом. Текущее состояние отрасли и ретроспектива ее развития определяются невозобновляемыми источниками энергии. Традиционная энергетика является хорошо освоенной областью человеческой деятельности, она прошла длительную проверку в различных условиях эксплуатации. Согласно статистике генерации [1] основными источниками энергии являются уголь и природный газ. Самое распространенное топливо в мире — уголь (его доля в объеме мирового производства электроэнергии на протяжении многих лет составляет порядка 40%). В выработке электроэнергии такие крупнейшие экономики, как США, Китай, Индия опираются именно на твердое топливо [2].

Вопрос экологии угольной генерации на сегодняшний день является весьма актуальным. Разработано множество технологий по снижению воздействия электрических станций, использующих уголь, на окружающую среду [3–10]. Новое котельное оборудование проектируется с применением современных методов сни-

жения эмиссии экологически опасных газов. Значительную долю генерации при этом определяют установки, введенные намного раньше и требующие модернизации. Большинство блоков работает по технологии пылеугольного сжигания [11]. Одним из экономически выгодных способов совершенствования таких котлоагрегатов является ввод вторичного топлива, что определяет актуальность принятой к рассмотрению темы.

Цель работы — численное исследование выгорания топливных частиц при использовании технологии с вводом вторичного топлива.

Моделирование топочного процесса — задача с большим числом параметров, требующая для своего решения рассмотрения ряда вопросов. В процессе исследования сформулированы и решены следующие основные задачи:

1. построено векторное поле скоростей дымовых газов в топочной камере парового котла;
2. рассчитано выгорание топливных частиц (диффузионно-кинетическая теория горения);
3. рассчитана температура газов по высоте топочной камеры с учётом эффекта от ввода вторичного топлива;
4. построены траектории движения реагирующих частиц угольной пыли;
5. определены зависимости изменения размера, плотности и массы частиц в процессе горения;

\*E-mail: [maria.khabarova.politeh@yandex.ru](mailto:maria.khabarova.politeh@yandex.ru)

†E-mail: [trinchenko@spbstu.ru](mailto:trinchenko@spbstu.ru)

6. уточнено значение КПД установки;
7. оценена генерация оксидов азота.

Гипотезой исследования является прогнозируемое снижение генерации оксидов азота вследствие применения технологии с вводом вторичного топлива.

Построенная математическая модель топочного процесса может быть использована для моделирования на стадиях проектирования новых котельных агрегатах или модернизации существующих, что определяет практическую значимость исследования.

## 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования рассматривается паровой котёл Е-230-14.0-520 паропроизводительностью 230 т/ч, работающий на пыли донецкого каменного угля марки Д, предмет исследования — сопутствующие процессу горения физико-химические преобразования, происходящие в топочной камере парового котла. Котельный агрегат имеет 6 прямооточных горелок, расположенных на фронтальной стенке котла, через которые подается первичное топливо в количестве 90% от общего расхода. Скорость подачи дополнительного топлива — 10 м/с, диаметр сопл — 0.243 м. Расчетная модель котельного агрегата представлена на рис. 1.

Для схематизации процесса горения угольного топлива его принято разделять на отдельные, относительно независимые, стадии:

1. прогрев частицы до выхода и горения летучих веществ;
2. выход и горение летучих вблизи поверхности частицы;
3. горение коксового остатка.

Продолжительность начальных этапов (прогрева ( $\tau_w$ ), выхода летучих ( $\tau_{ev}$ ), горения летучих ( $\tau_{cv}$ )) определена по эмпирическим зависимостям, предложенным В.И. Бабием [12]:

$$\tau_w = -0.384 \cdot \frac{A_p \cdot \rho_p \cdot \delta^2}{Nu \cdot \lambda_g} \cdot \lg \left( 1 - \frac{Q}{Q_{max}} \right), \quad (1)$$

$$\tau_{ev} = k_{ev} \cdot 5.3 \cdot 10^{14} \cdot g^{-4} \delta^{0.8}, \quad (2)$$

$$\tau_{cv} = k_{cv} \cdot 0.5 \cdot 10^6 \cdot \delta^2 \quad (3)$$

где  $c_p$  — удельная теплоемкость сухой массы топлива;  $\rho_p$  — плотность частицы, принята равной плотности угля согласно [13];  $\delta$  — размер частицы рассматриваемой фракции;  $Nu$  — тепловой критерий Нуссельта;  $\lambda_g$  — теплопроводность;  $Q/Q_{max}$  — отношение количества тепла, воспринятого частицей, к максимально возможному при данной температуре газа;

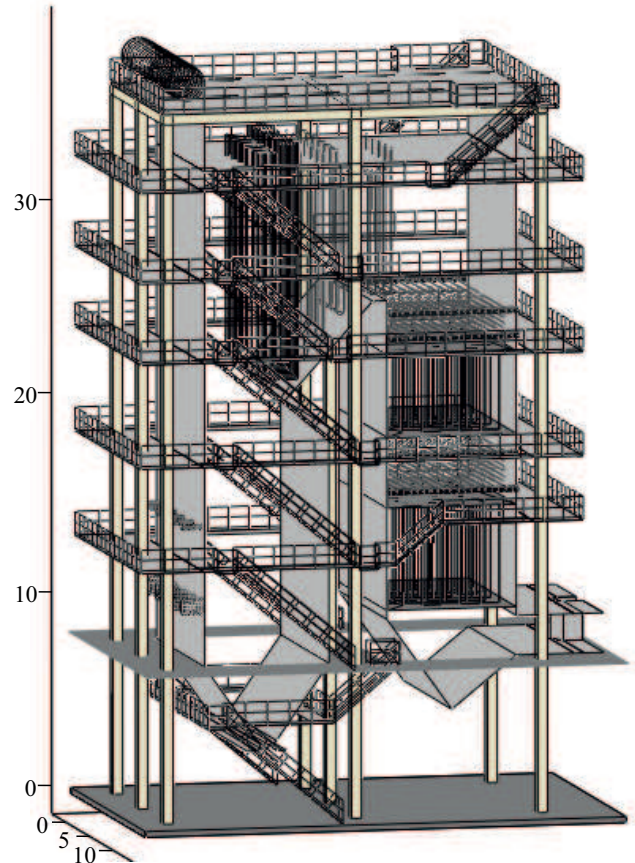


Рис. 1: Модель котла Е-230-14.0-520

$g$  — температура газового потока;  $k_{ev}$ ,  $k_{cv}$  — опытные коэффициенты [14].

Для угольной пыли стадия горения углерода кокса (стадия выгорания) является существенной и составляет до 90% общего времени горения частицы. В работе наиболее подробно рассмотрен вопрос расчета последней, самой продолжительной, стадии.

## 2. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПЫЛИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА

Горение углерода кокса — гетерогенный процесс, определяемый как кинетикой горения углерода кокса, так и диффузионным переносом кислорода и продуктов сгорания у горящей поверхности частицы. Следствием одновременности этих процессов является определенное распределение концентраций продуктов сгорания и кислорода. Изменение массы частицы во времени (выгорание) можно записать в виде:

$$\frac{dm_p}{d\tau} = -G_C M_C F_{surf}, \quad (4)$$

где  $m_p$  — масса частицы;  $\tau$  — момент времени;  $G_C$  — скорость выгорания углерода;  $M_C$  — молеку-

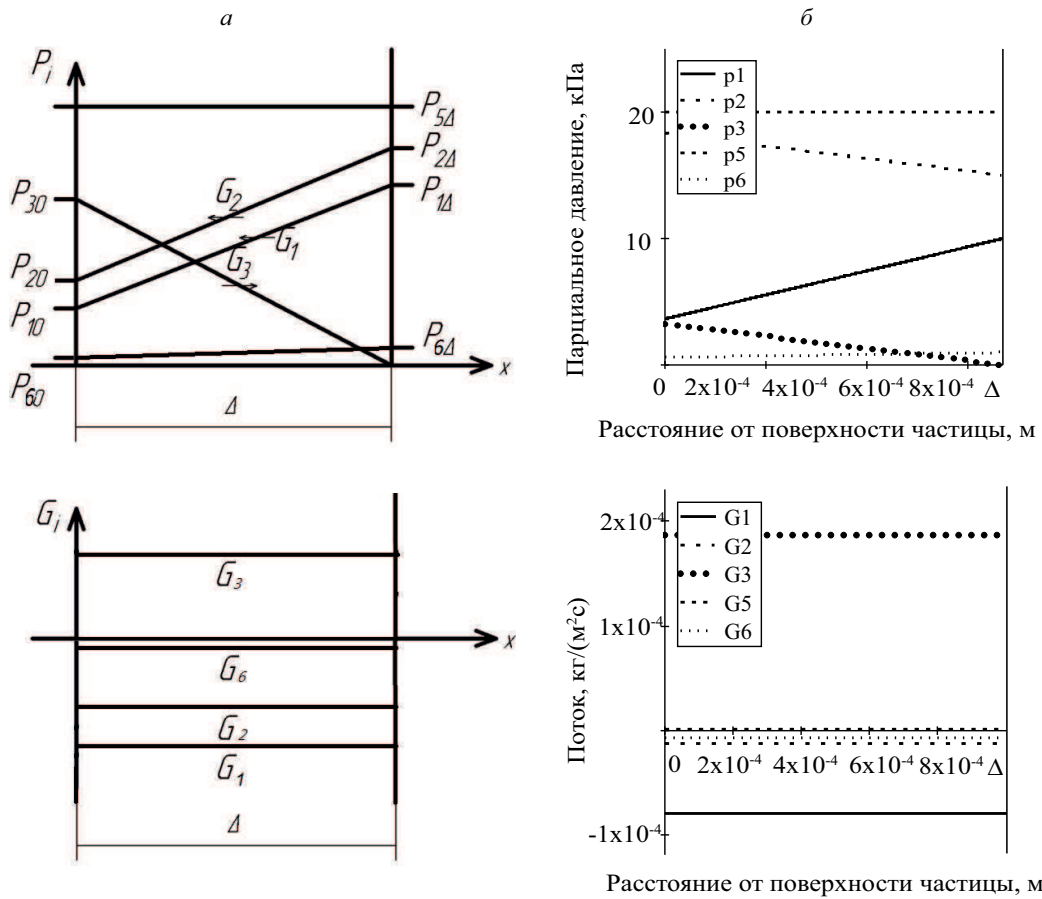


Рис. 2: Распределение парциальных давлений и потоков компонентов в приведенной пленке: *a* — схема процесса; *б* — результаты расчета процесса в приведенной пленке (обозначения компонентов: 1 — O<sub>2</sub>; 2 — CO<sub>2</sub>; 3 — CO; 4 — H<sub>2</sub>; 5 — H<sub>2</sub>O; 6 — NO)

лярная масса углерода;  $F_{surf}$  — площадь поверхности частицы.

При попадании частиц неправильной формы в топочную камеру их острые кромки стремительно обгорают, и их форма становится близкой к форме шара. Для шаровой частицы, для которой выгорание происходит только по внешней поверхности, получим уравнение выгорания частицы:

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -2 \frac{M_C}{\rho_p} G_C. \tag{5}$$

Решение данного уравнения обычно представляет собой трудную математическую задачу, вследствие сложности зависимости  $G_C(\delta)$ .

Основными газами, реагирующими с углеродом кокса топлива, являются кислород, уголекислота, водяной пар. В настоящей работе рассмотрен случай с добавлением к набору гипотетических реакций [14] реакции взаимодействия углерода с оксидом азота.

В зависимости от условий протекания процесса кислород все в большей степени расходуется на догорание CO и H<sub>2</sub> в пределах приведенной пленки. При этом возможны следующие схемы горения:

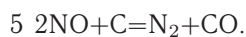
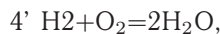
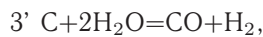
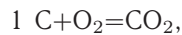
1. Схема «горящего» пограничного слоя (кислород достигает поверхности углеродной частицы);
2. Схема «двойного горящего» пограничного слоя (кислород не достигает поверхности углеродной частицы, расходуясь на догорание CO и H<sub>2</sub> в пределах приведенной пленки);
3. Схема «негорящего» пограничного слоя (в пределах приведенной пленки происходят только диффузионные процессы).

Для пылеугольного сжигания топлива свойственна схема с «негорящим» пограничным слоем. Характерная картина распределения парциальных давлений (концентраций) компонентов газовой смеси вблизи поверхности горячей частицы кокса (в пределах приведенной пленки толщиной  $\Delta$ ) представлена на рис. 2.

Как показали расчеты, скорость горения CO и H<sub>2</sub> невелика, и их горение в пределах приведенной пленки практически не влияет на распределение концентраций компонентов, прежде всего кислорода. Оксид углерода выносится из приведенной пленки и сгорает в газовом потоке. В этом случае в пределах приведенной пленки происходят только диффузионные процессы (рис. 2,

б). Расчетные формулы для этой схемы упрощаются, т.к. потоки компонентов сохраняются неизменными по всей толщине пограничного слоя.

Набор исследуемых реакций, идущих без изменения объема:



Обозначим основные реагирующие компоненты следующим образом: 1 —  $\text{O}_2$ ; 2 —  $\text{CO}_2$ ; 3 —  $\text{CO}$ ; 4 —  $\text{H}_2$ ; 5 —  $\text{H}_2\text{O}$ ; 6 —  $\text{NO}$ ; 7 —  $\text{N}_2$ .

Поток углерода с учетом стехиометрических соотношений (действительных реакций):

$$G_C = \frac{\alpha_D}{RT} [(N_1 + 2N_2)p_{10} + N_3p_{20} + N_3'p_{50} + N_5p_{60}], \quad (6)$$

где  $\alpha_D$  — коэффициенты диффузионного массообмена;  $N_i$  — диффузионно-кинетический критерий  $i$ -го компонента;  $p_{i0}$  — давление  $i$ -го компонента у поверхности частицы.

На основе диффузионно-кинетической теории реагирования получены зависимости парциальных давлений (7, 8) и потоков компонентов (9) вблизи горячей угольной частицы с учетом реакции разложения оксидов азота на углероде кокса.

Давления компонентов у поверхности частицы:

$$\begin{cases} p_{10} = \frac{p_{1\Delta} - 0,5N_3'p_{5\Delta}}{1 + N_1 + N_2}, \\ p_{20} = \frac{p_{2\Delta} + N_1p_{10}}{1 + N_3}, \\ p_{30} = N_2p_{10} + N_3p_{20} + 0,5N_3'p_{5\Delta} + 0,5N_5p_{60}, \\ p_{50} = p_{5\Delta}, \\ p_{60} = \frac{p_{6\Delta}}{1 + N_5}, \end{cases} \quad (7)$$

где  $p_{i\Delta}$  — давление  $i$ -го компонента на поверхности приведенной пленки.

Распределения давлений компонентов по толщине приведенной пленки:

$$\begin{cases} p_1(x) = \frac{p_{1\Delta} - p_{10}}{\Delta}x + p_{10}, \\ p_2(x) = \frac{p_{2\Delta} - p_{20}}{\Delta}x + p_{20}, \\ p_3(x) = \frac{-p_{30}}{\Delta}x + p_{30}, \\ p_6(x) = \frac{p_{6\Delta} - p_{60}}{\Delta}x + p_{60}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $x$  — координата по оси, перпендикулярной поверхности частицы, в условиях данной задачи рассматривается интервал  $[0.. \Delta]$

По формулам для гипотетических реакций необходимо принимать двойной поток  $\text{CO}$ , чтобы удовлетворить фактическому соотношению между потоками. Распределения потоков компонентов по толщине приведенной пленки:

$$\begin{cases} G_1 = \frac{D}{RT} \frac{p_{10} - p_{1\Delta}}{\Delta}, \\ G_2 = \frac{D}{RT} \frac{p_{20} - p_{2\Delta}}{\Delta}, \\ G_3 = 2 \frac{D}{RT} \frac{p_{30}}{\Delta}, \\ G_6 = \frac{D}{RT} \frac{p_{60} - p_{6\Delta}}{\Delta}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $G_i$  — поток  $i$ -го компонента;  $D$  — коэффициент диффузии кислорода в топочных газах.

С применением выведенных зависимостей получено, что выражение для потока углерода примет вид:

$$G_c = \frac{\alpha_D}{RT} \left( \frac{1}{(1 + N_3)(1 + N_1 + N_2)} \times \right. \\ \times [p_{1\Delta} \langle N_1(1 + 2N_3) + 2N_2(1 + N_3) \rangle + \\ \left. + p_{2\Delta} N_3 \langle 1 + N_1 + N_2 \rangle + \right. \\ \left. + N_3' p_{5\Delta} \langle 1 + 0,5N_1 + N_3 \rangle \right] + N_5 \frac{p_{6\Delta}}{1 + N_5} \Big). \quad (10)$$

Таким образом, с помощью диффузионно-кинетической теории реагирования получены расчетные зависимости для стадии горения углерода кокса (стадии выгорания), которые учитывают протекание реакции разложения оксидов азота на углероде кокса.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТОПОЧНОГО ПРОЦЕССА

С применением зависимостей (1–10) выполнен расчет топочного процесса при горении твердого топлива полифракционного состава.

По выражениям [14] истечения системы горелочных струй из сопловых отверстий произведен расчет аэродинамики топочного пространства. Определение скорости ввода вторичного топлива выполнено с учетом оценки ее влияния на дальность струи. Для получения наилучшего эффекта от ввода вторичного топлива необходимо, чтобы поток вторичного топлива достиг ядра факела. Данное условие достигается при скорости ввода вторичного топлива ( $w_0$ ), равной 10 м/с (рис. 3). Векторное поле скоростей газо-воздушных потоков в продольном сечении топочной камеры представлено на рис. 4.



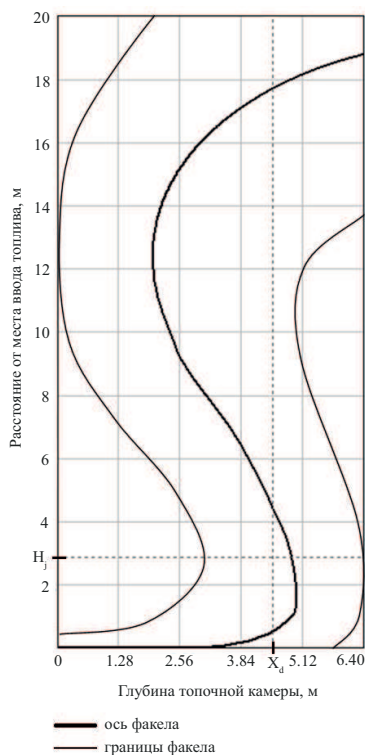


Рис. 3: Схема проникновения вторичного топлива в поперечный поток:  $H_j$  — уровень установки сопел  $d$  — глубина проникновения струи вторичного топлива при  $w_0 = 10$  м/с

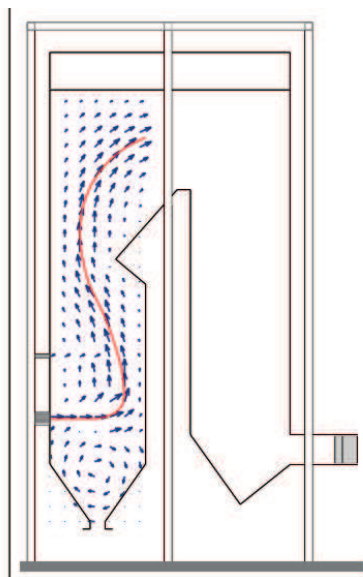


Рис. 4: Векторы скорости и ось основной струи в топке котла Е-230-14.0-520

Обработка рассеивочных кривых основного и дополнительного топлив (рис. 5), позволила получить начальные размеры, массу и площади частиц для каждой из принятых к расчету фракций. Распределение частиц по размерам определяется по формуле Розина–

Раммлера–Беннета:

$$R_{0i} = e^{-b \cdot \delta_{0i}^n}, \tag{11}$$

где  $b$  — опытный коэффициент, характеризующий тонкость помола;  $n$  — показатель полидисперсности.

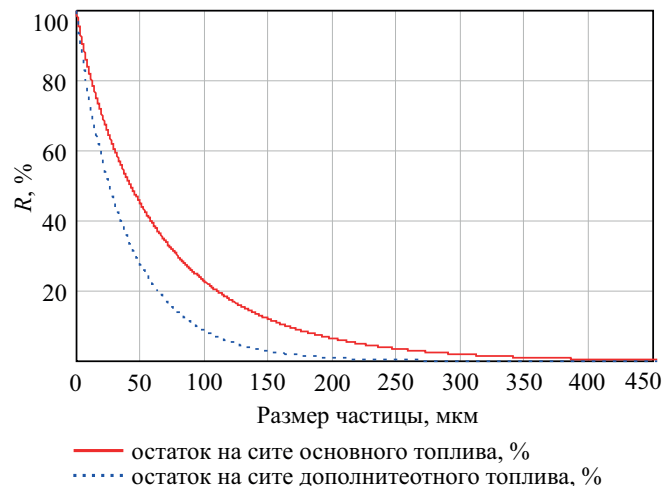


Рис. 5: Зерновые характеристики пыли ( $R$  — относительное массовое содержание частиц с размером  $\delta$ )

Концентрация образующихся оксидов азота при горении основного топлива (11) находится из решения уравнения гомогенной кинетики [12], количество разложившихся оксидов азота на углероде кокса вторичного топлива (12) определяется в соответствии со стехиометрией реакции  $2NO + C = N_2 + CO$ .

$$\frac{dNO_x}{d\tau} = k_{02} e^{-\frac{E}{RT}} \frac{1}{T} [O_2]^\nu [N]; \tag{12}$$

$$NO_d = 2.5G_{C+NO}12F\Delta\tau, \tag{13}$$

где  $NO_x$  — количество образовавшихся оксидов азота;  $NO_d$  — количество разложившихся оксидов азота;  $k_{02}$  и  $E$  [13] — предэкспоненциальный множитель и энергия активации для реакции окисления азота [13];  $[O_2]$  — концентрация кислорода;  $\nu$  — порядок реакции по кислороду;  $[N]$  — концентрация атомарного азота;  $G_{C+NO}$  — скорость выгорания углерода кокса;  $F$  — площадь поверхности частиц реагирующего топлива;  $\Delta\tau$  — интервал времени.

Результаты расчетов динамики изменения концентрации оксидов азота по высоте топочной камеры, применительно к топливу полифракционного состава, представлены на рис. 6. Получено, что наибольший эффект от ввода вторичного топлива достигается при установке сопел на уровне максимальной генерации оксидов азота. Таким образом, высота ввода вторичного топлива составила 2.875 м над основным ярусом горелок.

Температура дымовых газов с учётом ввода вторичного топлива определяется по зависимости, предложенной А.М. Гурвичем и А.Г. Блохом [13], применительно к ступенчатому сжиганию преобразованной к виду:

$$\Theta = (e^{-\alpha Z} - Ae^{-\beta Z})^{1/4} (1 - b_{II}) + (e^{-\alpha(Z-Z_{scnd})} - Ae^{-\beta(Z-Z_{scnd})})^{1/4} b_{II}, \quad (14)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $A$  — коэффициенты, определяемые граничными условиями и условием экстремума функции  $\Theta = f(Z)$ ,  $b_{II}$  — доля вторичного топлива;  $Z$  — относительное расстояние от места ввода топлива;  $Z_{scnd}$  — уровень вторичного ввода топлива.

Результат вычислений для случая одноступенчатого сжигания и технологии ввода вторичного топлива представлен на рис. 7.

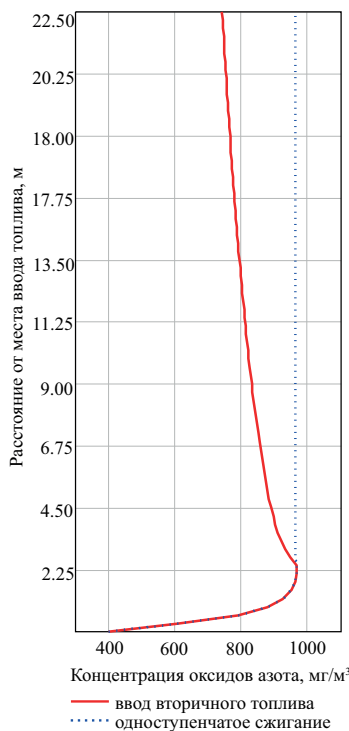


Рис. 6: Динамика изменения концентрации оксидов азота по высоте топки

При расчете движения реагирующих частиц в потоке дымовых газов учитывалось две силы: сила лобового аэродинамического сопротивления и сила тяжести частицы, как наиболее существенные факторы, влияющие на процесс перемещения частиц топлива. С учетом переменной массы для плоской картины можно записать уравнение движения реагирующих частиц в проекциях на оси двумерной декартовой системы координат [14]:

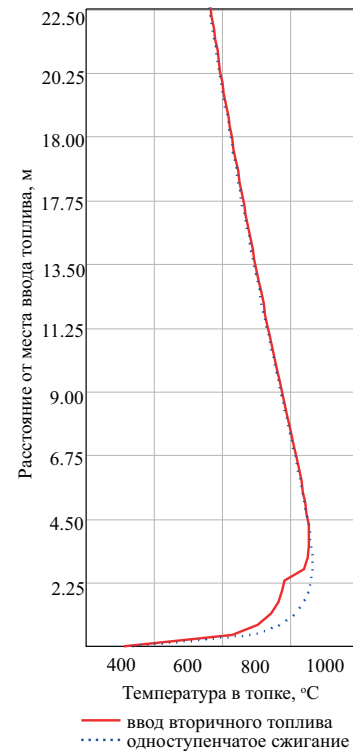


Рис. 7: Профиль температуры в топке котла E-230-14,0-520

$$\begin{cases} \frac{dm_p V_x}{d\tau} = \frac{cf\rho_3}{2} (W_x - V_x) \times \\ \quad \times \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2}, \\ \frac{dm_p V_y}{d\tau} = \frac{cf\rho_3}{2} (W_y - V_y) \times \\ \quad \times \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2} - mg, \end{cases} \quad (15)$$

где  $V$  и  $W$  — скорость частицы и газового потока;  $f$  — площадь миделева сечения частицы;  $\rho_3$  — плотность газового потока;  $c$  — коэффициент сопротивления горящих частиц;  $g$  — ускорение свободного падения.

Решение системы (15) произведено численным методом с условием известного поля скоростей дымовых газов в топочной камере парового котла.

В процессе горения топливных частиц помимо изменения размера происходит изменение плотности, которые в совокупности определяют изменение массы во времени. Результаты расчетов для частиц размером 300 мкм представлены на рис. 8. Результаты расчета траекторий движения горящих угольных частиц представлены на рис. 9.

Для наглядного представления результатов использованы графические возможности средств цифровых вычислений. Подобный подход к решению технических задач в энергетике позволяет изучать их в более глубоком, подробном ключе с использованием значительного объема итерационных вычислений.

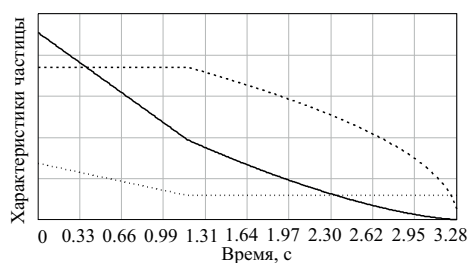


Рис. 8: Изменение массы (—), плотности (.....), размера (.....) горящей угольной частицы во времени ( $\delta_0 = 300$  мкм)

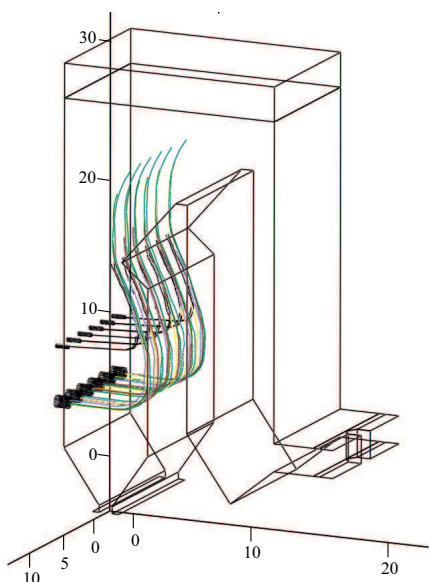


Рис. 9: Траектории движения горящих частиц в топке котла E-230-14,0-520

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании современных подходов диффузионно-кинетической теории горения, выполнено численное исследование выгорания топливных частиц технологии ввода вторичного топлива топлива. Разработаны методика, алгоритм, математическая модель и компьютерная программа расчета процесса горения топлива полифракционного состава. Модель учитывает

сложные физико-химические процессы перехода связанной энергии топлива в тепловую энергию. На основании вариантных расчетов по разработанной модели спрогнозированы технико-экономические показатели работы котельного агрегата на стадии проектирования установки, по представленной методике произведен расчет динамики изменения концентрации оксидов азота по высоте топки.

С использованием модели рассчитаны зависимости размера, плотности и массы частиц рассматриваемого топлива от времени. Моделирование горения полифракционного твердого топлива в топочной камере котла E-230-14,0-520 показало, что принятое при составлении теплового баланса значение механической неполноты сгорания превышает расчетное на 0,5 %. Это определяет в конструкторском расчете котла повышенный расход топлива ( $B$ ) и снижение КПД установки ( $\eta$ ). При принятом значении механического недожога:  $\eta = 92.33\%$ ,  $B = 38.2$  т/ч; при рассчитанном:  $\eta = 92.83\%$ ,  $B = 38.0$  т/ч. Отклонение расхода топлива (в большую сторону) составляет 0,2 т/час. Для ликвидации завышения расчетного расхода топлива, это обстоятельство должно учитываться при проектировании котельного агрегата.

Представленная в работе модель позволила рассчитать концентрацию оксидов азота на выходе из топочной камеры. В результате получено, что для принятого к рассмотрению котельного агрегата использование технологии ввода вторичного топлива приводит к снижению концентрации оксидов азота на выходе из топочной камеры на 30 % ( $990$  мг/м<sup>3</sup> для технологии пылеугольного факела и  $700$  мг/м<sup>3</sup> при применении технологии ступенчатого ввода топлива), что согласуется с имеющимися разработками [15–17].

Таким образом, разработанная модель позволяет уточнить проектные характеристики установки и может быть использована как при создании новых котлов, так и при их реконструкции и техническом перевооружении. Результаты расчетов хорошо согласуются с опытными данными, что позволяет использовать разработанную модель для исследования процесса горения твердого органического топлива при его факельном сжигании в топках котлов, а также других технологических аппаратах для исследования и совершенствования протекающих в них процессов.

- [1] Международное энергетическое агентство (IEA, МЭА) (world energy balance: overview 2018)
- [2] Carbon Brief. Clear on climate "Global coal power"[Электронный ресурс]. URL: <https://www.carbonbrief.org> (дата обращения: 01.10.2018).
- [3] Trinchenko A. A. Research of nitrogen oxides generation during low-temperature swirl fuel combustion // *MATEC Web of Conferences*. 2018. **193**, 03054..
- [4] Trinchenko A. A., Paramonov A. P., Kadyrov M. R.,

- Koryabkin A. I. Numerical research of reburning-process of burning of coal dust torch // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2017. **90** 012012 .
- [5] Kadyrov M. R., Khabarova M. A., Khabarov A. A., Trinchenko A. A. Simulating combustion processes based on digital technologies. *SHS Web of Conferences*. IV Int. Sci. Conf. «The Convergence of Digital and Physical Worlds: Technological, Economic and Social Challenges». 2018. **44**. .
- [6] Trinchenko A. A. Numerical simulation of

- environmentally-safe technologies in power engineering // *SHS Web of Conferences*. 2018. **44**. 00076.
- [7] *Рябов Г. А., Надыров И. И.* Сжигание угля в кипящем слое // Сборник научных статей «Развитие технологий подготовки и сжигания топлив на электростанциях». М.: ВТИ, 1996.
- [8] *Тумановский А. Г., Котлер В. Р., Надыров И. И., Енякин Ю. П., Рябов Г. А., Пронин М. С., Бабий В. И.* // Теплоэнергетика. 1996. № 7. С. 30.
- [9] *Башкова М. Н., Казимиров С. А., Темлянец М. В., Багрянцев В. И., Рыбушкин А. А., Слажнева К. С.* Практика и перспективы применения различных способов сжигания твёрдого топлива в теплоэнергетических установках. Новокузнецк: СибГИУ, 2014.
- [10] *Мурко В. И., Федяев В. И., Карпенков В. И., Дзюба Д. А.* // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2012. № 5. С. 512.
- [11] *Башкова М. Н., Казимиров С. А., Темлянец М. В., Багрянцев В. И., Рыбушкин А. А., Слажнева К. С.* Практика и перспективы применения различных способов сжигания твёрдого топлива в теплоэнергетических установках. Новокузнецк: СибГИУ, 2014.
- [12] *Бабий В. И., Куваев В. Ф.* Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- [13] *Гурвич А. М., Блох А. Г.* Энергомашиностроение. 1956. № 6. С. 11.
- [14] *Померанцев В. В., Арефьев К. М., Ахмедов Д. Б.* Основы практической теории горения: Учебное пособие для вузов / Под ред. В. В. Померанцева. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
- [15] *Trinchenko A. A., Paramonov A. P., Kadyrov M. R.* // *Procedia Engineering*. 2017. **206**. P. 546..
- [16] *Trinchenko A. A., Paramonov A. P., Kadyrov M. R.* // *Procedia Engineering*. 2017. **206**. P. 558..
- [17] *Тринченко А. А.* // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 2 (**123**). С. 104.

---

## Numerical study of combustion of fuel particles in burning with the introduction of the secondary fuel

**M. A. Khabarova<sup>a</sup>, A. A. Trinchenko<sup>b</sup>**

*St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great  
St. Petersburg 195251, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>maria.khabarova.politeh@yandex.ru, <sup>b</sup>trinchenko@spbstu.ru*

Energy is the Foundation for the development and existence of the industrial sector of any country. At present, a significant share in the generation of electricity is coal generation, an important indicator of which is the ecology of production. The estimated reduction of adverse impact of the operation coal-fired power plants on the environment during the application of the technology stage solid fuel burning polyfractional composition. Based on the numerical study of the combustion process, the effect of the introduction of this technology in a steam power boiler with flaring technology is estimated. According to the developed approaches are identified: the level of flue gas temperatures in the furnace chamber height, with the launch of the secondary fuel; indicators of the combustion process at various stages; the trajectory of the particles of burning coal particles; dynamics of changes in the concentration of nitrogen oxides at the height of the furnace, the mechanical incomplete combustion of the fuel and specified values of indicators of efficiency of operation. According to the diffusion-kinetic theory of the combustion modern approaches developed an algorithm, a mathematical model and a computer program for calculating the combustion process of coal fuel of the polyfractional composition taking into account the input of secondary fuel. The model takes into account complex physical and chemical transformations occurring in the process of burning coal fuel, and can be used at the design stage of new installations and upgrading of existing boiler units.

PACS: 02.60.Cb

*Keywords:* steam boiler, combustion process, combustion of solid fuel, incomplete combustion, nitrogen oxides.

*Received 20 June 2019.*

### Сведения об авторах

1. Хабарова Мария Александровна — студент; e-mail: maria.khabarova.politeh@yandex.ru.
2. Тринченко Алексей Александрович — канд. техн. наук, доцент, вед. науч. сотрудник; тел.: (812) 552-16-30, e-mail: trinchenko@spbstu.ru.