**Гусева, Мария Александровна. Автоматическое управление технологическим процессом индукционного нагрева нефти в установках трубопроводного транспорта : диссертация ... кандидата технических наук : 05.13.06 / Гусева Мария Александровна; [Место защиты: Сам. гос. техн. ун-т].- Самара, 2012.- 136 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-5/3260**

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет»**

*На правах рукописи*

Л / -7 /. О ^

ГУСЕВА Мария Александровна

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НЕФТИ В УСТАНОВКАХ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА

Специальность 05.13.06 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: кандидат технических наук И.А. Данилушкин

Самара - 2012

**СОДЕРЖАНИЕ**

[Введение 5](#bookmark2)

1. [Проблема создания систем автоматического управления индукционным нагревателем нефти в установках трубопроводного транспорта 14](#bookmark3)
   1. Термообработка высоковязких и парафинистых нефтей

в установках трубопроводного транспорта 14

* 1. Применение индукционных нагревателей в

теплообменных аппаратах для нагрева вязких жидкостей 17

* 1. [Методы моделирования процессов теплообмена 21](#bookmark7)
     1. [Общие сведения 21](#bookmark8)
     2. [Аналитические методы решения 24](#bookmark10)
     3. [Численные методы решения 26](#bookmark11)
     4. [Моделирование с помощью интеллектуальных систем 29](#bookmark12)
  2. Проблема синтеза систем управления объектов с

распределёнными параметрами 31

* + 1. [Методы структурной теории распределённых систем 31](#bookmark16)
    2. [Численно-аналитические методы 33](#bookmark17)
    3. Управление объектами с распределёнными

[параметрами 34](#bookmark15)

[Выводы 36](#bookmark19)

1. [Математическое моделирование температурных полей стенки нагревателя и потока нефти 38](#bookmark20)
   1. [Постановка задачи 38](#bookmark21)
   2. Структурное моделирование многосекционного

индукционного нагревателя 40

* 1. [Аппроксимация распределённых сигналов 47](#bookmark32)
     1. [Способы аппроксимации распределённого сигнала 47](#bookmark33)
     2. Аппроксимации распределённого сигнала

полиномиальной зависимостью 49

**з**

* + 1. Аппроксимации распределённого сигнала рядом

Фурье 52

* + 1. Сравнительный анализ предложенных способов аппроксимации 53
  1. Аналитическое представление процесса теплообмена

между стенкой и потоком жидкости 58

[Выводы 62](#bookmark45)

1. [Реализация математических моделей ОРП в программных пакетах моделирования динамических систем 64](#bookmark46)
   1. Подход к реализации моделей динамических систем в

**среде SlMULINK 64**

* 1. Реализация блоков модели косвенного индукционного

нагрева нефти 67

* 1. Сравнение численно-аналитической и конечно­элементной моделей процесса теплообмена между стенкой

и потоком 80

[Выводы 85](#bookmark53)

1. [Определение оптимальной конструкции многосекционного индукционного нагревателя 87](#bookmark54)
   1. Определение коэффициентов конвективного

теплообмена 87

* 1. Конечно-элементная модель процесса нагрева потока

[жидкости с переменной по сечению скоростью 92](#bookmark61)

* 1. Определения оптимальной конструкции

многосекционного индукционного нагревателя нефти 97

[Выводы 99](#bookmark66)

1. Синтез системы модального управления температурным полем

стенки многосекционного индукционного нагревателя 100

* 1. Исследование модального представления объекта при ограничениях на конфигурацию распределённого

управления 100

* 1. Синтез системы модального управления температурным

полем стенки нагревателя 104

* 1. Настройка системы модального управления

температурным полем стенки 107

* 1. [Компьютерная реализация и исследование системы модального управления температурным полем стенки индукционного нагревателя 110](#bookmark79)
  2. Техническая реализация системы модального

[управления температурным полем стенки нагревателя 119](#bookmark81)

[Выводы 121](#bookmark90)

[Заключение , 122](#bookmark91)

[Список использованных источников 123](#bookmark92)

Приложение А. Акт внедрения научных исследований диссертации в

учебный процесс СамГТУ 133

Приложение Б. Справка об использовании результатов диссертационной работы в ОАО «Татнефть», ОАО «Саратовский НПЗ»,

ОАО «Саратовнефтегаз» 134

Приложение В. Справка об использовании результатов

диссертационной работы в ОАО «КНПЗ» 135

Приложение Г. Свидетельство о государственной регистрации

программы для ЭВМ 136

**ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** Нефтяная промышленность является одной из важнейших составных частей топливно-энергетического комплекса. Энергетическая стратегия России на период до 2020 г. предусматривает дальнейшее увеличение добычи нефти как для внутреннего потребления, так и на экспорт, интенсивную реализацию организационных и технологических мер по экономии топлива и энергии.

Основной объём российской нефти в настоящее время добывается в Западной Сибири, в удалении от основных потребителей нефти и нефтепродуктов. Конкурентоспособность российской нефтяной промышленности во многом зависит от эффективности доставки нефти и продуктов её переработки покупателю.

Себестоимость транспортировки нефти существенно возрастает в условиях низких температур. При снижении температуры из нефти начинает выкристаллизовываться парафин, что влечет за собой изменение структуры жидкой фазы нефти. Улучшение реологических характеристик нефти может быть достигнуто различными способами: смешением с углеводородными разбавителями, применением поверхностно-активных веществ, различных депрессаторов, полимерных добавок, растворенного газа и др. Однако наибольшее распространение получил трубопроводный транспорт нефти с предварительным подогревом, впервые предложенный Шуховым **В.Г.** В настоящее время для подогрева применяются паровые или огневые подогреватели, однако они во многом не отвечают технологическим и эксплуатационным требованиям. В связи с этим востребованным становится внедрение и использование индукционных установок косвенного подогрева нефти, которые позволяют повысить экономическую эффективность, надежность работы систем транспортировки и улучшить экологическую обстановку.

Нагрев нефти осуществляется за счёт конвективного теплообмена с учётом технологических ограничений на предельно допустимую температуру стенок нагревателя, поддержание которой может быть реализовано при помощи специализированной системы автоматического управления. Таким образом, актуальными являются вопросы построения адекватных математических моделей теплообменных процессов нагревателя, которые могут быть построены только с учётом пространственной распределённости температурных полей стенки нагревателя и потока нефти, а также вопросы разработки методики синтеза и анализа распределённых систем автоматического управления индукционными установками косвенного нагрева нефти.

Цель работы. Целью диссертационной работы является решение научно- технической задачи по разработке моделей, методов исследования, синтеза алгоритмов и систем автоматического управления процессом косвенного индукционного нагрева потока нефти в установках трубопроводного транспорта.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

* Разработка ориентированной на синтез систем автоматического управления математической модели и структурных схем, описывающих взаимное влияние температурных полей стенки нагревателя и движущегося потока нефти.
* Разработка методики численно-аналитического моделирования систем с распределёнными параметрами рассматриваемого класса в компьютерных пакетах моделирования динамических сосредоточенных систем. Создание и исследование численно-аналитической модели процесса теплообмена между стенкой и потоком нефти в многосекционном индукционном нагревателе.
* Обоснование и выработка на основе конечно-элементного моделирования рекомендаций по выбору конфигурации многосекционной индукционной установки, обеспечивающей требуемый технологический режим транспортировки нефтепродуктов.
* Синтез и анализ системы модального управления температурным полем стенки многосекционного индукционного нагревателя с учётом ограничений на пространственную конфигурацию распределённого управляющего воздействия.
* Разработка специализированного программного обеспечения, реализация компьютерной модели системы модального управления температурным распределением стенки многосекционного индукционного нагревателя с учётом распределённого возмущающего воздействия со стороны потока нефти.

**Методы исследования.** Решение поставленных задач осуществлялось с помощью теории теплопроводности, теории автоматического управления, структурной теории распределенных систем, аппарата преобразования Лапласа, методов математического анализа, методов численного и компьютерного моделирования.

**Научная новизна.** В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты:

* проблемно-ориентированная на задачи управления математическая модель процесса индукционного нагрева нефти в установках трубопроводного транспорта, отличающаяся учётом взаимного влияния температурных полей стенки нагревателя и потока нефти, что обеспечивает требуемую точность их описания для построения высококачественной системы автоматического регулирования;
* структурное представление аналитических моделей процессов нагрева движущихся сред, описываемых системой дифференциальных уравнений теплопроводности в частных производных, в виде системы передаточных функций распределённых блоков с сосредоточенными входными воздействиями и выходными величинами, отличающееся использованием пространственной аппроксимации распределённых сигналов в форме разложения в ортонормированный базис или в форме полиномиальной зависимости, что позволяет получить обоснованные решения задачи синтеза системы автоматического управления;
* система модального управления многосекционным индукционным нагревателем нефти, отличающаяся учётом конструкционных ограничений на конфигурацию распределённого управляющего воздействия при формировании сосредоточенных управлений мощностью каждой из секций, что обеспечивает техническую реализуемость предлагаемых методов проектирования систем автоматического регулирования.

**Практическая полезность работы.** В рамках выполнения диссертационной работы получены следующие практически значимые результаты:

-разработана инженерная методика создания численно-аналитических моделей управляемых процессов подогрева нефти, на базе пространственной аппроксимации распределённых сигналов;

-разработано специальное математическое и программное обеспечение для моделирования и анализа теплообменных аппаратов, как объектов управления с распределёнными параметрами, описываемых системой уравнений теплопроводности в частных производных в одномерной системе координат;

* разработано специальное математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для моделирования, анализа и синтеза алгоритмов управления индукционными установками косвенного нагрева нефти, которое может быть непосредственно использовано для решения конкретных задач автоматизации установок трубопроводного транспорта;
* предложена инженерная методика определения физических параметров процесса теплообмена в проточном нагревателе, а также конструктивных параметров индукционной установки косвенного нагрева нефти;
* обоснована целесообразность практического использования разработанных моделей и методов построения систем автоматического управления исследуемыми технологическими процессами.

Результаты работы использованы в проектных разработках перспективных систем управления индукционными установками косвенного нагрева нефти в ОАО «Татнефть», ОАО «Саратовский НПЗ», ОАО «Саратовнефтегаз», ОАО «КНПЗ» и в учебном процессе при подготовке в СамГТУ инженеров по специальности «Управление и информатика в технических системах» и магистров по направлению «Управление в технических системах».

На программное обеспечение для моделирования и анализа пространственно-распределённых процессов теплообмена, разработанное в рамках выполнения работы, получено Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012611864 от 17.02.2012 «Система моделирования теплообменных аппаратов».

Реализация результатов исследований. Полученные в работе теоретические положения и практические результаты использованы:

* при выполнении НИР по проекту Российского Фонда Фундаментальных Исследований «Разработка методов структурного моделирования объектов и систем управления с распределёнными параметрами на базе аппроксимации пространственного распределения информационных сигналов» (проект 10-08-00754-а);
* при выполнении НИР «Создание энергосберегающих систем потребления электроэнергии мощными промышленными установками для индукционного нагрева металла перед обработкой давлением», в рамках Федеральной целевой программой «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (гос. контракт № П231 от 23.07.2009);
* при выполнении фундаментальной НИР «Теория и приложения аналитических методов синтеза агрегированных систем управления техническими объектами с распределенными параметрами», проводимой в СамГТУ по заданию Минобрнауки РФ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научной конференции «Проблемы управления, обработки и передачи информации» (Саратов, 2009), Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы управления и автоматизации технологических процессов и производств» (Уфа, 2010), Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт- Петербург, 2010), VII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2010), Международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2010» (Одесса, 2010), VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи» (Самара, 2011).

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, из них 4 публикаций в издании из перечня ВАК.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, изложенных на 136 страницах машинописного текста, содержит 57 рисунков и 2 таблицы, список использованных источников, включающий 102 наименования, 4 приложения.

Основные положения, выносимые на защиту:

* проблемно-ориентированная на задачи управления математическая модель индукционной установки косвенного нагрева потока нефти;
* методика реализации численно-аналитических моделей процессов нестационарной теплопроводности, протекающих в индукционных установках косвенного нагрева потока нефти, в пакетах компьютерного моделирования сосредоточенных динамических систем;
* структурное представление модели пространственно-распределённых процессов теплообмена в установке косвенного индукционного нагрева потока нефти;
* методика синтеза и моделирования системы модального управления многосекционной установкой косвенного индукционного нагрева потока нефти;
* результаты численного моделирования объектов и систем автоматического управления температурным полем стенки многосекционной установки косвенного индукционного нагрева потока нефти.

Краткое содержание работы:

В первой главе приведён обзор существующих технологий нагрева нефти в установках трубопроводного транспорта. Анализ используемых в настоящее время установок и способов подогрева нефти показал, что существующие методы нагрева не всегда обеспечивают возросшие требования к экономической эффективности, точности и быстродействию систем.

Проведён анализ работ, посвященных вопросам численного и аналитического моделирования электромагнитных, гидродинамических и температурных полей при индукционном нагреве вязких неэлектропроводных жидкостей. Приведено описание предлагаемой конструкции индукционной установки нагрева нефти. Обзор современных методов математического моделирования процессов теплообмена показал, что в случае отсутствия точного аналитического решения краевых задач, описывающих поведение объекта управления, эффективным способом получения решения выступают методы численно-аналитического моделирования.

Проведенный анализ литературных источников, посвященных проблеме синтеза систем управления объектов с распределёнными параметрами показал, что наиболее эффективным подходом при решении задач поддержания температурного распределения на заданном уровне, является применение модального регулятора, обеспечивающего независимое управление отдельными модами объекта управления.

Во второй главе диссертационной работы разработана адекватная математическая модель управляемого технологического процесса нагрева потока нефти, учитывающая взаимное влияние стенки нагревателя и потока друг на друга. В терминах структурной теории распределённых систем представлена структурная схема объекта управления, с учётом пространственной распределённости теплоисточников. Предложен способ преобразования системы с распределёнными параметрами в систему с сосредоточенными параметрами, базирующийся на пространственной аппроксимации распределённых сигналов. Выполнена оценка точности способов аппроксимации распределённых сигналов полиномиальной зависимостью и разложением в ряд Фурье в статике и динамике на модельном примере - при постоянной температуре нагрева по всей длине нагревателя и ступенчатом изменении температуры на входе нагревателя. Получена численно-аналитическая модель процесса косвенного индукционного нагрева вязких жидкостей, использующая пространственную аппроксимацию распределённых сигналов путём разложения в ряд по собственным функциям уравнения теплопроводности стенки нагревателя.

В **третьей главе** предложена методика моделирования в **MATLAB Simulink** процесса косвенного индукционного нагрева потока нефти как объекта с распределёнными параметрами на базе численно-аналитического представления, полученного во второй главе. Разработана и реализована численно-аналитическая модель процесса теплообмена между стенкой нагревателя и потоком с учётом полученных выражений для сосредоточенных передаточных функций для вычисления температуры стенки и потока в произвольных точках по длине нагревателя. Сосредоточенные передаточные функции описывают зависимость температуры от коэффициентов аппроксимации входного сигнала на входе соответствующей распределённой передаточной функции. Проведено сравнение численно-аналитической и конечно-элементной моделей процесса теплообмена между стенкой и потоком.

Показано, что численно-аналитическая модель обеспечивает приемлемую точность и может быть использована при решении задач управления.

В четвертой главе описана методика расчёта коэффициента теплоотдачи между стенкой индукционного нагревателя и ламинарным потоком нефти. Сделаны выводы о невозможности применения известных в литературе выражений для расчёта коэффициента теплоотдачи из-за низкой скорости потока в исследуемой установке. По конечно-элементной двумерной модели процесса нагрева потока жидкости с переменной по сечению скоростью найдено температурное распределение по сечению потока на выходе эталонного нагревателя, которое использовано для расчёта средней температуры потока с учётом эпюры скоростей. Исходя из уравнения теплового баланса процесса нагрева потока, рассчитаны приведённые коэффициенты конвективного теплообмена для стенки и потока; определены оптимальная длина и количество секций для индукционного нагревателя.

Пятая глава посвящена синтезу системы модального управления температурным распределением стенки многосекционного индукционного нагревателя потока нефти. Выполнен анализ связности контуров управления модами температурного распределения стенки в условиях ограничения на пространственную конфигурацию распределенного управляющего воздействия. Показано, что установка с шестью секциями нагрева позволяет построить систему модального управления с шестью независимыми контурами управления. Предложена структура системы модального управления, совместно с численно-аналитической моделью нагревателя нефти. Температурное распределение потока выступает в роли возмущения в системе. С помощью разработанной модели системы управления выполнены численные эксперименты, показавшие удовлетворительное поведение системы при отработке возмущений температурой потока на входе нагревательной установки.

**ВЫВОДЫ**

а) Выполнен анализ связности контуров управления модами температурного распределения стенки в условиях ограничения на пространственную конфигурацию распределенного управляющего воздействия. Показано, что установка с шестью секциями нагрева позволяет построить систему модального управления с шестью независимыми контурами управления.

б) Предложена структура системы модального управления, учитывающая ограничение на формирование распределённого управления; рассчитаны коэффициенты регуляторов.

в) В пакете компьютерного моделирования динамических сосредоточенных систем реализована численно-аналитическая модель системы модального управления температурным распределением стенки нагревателя, учитывающая распределённое возмущение температурой потока нефти.

г) С помощью разработанной модели системы управления выполнены численные эксперименты, показавшие удовлетворительное поведение системы при отработке возмущений температурой потока на входе нагревательной установки.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

а) Разработана проблемно-ориентированная на задачи управления математическая модель процесса теплообмена в установках косвенного индукционного нагрева потока нефти при трубопроводном транспорте, учитывающие пространственное распределение температурных полей стенки и потока по длине нагревателя.

б) Предложен подход к построению численно-аналитических моделей процессов теплообмена, базирующийся на пространственной аппроксимации распределённых сигналов. С помощью подхода разработана и реализована модель исследуемой системы с распределёнными параметрами в компьютерном пакете моделирования динамических сосредоточенных систем.

в) На базе конечно-элементной модели установки нагрева потока, предложена инженерная методика идентификации параметров процесса теплообмена. Предложена методика расчёта конструктивных параметров установки нагрева.

г) Выполнен синтез системы модального управления температурным полем стенки нагревателя потока нефти с учётом ограничений на пространственную конфигурацию распределённого управляющего воздействия.

д) Предложена методика реализации динамических моделей широкого круга тепловых объектов и систем с распределёнными параметрами, а также систем модального регулирования в компьютерном пакете научных вычислений **Matlab** и **Simulink.**

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ источников**

1. Григорьев Б.А., Богатов Г.Ф., Герасимов А.А. Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций. - М.: Издательство МЭИ, 1999. - 372 с.
2. Фукс Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов. - Москва- Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. - 328 с.
3. Рогачев М.К., Кондрашева Н.К. Реология нефти и нефтепродуктов: Учеб. пособие. - Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. - 89 с.
4. Ильин А.Н., Полищук Ю.М., Ященко И.Г. Высокопарафинистые нефти: закономерности пространственных и временных изменений их свойств [Электронный ресурс, 265 Кб]//Нефтегазовое дело. - 2007. -

<http://www.ogbus.ru/authors/Iliin/Ili_in_l.pdf>.

1. Лобков А.М. Сбор и обработка нефти и газа на промысле. М.: «Недра» 1968. 203 с
2. Мастобаев Б.Н. История применения химических реагентов и

технологий в трубопроводном транстпорте нефти и нефтепродуктов: Автореф. дисс. докт. тех. наук. - Уфа, 2003. - 50 с.

1. Бунчук В.А. Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и газа. - М.: «Недра», 1977. - 366 с.
2. Агапкин В.М., Кривошеин Б.Л., Юфин В.А. Тепловой и

гидравлический расчеты трубопроводов для нефти и нефтепродуктов. - М.: «Недра», 1981. - 256 с.

1. Байков Н.М., Колесников Б.В., Челпанов П.И. Сбор, транспорт и подготовка нефти. - М.: «Недра», 1975. - 317 с.
2. Трубопроводный транспорт нефти и газа: Учеб. для вузов/Р.А.

Алиев, В.Д. Белоусов, А.Г. Немудров и др. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: «Недра», 1988. - 368 с.