

КУЛАГИНА
Людмила Владимировна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ
ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕЧАХ**

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы
и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2010

Работа выполнена во ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
и Институте вычислительного моделирования СО РАН

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Демиденко Николай Данилович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Иванчура Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор
Калекин Вячеслав Степанович

Ведущая организация: **Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе
СО РАН (Новосибирск)**

Защита диссертации состоится 05 марта 2010 года в 16-00 часов в ауд. УЛК 115 на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.06 при ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского федерального университета по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, ауд. Г 274.

Автореферат разослан 02 февраля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Р. Ю. Царев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки методов анализа нестационарных процессов объектов с распределенными параметрами и использования в производстве высокоэффективных методов и средств решения задач проектирования оптимальных режимов и систем управления химико-технологическими установками.

В современных условиях развития нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности актуальной задачей становится повышение эффективности и экологической безопасности эксплуатации применяемого в отрасли топливоиспользующего энергоемкого оборудования, в особенности трубчатых печей, которые широко распространены на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) (50-60 % от общего количества печей), их стоимость достигает 25 % от стоимости всех технологических установок НПЗ.

В зависимости от специфики технологического процесса, физико-химических свойств нагреваемой среды и вида топлива, применяют печи различных конструкций и параметров. Вместе с тем, габаритные размеры трубчатых печей и другие конструктивные особенности не позволяют в полной мере осуществить совершенствование их конструкций и технологических процессов на базе экспериментальных исследований.

Таким образом, существует народно-хозяйственная задача повышения точности проектирования, эксплуатации, управления и контроля технологией производства нефтепродуктов, решение которой позволит экономить топливные ресурсы и снизить вредные выбросы в атмосферу.

Современные требования к теплотехнологиям, широкое внедрение процессорных методов измерения, контроля и управления ставят в число приоритетных задач более детальную разработку физико-математических моделей гидродинамических, тепломассообменных и термодинамических процессов.

В области моделирования процессов нефтепереработки значительные результаты получены В. Н. Ветохиным, Н. Д. Демиденко, В. В. Кафаровым и другими. В области систем с сосредоточенными параметрами основополагающими являются работы Р. Габасова, Ф. М. Кириловой, Н. Н. Красовского, Л. С. Понтрягина и др. Важные задачи оптимального управления для распределенных систем решены А. Г. Бутковским, Г. Л. Дегтяревым, Н. Д. Демиденко, А. И. Егоровым, Т. К. Сиразетдиновым и др.

Несмотря на широкое распространение в промышленности процессов разделения многокомпонентных смесей, системы оптимального управления такими процессами все еще детально не исследованы, что определяет актуальность решаемых в данной работе задач.

Основные результаты диссертации получены в ходе выполнения планов научных исследований Института вычислительного моделирования СО РАН, а также в рамках научных исследований по Всероссийской программе «Энергосбережение Минобразования РФ» (2003–2005). Исследования поддержаны грантом Академии наук Высшей школы и Международного фонда «Филипп

Моррис» (2003) и грантом для поддержки научных исследований студентов, аспирантов и молодых ученых Сибирского федерального университета (2007).

Объектом исследования являются трубчатые нагревательные печи нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности, как сложные системы с распределенными параметрами.

Предмет исследования – режимные характеристики рабочих процессов в трубчатых печах.

Цель диссертационной работы – разработка математических моделей тепломассообменных процессов в трубчатых печах для усовершенствования систем управления и контроля режимами их работы.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие **задачи**:

изучение и анализ существующих методов оценки технологических режимов работы трубчатых печей нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности на базе феноменологических моделей процессов тепломассообмена и гидроаэромеханики;

разработка математических моделей режимов работы технологических печей на базе краевых задач, описывающих процессы тепломассообмена в разнонаправленных потоках;

выбор численных методов расчета;

проведение численного анализа статических и динамических режимов работы технологических печей на базе предлагаемых моделей с целью выработки рекомендаций для проектирования и эксплуатации энергоэффективных промышленных процессов и установок;

анализ нестационарных режимов в системах контроля и управления распределенными процессами.

Основная идея диссертации заключается в комплексном использовании метода декомпозиции общей проблемы на ряд отдельных задач с целью построения и исследования моделей систем с распределенными параметрами и математического моделирования тепломассообменных процессов в трубчатых печах для повышения эффективности и экологической безопасности производства нефтепродуктов.

Методика исследований. Численный анализ проводился с применением методов решения дифференциальных уравнений с обыкновенными производными (метод Кутты-Мерсона) и программного комплекса COMSOL Multiphysics, для систем уравнений с частными производными.

Основные результаты:

на основе анализа моделей процессов нестационарного тепломассообмена с разнонаправленными потоками найдены и обоснованы определяющие параметры для моделирования статических и динамических режимов работы технологических печей;

разработаны и реализованы математические модели стационарных и нестационарных режимов работы технологических печей; с помощью метода Кутты-Мерсона на основе предложенных уравнений, учитывающих тепломас-

сообмен в одно- и разнонаправленных потоках, решена задача Коши. Показана эффективность предложенных численных алгоритмов;

в математических моделях статических и динамических режимов работы технологических печей установлены взаимозависимости рассматриваемых параметров управления, позволяющие учитывать их еще на стадии проектирования технологического оборудования или создавать максимально приближенные к реальным условиям программы автоматического управления промышленными комплексами;

определено влияние концентрации капель жидкого топлива на скорость распространения пламени на начальной стадии процесса. Наилучшие параметры горения имеют капли диаметром 1 мм, причем по скорости горения для этих капель наблюдается локальный максимум. Установлено, что с увеличением концентрации капель этого размера скорость распространения пламени уменьшается при $x < 9\%$ и возрастает при более высоких x ;

на основе анализа нестационарных режимов в системах контроля и управления распределенными процессами найдены и обоснованы критерии оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах.

Научная новизна:

установлено влияние размера капель жидкого топлива в трубчатых печах на скорость распространения пламени на начальной стадии процесса; определены оптимальные размеры капель и их концентрация, что позволяет совершенствовать технологию сжигания топлива с целью повышения эффективности и экологической безопасности процесса в целом;

усовершенствованы математические модели тепломассообменных процессов в трубчатых печах, в отличие от известных, позволяющие комплексно оценивать влияние управляющих воздействий (концентрации горючего вещества; температуры сырья; скорости, плотности и температуры потока) на режимы нефтепереработки на стадии проектирования технологического оборудования и обеспечивающие повышение точности расчетов характеристик процесса до 1-5 %;

предложены и обоснованы критерии оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах, позволяющие выбирать оптимальные режимы работы для получения конечного продукта нефтепереработки заданного качества.

Значение для теории. Предложенные математические модели тепломассообменных процессов в трубчатых печах, а также критерии оптимального управления теплотехнологическими процессами дополняют теоретические основы для проектирования и разработки энергоэффективных технологий и оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств.

Практическая значимость состоит в том, что на основании проведенных исследований повышается эффективность (скорость, достоверность и точность) расчётов при проектировании режимов работы технологических печей нефтепереработки с учетом усовершенствования систем управления и контроля. Данные численного анализа могут быть использованы при разработке оптимальных режимов управления процессами теплотехнологических агрегатов непрерывно-

го действия, что позволяет повысить энергоэффективность производства и уменьшить количество вредных выбросов в окружающую среду за счет совершенствования процессов сжигания топлива. Методы и подходы являются новыми в прикладной сфере и могут быть применены в других областях техники и технологии.

Использование полученных результатов. Разработанные алгоритмы и программы прошли экспериментальную проверку и используются при расчетах статических и динамических режимов работы для трубчатых печей, установленных в технологической цепочке Ачинского НПЗ.

Научные результаты исследований апробированы и использованы в учебном процессе при разработке курсов лекций и создании учебных пособий (с грифом Минобрнауки РФ) в Политехническом институте (они включены в программу учебной дисциплины «Автоматизированные системы управления теплотехнологическими комплексами», преподаваемой для студентов специальности 140105 – энергетика теплотехнологии), Институте градостроительства, управления и региональной экономики Сибирского федерального университета и Омском государственном техническом университете (включены в программу учебной дисциплины «Процессы и аппараты химической технологии: гидромеханические и тепловые процессы», преподаваемой для студентов специальности 240801 – Машины и аппараты химических производств) и применяются в научно-исследовательской деятельности теплоэнергетического факультета ПИ СФУ. Все приводимые сведения подтверждены актами об использовании.

Достоверность и обоснованность результатов, полученных в диссертационной работе, научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректным применением математического аппарата теории систем дифференциальных уравнений в частных производных, теории численных методов и оптимальных систем управления для объектов с распределенными параметрами, а также сопоставительным анализом расчетных значений с натурными данными действующих производств.

Апробация работы. Основные положения работы, результаты теоретических, вычислительных и экспериментальных исследований докладывались и обсуждались на: VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвященной 80-летию со дня рождения генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева «Решетневские чтения» (Красноярск, 2004), International SYMKOM' 05 и International SYMKOM' 08 (Poland, Lodz, 2005, 2008), Всерос. НТК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения» (Красноярск, 2003-2008), V - VIII Всерос. НПК и выставках по проблемам энергоэффективности (Красноярск, 2004-2007), III Науч. конф. с междунар. участием «Современные наукоемкие технологии» (Египет, Хургада, 2005), IX Всерос. науч. конф. с междунар. участием «Решетневские чтения» (Красноярск, 2005), Межрегион. НПК «Инновационное развитие регионов Сибири» (Красноярск, 2006), V и VI Школах-семинарах молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова (Казань, 2006, 2008), III Междунар. летней научной школы «Гидродинамика больших скоростей

и численное моделирование» (Кемерово, 2006), VI Междунар. НПК «Экология и безопасность жизнедеятельности» (Пенза, 2007).

По результатам работы на различных этапах ее выполнения она была отмечена: Дипломом лауреата конкурса и грантом Академии наук Высшей школы и Международного фонда «Филипп Моррис» (2003), Дипломом Министерства образования РФ за первое место во Всероссийском конкурсе на лучшую студенческую научную работу по естественным, техническим и гуманитарным наукам в вузах Российской Федерации (2004), Сертификатом участника конференции «Приоритетные направления развития науки, технологий и техники» Российской академии Естествознания (2005), Грамотой Министерства образования РФ в конкурсе инновационных проектов аспирантов и студентов по приоритетному направлению «Энергетика и энергосбережение» (2005), Стипендией Президента Российской Федерации на 2006-2007 и 2007-2008 учебные годы, Государственной премией Красноярского края (2007), Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года–2007» по версии «Инженерное искусство молодых» в номинации «Нефтяная и газовая промышленность».

Личный вклад автора состоит в разработке численных методов и алгоритмов расчета статических и динамических режимов работы оборудования, численном анализе и формулировке основных положений, определяющих научную новизну и практическую значимость. Совместно с научным руководителем были сформулированы: цели и задачи исследований, выводы и рекомендации для принятия решений, которому автор выражает свою искреннюю признательность.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 25 работ, из них: 8 статей в изданиях по списку ВАК; 5 статей в других изданиях и за рубежом; 10 работ – в материалах всесоюзных, всероссийских и международных конференций и симпозиумов; 2 учебных пособия.

Объем и структура работы. Материалы диссертации изложены на 129 страницах основного текста, включающего 30 рисунков и 4 таблицы. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка литературы из 138 наименований и двух приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность проблемы, поставлена цель и определены задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первый раздел посвящен анализу вычислительных проблем систем с распределенными параметрами.

Важное место среди современных непрерывно действующих промышленных установок занимают такие, в которых технологический процесс происходит при движении взаимодействующих сред. Это технологические печи, трубчатые реакторы, ректификационные колонны, вращающиеся печи, теплообменные аппараты, сушильные камеры непрерывного действия, металлургические проходные нагревательные печи, парогенераторы энергетических установок, длинные трубопроводы и целый ряд других.

Рассматриваемые процессы имеют значительную распределенность в пространстве, что хорошо иллюстрирует описание технологического оборудования Ачинского НПЗ (рисунок 1), на примере которого были апробированы разработанные в диссертации модели. Пренебрежение важным свойством распределенности процессов приводит к принципиальным ошибкам в решении задач автоматического управления.

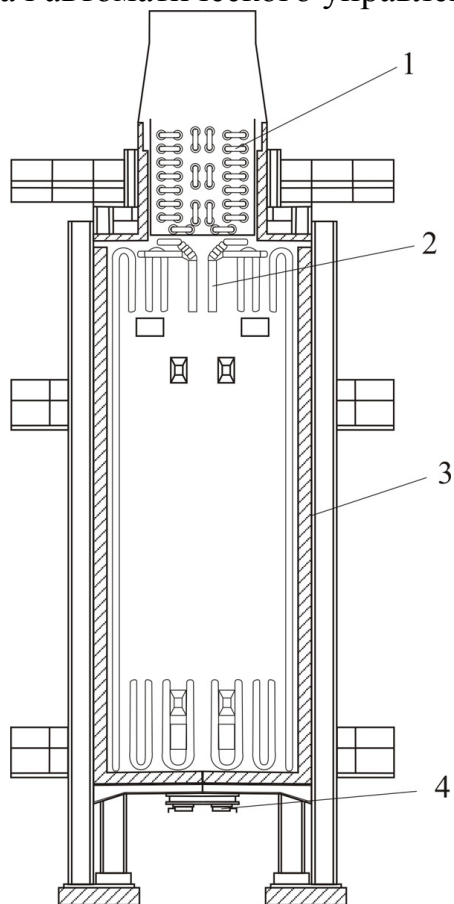


Рисунок 1 – Конструкция трубчатой печи с верхним отводом дымовых газов:
1 – змеевик конвекционных труб; 2 – змеевик радиантных труб; 3 – каркас;
4 – горелка

Существующие подходы моделирования характеризуются отсутствием количественной основы, связывающей фундаментальные и специальные знания. До настоящего времени системы обработки данных и управления для процессов нефтепереработки часто создавались на основе анализа статических характеристик, что не всегда должным образом повышает эффективность их функционирования.

Актуальной задачей является численная реализация методов решения краевых задач и задач определения статических и динамических характеристик рациональных режимов работы теплотехнологических процессов и установок. Основы в этой области представляют опубликованные работы Н. Д. Демиденко, Г. И. Марчука, Н. Н. Моисеева, Р. П. Федоренко, В. В. Шайдурова, Ю. И. Шокина, Н. Н. Яненко, и др.

Разработка методов анализа нестационарных процессов объектов с распределенными параметрами является центральным вопросом в проблеме моделирования

статических и динамических режимов технологических процессов. Декомпозиция общей проблемы на ряд отдельных задач и разработка метода их решения определяет возможность успешного достижения цели. Такой подход в конечном итоге приводит к повышению эффективности технологических процессов, минимизации затрат на производство продуктов и сокращению сроков их выпуска. Кроме того, он даёт возможность исследовать закономерности поведения объектов и более детально изучить технологические процессы.

Результаты анализа обзора литературных источников подтверждают актуальность работы и целесообразность постановки решаемых в диссертации задач.

Второй раздел содержит материалы по математическому моделированию процессов теплообмена. Приведены математические модели тепловых процессов в двух взаимодействующих средах, служащих для описания нестационарных режимов в различных теплообменниках.

Физическая картина явлений, происходящих в объектах как правило не-

сколько упрощена во избежание излишней громоздкости записей и для выделения общих свойств рассматриваемого класса объектов. Последнее обстоятельство связано с возможностью типизации моделей и применением общего для всего класса объектов методов исследования и управления.

Таким образом, в этом разделе важна прежде всего структура математических моделей. Следует подчеркнуть, что аналитический метод построения моделей промышленных объектов не всегда обеспечивает удовлетворительное совпадение предсказанных моделью значений с экспериментом. Это объясняется влиянием на реальный процесс многих неучтенных моделью факторов (часто неизвестных), случайным характером внешних воздействий на объект, а также неточным знанием физических констант, характеризующих процесс в исследуемом объекте. В связи с указанными выше факторами, полученные аналитическим путем модели, как правило, проверяются на адекватность реальному объекту и в случае необходимости корректируются. Однако, несмотря на отмеченный недостаток, феноменологический (аналитический) подход остается одним из основных инструментов получения математических моделей промышленных объектов, так как определяет структуру модели и дает большую априорную информацию об объекте управления.

В третьем разделе изложены принципы и задачи компьютерного моделирования процессов в трубчатой печи. Приведен тепловой расчет. Предложена математическая модель процесса горения капель топлива с учетом потерь на излучение. Рассмотрены решения стационарной и динамической задач.

Считается, что пары топлива сгорают в весьма тонком сферическом слое радиуса r_g , который называется зоной горения. Скорость горения определяется подводом к зоне горения кислорода извне и паров топлива изнутри. Такой подход позволяет вычислить скорость испарения капли, температуру в зоне горения, радиус зоны горения, температуру капли. В практически важных случаях температура капли оказывается близкой к температуре кипения. Теория развита для случая молекулярных процессов горения. Ее можно распространить на случай конвективного тепло- и массообмена. Однако вышеприведенная теория встречается с серьезными трудностями. Экспериментально установлено, что температура в зоне горения значительно ниже расчетной.

Исходя из законов механики сплошных сред, модель нестационарного горения, можно представить следующими уравнениями:

1. *Уравнение неразрывности:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial l} = 0, \quad (1)$$

где ρ - плотность потока;

u - скорость потока;

t - временная координата;

l - пространственная координата.

Для покомпонентной модели процесса горения уравнение (1) можно записать в виде

$$\frac{\partial(\rho x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho x u)}{\partial l} = -\frac{\rho x}{\tau}, \quad (2)$$

здесь x – концентрация горючего вещества в смеси ($0 \leq x \leq 1$);
 τ – время сгорания.

2. Уравнение движения в виде

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial l} \right) + \frac{\partial P}{\partial l} = 0, \quad (3)$$

где P – давление.

3. Уравнение сохранения энергии:

$$\rho T \left(\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial l} \right) = \frac{\rho x}{\tau} q - Q(T) + K_1 (T_C - T), \quad (4)$$

где q – теплота сгорания топлива;

$Q(T)$ – потери на излучение;

S – энтропия, причем $S = C_v \ln \frac{P}{\rho^\gamma}$ ($\gamma = 1,0 - 1,4$, так как для жидкостей различие между C_v и C_p незначительно);

K_1 – коэффициент теплопередачи для рабочего потока;

T_C – температура сырья;

T – температура потока.

Уравнение (4) после ряда преобразований можно записать как

$$\frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \gamma) T \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T}{\partial l} + \frac{xq}{C_v \tau} - \frac{Q(T)}{C_v \rho} + K_1 (T_C - T).$$

4. Уравнение теплообмена:

$$\frac{\partial T_C}{\partial t} - w \frac{\partial T_C}{\partial l} = K_2 (T - T_C), \quad (5)$$

где K_2 – коэффициент теплопередачи для стенки печи;

w – скорость сырья.

Уравнения (1)–(5) представляют собой математическую модель теплового процесса печи, которая может быть реализована относительно скорости движения смеси и концентрации горючего вещества в смеси по длине камеры сгорания и используется для получения других параметров печи, которые зависят от x и u .

Для получения x , u , ρ , P , T , T_C как функции длины и времени в камере сгорания формулируется смешанная краевая задача. Для этого к уравнениям (1)–(5) добавляются начальные:

$$x(l, 0) = \varphi_1(l), u(l, 0) = \varphi_2(l), T(l, 0) = \varphi_3(l), T_C(l, 0) = \varphi_4(l), \rho(l, 0) = \varphi_5(l) \quad (6)$$

и граничные условия:

$$x(0, t) = \varphi_1(t), u(0, t) = \varphi_2(t), T(0, t) = \varphi_3(t), T_C(L, t) = \varphi_4(t), \rho(0, t) = \varphi_5(t) \quad (7)$$

Стационарная модель процесса горения следует из (1)–(5) при $\partial/\partial t = 0$. Тогда $\partial/\partial l \rightarrow d/dl$ и модель после соответствующих преобразований может быть представлена в виде

$$\frac{dx}{dl} = -\frac{x}{u\tau},$$

$$Mu + P = \Pi, \tag{8}$$

$$\frac{d}{dl} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{\gamma u P}{(\gamma - 1) M} \right) = \frac{R}{C_v (\gamma - 1) \tau} \frac{x}{u} q - \frac{RQ(T)}{C_v M (\gamma - 1)},$$

где M , Π – константы.

Система (8), состоящая из обыкновенных дифференциальных уравнений, теперь может быть разрешена относительно скорости движения смеси и концентрации горючего вещества в смеси по длине камеры сгорания. Это решение может быть использовано для получения других параметров печи, которые зависят от x и u .

Решение стационарной задачи. Для определения x и u как функций длины в камере сгорания формулируется задача Коши, решаемая методом Кутты-Мерсона, задаются значения x и u на входе в камеру сгорания.

$$\frac{dx}{dl} = -\frac{x}{ul},$$

$$\frac{du}{dl} = \frac{R}{C_v} \left[\frac{(Mxq - \tau u Q(T))}{u\tau(\gamma P - Mu)} \right],$$

$$0 \leq l \leq L.$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} x(0) = \alpha_1, \\ u(0) = \alpha_2. \end{cases}$$

Были проведены расчеты горения капель различного диаметра для решения задачи Коши с начальными условиями, м/с:

$$\begin{aligned} x(0) &= 0,346, \\ u(0) &= 1,0. \end{aligned}$$

Результаты расчетов представленные на рисунках 2 и 3 показывают, что скорость горения и концентрация горючего вещества по длине печи, как и потери тепла на излучение, существенно зависят от размеров капель топлива. Наилучшие параметры горения имеют капли диаметром 1 мм, причем по скорости горения для этих капель наблюдается локальный максимум.

Решения, описывающие рассматриваемые процессы, отражают их общий ход и меру влияния отдельных факторов на их протекание. Качественный анализ полученных соотношений и зависимостей в целом является основой для построения (уточнения) физической модели горения жидкого топлива, моделирования и оптимизации сложных процессов разделения и систем управления.

На рисунке 4 показано влияние концентрации капель жидкого горючего на скорость распространения пламени на начальной стадии процесса. Видно, что по мере увеличения x – концентрации капель определенного размера – скорость распространения пламени уменьшается при $x < 9$ % (для диаметра капель ~ 1 мм) и несколько возрастает при более высоких x . При очень малых и очень больших концентрациях горючего влияние размеров капель по существу отсутствует.

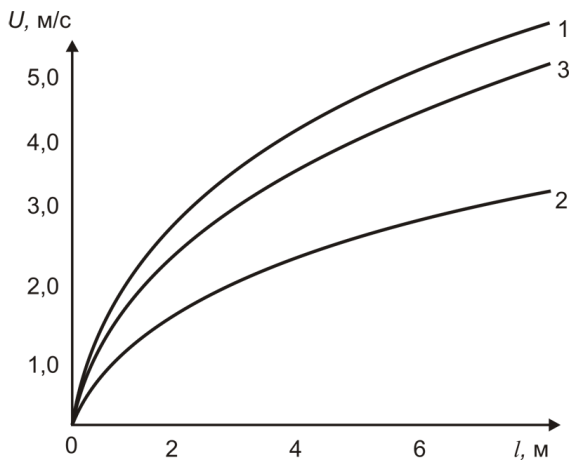


Рисунок 2– Изменение скорости горения смеси по длине печи: 1– диаметр капли 1 мм, 2 – 2 мм, 3 – менее 1мм

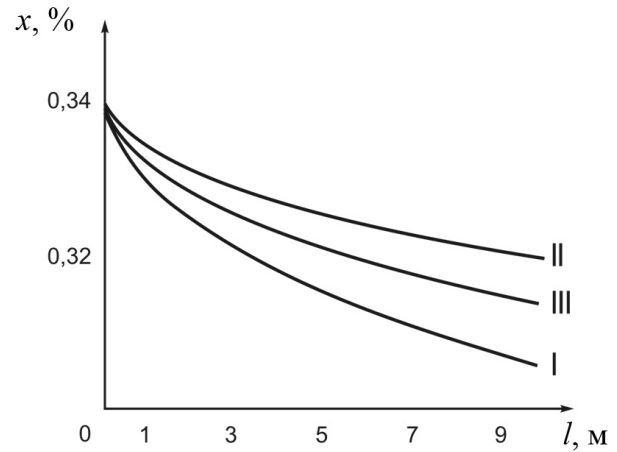


Рисунок 3– Изменение концентрации горючего вещества по длине печи: I – горение каплей диаметром 1мм, II – 2 мм, III - менее 1 мм

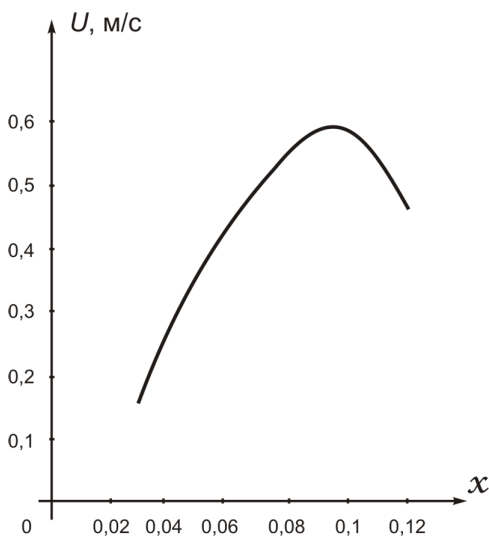


Рисунок 4– Влияние концентрации капель жидкого горючего на скорость распространения пламени на начальной стадии процесса

При увеличении количества сконденсированного горючего полная концентрация, при которой достигается максимальная скорость распространения пламени, сдвигается в стороны больших значений концентрации горючего, а значение максимальной скорости распространения пламени уменьшается. Влияние концентрации жидких капель на скорость горения идентично влиянию концентрации жидких капель на скорость распространения пламени, причем этот эффект выражен тем сильнее, чем выше скорость распространения пламени. Это, в свою очередь, показывает, что в случае высокой скорости распространения пламени жидкие.

капли размером 1 мкм не успевают полностью испариться перед фронтом пламени.

В четвертом разделе излагаются результаты исследования динамических характеристик систем с распределенными параметрами. Здесь рассматривается решение задач оптимального контроля для непрерывного процесса взаимодействия двух разнонаправлено движущихся сред в тепломассообменном аппарате с пространственно распределенным тепловым воздействием и оптимального управления для процесса нестационарной массопередачи в трубчатой печи. Исходя из закона сохранения количества тепла или массы рассмотрим уравнения, описывающие этот процесс:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial t} + \frac{\partial(\omega_1 T_1)}{\partial l} &= \alpha_1(l,t)(T_2 - T_1), \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} + \frac{\partial(\omega_2 T_2)}{\partial l} &= \alpha_2(l,t)(T_1 - T_2) + f(l,t), \end{aligned} \quad (9)$$

где $T_i = T_i(l, t)$, $i = 1, 2$ – функция распределения температуры;
 $\omega_i = \omega_i(l, t)$, $i = 1, 2$ – скорость движения соответственно первой и второй сред;
 $f(l, t)$ – функция внешнего воздействия;
 $\alpha_i = \alpha_i(l, t)$, $i = 1, 2$ – коэффициенты, характеризующие свойства взаимодействующих сред.

Здесь внешнее воздействие приложено в m промежуточных точках и представляется в виде:

$$f(l, t) = \sum_{j=1}^m \chi_j(l) v_j(t).$$

В качестве функции распределенного внешнего воздействия возьмем функцию следующего вида:

$$\chi_j(l) = \begin{cases} a(l-l_j)^b e^{c(l-l_j)}, & l \in [0, l_j]; \\ 0, & l \in [l_j, l]; \end{cases}$$

где l_j – координата точки приложения внешнего воздействия;
 $a = 738,91$; $b = 2$; $c = 20$.

Дополним систему уравнений (9) следующими начальными и граничными условиями:

$$T_i(l, 0) = 0, \quad i = 1, 2, \quad (10)$$

$$T_1(0, t) = T_{1\text{вх}}(t), \quad T_2(1, t) = T_{2\text{вх}}(t), \quad (11)$$

где $T_{1\text{вх}}(t)$, $T_{2\text{вх}}(t)$ – заданные функции.

Функционал качества имеет вид:

$$I = \int_0^{\theta} [T_1^*(1, t) - T_1(1, t)]^2 dt, \quad (12)$$

где θ – фиксированное время процесса управления;

$T_1^*(1, t)$ – заданное значение регулируемой величины;

$T_{1\text{вх}}(1, t)$ – регулируемая величина.

Используется возможность подачи на объект $m + 1$ управляющих воздействий: при $j = 0$ – за счет изменения граничных условий на входе второй (регулирующей) среды $v_0(t) = T_{2\text{вх}}(t)$; при $j = 1, \dots, m$ – промежуточных внешних воздействий $v_j(t)$.

Таким образом, получаем $m + 1$ – контурную систему автоматического регулирования. Функции управляющих воздействий $v_j(t)$, $j = 0, \dots, m$ представляются в виде:

$$v_j(t) = \int_0^1 u_j(t, \tau) \int_0^1 T_1(l, \tau) g_j(l) dl d\tau, \quad j = 0, \dots, m, \quad (13)$$

здесь $v_j(t)$ – операторы используемых управляющих устройств (в данном случае интегральные) с заданными ядрами $u_j(t, \tau)$ определенными в треугольнике

$0 \leq \tau \leq t \leq T$, $\varphi_j(\tau) = \int_0^1 T_1(l, \tau) g_j(l) dl$ – воздействия на входе регуляторов, характеризующие состояние объекта управления и выражающиеся через весовые функции распределенного контроля $g_j(x)$.

Таким образом, задача оптимизации системы управления такова: найти

такие весовые функции $g_j(l)$, при которых значение функции состояния $T_1(1, t)$ минимизировало бы функционал качества (12).

На рисунках 5 и 6 приведены кривые оптимального управления и соответствующие функции распределенного контроля с подачей управляющих воздействий в точки распределенные по длине аппарата.

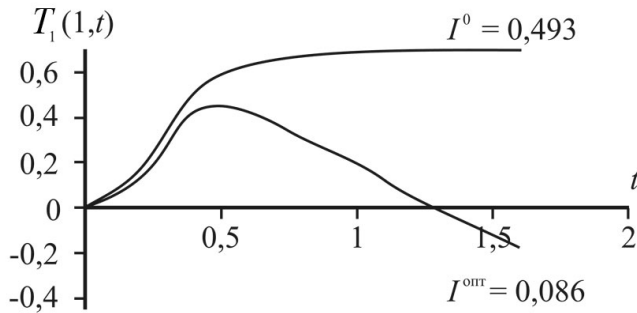


Рисунок 5 – Изменения температуры в переходном режиме и при оптимальном контроле с весовыми функциями g_0, g_4

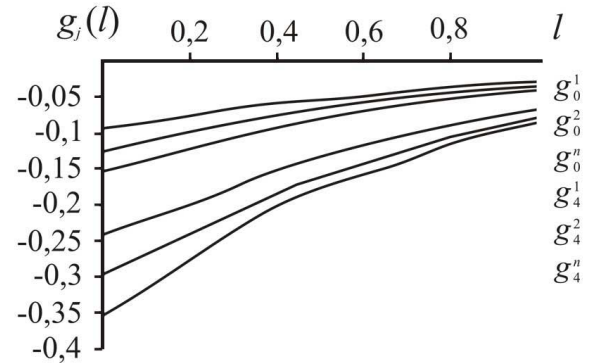


Рисунок 6 – Начальные g_0^1, g_4^1 и оптимальные g_0^n, g_4^n весовые функции распределенного контроля

На основе математической модели, записанной уравнениями (1)-(5) рассмотрим следующую тепломассообменную задачу для трубчатой печи в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial l} - \rho \frac{\partial u}{\partial l}, \\ \frac{\partial x}{\partial t} = -u \frac{\partial x}{\partial l} - \frac{x}{\tau}, \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -u \frac{\partial u}{\partial l} - R \frac{\partial T}{\partial l} - \frac{RT}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial l}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = (1 - \gamma) T \frac{\partial u}{\partial l} - u \frac{\partial T}{\partial l} + \frac{xq}{C_v \tau} - \frac{Q(T)}{C_v \rho} + K_1 (T_c - T), \\ \frac{\partial T_c}{\partial t} = -w \frac{\partial T_c}{\partial l} + K_2 (T - T_c). \end{array} \right. \quad (14)$$

К системе (14) добавляют начальные и граничные условия (6)–(7).

Примем следующие ограничения на управления:

$$v_{i\min} \leq v_i(t) \leq v_{i\max}. \quad (15)$$

Вводя фиктивные управления $z_i, i = \overline{1, 5}$ сведем неравенство (15) к равенству

$$(v_{i\max} - v_i)(v_i - v_{i\min}) - z_i^2 = 0, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (16)$$

Связь граничных условий с управлениями имеет вид:

$$\frac{\partial \rho(0, t)}{\partial t} = b_1 v_1(t), \quad \frac{\partial x(0, t)}{\partial t} = b_2 v_2(t), \quad \frac{\partial u(0, t)}{\partial t} = b_3 v_3(t), \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial t} = b_4 v_4(t),$$

$$\frac{\partial T_c(0, t)}{\partial t} = b_5 v_5(t).$$

Задача оптимального управления в этом случае состоит в нахождении таких управлений $v_i(t)$, $i = \overline{1, 5}$ из промежутков (15), которые удовлетворяют системе уравнений (16), соответствующим граничным условиям и минимизируют функционал качества:

$$\int_0^T \int_0^L [T_c(l,t) - T_c^*(l,t)]^2 dl dt, \quad (17)$$

Введем следующие обозначения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial l} = \zeta^{(1)}, \quad \frac{\partial x}{\partial l} = \zeta^{(2)}, \quad \frac{\partial u}{\partial l} = \zeta^{(3)}, \quad \frac{\partial T}{\partial l} = \zeta^{(4)}, \quad \frac{\partial T_c}{\partial l} = \zeta^{(5)}. \quad (18)$$

С учетом (18) система (14) будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} = -u\zeta^{(1)} - \rho\zeta^{(3)} \equiv X_1, \\ \frac{\partial x}{\partial t} = -u\zeta^{(2)} - \frac{x}{\tau} \equiv X_2, \\ \frac{\partial u}{\partial t} = -u\zeta^{(3)} - R\zeta^{(4)} - \frac{RT}{\rho}\zeta^{(1)} \equiv X_3, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = (1-\gamma)T\zeta^{(3)} - u\zeta^{(4)} + \frac{xq}{C_v\tau} - \frac{Q(T)}{C_v\rho} + K_1(T_c - T) \equiv X_4, \\ \frac{\partial T_c}{\partial t} = -w\zeta^{(5)} + K_2(T - T_c) \equiv X_5. \end{array} \right. \quad (19)$$

Собрав слагаемые при одинаковых вариациях функции и, используя аргументацию теории вариационных исчислений, получим сопряженную систему уравнений относительно функции Лагранжа:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \xi_1}{\partial t} = -\xi_4 \frac{QT}{C_v\rho^2} - u \frac{\partial \xi_1(l,t)}{\partial l} - \frac{RT}{\rho} \frac{\partial \xi_3(l,t)}{\partial l} - \frac{\xi_3 R}{\rho} \frac{\partial T(l,t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_2}{\partial t} = \xi_2 \frac{1}{\tau} - \xi_4 \frac{q}{C_v\tau} - u \frac{\partial \xi_2(l,t)}{\partial l} - \xi_2 \frac{\partial u(l,t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_3}{\partial t} = \xi_2 \frac{\partial x(l,t)}{\partial l} - \rho \frac{\partial \xi_1}{\partial l} - u \frac{\xi_3}{\partial l} + (1-\gamma)T \frac{\partial \xi_4}{\partial l} + (2-\gamma)\xi_4 \frac{\partial T(l,t)}{\partial l}, \\ \frac{\partial \xi_4}{\partial t} = \xi_3 \frac{R}{\rho} \frac{\partial \rho(l,t)}{\partial l} + (\gamma-2)\xi_4 \frac{\partial u(l,t)}{\partial l} + \frac{\xi_4 \gamma}{C_v\rho} \frac{\partial QT}{\partial l} - \xi_5 K_2 - \\ - R \frac{\partial \xi_3(l,t)}{\partial l} - u \frac{\partial \xi_4(l,t)}{\partial l} - \xi_4 K_1, \\ \frac{\partial \xi_5}{\partial t} = \xi_5 K_2 + 2(T_c - T_c^*) + w \frac{\partial \xi_5(l,t)}{\partial l} + \xi_4 K_1. \end{array} \right. \quad (20)$$

здесь $\xi_i(l, t)$, $\eta_i(l, t)$ – функции Лагранжа.

Начальные условия:

$$\xi_i(l, T) = 0, \quad i = \overline{1, 5}. \quad (21)$$

Граничные условия:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \lambda^{(1)}}{\partial t} = -\xi_1(0, t)u(0, t) - \xi_3(0, t)RT(0, t) / \rho(0, t), \\ \frac{\partial \lambda^{(2)}}{\partial t} = -\xi_2(0, t)u(0, t), \\ \frac{\partial \lambda^{(3)}}{\partial t} = -\xi_1(0, t)\rho(0, t) - \xi_3(0, t) + \xi_4(0, t)(1 - \gamma)T(0, t), \\ \frac{\partial \lambda^{(4)}}{\partial t} = -\xi_3(0, t)R - \xi_4(0, t)u(0, t), \\ \frac{\partial \lambda^{(5)}}{\partial t} = -\xi_5(L, t)w. \end{array} \right. \quad (22)$$

где $\lambda_i(t)$, $(i = \overline{1, 5})$ – функции Лагранжа.

Численное исследование задачи (14) с краевыми и граничными условиями (6)-(7) проводилось для реального объема трубчатой печи с использованием программы COMSOL Multiphysics, предназначенной для решения широкого круга задач, формулируемых системами уравнений с частными производными. Здесь неизвестными являются x , u , ρ , T и T_c . Результаты расчетов приведены на рисунках 7–15.

Полученные результаты дают возможность сделать следующие заключения:

увеличение плотности потока на выходе из печи происходит в силу снижения скорости потока газа и продуктов сгорания. Из рисунка 8 видно, что происходит полное выгорание топлива. При детальном рассмотрении процесса с помощью двумерных зависимостей наблюдается оптимум в области температур вблизи 450 °С. Увеличение плотности потока выше оптимального приводит к увеличению недожога, снижению КПД процесса и увеличению количества вредных выбросов в окружающую среду. Снижение плотности характеризует недогрев сырья и, соответственно, неоптимальный режим работы технологической установки в целом;

выявлен эффект перераспределения теплообмена между потоком горячих газов и сырьем по длине печи (рисунок 12), что может оказать влияние на качество получаемого продукта, следовательно, изменяя температуру потока по длине печи или задавая режим работы, можно получать продукт заданного наперед качества;

управляя скоростью движения потока, имеется возможность регулировать плотность, и как следствие, величину недожога и соответственно количество выбросов в окружающую среду на выходе из печи.

Сопоставление полученных результатов со значениями управляющих параметров реального производства АНПЗ показало хорошее соответствие (отличие составляет 1–5 %).

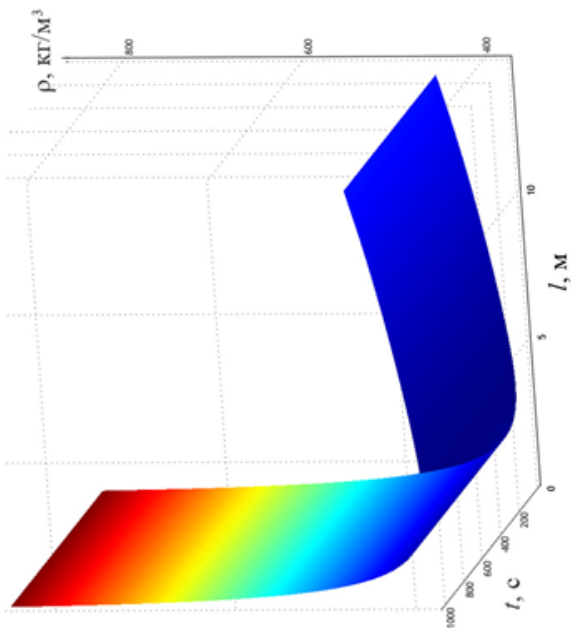


Рисунок 7 – Распределение плотности потока по длине печи

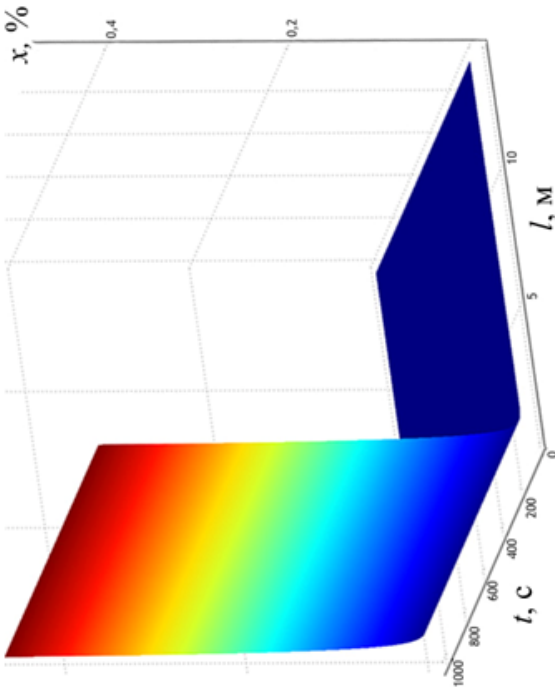


Рисунок 8 – Изменение концентрации горючего вещества

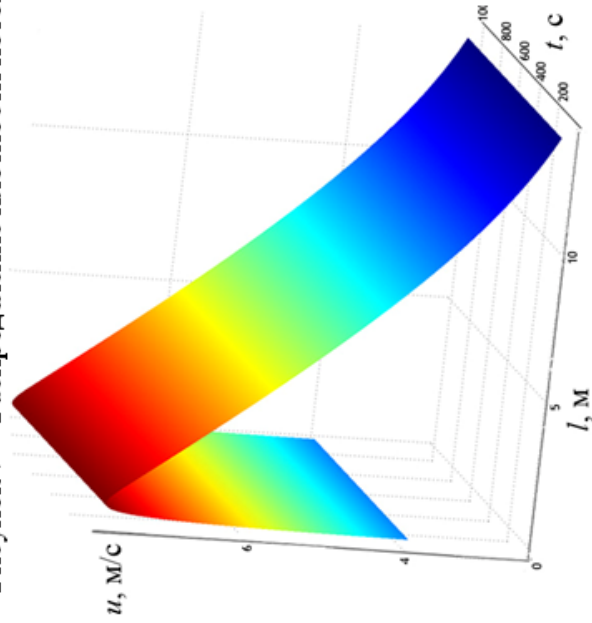


Рисунок 9 – Изменение скорости движения потока

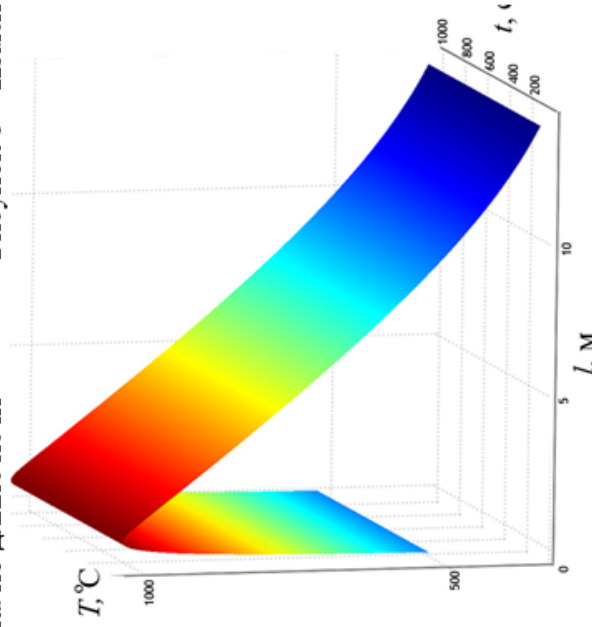


Рисунок 10 – Распределение температуры потока по длине печи

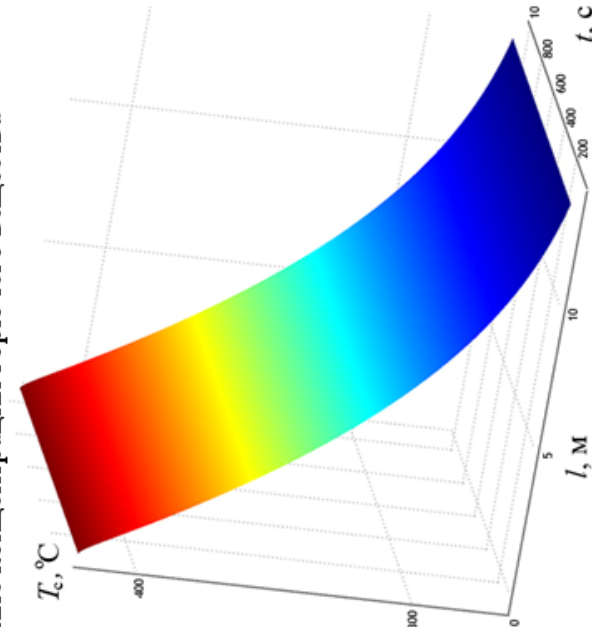


Рисунок 11 – Изменение температуры сырья

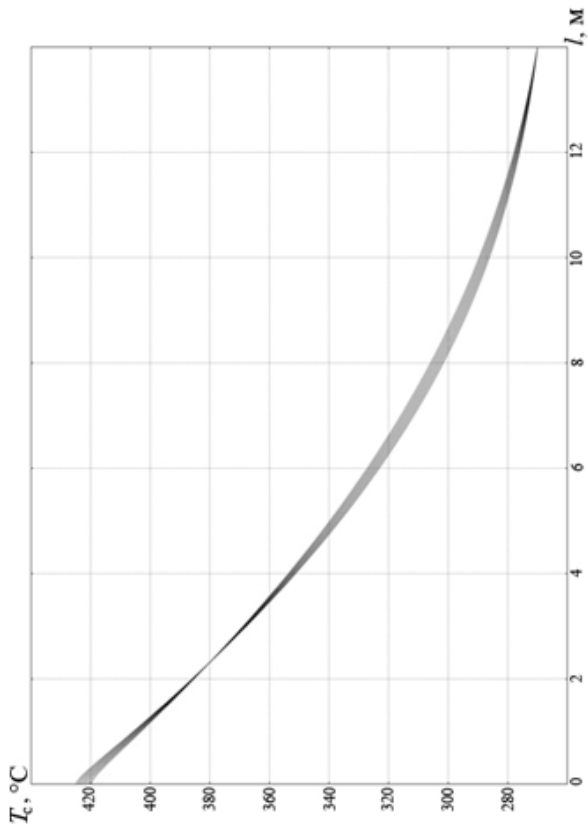


Рисунок 12 – Изменение температуры сырья по длине печи при различных значениях температуры потока

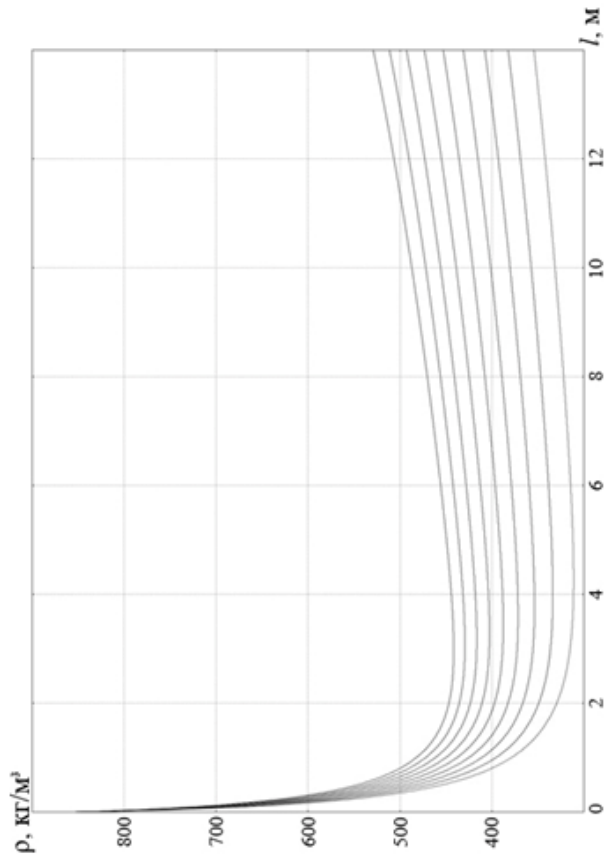


Рисунок 13 – Изменение плотности потока по длине печи при различных значениях температуры

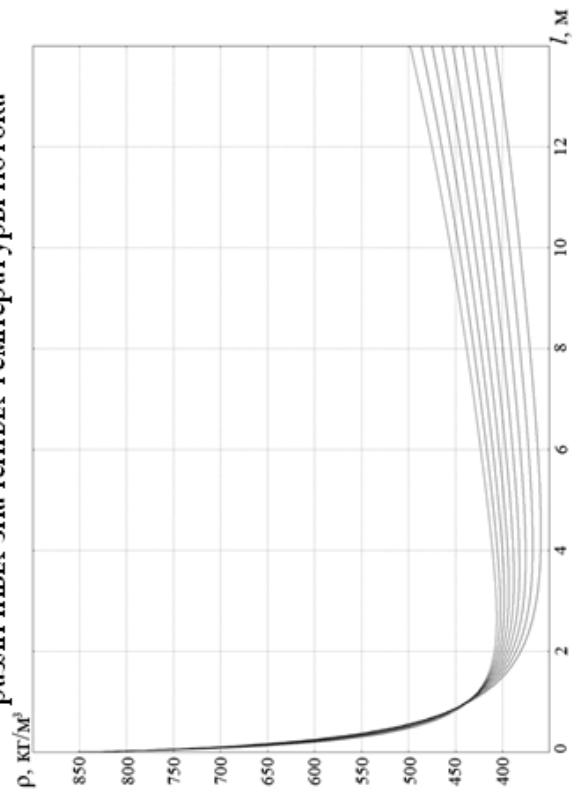


Рисунок 14 – Изменение плотности потока по длине печи при различных значениях скорости

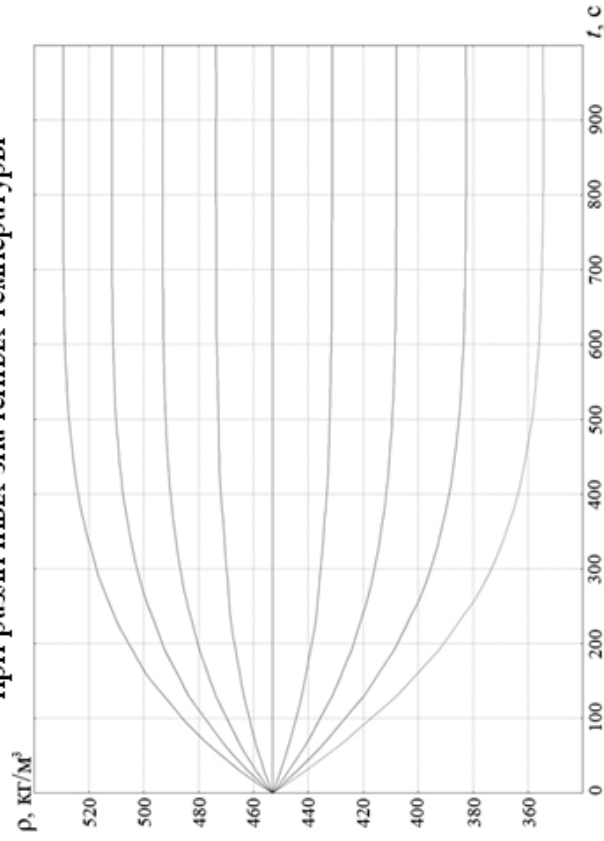


Рисунок 15 – Изменение плотности потока на выходе из печи при различных значениях температуры

В приложении А собраны акты об использовании результатов работы; в приложении Б приведены таблицы и рисунки, не вошедшие в основной текст диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа моделей процессов нестационарного теплообмена с разнонаправленными потоками найдены определяющие параметры для моделирования статических и динамических режимов технологических печей; на этой основе на примере процессов горения в технологических печах реализованы задачи получения статических и динамических характеристик объектов с распределенными параметрами;

2. Разработаны и реализованы математические модели стационарных и нестационарных режимов тепломассообменных процессов в трубчатых печах, в отличие от известных, позволяющие комплексно оценивать влияние управляющих воздействий (концентрации горючего вещества; температуры сырья; скорости, плотности и температуры потока) на режимы нефтепереработки на стадии проектирования технологического оборудования и обеспечивающие повышение точности расчетов характеристик процесса до 1-5 %. Показана эффективность предложенных численных алгоритмов, подтвержденная сравнением с характеристиками натуральных установок и актами об использовании результатов исследований;

3. На основе численного анализа математических моделей тепломассообменных процессов статических и динамических режимов работы технологических печей установлены взаимозависимости рассматриваемых параметров управления, позволяющие учитывать их еще на стадии проектирования технологического оборудования или создавать максимально приближенные к реальным условиям программы автоматического управления промышленными комплексами;

4. Определено влияние концентрации капель жидкого топлива на скорость распространения пламени на начальной стадии процесса. Наилучшие параметры горения имеют капли диаметром 1 мм, причем по скорости горения для этих капель наблюдается локальный максимум. При численном моделировании установлено, что по мере увеличения концентрации капель этого размера скорость распространения пламени уменьшается при $x < 9\%$ и несколько возрастает при более высоких x . При очень малых и очень больших концентрациях горючего влияние размера капель по существу отсутствует;

5. На основе анализа нестационарных режимов в системах контроля и управления распределенными процессами найдены критерии оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах, что позволяет выбирать оптимальные режимы работы уже на стадии проектирования оборудования.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК

1. Демиденко, Н. Д. Математическое описание процессов в технологических печах / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Вестник СибГАУ. – 2005. – С. 238–239.
2. Демиденко, Н. Д. Анализ нестационарных режимов в системах контроля и управления распределенными процессами / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина**, И. Н. Мельник // Вестник СибГАУ. – 2006. – № 2 – С. 89–92.
3. Демиденко, Н. Д. Методы и средства оптимального управления теплотехнологическими процессами в трубчатых печах / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 3. – С. 8–9.
4. Демиденко, Н. Д. Математическое моделирование процессов в технологических печах / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Вестник СибГАУ. – 2006. – Вып. 7. – С. 91–95.
5. Демиденко, Н. Д. Исследование систем с распределенными параметрами на базе математического моделирования / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 25–27.
6. Демиденко, Н. Д. Численное исследование систем с распределенными параметрами / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Вестник КрасГАУ. – 2007. – № 2. – С. 103–112.
7. Демиденко, Н. Д. Численное моделирование технологических режимов в трубчатых печах / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Омский научный вестник. – 2009. – № 2 – С. 242–246.
8. **Кулагина, Л. В.** Особенности моделирования процессов тепломассообмена / Л. В. Кулагина, Н. Д. Демиденко // Компрессорная техника и пневматика. – 2009. – № 9. – С. 11–13.

Статьи, опубликованные в других изданиях и за рубежом

9. Демиденко, Н. Д. Оптимальное управление режимами работы технологических печей в нефтеперерабатывающей промышленности / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Фундаментальные исследования, 2005. – № 2. – С. 43–44.
10. Demidenko, N. D. Heat-mass exchange processes modeling in technological furnaces / N. D. Demidenko, **L. V. Kulagina** // Ciepłne Maszyny Przepływowe. Turbomachinery. № 128. Lodz: Academicke Centrum Graficzno-Marke-tingowe. – 2005. – P. 138–146.
11. Demidenko, N. D. Optimal control of thermal-engineering processes in tube furnaces / N. D. Demidenko, **L. V. Kulagina** // Chemical and Petroleum engineering. New-York: Kluwer Academic. – 2006. – Vol. 42. – № 3–4. – Pp. 56–70.
12. Demidenko, N. D. Research of control system over technological processes with distributed parameters based on mathematical simulation / N. D. Demidenko, **L. V. Kulagina** // Chemical and Petroleum engineering. New-York: Kluwer Academic. – 2007. – Vol. 43. – № 3–4. – Pp. 128–130.
13. Демиденко, Н. Д. Особенности сжигания топлива в технологических установках / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Химическая техника. – 2006. – № 7. – С. 35–37.

Материалы научно-технических конференций

14. **Кулагина, Л. В.** Проблема ингерентности и ликвидности перспективных энергогенерирующих систем / Л. В. Кулагина // Материалы Всерос. НПК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения». Вып. IX. – Красноярск: Краевое НТО, 2003. – С. 45–56.

15. **Кулагина, Л. В.** Анализ теплофизических и гидродинамических процессов при сжигании различных видов топлив в энергетическом котле / Л. В. Кулагина // Материалы Всерос. НПК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения». Вып. X. – Красноярск: Краевое НТО, 2004. – С. 29–45.

16. **Кулагина, Л. В.** Методы оценки ущерба от загрязнения атмосферы вредными выбросами нефтеперерабатывающих производств / Л. В. Кулагина // Материалы Всерос. НПК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения». Вып. XI. – Красноярск: Краевое НТО, 2005. – С. 82–96.

17. Демиденко, Н. Д. Оптимизация систем управления распределенным процессом / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Решетневские чтения: материалы VIII Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 80-летию со дня рождения ген. конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева. – Красноярск: СибГАУ, 2004. – С. 151–152.

18. Demidenko, N. D. Heat-mass exchange processes modeling in technological furnaces / N. D. Demidenko, **L. V. Kulagina** // Abstract of the papers Streszczenia referatow. Enternational SYMKOM' 05. Lodz, Poland, 2005. P.147–148.

19. Демиденко, Н. Д. Моделирование теплотехнологического процесса в трубчатой печи / Н.Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Материалы Всерос. НПК «Социальные проблемы инженерной экологии, природопользования и ресурсосбережения». Вып. XI. – Красноярск: Краевое НТО, 2005. – С. 37–48.

20. Демиденко, Н. Д. Математическое описание процессов в технологических печах / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Решетневские чтения: материалы IX Всерос. науч. конф. с междунар. участием. – Красноярск: СибГАУ, 2005. – С. 238–239.

21. Демиденко, Н. Д. Повышение эффективности и экологической безопасности сжигания топлива в технологических установках / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина** // Материалы VI Всерос. НПК «Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города». – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – С. 276–281.

22. Demidenko, N. D. The heat-mass exchange processes modeling task solution in technological furnaces / N. D. Demidenko, **L. V. Kulagina** // High-Speed Hydrodynamics and Numerical Simulation: Proceedings of the Third International Summer Scientific Workshop. – Kemerovo: ИИТ, 2006. – P. 493–496.

23. Лихачев, Д. С. Разработка и совершенствование техники и технологии нефтепереработки / Д. С. Лихачев, **Л. В. Кулагина** // Проблемы теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении: матер. VI Школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В. Е. Алемасова. – Казань: Иссл. центр пробл. энерг. КазНЦ РАН, 2008. С. 75–83.

Учебные пособия

24. Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация технических систем с распределенными параметрами: учеб. пособие для вузов / Н. Д. Демиденко, **Л. В. Кулагина**. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 210 с.

25. Гутенев, В. В. Экология техносферы: учеб. пособие для вузов / В. В. Гутенев, **Л. В. Кулагина**, О. Н. Русак и др. – М.: «Маджента», 2008. – 468 с.

Кулагина Людмила Владимировна

Моделирование тепломассообменных процессов в технологических печах

Подписано в печать 25.01.2010 г.

Формат бумаги 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Отпечатано в ИПЦ СФУ

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82.