

На правах рукописи

СЕМЕНОВ Борис Васильевич

**МЕТОДЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ
ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ В ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТАХ**

**Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
технических наук**

Тюмень – 2013

Работа выполнена на кафедре автоматизации и вычислительной техники Института геологии и нефтегазодобычи ГОУ ВПО Тюменский государственный нефтегазовый университет.

Научный руководитель: **Борzych Владимир Эрнестович,**
доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные аппоненты: **Захаров Александр Анатольевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Тюменский
государственный университет,
заведующий кафедрой ИБ

Старченко Александр Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский
государственный университет»,
заведующий кафедрой
«Вычислительной математики и
компьютерного моделирования»

Ведущая организация: ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский Томский
политехнический университет»

Защита диссертации состоится «25» декабря 2013 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.14 при ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет» по адресу: 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15А, ауд.410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный университет».

Автореферат разослан «22» ноября 2013 г.

Учёный секретарь
Диссертационного совета

Оленников Евгений
Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований.

Загрязнение воздуха вредными выбросами автомобилей в наше время стало одной из глобальных экологических проблем. Путь ее решения только один - автомобиль должен стать экологически чистым. Важное место здесь принадлежит системам нейтрализации, позволяющие снизить токсичность выхлопных газов.

Вопросы проектирования фильтров-нейтрализаторов для очистки выхлопных газов, на основе методов математического моделирования, представлены весьма скудно в литературе, несмотря на их значимость и актуальность. В этой связи можно отметить группу учёных АлГТУ им. И.И. Ползунова под руководством Новосёлова Н.Н., занимающиеся исследованиями процессов фильтрации отработанных газов дизельных двигателей. Однако данная группа учёных используют традиционный макроскопический подход: уравнение Навье-Стокса, уравнение для массовой концентрации сажи и уравнения массового и теплового баланса. Решение представляется не в режиме реального времени и с привязкой по компонентам отработанных газов типичным для двигателей на тяжелом топливе. Все это не позволяет решать задачи выработки оптимальных конструкторских решений изготовления фильтроэлементов, а также апробировать технологические приемы в реальном виртуальном режиме. Особенно данная задача актуальна для бензиновых двигателей, ввиду наличия в выпускных газах этих двигателей большего количества значимых вредных веществ.

С целью нахождения оптимальных технологических параметров разрабатываемых систем очистки выпускных газов бензиновых двигателей на основе пористых матриц методами имитационного моделирования, в данной диссертационной работе предложен новый подход к физическому и математическому моделированию процессов фильтрации на основе микроскопического (молекулярнокинетического) подхода. Это позволяет решать задачу с использованием параллельных вычислений в режиме реального времени на обычных персональных компьютерах (ПК) с графическими процессорами и без привлечения дорогих суперкомпьютерных технологий.

Цель диссертационной работы состоит в разработке и апробации методов математического и имитационного моделирования процессов фильтрации через пористую матрицу многокомпонентных газовых смесей, характерных для отработанных газов (ОГ) бензиновых двигателей внутреннего сгорания.

Для достижения поставленной цели определены следующие основные **задачи исследования:**

1. Усовершенствование и адаптация математической модели фильтрации многокомпонентной смеси ОГ на основе молекулярнокинетического подхода.
2. Разработка комплекса программ — основы для автоматизированного рабочего места (АРМ) конструктора-технолога с целью проведения численного эксперимента по фильтрации ОГ с визуализацией имитируемых процессов и массивно-параллельных вычислений на графических процессорах.
3. Разработка методики имитационного моделирования для определения геометрических и технологических параметров фильтроэлементов.
4. Проведение имитационного моделирования процессов фильтрации ОГ, характерных для бензиновых двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Объект исследований — процессы течения многокомпонентных смесей в фильтроэлементах выпускных систем ДВС.

Предмет исследований - Имитационное моделирование процессов фильтрации многокомпонентных смесей через пористую матрицу и принятие на его основе конструкторских и технологических решений при разработке и модернизации выпускных систем ДВС.

Методы исследования основаны на методологии физического, математического и компьютерного моделирования, закономерностях теории фильтрации, положениях математической физики, объектно-ориентированной технологии создания программных средств. Для решения поставленных задач используются методы имитационного моделирования; численные методы математической физики; методы объектно-ориентированного проектирования и программирования.

Научная новизна полученных в работе результатов характеризуется в соответствии с тремя составляющими специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, следующим:

В области математического моделирования

- усовершенствована математическая модель фильтрации многокомпонентной смеси ОГ оригинальным образом - на основе молекулярнокинетического подхода;
- разработана оригинальная методика имитационного моделирования с применением параллельных вычислений для апробирования принимаемых конструкторских и технологических решений для систем очистки ОГ ДВС;

В области численных методов

- впервые применены численные методы решения систем линейных уравнений при распараллеливании процесса вычислений на графических процессорах для задач фильтрации ОГ ДВС через пористый элемент, состоящий из большого количества пор, являющихся элементами этого распараллеливания;

В области создания и реализации комплексов программ

- впервые создан и апробирован программный комплекс — основа (АРМ) конструктора-технолога, включающий взаимосвязанные части: параллельного счета и визуализации и позволяющий находить решения в реальном масштабе времени;
- впервые получены оригинальные результаты исследований влияния изменения концентрации компонент смеси, в зависимости от диаметра пор, длины фильтроэлемента и изменения концентраций одной из компонент, которые удовлетворительно согласуются с результатами натуральных экспериментов.

Практическая значимость. Предложенные, в рамках диссертационного исследования, методика имитационного моделирования и программный комплекс с использованием массивно-параллельных вычислений служат основой для создания автоматизированного рабочего места (АРМ) конструктора-технолога при разработке и модернизации систем выпуска ОГ ДВС. Алгоритмы, методики и программный комплекс используются в ряде учебных курсов, преподаваемых в ТюмГНГУ на кафедре АВТ.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся результаты, соответствующие следующим пунктам паспорта специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам.

1. *Пункт 1: Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений.* Усовершенствованная, адаптированная и численно реализованная математическая модель течения многокомпонентных смесей в пористой матрице на основе молекулярнокинетического подхода.
2. *Пункт 3: Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.* Усовершенствованный численный метод решения систем линейных уравнений при распараллеливании процесса вычислений на графических процессорах по локальному элементу объема пористой матрицы.
3. *Пункт 4: Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.* Программный комплекс расчета концентраций компонент ОГ ДВС и их визуализации в реальном масштабе времени.
4. *Пункт 5: Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.* Результаты исследований зависимости концентрации отдельных компонент смеси от диаметра пор, длины фильтроэлемента и изменения концентрации одной из компонент.

5. *Пункт 8: Разработка систем компьютерного и имитационного моделирования.* Разработанная и реализованная основа АРМ конструктора-технолога для компьютерного и имитационного моделирования течения многокомпонентных смесей через пористую матрицу для принятия решений при создании и модернизации выпускных систем ДВС.

Таким образом, диссертация рассматривает и содержит оригинальные решения по трем составляющим специальности 05.13.18 — Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, соответствует паспорту специальности по пяти пунктам.

Личный вклад автора. В процессе выполнения работ над диссертацией автор принимал непосредственное участие в постановке и реализации поставленных задач, алгоритмов и компьютерных программ. Проведенные исследования и предложенная методика имитационного моделирования процессов фильтрации многокомпонентных смесей, является результатом работы автора.

Достоверность результатов проведенных исследований, содержащихся в работе, определяется корректным использованием математических методов, методов моделирования, проверкой разработанных алгоритмов и программы с помощью тестовых наборов данных, а также подтверждается удовлетворительной корреляцией результатов вычислений и экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических и научно-практических конференциях:

- Международная конференция «Сопряжённые задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». ТГУ, г. Томск 2007 год.
- Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы эксплуатации систем транспорта», г. Тюмень, 2007 год.
- XXI Международная конференция. Математические методы в технике и технологиях ММТТ-21, г. Саратов, 2008 год.
- Всероссийская конференция, посвящённая 60-ю мехмата ТГУ, г. Томск 2008 год.
- VI всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвящённая 40-летию НИИ ПММ ТГУ, г. Томск, 2008 год.
- Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы эксплуатации систем транспорта», г. Тюмень, 2008 год.
- IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании», Тюмень, 2010 год.

Публикации. По тематике связанной с содержанием диссертационной работы опубликовано 18 работ, в том числе шесть в научных журналах, рекомендованных ВАК, получено два сертификата о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка и приложения. Работа представлена на 134 страницах, машинописного текста, включая 19 таблиц, 56 рисунков, библиографический список из 108 наименований, приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и практическая значимость работы, формулируется цель и задачи исследования. Дается описание научных положений, выносимых на защиту, подчёркивается их практическая значимость, новизна и достоверность.

В первой главе рассмотрены вопросы снижения выбросов от автомобильного транспорта, особенности работы различного вида нейтрализаторов для ДВС в зависимости от вида топлива, исходные материалы для фильтроэлементов, в том числе и изготовляемых по СВС-технологии, а также процессы фильтрации в пористых структурах фильтров-нейтрализаторов для выпускных систем ДВС.

Вторая глава посвящена анализу и выбору методов: моделирования процессов течения газа через пористую матрицу, позволяющих провести детальный анализ и изучить влияние параметров пористой среды на ход процесса переноса.

Рассмотрен молекулярно-кинетический подход, описывающий процессы переноса в пористых средах: *модель запылённого газа*. В нём обосновывается аддитивность вязкого и диффузионного потоков, используется весь аппарат кинетической теории Чепмена — Энскога для смеси газов, в которой пористая среда рассматривается как один из компонентов смеси. В этом подходе изменение давления можно формально описать через изменение мольной доли "пылевого" компонента.

Главное достоинство этой модели состоит в том, что она обеспечивает возможность разработки общего подхода, позволяющего с единых позиций, основанных на прочном теоретическом базисе, описать процессы переноса и диффузии во всем их разнообразии.

В основе теории лежит утверждение о том, что перенос газа в пористом теле осуществляется следующими независимыми механизмами:

1. Свободномолекулярное, или кнудсеновское, течение, реализующееся при столь малой плотности газа, что частотой столкновений между молекулами можно пренебречь по сравнению с частотой их столкновений с поверхностями каналов пористого тела или капилляра.

2. Вязкое течение, при котором газ течет как сплошная среда под действием градиента давления и межмолекулярные столкновения преобладают над столкновениями молекул с поверхностью. Этот механизм иногда называют также конвективным или переносом газа как целого

3. Диффузия в режиме сплошной среды, когда отдельные компоненты смеси перемещаются относительно друг друга под действием градиента концентрации (обычная диффузия), градиента температуры (термодиффузия) или внешних сил (силовая диффузия). Здесь снова межмолекулярные столкновения происходят чаще, чем столкновения молекул с поверхностью.

4. Поверхностная диффузия, при которой молекулы газа перемещаются вдоль поверхности твердого тела, не покидая адсорбционного слоя.

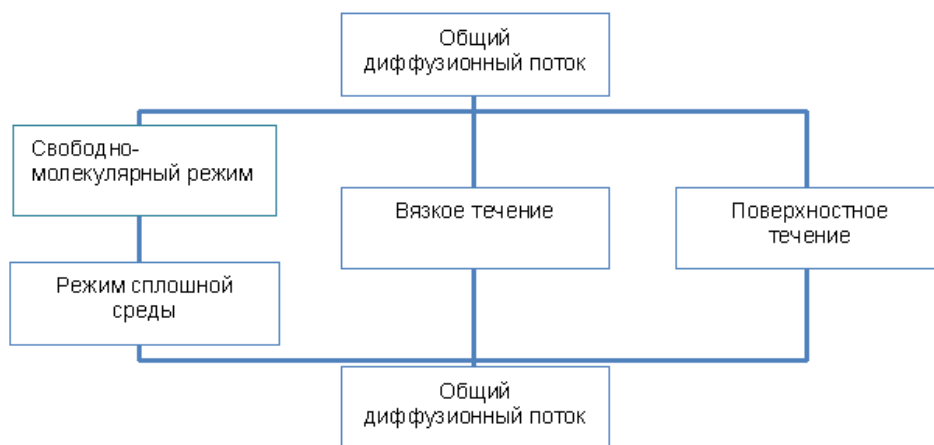


Рисунок 1. Мнемоническая схема переноса газовой смеси

Описанная мнемоническая схема применяется локально, в каждой точке или малой области системы, что позволяет получить полный набор дифференциальных уравнений движения каждого из компонентов смеси под действием градиентов давления, концентрации и температуры. При конкретном применении данного подхода возникает необходимость интегрирования полученных дифференциальных уравнений, что в свою очередь требует постановки граничных и начальных условий.

Исходя из рассмотренных гидравлических свойств фильтроэлементов, основываясь на описании модели течения многокомпонентной смеси газа можно предложить модель запылённого газа многокомпонентной смеси для реализации поставленной цели.

Математическая модель была в свое время предложена и апробированна Б.В. Дерягиным, обобщена Э. Мейсоном и А. Малинаускасом. Основу модели запылённого газа составляют уравнения переноса, которые представляют собой локальные уравнения переноса газа в пористой среде для каждой компоненты.

Для реализации поставленных задач, в которых фильтроэлемент рассматривается в качестве химического реактора, будем рассматривать течение многокомпонентной смеси ОГ как ламинарное, без силовой диффузии и без термодиффузии, тогда выше обозначенная модель упростится и примет следующий вид (для i -го компонента):

$$\sum_{j=1}^{\nu} \frac{n_j}{n \cdot D_{ij}} \left(\frac{J_i}{n_i} - \frac{J_j}{n_j} \right) + \frac{1}{[D_{iK}]} \left[\frac{J_i}{n_i} + \frac{B_0}{\eta} (\nabla p) \right] = -\nabla \ln \left(\frac{n_i}{n} \right) - \nabla \ln p \quad (1)$$

$, i \neq j$

В связи с малостью диаметра пор можно принять, что течение одномерно вдоль поры. Тогда получим следующий вид (для i -ого компонента):

$$\sum_{j=1}^{\nu} \frac{n_j}{n \cdot D_{ij}} \left(\frac{J_i}{n_i} - \frac{J_j}{n_j} \right) + \frac{1}{[D_{iK}]} \left[\frac{J_i}{n_i} + \frac{B_0}{\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) \right] = -\frac{d}{dz} \ln \left(\frac{n_i}{n} \right) - \frac{d}{dz} \ln p \quad (2)$$

$, i \neq j$

Учитывая свойство логарифма и производной от логарифма, получим i -ое уравнение системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\sum_{j=1}^{\nu} \frac{n_j}{n \cdot D_{ij}} \left(\frac{J_i}{n_i} - \frac{J_j}{n_j} \right) + \frac{1}{D_{iK}} \left[\frac{J_i}{n_i} + \frac{B_0}{\eta} \left(\frac{dp}{dz} \right) \right] = \frac{1}{n} \frac{dn}{dz} - \frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dz} - \frac{1}{p} \frac{dp}{dz} \quad (3)$$

С граничными условиями:

$$n_i = n_i^0, \quad i = 1 \div \nu, \quad p_0 = p_0^0, \quad p_1 = p_1^0.$$

Приведем данную систему дифференциальных уравнений к системе линейных алгебраических уравнений путём замены производной разностной

схемой: $\frac{dn_i}{dz} \approx \frac{n_j^{m+1} - n_j^m}{h}$, где h – шаг по пространству.

Таким образом, получаем i -ое уравнение системы линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^{\nu} \frac{n_j^m}{\sum_{k=1}^{\nu} n_k^m \cdot D_{ij}} \left(\frac{J_i}{n_i^m} - \frac{J_j}{n_j^m} \right) + \frac{1}{D_{iK}} \left[\frac{J_i}{n_i^m} + \frac{B_0}{\eta} \left(\frac{p_1 - p_0}{L} \right) \right] = \frac{1}{n_i^m} \frac{n_i^{m+1} - n_i^m}{h} - \frac{\sum_{j=1}^{\nu} \frac{n_j^{m+1} - n_j^m}{h}}{\sum_{j=1}^{\nu} n_j^m} - \frac{p_1 - p_0}{L} \cdot \frac{1}{p_0 + \frac{(p_1 - p_0) \cdot (h \cdot m)}{L}}$$

Решение данной системы линейных уравнений, на каждом шаге итерации, численно находим матричным методом.

Третья глава посвящена разработке алгоритмов и методики имитационного моделирования процессов течения многокомпонентных газовых смесей через пористую матрицу. Здесь также рассмотрена архитектура и методика создания программного комплекса с использованием параллельных вычислений, реализующего разработанную имитационную модель.

Разработанный программный комплекс представляет собой CAE-систему, являющуюся системой полнофункционального инженерного исследования. Комплекс позволяет пользователю проводить компьютерное моделирование процессов фильтрации многокомпонентной смеси через пористую матрицу.

На основе поставленной задачи и дополнительных требований к системе реализовано выполнение следующих основных функций программы:

- управление параметрами:
 - задание начальных параметров;
 - модификация значений параметров;
 - загрузка значений параметров из конфигурационного файла;
 - сохранение значений параметров в конфигурационный файл;
- расчет эксперимента по заданным параметрам;
- расчёт эксперимента с использованием массивно-параллельных вычислений на основе технологии NVIDIA CUDA
- визуализация результатов эксперимента в виде графиков и трехмерной сцены;
- настройка программного обеспечения:
 - настройка параметров визуализации;
 - настройка параметров интерфейса программы;

Система кроссплатформенная. Операционные системы Windows/Unix являются фактическим стандартом и установлены на большинстве компьютеров учебных и иных заведений, что обуславливает лёгкость освоения интерфейса системы пользователями и простоту её развёртывания.

Для разработки был применён кроссплатформенный инструментарий разработки программного обеспечения на языке программирования C++ - Qt Creator. Для визуализации трехмерной сцены был выбран объектно-ориентированный графический движок Ogre3D и физический движок NVIDIA PhysX написанные на языке C++. Данный графический движок поддерживает кроссплатформенность и является свободным программным обеспечением, распространяющимся по лицензии LGPL/MIT. Физический движок также поддерживает кроссплатформенность и является бесплатным для некоммерческого использования. Для визуализации графиков используется qwt (Qt Widgets for Technical Applications) набор виджетов и классов для

создания технических приложений.

Таким образом, создан программный комплекс, полностью заключивший в себя все описанные подходы к исследованию процессов фильтрации многокомпонентных смесей с применением визуализации процесса и параллельных вычислений.

В четвёртой главе представлены результаты численного и компьютерного моделирования. Осуществлено имитационное моделирование процесса фильтрации многокомпонентной смеси ОГ ДВС.

С целью сравнения с существующими экспериментальными данными рассмотрена математическая постановка задачи для случая двух компонент (СО и NO):

1. Полный поток, представляется в виде суммы двух членов - вклада в поток от движения газа как целого, вызванного перепадом давления (разность давлений на входе и выходе пор), и слагаемого, связанного с диффузионным перемещением компонентов.
2. Плотность потока одного компонента представляется в виде суммы диффузионного потока и слагаемого, связанного с полным потоком.
3. Для случая течения в пористых средах используется методы термодинамики необратимых процессов.

Проведенные расчеты и анализ результатов вычислительного эксперимента, показали сопоставимость диаграмм, полученными экспериментально Эвансом. Следовательно, можно говорить об адекватности предложенной модели.

Для газовой смеси, характерной для выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, состоящей из семи основных компонент: N_2 , СО, H_2O , O_2 , СН, CO_2 , NO, находилось решение системы (3) и проводилась компьютерная, 2D и 3D, визуализация процесса решения с заданием соответствующих параметров фильтроэлемента.

На рисунке 2 а,б - представлены окна визуализации по фильтру и по поре соответственно. В режиме визуализации по фильтру, происходит процесс визуализации фильтрации отработанных газов через некоторое сечение фильтра-нейтрализатора. В режиме визуализации по поре производится визуализация процесса фильтрации отработанных газов через одну пору. В данном режиме показывается течение отработанных газов, которые изображены в виде дыма, цвет которого зависит от концентрации выбранной компоненты. По мере прохождения отработанных газов через пору концентрация компоненты отработанных газов меняется и в трехмерной визуализации это наглядно изображается в виде изменения цвета дыма.

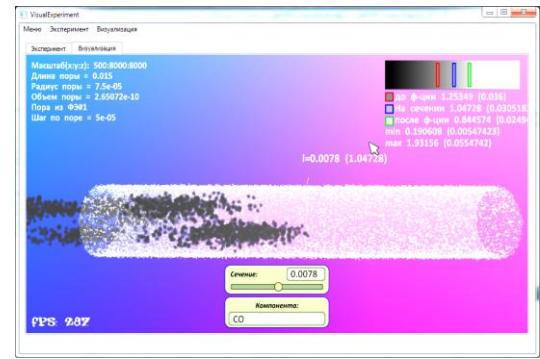
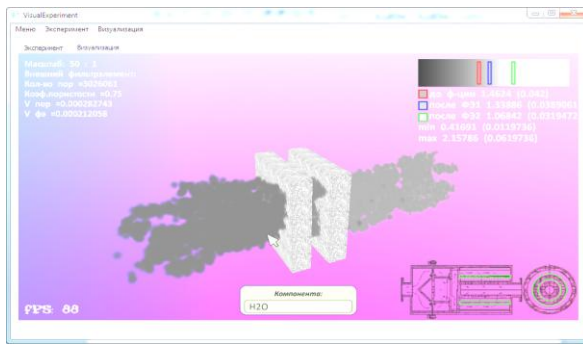


Рисунок 2а. Визуализация по фильтру Рисунок 2б. Визуализация по поре

На основе расчётных данных получены графические зависимости (рисунок 3 а,б,в,г) концентраций компонент от длины фильтроэлемента для концентраций азота, окиси углерода, паров воды и кислорода.

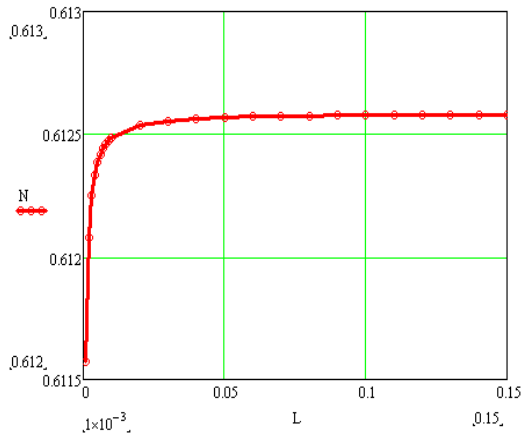


Рисунок 3а. Азота

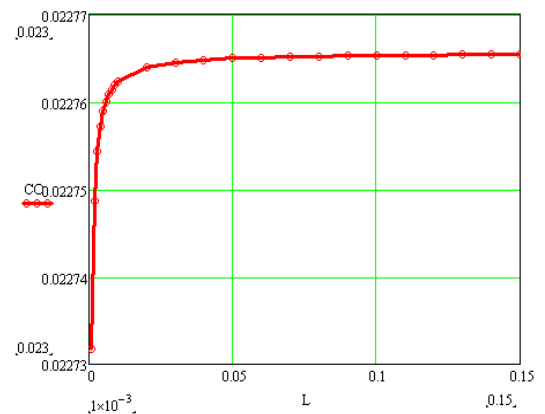


Рисунок 3б. Окись углерода

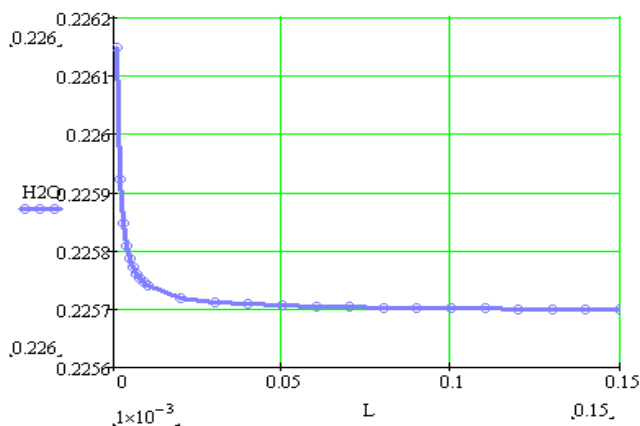


Рисунок 3в. Паров воды

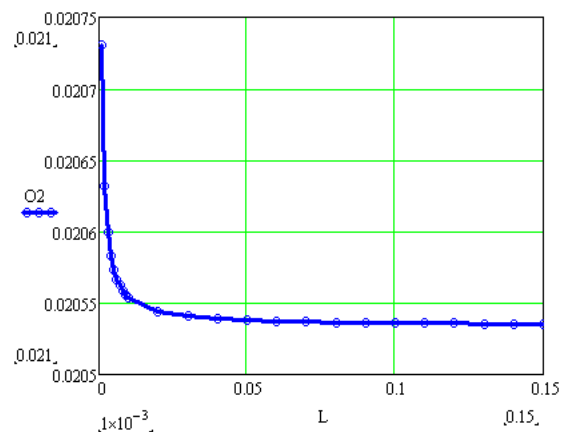


Рисунок 3г. Кислорода

На основе расчётных данных получены графические зависимости (рис. 4 а,б,в,г) концентраций компонент от радиуса поры фильтроэлемента для концентраций азота, окиси углерода, паров воды и кислорода.

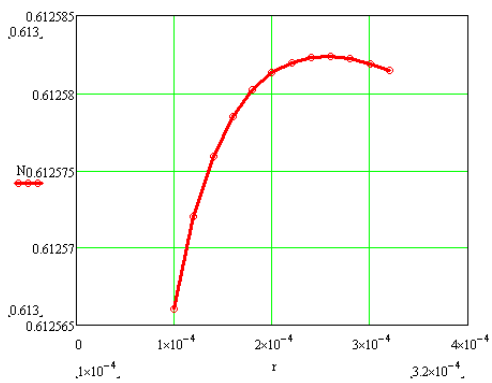


Рисунок 5а. Азота

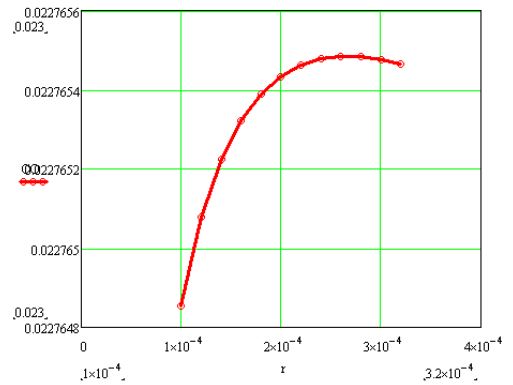


Рисунок 5б. Окиси углерода

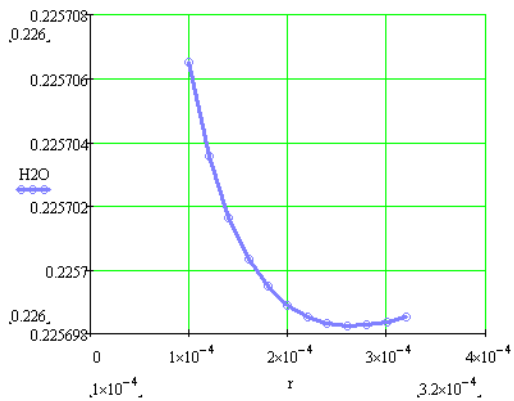


Рисунок 5в. Паров воды

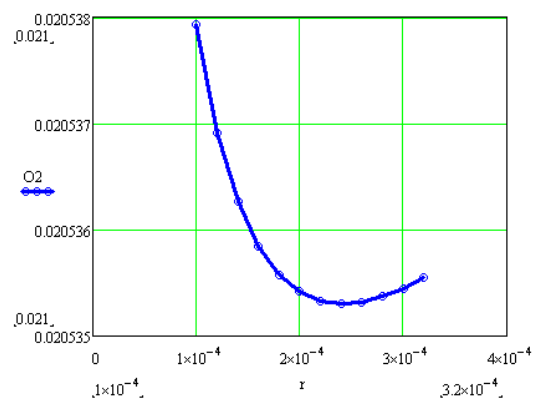


Рисунок 5г. Кислорода

На рисунке 6 а,б представлены графические зависимости концентраций азота и окиси углерода (CO) в зависимости от изменения концентрации кислорода.

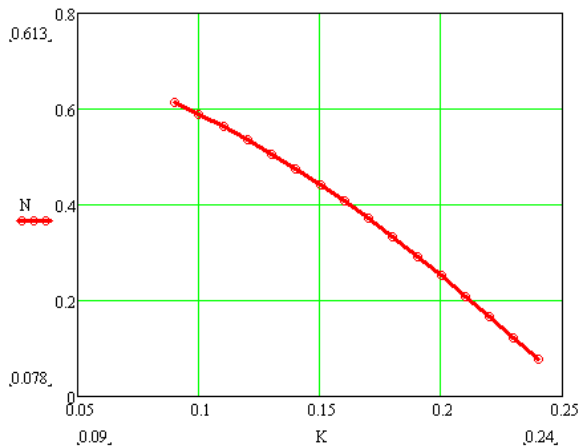


Рисунок 6а. Азота

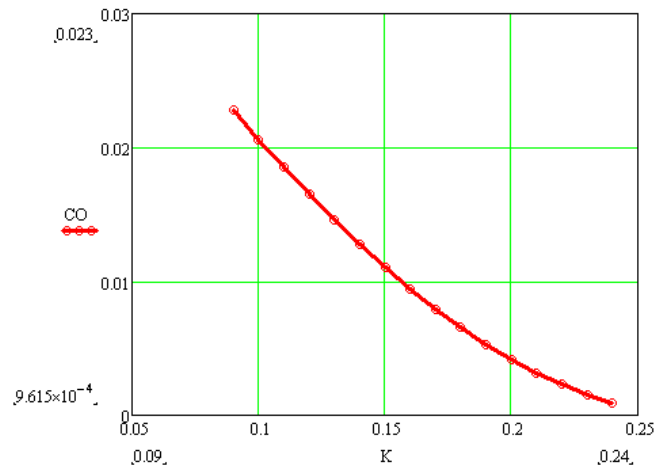


Рисунок 6б. Окиси углерода.

На рисунке 7 а,б представлены графические зависимости концентраций азота и окиси углерода (CO) в зависимости от изменения концентрации паров воды.

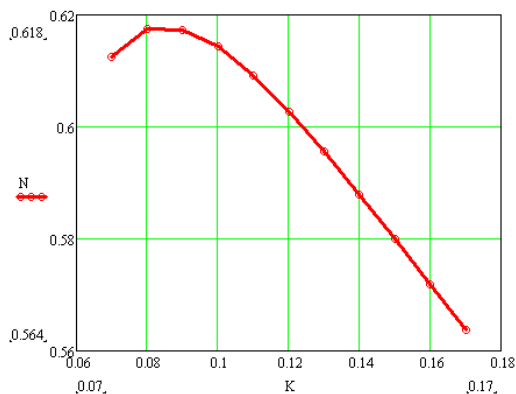


Рисунок 7а. Азота

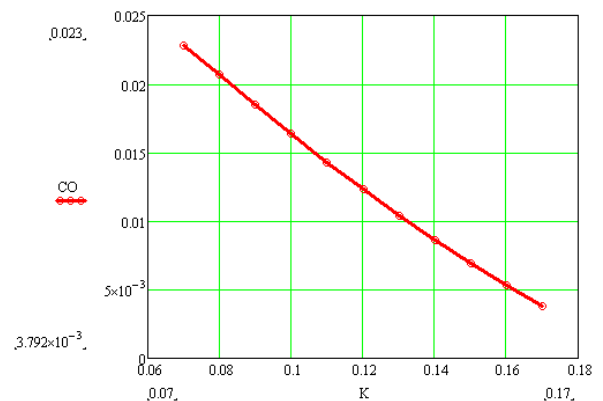


Рисунок 7б. Окиси углерода.

Результаты компьютерного моделирования и анализ графических зависимостей рис.2-7 позволяют выработать ряд конструктивных и технологических решений при разработке и модернизации систем выпуска ОГ бензиновых ДВС. Например:

1. Оптимальная длина фильтроэлемента - 0,08-0,1 м.
2. Оптимальный диаметр пор фильтроэлемента - 300-600 мкм.
3. Для снижения концентрации CO, в выпускных газах, необходимо создать подсос воздуха в реакционную зону.
4. Для снижения концентрации окислов азота и углерода, в выпускных газах, делаем впрыск паров воды.

В пятой главе были проведены исследования оценки производительности системы, основанной на графических процессорах.

Вычисления и визуализация осуществлялись, в многопоточном режиме, и сравнивались с однопоточным режимом. Установлено, что зависимость времени расчета от размера генерируемого сегмента имеет линейный вид:

$$t_{8800GT}(n) = -0.003 * n + 8.345 * 10^4$$
$$t_{GTx480}(n) = -0.001 * n + 3.25 * 10^3$$

время расчета прямо пропорционально количеству пор в фильтре и соответствует:

$$t_{8800GT}(N) = 0.027 * N - 42.1$$
$$t_{GTx480}(N) = 6.7 * 10^{-4} * N + 53.3$$

зависимость быстродействия от шага по пространству для обоих адаптеров имеет экспоненциальный вид и выражается соотношениями:

$$t_{8800GT}(\Delta z) = 1,46 * 10^5 * e^{-1.8 * 10^4 * \Delta z} + 1.05 * 10^4$$
$$t_{GTx480}(\Delta z) = 3,57 * 10^3 * e^{-1.82 * \Delta z} + 399.$$

Было зафиксировано значительное (в 250 раз) ускорение как вычислительных, так и графических функций. Это позволило утверждать о возможности использования разработанного комплекса в режиме реального времени.

В шестой главе была проведена оценка времен характерных реакций в нейтрализаторе, которая показала, что при указанных выше оптимальных значениях длины фильтроэлемента и диаметрах пор матрицы химические реакции при наличии катализатора «успевают» завершиться, следовательно: основное функциональное предназначение фильтроэлементов не нарушается.

Расчетные результаты по геометрическим параметрам совпали в пределах погрешности с полученными ранее другими авторами (П.В. Исаенко).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы. Автором были изучены особенности и гидравлические характеристики пористых материалов, используемых в системах выпуска ОГ ДВС, в том числе получаемых на основе СВС-технологии. При этом получены следующие оригинальные результаты:

1. Усовершенствована и адаптирована к условиям выпускной системы ДВС математическая модель фильтрации многокомпонентной газовой смеси, учитывающая гидродинамику рассматриваемого процесса, путем ввода параметров характеризующих структуру пористой среды и механизмы переноса смеси (молекулярнокинетический подход).
2. Предложены и реализованы алгоритмы для имитационного моделирования процессов фильтрации многокомпонентной газовой смеси через пористую матрицу (течение ОГ в выпускной системе ДВС)

- с использованием массивно-параллельных вычислений.
3. Предложена и реализована оригинальная методика имитационного компьютерного моделирования процессов фильтрации многокомпонентной смеси отработанных газов, через фильтроэлемент, с использованием параллельных вычислений на графических процессорах.
 4. На основе проведенных исследований с использованием массивно-параллельных вычислений выявлено значительное увеличение (в 250 раз) производительности комплекса для численного счета и выполнения графических операций, то есть стало возможным утверждать о том, что разработанная система может служить основой для принятия решений при конструировании и модернизации выпускных систем бензиновых ДВС.
 5. Оценка времени протекания гомогенных реакций окисления CO и NO, выявленные оптимальные значения геометрических параметров фильтроэлемента, а также установленные технологические приемы позволили полностью достичь поставленной цели и дать возможность для создания АРМ конструктора-технолога выпускных систем бензиновых ДВС.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ.

1. В.Э.Борзых, Б.В. Семёнов. Математическое моделирование процессов фильтрации продуктов сгорания топлив // Вестник Тюменского государственного университета, № 6, 2009.-С .192-197.
2. В.Э.Борзых, Б.В. Семёнов. Математическое моделирование процессов течения многокомпонентных газов через пористую структуру // Известия вузов. Нефть и газ, № 3, 2010.-С.118-124.
3. С.Н.Соколко, Б.В.Семёнов. Некоторые особенности обработки экспериментальных данных автоматизированной системы для моделирования процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Вестник кибернетики, №10, 2011.-С.90-96.Тюмень Издательство ИПОС СО РАН.
4. В.Э.Борзых, Б.В.Семёнов. Имитационное моделирование процессов течения многокомпонентных газов через пористую структуру, с использованием технологии NVIDIA CUDA // Вестник Тюменского государственного университет, №4, 2012. -С.125-128.
5. Б.В. Семёнов. Математическое моделирование процессов течения двухкомпонентной смеси через пористую структуру // Вестник кибернетики №11, 2012 .-С.Тюмень Издательство ИПОС СО РАН.
6. В.Э.Борзых, Б.В.Семёнов, В.В. Титов. Визуализация результатов

компьютерного моделирования процесса фильтрации отработанных газов двигателей внутреннего сгорания // Вестник кибернетики, № 11, 2012. - С.129-134. Тюмень Издательство ИПОС СО РАН.

Публикации в других изданиях

7. В.Э.Борзых, Б.В Семёнов. Совершенствование систем выпуска отработанных газов для повышения экологической безопасности дорожно-строительных машин // Материалы Международной конференции «Сопряжённые задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». ТГУ, г. Томск 25-28 июня 2007 года, - С.23-24.
8. В.Э.Борзых, Б.В Семёнов. Задача о фильтрации отработанных газов для выпускных систем двигателей дорожно-строительных машин // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации систем транспорта», г.Тюмень, 16-17 октября 2007 года, - С.180-182.
9. В.Э.Борзых, Б.В Семёнов. Постановка задачи фильтрации отработанных газов для выпускных систем двигателей внутреннего сгорания // XXI Международная конференция. Математические методы в технике и технологиях ММТТ-21, г. Саратов, 27-30 мая 2008 года, - С.260-261.
10. В.Э.Борзых, Б.В Семёнов. Решение задачи фильтрации для выпускных систем двигателей внутреннего сгорания // Всероссийская конференции посвящённая 60-ю мехмата ТГУ, г. Томск 22-25 сентября 2008 года, - С.187.
11. В.Э.Борзых, Б.В Семёнов. Течение отработанных газов в выпускных системах двигателей внутреннего сгорания // VI всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященная 40 - летию НИИ ПММ ТГУ, г. Томск, с 30 сентября по 2 октября 2008 года. -С.338-340.
12. Б.В Семёнов. Моделирование процесса очистки ОГ ДВС // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эксплуатации систем транспорта», г.Тюмень, 6-7 ноября 2008 года, - С.281-285.
13. Б.В Семёнов, Соколко С.Н. Режимы течения отработанных газов ДВС через пористую структуру // Материалы Межрегиональной научно-технической конференции., г.Тюмень, 31 октября - 2 ноября 2008 года, - С.128-130.
14. Б.В Семёнов, Соколко С.Н. Модель фильтрации и очистки отработанных газов двигателей внутреннего сгорания // VIII Международная научно-практическая конференция «Экология и безопасность жизнедеятельности». г.Пенза, декабрь, -2008 года. -С.124-126.
15. В.Э.Борзых, Б.В Семёнов, С.Н. Соколко. Организация вычислительного эксперимента для задач моделирования отработанных газов через пористую структуру выпускной системы автомобиля // Вестник кибернетики, № 8, 2009. - С.25-31. Тюмень Издательство ИПОС СО РАН.
16. В.Э.Борзых, Б.В.Семёнов, С.Н.Соколко. Проектирование автоматизированной системы для изучения процессов сомораспространяющегося высокотемпературного синтеза // Вестник

кибернетики, №9, 2010.-С.92-98.Тюмень Издательство ИПОС СО РАН.

17. В.Э. Борзых, Б.В. Семёнов. Молекулярно-кинетический подход к математическому моделированию процессов фильтрации отработанных газов ДВС // IV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Новые информационные технологии в нефтегазовой отрасли и образовании», Тюмень, 14-15 октября 2010. -С.41-44.

18. Б.В. Семёнов. Иммитационное моделирование течения выпускных газов в фильтроэлементах // Материалы итоговой конференции аспирантов Института геологии и нефтегазодобычи ТюмГНГУ и Института проблем освоения Севера СО РАН. Тюмень, ТюмГНГУ, 2012. -С.8.

19. Б.В. Семёнов, В.Э. Борзых, А.К. Гулевсий, И.П. Навинкин. Компьютерное моделирование многокомпонентной смеси через пористую структуру // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012612404.

20. Б.В.Семёнов, В.Э.Борзых, В.В.Титов. Визуализация процесса фильтрации многокомпонентной смеси через пористую структуру // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2012612405.