

**На правах рукописи**



**ГАСИЛИН ВИТАЛИЙ ВИКТОРОВИЧ**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАГИРУЮЩИХ  
ГАЗО-УГОЛЬНЫХ ПОТОКОВ В УСТАНОВКАХ С ПОНИЖЕННЫМ  
СОДЕРЖАНИЕМ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ**

Специальность:

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Казань 2020

Работа выполнена на кафедре автомобильных двигателей и сервиса федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева–КАИ»

**Научный руководитель:**

**Крюков Виктор Георгиевич**

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева–КАИ», профессор кафедры автомобильных двигателей и сервиса

**Официальные оппоненты:**

**Ларионов Виктор Михайлович**

доктор технических наук, доцент кафедры технической физики и энергетики инженерного института ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

**Зырянов Илья Андреевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной физики института математики и информатики ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет».

Защита состоится «29» апреля 2020 года в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 212.0079.02 при ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ" по адресу: 420111, г.Казань, ул.К. Маркса, д. 10 (зал заседаний Ученого совета).

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах), заверенные гербовой печатью учреждения, просим отправлять по адресу: 420111, г. Казань, ул.К. Маркса, д. 10, ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ", ученому секретарю диссертационного совета Д 212.079.02.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ" и на сайте <http://old.kai.ru/science/disser>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.079.02  
д.т.н., профессор



В.А. Алтунин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность и степень разработанности темы исследования**

Согласно энергетической стратегии России до 2030г. экологическая безопасность тепловой энергетики будет обеспечиваться на основе развития экологически чистых технологий сжигания угля и улучшения качества угольного топлива. Основным препятствием для широкого применения угля в топливно-энергетической сфере является наличие значительного количества вредных веществ в продуктах его сгорания. С целью их сокращения разрабатываются топки горения распыленного угля в потоке со значительно сокращенным объемом вредных выбросов.

Горение частиц угля в реагирующих потоках является сложным комплексным процессом, трудным для изучения как экспериментально, так и теоретически. Для ее решения широко применяется техника математического моделирования. В связи с актуальностью проблемы опубликовано множество работ по тематике горения угля. Моделирование отдельных процессов рассматривалось в работах: Хайдурова А. и др., Мингалеевой Г. и др., Кузнецова В. и др, Reichel D.и др, Therssen, E. и др, Kobayashi H. и др., Федосеева, С. и др, Monson С. и др., Sadhukhan A. и др., Saastamoinen J и др., Nair R. и др., Stouffer, M. и др. Комплексные модели представляли: Бойко Е., А. Musarra S. и др., Lau С. и др., Tang В. и др., Veras, С. и др., Costa V.и др.

Однако комплексные модели с учетом образования вредных веществ, ориентированные на установки с пониженным содержанием вредных выбросов практически отсутствуют.

**Цель исследования:** разработать и модифицировать комплексные математические модели, алгоритмы и инвариантные программы расчета характеристик горения распыленного угля в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов.

### **Задачи исследования:**

1. Провести обзор и анализ научно-технической и патентно-лицензионной литературы по теме диссертации;
2. Создать и модифицировать комплексные модели расчета характеристик горения распыленного угля в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов;
3. Разработать алгоритмы и программные комплексы, основанные на численной схеме решения жестких уравнений, позволяющие выполнять расчеты для различных типов углей;
4. Провести сравнение созданных моделей с экспериментальными данными;

5. Выполнить численные исследования по прогнозированию характеристик процессов горения в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов.

**Научная новизна диссертационной работы:**

1. Разработана новая комплексная математическая модель расчета горения смеси генераторного газа (Н-газа) и препарированного угля (Р-угля) в тракте при двухзонном вдуве воздуха; эта модель базируется на детальной химической кинетике;

2. Усовершенствована математическая модель горения распыленного угля в потоке горячего воздуха с последующим впрыском охлаждающей воды;

3. Создан новый алгоритм расчета жестких дифференциально-алгебраических уравнений, использующий неявно-разностную схему с вовлечением якобиана.

**Теоретическая значимость работы:**

1. Для прогнозирования характеристик газоугольных реагирующих смесей в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов созданы инвариантные программные комплексы;

2. Для выполнения численных исследований в реагирующей системе (C + H + O + N + S + Ca) сформирована специальная база данных, которая включает 88 веществ и более 500 реакций.

**Практическая значимость работы:**

1. Выполнены численные исследования по прогнозированию характеристик процессов горения в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов;

2. По результатам этих исследований были выявлены взаимосвязи процессов, протекающих в трактах, и получены оценки влияния конструктивных параметров на характеристики горения.

**Методы исследования.**

Работа носит теоретический характер, базируется на методологии математического моделирования, использует методы вычислительной математики и научного программирования, применяемые к области проектирования установок сгорания распыленного угля.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Новая комплексная математическая модель расчета горения смеси генераторного газа (Н-газа) и препарированного угля (Р-угля) в тракте;

2. Усовершенствованная комплексная математическая модель горения распыленного угля в потоке горячего воздуха с последующим впрыском охлаждающей воды;

3. Алгоритм расчета жестких дифференциально-алгебраических уравнений, использующий неявно разностную схему с вовлечением якобиана;

4. Инвариантные программные комплексы расчета процессов в реагирующих газо-угольных системах;

5. Численные исследования по прогнозированию характеристик процессов горения в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов.

#### **Степень достоверности полученных результатов.**

Достоверность полученных результатов исследования подтверждена корректным использованием фундаментальных законов механики сплошных сред, химической кинетики, горения, тепло-массообмена и сравнением с данными других авторов.

#### **Апробация результатов исследования.**

Автор выступал с докладами на Всероссийских и международных научно-технических конференциях: XIX международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Алушта, Крым, 2015 г.; X Школа-семинар молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, Казань, 2016 г.; XI Международная молодежная научная конференция «Тинчуринские чтения», Казань, 2016 г.; Международная молодежная научная конференция «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)», Казань, 2017 г.; XI Всероссийская научная конференция молодых ученых "Наука. Технологии. Инновации" (НТИ-2017), Новосибирск, 2017 г.; Научно-техническая конференция по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ-РТ, Казань, 2017 год.

#### **Внедрение результатов исследований.**

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ и Республики Татарстан «Математическое моделирование реагирующих и массообменных течений в энергоустановках» № 13-08 97070/2013-2014 гг., №.15-48-02454/2015-2017 гг. Результаты работы внедрены на предприятии ООО "Энергетика" при принятии технических решений по оптимизации схемы подготовки и организации процесса сжигания топлива, получаемого из древесной щепы, в топке газогенератора мощностью 12кВт вырабатываемой электрической энергии, а также в лекционные курсы и лабораторные комплексы дисциплин «Математическое моделирование» и «Управление техническими системами», читаемых на кафедре «Автомобильные двигатели и сервис» КНИТУ-КАИ.

#### **Личный вклад автора.**

Автором лично была разработана комплексная математическая модель расчета горения смеси генераторного газа (Н-газа) и препарированного угля (Р-угля) в тракте сгорания (DFC); усовершенствована математическая модель

горения распыленного угля в потоке горячего воздуха с последующим впрыском охлаждающей воды; сконструированы инвариантные программные комплексы, базирующиеся на детальной химической кинетике; выполнены численные исследования по прогнозированию характеристик процессов горения в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов.

#### **Публикации.**

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них 3 научные статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК, 8 тезисов и материалов докладов на Всероссийских и международных научно-технических конференциях.

#### **Структура и объем диссертационной работы.**

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка используемых источников информации и списка принятых обозначений и сокращений. Основное содержание диссертации изложено на 176 страницах машинописного текста, содержит 17 таблиц и 62 рисунка. Библиография включает 134 наименования.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложена актуальность темы диссертационной работы, приведены цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние проблемы моделирования процессов горения частиц распыленного угля. Представлены схемы установок и принципиальная схема процессов, протекающих при горении угля. Горение частиц угля является комплексным процессом, обусловленным сложной структурой угля, который включает: влагу, летучие вещества, углерод, минеральные примеси (рис.1). Этот процесс включает: теплообмен частиц топлива с окружающей средой; теплоперенос внутри частицы; термохимические превращения органических и минеральных масс; испарение влаги; выход летучих; сгорание кокса; эмиссия примесей; горение в газовой фазе.

Количество влаги в частицах угля может оказать значительное влияние на температуру рабочего тела и динамику процесса горения. В работах Пузырева Е. М., Costa V. J. и др. показано, что при содержании влаги более 10% необходимо учитывать ее влияние на характеристики рабочего тела, и отмечается, что не вся влага испаряется из пор частиц при температуре кипения.

Разработке математических моделей образования и выхода летучих посвящено много публикаций. В работах Бойко Е. А. представлена общая форма уравнений выхода летучих в результате многостадийного механизма разрыва связей, сопровождающийся выделением балластных ( $H_2O_{ch}$  и  $CO_2$ ) и горючих газообразных летучих компонентов ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  и т.д.) и смол ( $C_8H_{18} \cdot 2H_2O$ ) при термическом разложении органической массы угля.

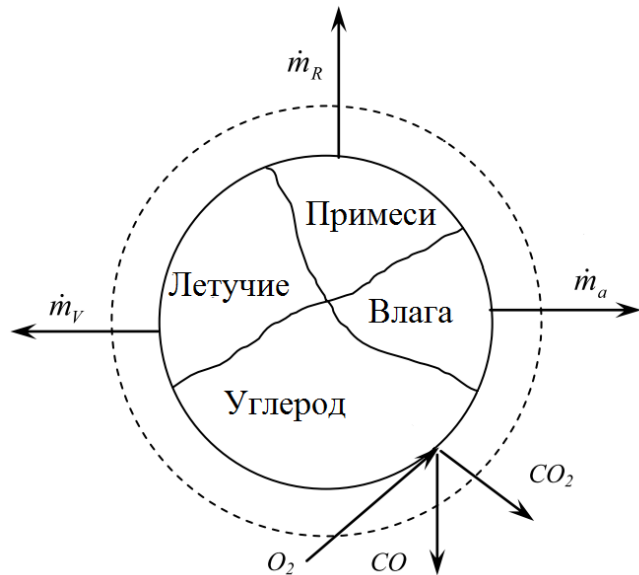


Рисунок 1 - Состав и схема горения угольной частицы

Модель Kobayashi Н., и др. описывает выход летучих двумя параллельными реакциями, которые приводят к образованию разных количеств летучих и кокса, и с увеличением темпа нагрева количество кокса увеличивается. Therssen, Е., и др. представили модель выхода летучих для восьми видов угля в сухом виде. Даны оценки некоторым эффектам, которые наблюдаются во фракции летучих. Полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными. Авторы также сравнивают пять моделей выхода летучих: модели Badzioch,

Kobayashi, Ubhayakar, Fu и Anthony. Утверждается, что выход летучих веществ зависит от содержания углерода и водорода, без использования какого-либо механизма реакции.

Углерод сгорает в ходе поверхностных реакций, которые протекают с высокой скоростью в окислительной среде и медленно в восстановительной среде. К настоящему времени разработано немало математических моделей горения и газификации кокса. Monson, С. R., и др. представили глобальную модель окисления кокса на внешней поверхности частицы при четырех уровнях давления. Были проведены эксперименты для частиц с диаметрами от 40 до 70 мкм при температурах в реакторе  $T_g = (1000-1500)K$  и содержании кислорода от 5 до 21%. В ходе горения температура частиц достигала значений  $T_p = (1400-2100)K$ . При  $T_p \leq 1800K$  на поверхности образуется в основном  $CO_2$ , а при более высоких температурах  $CO$ . Ряд авторов изучали вопрос о перекрытии этапов выхода летучих и сжигания кокса. Так в статье Juniper, L. A., и др. сообщается об этом явлении для частиц от 10 до 130 мкм. Сжигание летучих веществ не препятствует нагреву частицы, но способствует нагреву газа, тем самым изменяя характеристики сгорания. Saastamoinen, J. J., и др. также экспериментально обнаружили и объяснили одновременное появление этих явлений для частиц меньше определенного критического размера ( $d_p \leq 500$  мкм) при  $T_g = (1000-1400)K$  и содержании кислорода  $\approx 21\%$ . Разработанная авторами упрощенная модель показала, что при некоторых условиях наложение этапов способствует ускорению сгорания частиц угля.

Проблема образования  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  является актуальной и в этом направлении уже опубликовано множество работ. В работах Visona, S. P., и др. представляются результаты численных исследований по горению одиночной частицы угля с учетом выделения азота (N) и последующего его преобразования в NO. Hughes, K. J., и др. оценивали количества  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2\text{O}$ , образовавшихся в камере сгорания с псевдоожиженным слоем во время сжигания пылевидного угля. Авторы оценили влияние температуры, размера частиц угля на выбросы  $\text{NO}_x$  и  $\text{N}_2\text{O}$ . Было указано, что хотя механизмы образования  $\text{NO}_x$ , представленные в литературе, уже широко изучены, существует большая потребность в их дальнейшей разработке.

В работах Liu, H. и др., Hu, N. и др., Nair, R.V., и др., для уменьшения концентрации двуокиси серы  $\text{SO}_2$  предлагается подавать в топку карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ). При его разложении образуются микрочастицы CaO (см. рис.2), которые могут абсорбировать  $\text{SO}_2$ , превращаясь в  $\text{CaSO}_4$ . А это вещество можно отделить от выходящих газов в циклоне. Но, как указывают эти авторы, процесс абсорбции протекает только в узком интервале температур  $T = 1100 \dots 1500$  К.

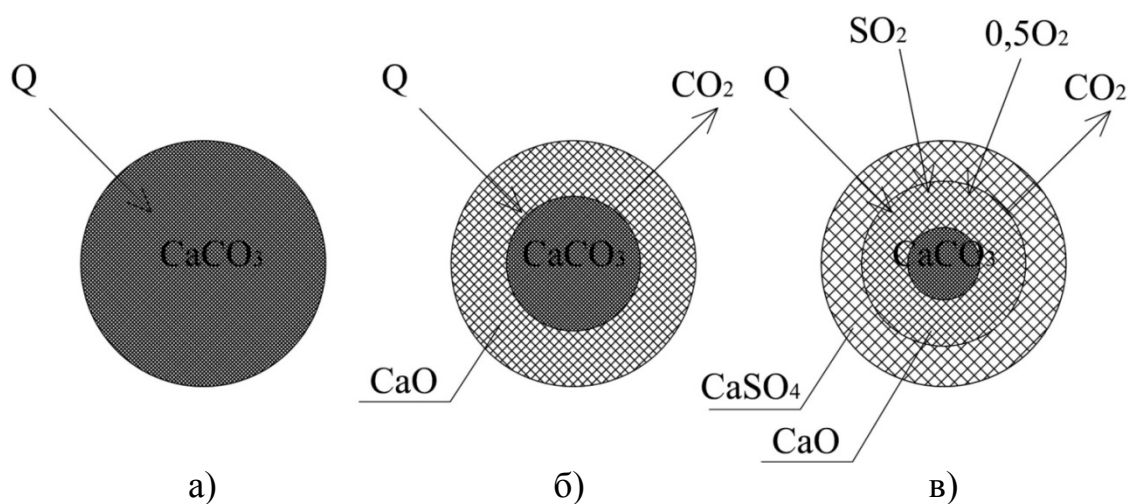


Рисунок 2 - Схема кальцинации и сульфатизации частиц карбоната кальция: а) нагрев частицы; б) кальцинация; в) сульфатизация

Базируясь на основных процессах, оказывающих влияние на горение частиц распыленного угля, возникает задача объединения их в единую комплексную модель. С развитием программных технологий появились работы в этом направлении. Musarra, S. P, и др. представили модель, где уже рассматривалось движение частицы пылевидного угля, нагретой в газовом потоке. В этой модели были решены уравнения: сохранения; количества движения; энергии частиц в двумерной формулировке. Однако в этой работе использо-



вались только четыре гомогенные реакции и две гетерогенные реакции, что делало модель верной только для конкретных условий горения. В работе Tang, В., и др. представлен подробный механизм образования NO при горении распыленного угля. Всего было использовано 72 элементарных реакций с 25 химическими веществами. В работе Бойко, Е. А. была представлена комплексная математическая модель процесса термохимической обработки угля, учитывающая химическую структуру, механизм превращения и реакционную способность твердых органических топлив, а также межфазный тепло- и массоперенос.

**Во второй главе** описана картина процессов в узлах сгорания (рис.3, 4) физическая схема горения распыленного угля в потоке, учитываемые явления и допущения, уравнения математические модели.

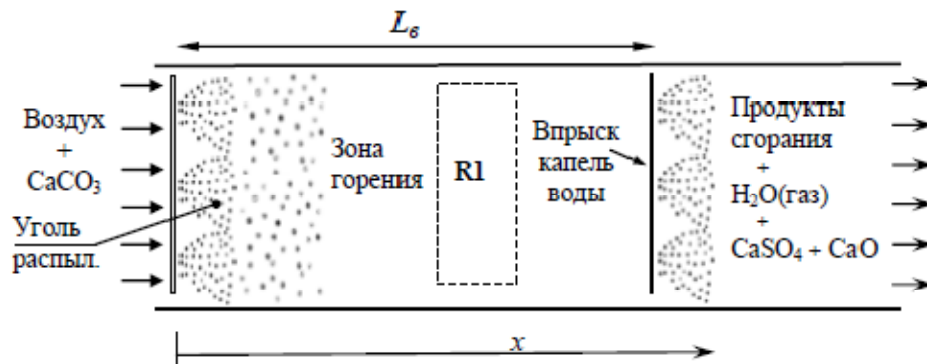


Рисунок 3 - Схема реагирующего газо-угольного потока для установки с пониженным содержанием вредных выбросов с впрыском капель воды (Модель ВКВ).

В узел горения с впрыском воды (рис.3) на вход вместе с потоком горячего воздуха подаются в виде мелких частиц уголь и карбонат кальция (CaCO<sub>3</sub>). При нагреве частицы CaCO<sub>3</sub>, внедренные в поток, превращаются в пористый агломерат CaO (кальцинация). После сгорания угля температура рабочего тела становится высокой (более 2000К) и в определенном сечении подается вода уменьшающая температуру газов до  $T_g = (1100...1500)K$ . Эта температура является благоприятной для образования CaSO<sub>4</sub> (сульфатизация). Кроме того может быть уменьшена концентрация NO<sub>x</sub> в продуктах сгорания. Течение в канале является трехфазным.

В установке, исследуемой в работах Ouyang, Z. и др., рабочими узлами являются «газификатор» (CFB) и «тракт основного сгорания» (DFC). В CFB подаются частицы обычного угля (R-уголь) и воздух («нулевая» зона подвального воздуха), в результате чего некоторая доля угля газифицируется. В итоге образуется «угольный» газ (Hot-газ) и «подготовленный уголь» (P-

уголь). В этот газо-угольный поток внедряются частицы карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ). Эта смесь Hot-газа и препарированного угля поступает в рабочий узел DFC (см. рис. 4). В этом агрегате проходит основной процесс горения, и предусматривается 2-х зонная подача воздуха. При такой схеме температура рабочего тела по всему тракту DFC будет относительно невысокой ( $T \approx 1500\text{K}$ ). Течение в DFC является 4-х фазным.

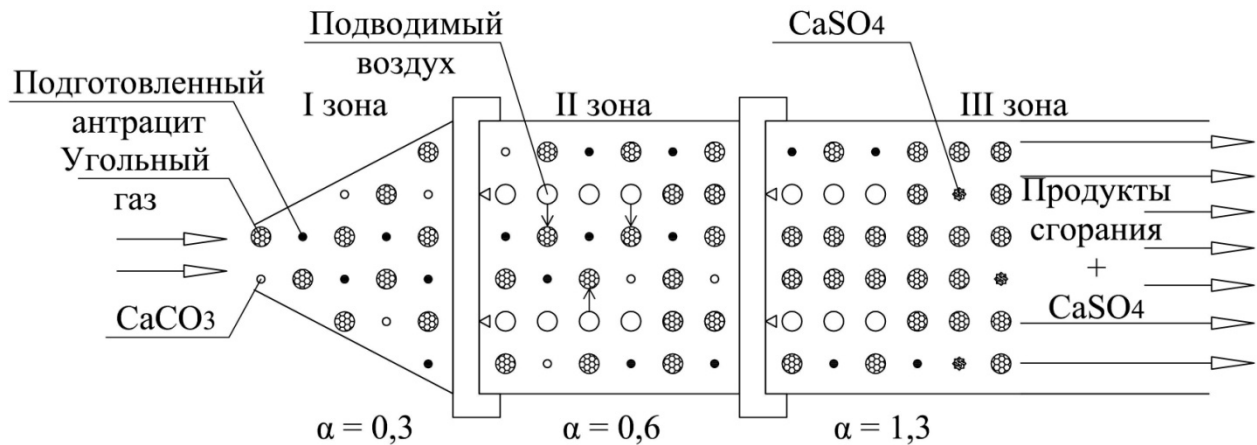


Рисунок 4 - Схема сгорания Р- угля и генераторного газа в тракте DFC с 2-х зонным вводом воздуха (модель DFC); 2-ая зона: вход в DFC ( $L_1 = 0$ ) с достижением  $\alpha_{ок} \approx 0,6$ ; 3-ая зона: сечение DFC ( $x = L_2 > 1,0\text{м}$ ) с достижением  $\alpha_{ок} > 1.0$

Математические модели узлов ВКВ и DFC являются близкими (хотя для каждого узла была разработана автономная программа расчета) и учитывали следующие явления:

- а) химические реакции в газовой фазе;
- б) изменение температуры ( $T_g$ ) и скорости ( $W_g$ ) газа из-за тепло- и массообмена с частицами угля и протекания газозофазных реакций, подвода воздуха;
- в) образование летучих в зависимости от температуры  $T_p$ , начальная доля летучих задана;
- г) горение углерода на поверхности частицы с образованием  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  в зависимости от температуры  $T_p$ ;
- д) теплообмен между частицами, газом и стенкой;
- е) влияние на процессы минеральных примесей в угле;
- ж) испарение влаги, содержащейся внутри угля;
- з) изменение плотности угля в ходе его горения;
- и) кальцинация и сульфатизация частиц  $\text{CaCO}_3$ ;
- к) разница между скоростями частиц угля и газа;
- л1) впрыск воды (модель ВКВ);

л2) двухзонная подача воздуха (модель DFC).

Были также приняты следующие допущения:

- движение газо-угольной смеси считается одномерным;
- частицы угля имеют сферическую форму;
- температура частиц ( $T_p$ ) не изменяется по радиусу, однако изменяется со временем  $T_p = f(t)$ ;
- частицы угля не взаимодействуют между собой;
- горение угля протекает на поверхности частицы;
- толщина пограничного слоя определяется по модели “приведенной пленки” с учетом разницы скоростей;
- минеральные примеси эмитируются пропорционально сгоранию углерода.

В математической модели используются относительные расходы компонентов угольных частиц: влаги ( $a$ ), летучей фракции ( $v$ ), углерода ( $c$ ), примесей ( $R$ ):

$$\bar{G}_a = \frac{G_a}{G_\Sigma}; \quad \bar{G}_v = \frac{G_v}{G_\Sigma}; \quad \bar{G}_c = \frac{G_c}{G_\Sigma}; \quad \bar{G}_R = \frac{G_R}{G_\Sigma}; \quad s \in a, v, c, R,$$

а также относительные расходы охлаждающего компонента:

для модели ВКВ  $\bar{G}_k = \frac{G_w}{G_\Sigma}$ ; для модели DFC  $\bar{G}_k = \frac{G_{a1} + G_{a2}}{G_\Sigma}$ ,

где  $G_\Sigma$  - общий расход рабочего тела;  $G_w$  - расход охлаждающей воды;  $G_{a1}$ ,  $G_{a2}$  - расходы охлаждающего воздуха.

Обобщенная математическая модель включает следующие основные уравнения:

Уравнение сохранения массы для всего потока

$$\sum \bar{G}_s + \frac{P\mu_g}{R_0T_g} \left( \frac{W_g}{G_\Sigma} - \frac{W_g}{W_p} \sum \frac{\bar{G}_s}{\rho_s} - \sum \frac{\bar{G}_k}{\rho_k} \right) + \sum \bar{G}_k = 1 \quad (1)$$

Уравнение энергии для всего течения

$$\sum h_s \bar{G}_s + h_g \frac{P\mu_g}{R_0T_g} \left( \frac{W_g}{G_\Sigma} - \frac{W_g}{W_p} \sum \frac{\bar{G}_s}{\rho_s} - \sum \frac{\bar{G}_k}{\rho_k} \right) + h_k \bar{G}_k = h_T. \quad (2)$$

Калорическое уравнение:

$$h_g = \frac{\sum r_i H_i(T_g)}{\sum \mu_i r_i}. \quad (3)$$

Уравнение для испарения влаги из частицы:

$$\frac{d\bar{G}_a}{dx} = \frac{g_a f_p}{W_p G_\Sigma} \frac{D_{ef} A_p P \mu_a}{\delta^* R_0 T_p} \ln \left( 1 - \frac{P_{st}(T_p)}{P} \right) \equiv f_a, \quad (4)$$

Уравнения расхода летучих веществ:

$$\frac{d\bar{G}_v}{dx} = -\frac{(\bar{G}_v + \bar{G}_c)}{W_p} (0,4K_1 + 0,8K_2) \equiv f_v. \quad (5)$$

Уравнение сгорания углерода на поверхности частицы:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{G}_c}{dx} &= -\frac{K_\varepsilon \bar{G}_c}{W_p \rho_c} \left( \frac{G_\Sigma}{f_p} \sum \frac{\bar{G}_s}{\rho_s} \right)^{-\frac{1}{3}} \left[ P_{O_2}^{0,5} A_{k1} \exp \left( -\frac{E_{k1}}{R_0 T_p} \right) + P_{CO_2}^{0,5} A_{k2} \exp \left( -\frac{E_{k2}}{R_0 T_p} \right) \right] = \\ &= f_{c1} + f_{c2} \equiv f_c, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $f_{c1}, f_{c2}$  - скорости выгорания углерода по реакциям:



Уравнение темпа образования  $CO_2(\varphi)$  при горении углерода:

$$\frac{1 - \varphi}{\varphi} = A_c \exp(-E_c/R_0 T_p). \quad (8)$$

Уравнение расхода примесей:

$$\frac{d\bar{G}_R}{dx} = f_c \frac{\bar{G}_R}{\bar{G}_c} \frac{\rho_c}{\rho_R} \equiv f_R. \quad (9)$$

Уравнение теплообмена для частицы угля:

$$\begin{aligned}
\frac{dT_p}{dx} = & \frac{\frac{K_\phi}{W_p} \left( \frac{f_p}{G_\Sigma} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \sum \frac{\bar{G}_s}{\rho_s} \right)^{\frac{2}{3}} \left[ \bar{h} (T_g - T_p) - \sigma \varepsilon (T_p^4 - T_w^4) \right] + f_a \left[ L_a + c_{pa} (T_g - T_p) \right]}{c_{y2} \sum \bar{G}_s} + \\
& + \frac{f_v \left[ L_v + (T_g - T_p) \sum_i g_{vi} c_{pvi} \right] - f_{C1} \left[ (1 - \phi) \frac{\Delta H_{CO}^+}{\mu_c} + \phi \frac{\Delta H_{CO_2}^+}{\mu_c} \right]}{c_{y2} \sum \bar{G}_s} + \\
& + \frac{-f_{C2} \left[ \frac{\Delta H_{CO_2}^+}{\mu_c} - \frac{2\Delta H_{CO}^+}{\mu_c} \right] + f_R (T_g - T_p) \sum_i g_{Ri} c_{Ri}}{c_{y2} \sum \bar{G}_s} \equiv f_{T_p}, \quad (10)
\end{aligned}$$

Уравнение изменения скорости частиц угля:

$$\frac{dW_p}{dx} = \frac{\pi C_x d_p^2 P \mu_g}{8 m_p W_p R_0 T_g} |W_g - W_p| (W_g - W_p). \quad (11)$$

Уравнения испарения для капель воды (ВКВ):

$$\frac{d\bar{G}_e}{dx} = 7,7955 \left( \frac{\bar{G}_e}{\rho_e} \right)^{\frac{1}{3}} \left( \frac{f_p}{G_\Sigma} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{D_{ef} \mu_a P}{W_g R_0 T_g} \ln \left( 1 - \frac{P_{st}(T_e)}{P} \right) \equiv f_e, \quad (12)$$

Уравнение теплообмена для капель воды (ВКВ):

$$\frac{dT_e}{dx} = \frac{1}{m_e c_e} \left[ \frac{-\frac{dm_e}{dx} \bar{c}_{ev} (T_g - T_e)}{\exp \left( -\frac{dm_e}{d\tau} \bar{c}_{ev} \delta^* / (\bar{\lambda}_{ev} 4\pi R_e^2) \right) - 1} + \frac{dm_e}{dx} L_a \right], \quad (13)$$

Уравнение смешения воздуха с газовой средой (DFC):

$$\frac{d\bar{G}_k}{dx} = -\frac{\bar{G}_k}{S_k} \equiv f_k. \quad (14)$$

где:  $W_g, W_p$  - скорости газа и частиц угля;  $\rho_s, \rho_k$  - плотности угольных компонент и охлаждающего компонента;  $h_T, h_s, h_g$  - удельные массовые энтальпии: всего потока, угольных компонент, газа;  $\bar{h}$  - коэффициент теплоотдачи,  $C_x = 24/Re$  - коэффициент сопротивления,  $r_i, H_i, \mu_i$  - мольная доля, мольная энтальпия, молекулярная масса  $i$ -го вещества;  $P_{st}$  - давление насыщенного пара;  $\delta^*$  - толщина приведенной пленки;  $L_a, L_v$  - теплоты испарения воды и разложения органических масс;  $\Delta H_{CO}^+, \Delta H_{CO_2}^+$  - тепловые эффекты образования CO и CO<sub>2</sub>;  $c_{pa}, c_{pvi}, c_{y2}, c_{Ri}$  - удельные теплоемкости угольных компонент;  $S_k$  - длина смешения воздуха с реагирующим газом ( $k = 1; 2$ ).

**Моделирование массообменных процессов.** В предлагаемой модели для сохранения ее универсальности массообменные процессы представляются в виде «химических» реакций.

Например, процесс кальцинации в реагирующем газо-угольном потоке

протекает по реакции:  $CaCO_3^* \xrightarrow{k_{Ca}^+} CaO^* + CO_2$ . с константой скорости:

$$k_{Ca}^+ = 30.909 d_{Ca}^{-0.55} \exp\left(\frac{-21817}{R_0 T}\right) \cdot \left(\frac{C_{CaCO_3}^0}{C_{CaCO_3}}\right)^{1/3}, \quad (15)$$

полученной из эмпирической формулы Nair'a.

Процесс сульфатизации CaO, т.е. превращение CaO в CaSO<sub>4</sub> протекает по реакции:

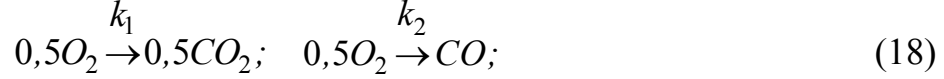


с константой скорости:

$$k_{Su}^+ = \frac{0,5 B_S C_{SO_2}^{n-1}}{(y^{2/3} - y) C_{O_2}^{0.5}}; \text{ где } B_S = 5,171 \cdot 10^4 a_{Ca}^2 (T_g)^n \exp\left(-\frac{E_{Su}}{R_0 T_g}\right), \quad (17)$$

полученной из эмпирической формулы Stouffer'a.

Модель горения углерода на поверхности частицы, предложенная Monson'ом, в настоящей работе отражалась реакциями:



с константами скорости:  $k_1 = 2\varphi k_C$ ;  $k_2 = (1 - \varphi)k_C$ , где:

$$k_C = 9,06 \cdot 10^{-3} \frac{A_r}{\mu_C} A_k T_g^{0,5} \exp\left(\frac{-E_k}{R_0 T_p}\right). \quad (19)$$

**В главе 3** описываются особенности определения поэлементного состава угля, в том числе элементарный состав летучих. Представлен базовый алгоритм расчета уравнений, в том числе расчет частных производных, которые компонуют якобиан. Также приводится краткое описание программного комплекса и базовая структура кода.

Созданная модель представляется системой дифференциально-алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dx} &= f(\langle x_k \rangle), i=1 \dots n, \quad k=1 \dots q, \quad i = 1 \dots n_d, \\ F_\xi(\langle x_k \rangle) &= 0, \quad i = (n_d + 1) \dots n_\Sigma \quad k = 1 \dots \end{aligned} \quad (20)$$

с неизвестными  $\gamma_n$ ,  $\bar{G}_a$ ,  $\bar{G}_V$ ,  $\bar{G}_C$ ,  $\bar{G}_R$ ,  $T_p$ ,  $T_g$ ,  $W_g$ ,  $h_g$  и  $\varphi$ .

Так как эта система является жесткой, в настоящей работе был применен метод Пирумова, согласно которому на  $n$ -ом шаге интегрирования ОДУ записываются в виде:

$$F_i^{n+1} \equiv x_i^{n+1} - x_i^n - h(Sf_i(\langle x_k^n \rangle) + (1 - S)f_i(\langle x_k^{n+1} \rangle)) = 0 \quad (21)$$

где  $x_i^n$  и  $x_i^{n+1}$  значения  $x_i$  в начале и в конце шага;  $h$  - шаг интегрирования.

Эти уравнения являются алгебраическими и нелинейными с неизвестными  $x_i^{n+1}$  и далее на каждом шаге решаются методом Ньютона в версии с «замороженным» якобианом:

$$\left[ \frac{\partial F_i}{\partial x_k} \right] \Delta x_i^{n+1,m} = F_k^m, \quad (22)$$

$$x_i^{n+1,m+1} = x_i^{n+1,m} - \Delta x_i^{n+1,m}; \quad i, k = 1, \dots, n_{\Sigma},$$

Согласно выбранной структуре программного кода, сначала выполняется расчет химически равновесных продуктов сгорания угля с воздухом. После этого выполняется расчет процессов в реагирующем газо-угольном потоке (по модели горения с впрыском воды или по модели 2-х зонной подачи воздуха). В этом расчете определяются характеристики рабочего тела по тракту горения, например,  $T_g$ ,  $T_p$ ,  $W_g$ ,  $W_p$ , состав газовой фазы,  $G_a$ ,  $G_v$ ,  $G_c$ ,  $G_R$ , а также определяются степени сгорания угля и абсорбции окислов серы.

В главе 4 приводятся результаты верификации модели сгорания угля при впрыске воды. Приведено описание базового режима течения и горения в канале. Представлено исследование по влиянию разницы скоростей газового потока и частиц угля на характеристики рабочего тела в зависимости от диаметра частиц. Приведены результаты по поиску оптимального расхода воды с целью минимизации выбросов  $SO_2$ .

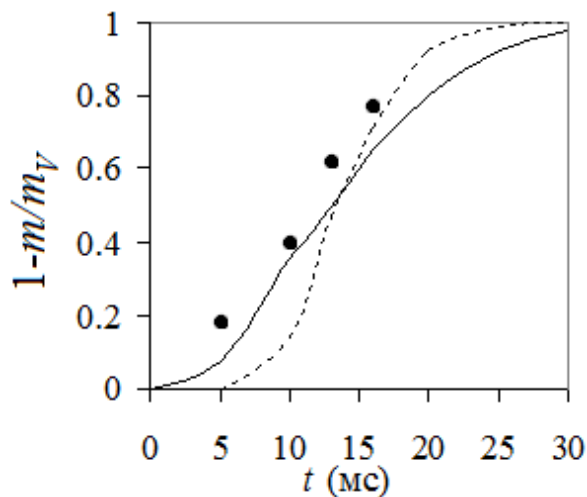


Рисунок 5 - Эмиссия летучих веществ в зависимости от времени при  $T_g = 1900K$ : (—) – модель ВКВ; (●) – эксперимент, Jost, М.; (- - -) – модель, Veras, С.

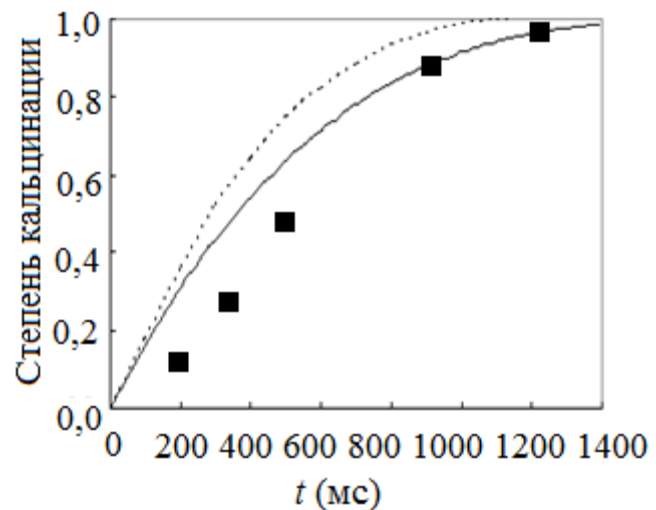


Рисунок 6 - Степень кальцинации  $CaO/(CaCO_3)_0$  в зависимости от времени: (—) - модель ВКВ; (■) – эксперимент, Ну, N; (- - -) – модель, Nair, R.V.

На рис.5 приведено сравнение по выходу летучих веществ с данными, полученными Jost, М. и Veras, С. для бурых углей с составом



$g_v = 0,465$ ;  $g_c = 0,494$ ;  $g_R = 0,041$  при начальном размере частиц угля  $d_p = 55$  мкм. Как видно, приведенные результаты удовлетворительно согласуются между собой.

На рис. 6 показано изменение степени превращения частицы  $\text{CaCO}_3$  в окись кальция (степень кальцинации =  $\text{CaO}/(\text{CaCO}_3)_0$ ) по времени при температуре  $T_p = 1373$  К, и начальном диаметре частицы  $d_{\text{CaCO}_3} = 45$  мкм. Представленные результаты также удовлетворительно соответствуют друг другу.

Расчеты по модели ВКВ проводились для битумных и суббитумных углей. Реагирующая среда включает: 88 веществ и 491 обратимых реакций и 15 реакций массообмена. Основные исходные данные и характеристики углей приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 - Исходные данные при выполнении численных исследований

$\alpha_{ox}$	$W_0$ [м/с]	$f_\varepsilon$	$d_{Ca}$ [мкм]	$L_v$ [Дж/кг]	$T_w$ [К]
1,25	3,9	0,6	45	$10^6$	800
$T_g^0$ [К]	$T_p^0$ [К]	$a_{Ca}$ [м <sup>2</sup> /гп]	$d_p$ [мкм]	$P$ [атм]	$G_g^0/G_p^0$
1073	300	20	100	1	13,96

$f_\varepsilon$  - степень шероховатости;  $a_{Ca}$  - поверхность ВЕТ;  $d_{Ca}$  - диаметр частиц  $\text{CaCO}_3$

Таблица 2 - Характеристики битумных и суббитумных углей

Тип угля	уголь В1	уголь S1
Приближенный анализ (%)		
Летучие	19,4	42,1
Фиксирован. углерод	69,6	37,7
Примеси	9,4	14,9
Вода	1,6	5,3
Летучие (%)		
$\text{CH}_4$	45,0	45,0
$\text{C}_6\text{H}_6$	25,0	25,0
$\text{CO}$	5,0	5,0
$\text{CO}_2$	10,0	10,0
$\text{O}_2$	5,0	5,0
$\text{H}_2\text{S}$	10,0	10,0
Примеси (%)		
$\text{Al}_2\text{O}_3$	60,0	60,0
$\text{SiO}_2$	40,0	40,0
Теплота сгорания (кДж/кг)	33140	26544

В работе были проведены численные исследования по влиянию разности скоростей частиц угля ( $W_p$ ) и газового потока ( $W_g$ ) на характеристики рабочего тела. На рис. 7 приведены зависимости относительного расхода угля  $\bar{G}_c$

для условий сгорания битумного угля при различных диаметрах  $d_p^0$ . Во всех случаях, при учете разности скоростей газа и частиц, частицы сгорают быстрее. При размере частиц 100 микрон разница является незначительной.

Также были выполнены расчеты по поиску оптимального количества воды, подаваемой в продукты сгорания. Численные исследования проводились для битумного (B1) и суб-битумного (S1) углей (рис. 8). Так как уголь B1 имеет более высокую теплоту сгорания, то для достижения одинаковых  $T_f$  при сгорании угля B1 требуется больший расход воды, чем для суббитумного угля. Для обоих вариантов зависимости  $r_{CaSO_4}^f(Z_e)$  имеют максимумы, соответствующие значению  $T_f \approx 1450\text{K}$ , которое для варианта B1 достигается при  $Z_e = 4,5$ , а для S1 – при  $Z_e = 3$ .

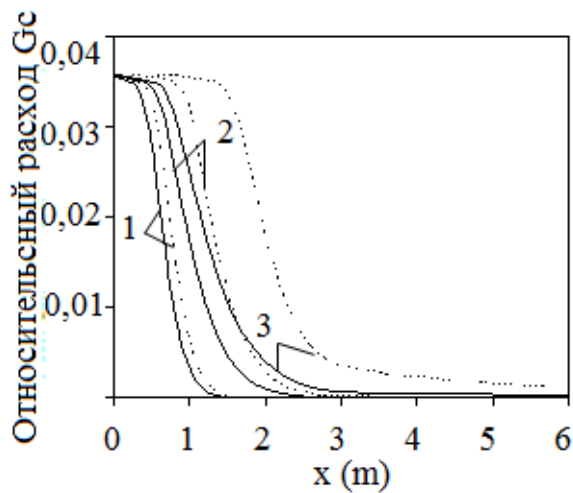


Рисунок 7 - Зависимость  $\bar{G}_c$  по длине канала при  $W_g \neq W_p$  (—); и при  $W_g = W_p$  (- - - - -); 1 -  $d_p^0 = 100\mu\text{к}$ ; 2-  $d_p^0 = 200\mu\text{к}$ ; 3-  $d_p^0 = 300\mu\text{к}$  (уголь B1)

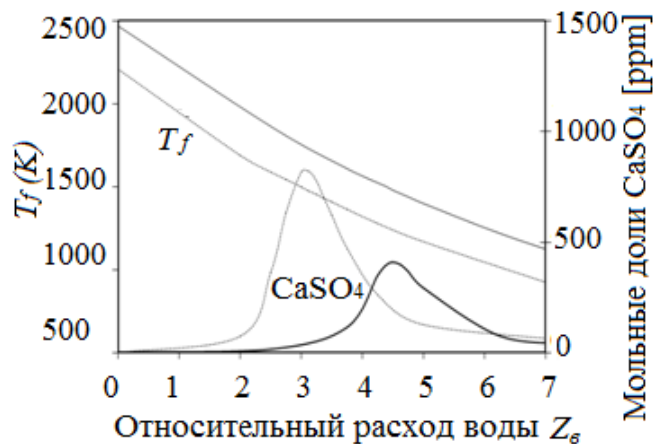


Рисунок 8 - Изменение  $T_f$  и  $r_{CaSO_4}^f$  для битумного (—) и суб-битумного углей (- - -) в зависимости от  $Z_e$

**В главе 5** описывается последовательность и пример формирования исходных данных для модели DFC (рис.4) установки с пониженным содержанием вредных выбросов. Приведено сравнение с экспериментами и дано описание базового режима течения и горения в тракте сгорания. Описаны численные исследования чувствительности характеристик горения к погрешностям исходных данных и влияния конструктивных параметров на характеристики рабочего тела. Набор исходных данных, взятый из работ Ouyang, Z., и др., приведен в таблицах 3, 4, 5.

Таблица 3 - Характеристики R- и P- антрацитов

Антрацит (R) исходный (% масс)				Антрацит (P) препаратов. (% масс)			
Приближенный анализ ( <i>Pro</i> )		Элементный анализ ( <i>Ult, daf</i> )		Приближенный анализ ( <i>Pro</i> )		Элементный анализ ( <i>Ult, daf</i> )	
Влага ( $g_a$ )	2,4	C	82,08	Влага ( $g_a$ )	0,40	C	78,09
Зола( $g_R$ )	8,64	H	3,13	Зола( $g_R$ )	16,24	H	1,17
Летучие( $g_v$ )	6,74	O	1,87	Летучие( $g_v$ )	5,27	O	1,68
Углерод( $g_c$ )	82,22	N	1,18	Углерод( $g_c$ )	78,09	N	1,50
$Q$ (MJ/kg)	31,4	S	0,70	$Q$ (MJ/kg)	27,0	S	0,92
$G_{yz}$ (g/sec)	0,972	-		$G_{yz}$ (g/sec)	0,517	-	

*daf* (*dryashfree*)- элементный состав угля без влаги и золы

Таблица 4 - Характеристики: летучих веществ P-антрацита и H-газа на входе в DFC

Характеристики P-антрацита	Летучие (%масс) $g_{vi}$				$d_p(\mu\text{к})$	$T_p(\text{K})$	$h_{yz}(P)$ J/kg
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S			
	21,51	31,65	28,44	18,40			
Характеристики H-газа	Состав H-газа (мольные доли $r_{ih}$ )					-	-
	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	$G_h(\text{g/sec})$	$T_h^0(\text{K})$
	4,64	12,85	9,89	0,25	72,137		
	NH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> S	O <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	-	0,3264	1000
	0,11	0,001	0,00001	0,022	-	-	-

Таблица 5. Характеристики подводимого воздуха и карбоната кальция

Воздух 0-го пояса				Воздух 2-го пояса			
$L_{cf}(m)$	$G_{cf}(\text{g/sec})$	$T_{cf}(\text{K})$	$S_I(m)$	$L_2(m)$	$G_2(\text{g/sec})$	$T_2(\text{K})$	$S_2(m)$
-	0,2809	300	-	1,2	0,5619	300	0,2
Воздух 1-го пояса				Характеристики CaCO <sub>3</sub>			
$L_I(m)$	$G_I(\text{g/sec})$	$T_I(\text{K})$	$S_I(m)$	$d_{Ca}(\mu\text{к})$	$T_{Ca}(\text{K})$	$a_{Ca}(\text{m}^2/\text{mg})$	Ca/S
0	0,3636	1000	0,03	45	1000	10	2

На рис.9, 10 показано сравнение с экспериментальными данными, полученными Ouyang, Z., и др. Результаты сравнения между этими данными и расчетами по модели DFC, учитывая, что ряд параметров был установлен «оценочно», и математическая модель является одномерной, можно считать удовлетворительными.

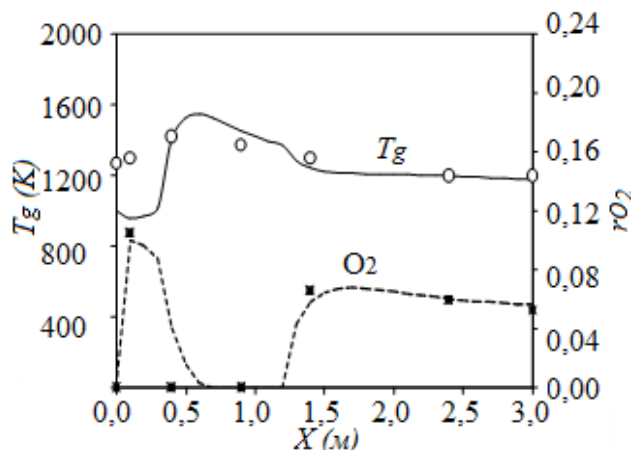


Рисунок 9 - Изменение значений  $T_g$  и  $r_{O_2}$  по длине тракта DFC; Эксперимент:  $\circ$  - температура;  $\blacksquare$  -  $r_{O_2}$

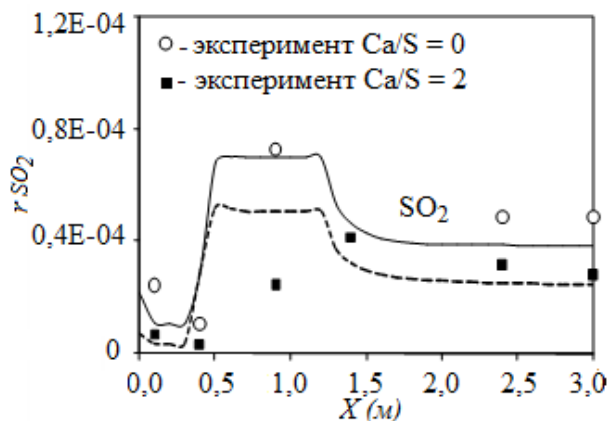


Рисунок 10 - Изменение значений  $r_{SO_2}$  по длине тракта DFC. Эксперимент:  $\circ$  - без  $CaCO_3$ ;  $\blacksquare$  - с  $CaCO_3$

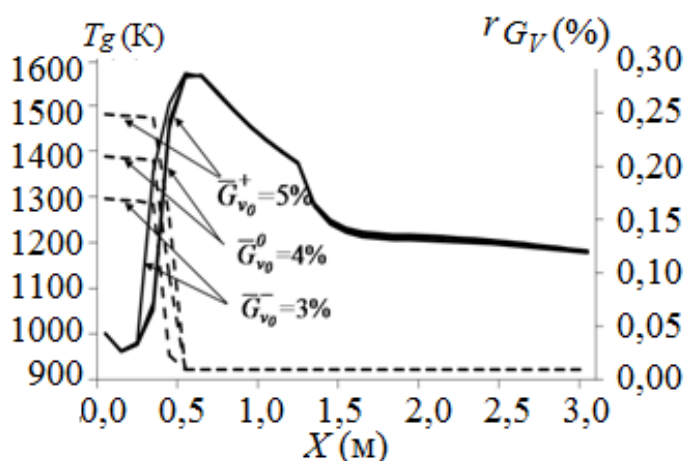


Рисунок 11 - изменение значений  $T_g$ ,  $G_v$  по длине тракта DFC при  $\bar{G}_{v_0} = \text{var}$ : — значение  $T_g$ ; - - - значение  $G_v$

Математическая модель горения в тракте DFC включает множество исходных данных (параметров), и некоторые из них могут иметь заметные погрешности по следующим причинам:

- в работах Ouyang, Z., и др. не приводятся некоторые параметры, необходимые для выполнения расчетов; такие параметры определяются по косвенным данным (например:  $g_{vi}$ ,  $h_{y_2}$ ,  $a_{Ca}$ ,  $S_I$ );

- некоторые исходные данные были изменены с целью согласования элементного состава. Поэтому в настоящей работе был

проведен анализ чувствительности характеристик горения к изменению таких параметров. Ниже приведен анализ влияния параметра  $\bar{G}_{v_0}$ .

Начальная доля летучих в угле на входе в DFC равна  $\bar{G}_{v_0} \approx 4\%$ , и расчеты по ее влиянию выполнялись для значений  $\bar{G}_{v_0}^- = 3\%$ ;  $\bar{G}_{v_0}^0 = 4\%$ ;  $\bar{G}_{v_0}^+ = 5\%$ . При этом принималось, что  $\bar{G}_{v_0} + \bar{G}_{c_0} = \text{const}$ . На рис. 11 показано изменение  $T_g$  и  $\bar{G}_v$  по длине тракта DFC. На начальном участке температура резко воз-

растает за счет сгорания Н-газа. При меньшем содержании летучих температура  $T_g$  ( $G_{v_0}^-$ ) возрастает быстрее, чем  $T_g$  ( $G_{v_0}^+$ ), что вызвано меньшими затратами тепла на их испарение.

Изменение мольных долей NO и SO<sub>2</sub> при различных  $\bar{G}_{v_0}$  показано на рис. 12, 13. Согласно принятому механизму реакций, основным источником образования NO в исследуемой реагирующей системе является аммиак (NH<sub>3</sub>). Он содержится только в Н-газе, и поэтому концентрация NO, после сгорания Н-газа, не зависит от значения  $\bar{G}_{v_0}$ . Но в случае  $G_{v_0}^-$ , Н-газ сгорает быстрее, и концентрация NO нарастает быстрее, чем при  $G_{v_0}^+$ .

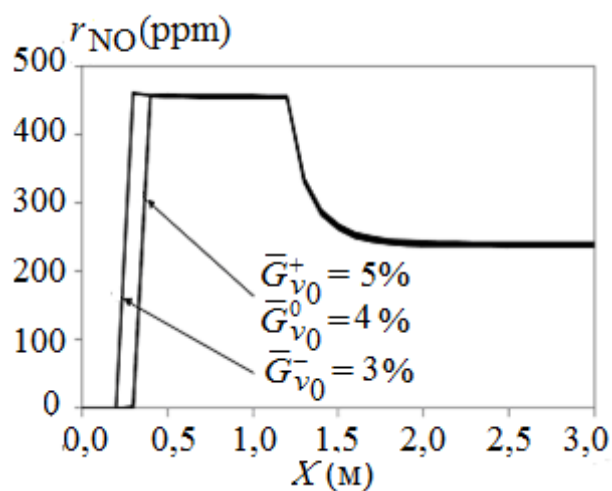


Рисунок 12 - Изменение концентраций NO по длине DFC при различных  $\bar{G}_{v_0}$

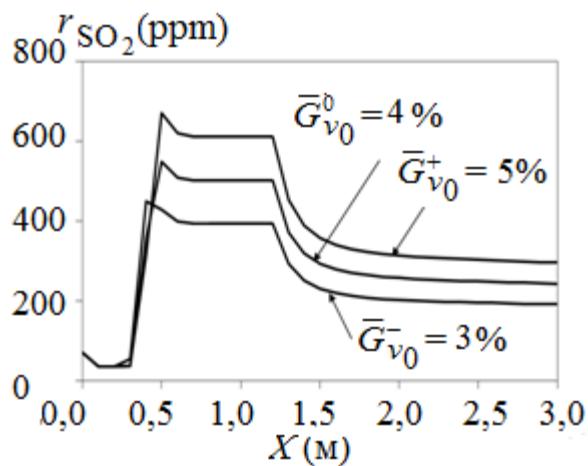


Рисунок 13 - Изменение концентраций SO<sub>2</sub> по длине DFC при различных  $\bar{G}_{v_0}$

В то же время, основным источником образования SO<sub>2</sub> является сероводород (H<sub>2</sub>S), который содержится в летучих и после его выхода H<sub>2</sub>S практически сразу преобразуется в SO<sub>2</sub>. Поэтому для варианта  $G_{v_0}^-$  содержание SO<sub>2</sub> в продуктах сгорания будет меньше, чем в случае  $G_{v_0}^+$  (см. рис. 13).

Кроме того, проводились численные исследования характеристик процессов в DFC в зависимости от конструктивных параметров. Ниже в качестве примера показано влияние конструктивного параметра  $L_2$ .

На рис. 14 показаны изменения  $T_g$  и  $G_v$  по длине DFC для интервала значений  $L_2 = 0,5 \dots 1,5$  м (второй пояс вдува воздуха). На первом поясе ( $L_1 = 0$ ) обеспечивается значение  $\alpha_{ок} = 0,7$ , а на втором -  $\alpha_{ок} = 1,3$ . Полное сгорание летучих завершается при  $x = 0,5 \dots 0,6$  м, поэтому линии  $\bar{G}_v(x)$  не расслаиваются.

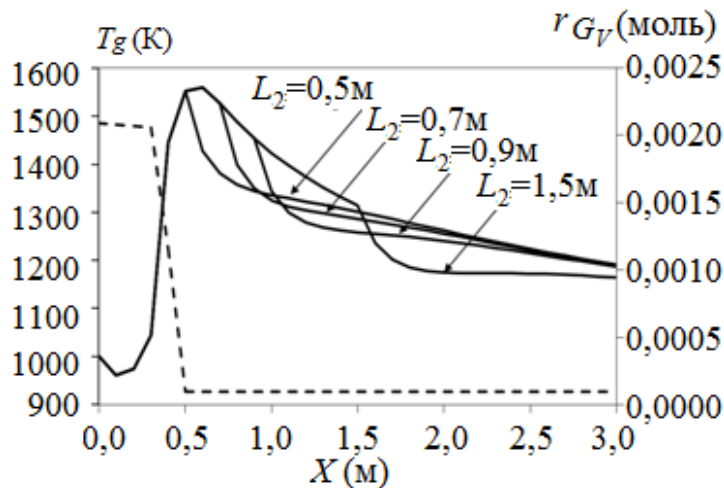


Рисунок 14 - Изменения значений  $T_g$  (—) и  $G_v$  (---) по длине тракта DFC при  $L_2 = \text{var}$

На отрезке  $x = x(T_g(\text{max})) \dots L_2$  горение прекращается (из-за отсутствия  $O_2$ ), но температура продолжает падать вследствие теплоотдачи в стенку. После достижения  $x \geq L_2$  одновременно протекают все 3 процесса: а), б), в). При этом смешение продуктов сгорания с воздухом способствует снижению температуры  $T_g$ , а горение углерода - ее повышению. При  $L_2 = 1,5$  м углерод не успевает сгореть полностью.

Практически полностью на этом отрезке сгорает Н- газ и некоторая доля углерода. В ходе горения весь кислород первого пояса расходуется до точки  $x \approx 0,7$  м. Далее на характеристики рабочего тела влияют следующие явления:

- а) теплоотдача в стенку тракта DFC;
- б) смешение продуктов сгорания с воздухом;
- в) продолжение горения углерода после подвода воздуха через второй пояс ( $x \geq L_2$ ).

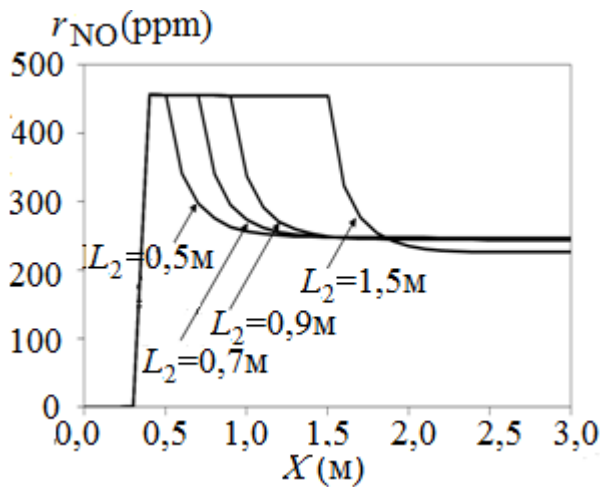


Рисунок 15 - Изменение концентраций NO по длине тракта DFC при  $L_2 = \text{var}$

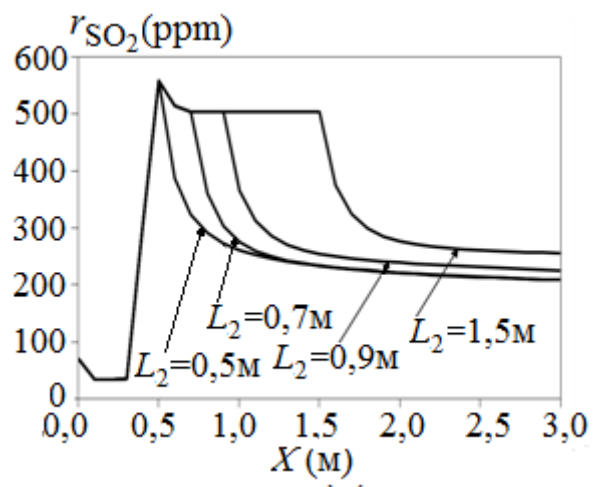


Рисунок 16 - Изменение концентраций  $SO_2$  по длине тракта DFC при  $L_2 = \text{var}$

На рис. 15 и 16 показаны изменения концентраций вредных выбросов NO и  $SO_2$  при различных значениях  $L_2$ . В основном NO образуется в ходе быстрого разложения аммиака ( $NH_3$ ), содержащегося в Н-газе и лишь малая

часть NO в продуктах сгорания имеет тепловую природу. Поэтому на линиях изменения аммиака появляется «плато», а после вдува воздуха второго пояса концентрация NO резко снижается. В свою очередь, двуокись серы ( $\text{SO}_2$ ) образуется только из  $\text{H}_2\text{S}$ , который является компонентом летучих.

Как видно, в районе  $x \approx 0,5$  м имеется максимум, вызванный последующим образованием  $\text{CaSO}_4$  (при благоприятной температуре  $T_g \approx 1450\text{K}$ ) по суммарной реакции (16).

Но после исчезновения кислорода (при  $x \approx 0,7$  м) процесс абсорбции  $\text{SO}_2$  прекращается, и ее концентрация не меняется. Затем, при подводе вторичного воздуха, возобновляются 2 процесса:

- разбавление продуктов сгорания воздухом, что понижает концентрацию  $\text{SO}_2$ ;
- протекание реакции (16), что при различных значениях  $L_2$  приводит к расслоению линий изменения  $\text{SO}_2$ .

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Совокупность результатов проведенных научных исследований можно квалифицировать как решение актуальной научно-технической задачи по разработке и модификации комплексной математической модели, алгоритмов и инвариантных программ расчета горения распыленного угля в трактах установок с пониженным содержанием вредных выбросов.

Основные выводы по работе можно сформулировать в виде следующих положений:

1. Была разработана новая математическая модель расчета горения распыленного угля в рабочих узлах установок с пониженным содержанием вредных выбросов. Модель имитирует 4-х фазное реагирующее течение и учитывает: испарение влаги из частиц; образование и выход летучих; горение углерода; наличие минеральных примесей; протекание химических реакций в газовой фазе; абсорбцию серных соединений частицами  $\text{CaCO}_3$ ; разницу скоростей между частицами и газом в условиях тепло-массопереноса между фазами.

2. Модель является системой жестких дифференциально-алгебраических уравнений и представлена в двух версиях:

- горение распыленного угля в потоке горячего воздуха с последующим впрыском охлаждающей воды (модель ВКВ);
- горение смеси генераторного газа (Н- газа) и препарированного угля (Р- угля) в тракте DFC при двух-зонном вдуве воздуха (модель DFC).

3. Для обеих версий моделей были разработаны алгоритмы и созданы инвариантные программные комплексы. Для выполнения численных иссле-

дований в реагирующей системе (C + H + O + N + S + Ca), была сформирована специальная база данных, которая включает 88 веществ и более 500 реакций. Обе версии были верифицированы путем сравнения с данными других авторов и экспериментальными результатами.

4. Численные исследования по модели ВКВ показали, что:

- двуокись серы может «связываться» в CaSO<sub>4</sub> при температурах  $T_g < 1500\text{K}$  (ограничение по химическому равновесию); существуют оптимальные расходы впрыскиваемой воды, когда SO<sub>2</sub> максимально связывается в CaSO<sub>4</sub>;

- для типичного размера угольных частиц ( $d_p \approx 100$  мкм) влияние разницы скоростей на характеристики течения и степень «захвата окислов серы» — незначительно, но уже при  $d_p \approx 200$  мкм это влияние заметно.

5. Численные исследования по модели DFC показали, что:

- на базовом режиме горения: смешение до «молекулярного уровня» слабо перекрывается с процессом горения; практически весь H-газ сгорает на начальном участке тракта, а частицы угля продолжают гореть по всей его длине; наличие частиц CaCO<sub>3</sub> заметно влияет на содержание SO<sub>2</sub> вследствие ее абсорбции этими частицами; окись азота (топливная NO) образуется в результате разложения NH<sub>3</sub>, который является компонентом H-газа;

- при изменении точки подвода вторичного воздуха в интервале  $L_2 = 0,5 \dots 1,0\text{м}$  температура на выходе DFC не меняется, а затем падает из-за недогорания угля; аналогичный характер имеют изменения концентраций NO и SO<sub>2</sub>;

- с увеличением диаметра частиц угля в интервале  $d_{p0} = 20 \dots 60\text{мкм}$  температура на выходе DFC падает; выход NO уменьшается, а выход SO<sub>2</sub> увеличивается; при  $d_{p0} = 60$  мкм заметная доля углерода не догорает.

**Основные положения и результаты диссертационного исследования изложены в следующих публикациях:**

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Гасилин, В.В. Влияние размеров частиц угля на характеристики продуктов сгорания установки с пониженным содержанием вредных выбросов / Гасилин В.В., Крюков В.Г. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. - 2018. - № 3 (75%);

2. Гасилин, В.В. Модель горения распыленного угля в установках с пониженным содержанием вредных выбросов / Гасилин В.В., Крюков В.Г., Явкин В.Б. // Труды Академэнерго. - 2017. - С. 33-48 (70%);

3. Гасилин, В.В. Математическая модель абсорбции окислов серы в реагирующем газугольном потоке / Гасилин В.В., Коста В.Ж., Крюков В.Г. // Труды Академэнерго. - 2016. - №1. - С.72-88 (70%).



Публикации в сборниках научных трудов, материалов конференций:

4. Гасилин, В.В. Математическое моделирование абсорбции окислов серы в реагирующем газугольном потоке / Гасилин В.В, Крюков В.Г., Коста В. Ж. // В материалах X-ой Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2014), 25-31 мая 2014 года, Алушта-М.: Изд-во МАИ.- 2014.- С. 100-102(30%);

5. Гасилин, В.В. Влияние впрыска воды на очистку газугольного потока с учетом абсорбции окислов серы / Гасилин В.В, Коста В. Ж. // В материалах докладов IX школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродинамики в энергомашиностроении», 10-12 сентября 2014 года, Казань, Изд-во Академэнерго.- 2014.- С. 302-305 (50%);

6. Гасилин, В. В. Математическая модель горения распыленного угля в установках с пониженным содержанием вредных выбросов / Гасилин В.В, Крюков В.Г., Коста В. Ж. // В материалах XI-ой Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), 25-31 мая 2016 года, Алушта-М.: Изд-во МАИ.- 2016.- С. 127-129 (30%);

7. Гасилин, В.В. Влияние разницы скоростей угольных частиц и газа на характеристики реагирующего потока // В тезисах XI международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» 23-25 марта 2016 г., Казань.- 2016.- С.119-120 (100%);

8. Гасилин, В.В. Численные исследования характеристик реагирующих газугольных течений в установках пониженного содержания вредных выбросов // В материалах Международной молодежной научной конференции «XXIII Туполевские чтения школа молодых ученых», Казань.- Том 1.- 2017.- С. 813-818 (100%);

9. Гасилин, В.В. Исследование характеристик абсорбции окислов серы в реагирующем газугольном потоке // В Сборнике трудов научной конференции «Наука, Технологии, Инновации», НГТУ, г. Новосибирск, 4-8 декабря 2017 г.- 2017.- С. 7-10 (100%);

10. Гасилин, В.В., Применение собственных значений для идентификации пульсационного горения в реакторе / Гасилин В.В, Крюков В.Г., Сафиуллин И.И.// В сборнике трудов научно-технической конференции по итогам совместного конкурса фундаментальных исследований РФФИ, Казань: Изд-во «Фэн» АН РТ.- 2017.- С. 163 - 167 (30%);

11. Гасилин, В.В. Исследование характеристик реагирующих газугольных течений в установках пониженного содержания вредных выбросов // В материалах докладов X школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е.Алемасова «Проблемы тепломассообмена и гидродина-

мики в энергомашиностроении», 13-15 сентября 2016 года, Казань, Изд-во Академэнерго. - 2016. - С. 303-306 (100%).