

На правах рукописи



Ильюшин Юрии Валерьевич

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ДОБЫЧИ
ВЫСОКОПАРАФИНИСТОЙ НЕФТИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена: на кафедре системного анализа и управления ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» и на кафедре автоматике и процессов управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Першин Иван Митрофанович, профессор кафедры автоматике и процессов управления ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

Официальные оппоненты:

Веселов Геннадий Евгеньевич, д.т.н., доцент, директор Института компьютерных технологий и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог.

Григорьев Валерий Владимирович, д.т.н., профессор, профессор факультета систем управления и робототехники, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (НИУ ИТМО), г. Санкт-Петербург.

Харазов Виктор Григорьевич, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизации процессов химической промышленности» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет)», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: акционерное общество «Северо-Кавказский научно-исследовательский проектный институт природных газов», г. Ставрополь.


Защита диссертации состоится «24» мая 2021 г. в 14 00 на заседании диссертационного совета 212.238.07, созданного при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») по адресу: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «СПбГЭТУ «ЛЭТИ»» и на сайте университета www.etu.ru в разделе «Подготовка кадров высшей квалификации» - «Объявление о защитах докторских и кандидатских диссертаций».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 197376, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5.

Автореферат разослан «19» февраля 2021 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.07  В.В. Цехановский

Актуальность проблемы исследования

Двадцать первый век можно охарактеризовать, как век научно-технического прогресса. Рост промышленного производства требует значительного увеличения количества потребляемого сырья. Важнейшим сырьем в экономике страны была и остается нефть. Нефть необходима для производства горючего, пластиков, резины и многого другого. На данный момент 85% выпускаемых промышленностью изделий содержат нефть или элементы нефтепродуктов. В последние годы, невзирая на развитие возобновляемых источников энергии, значение нефти остается решающим. Нефтедобывающие компании наращивают добычу нефти, но ее запасы конечны. Известно, например, что запасы легкоизвлекаемой нефти в мире почти исчерпаны. В таких условиях компаниям необходимо либо осуществлять добычу в ранее не рентабельных, законсервированных скважинах (с низким дебитом), либо осуществлять добычу трудноизвлекаемой нефти. К разряду трудноизвлекаемой относится нефть, в состав которой входят различные примеси, усложняющие процесс добычи. Основной примесью является парафин. Наличие парафина в составе нефти значительно меняет ее свойства. При охлаждении нефтяной массы, в процессе добычи, она становится желеобразной, а при значительном понижении температуры – затвердевает.

Такая особенность, существенно усложняющая добычу, заставляет нефтедобывающие компании менять технологические схемы автоматизации процесса, исходя из условий конкретного месторождения.

На начальном этапе эксплуатации скважины такую нефть чаще всего добывают, используя технологии и средства фонтанной добычи.

Однако с течением времени пластовое давление начинает падать и нефть по насосно-компрессорным трубам (НКТ) начинает подниматься медленнее. Это приводит к преждевременному охлаждению нефтяного потока, в следствие чего, на стенках НКТ начинают образовываться асфальтосмолопарафиновые отложения (АСПО), которые уменьшают внутреннее сечение НКТ, вплоть до его полного перекрытия. Для устранения этого эффекта имеется достаточно большое количество методов. К основным из них следует отнести методы, основанные на промывке НКТ различными составами (горячей нефтью, ингибиторами, водой и т.д.), тепловые методы (греющий кабель, индукционный нагреватель и т.д.), химические методы, а также, методы физической очистки труб различными скребками. Все вышеперечисленные методы имеют свои преимущества, однако имеют и ряд существенных недостатков. Главным из них является стоимость. Многие методы не целесообразно применять в условиях севера, в связи с проблемой труднодоступности. Самым эффективным является биологический метод, основанный на погружении в пласт микроорганизмов

разрушающих составляющие парафина. Но использованию этого метода препятствует необходимость длительного воздействия микроорганизмов.

В рамках данного диссертационного исследования был проведен многофакторный анализ, на основе данных собранных с 30-ти месторождений РФ. Анализ показывает достаточную эффективность применения тепловых методов, но и их значительную стоимость. Ограниченность применения данных методов так же связано со сложностью и не шаблонностью технической реализации. Адаптация существующих технических решений зачастую сводится к применению известных методов «исключительно для конкретного месторождения». Такие методики не учитывают пространственную распределенность месторождения, множественные входные и выходные факторы, не рассматривают месторождение, как единую систему и потому создаются только локальные, разрозненные алгоритмы управления. Таким образом анализ месторождения как единой системы, и выработка методов борьбы с парафинообразованием, при снижении затрат на их применение составляет область проводимых исследований.

Состояние проблемы исследования

В русскоязычной нефтегазовой литературе достаточно подробно описаны проблемы добычи высокопарафинистой нефти. Ключевые работы в данном направлении были опубликованы И.М. Губкиным, Д.В. Голубятниковым, А.Д. Архангельским в начале 20-х, середине 30-х годов прошлого века. В их работах были показаны основные принципы борьбы с АСПО, и высказаны предложения о применении тепловых методов. Опираясь на данные работы, Л.И. Рубинштейн, а позднее И.А. Чарный, А.Б. Шейнман провели первые исследования «тер-гидродинамических процессов». В последующие годы проводились исследования, имеющие прикладной характер. В зависимости от географического расположения нефтяных скважин и химического состава добываемый нефти Ю.А. Желтовым, Г.Е. Малофеевым, Э.Б. Чекалюком, А.А. Боксерманом, А.Б. Шейнманом, К.Е. Огановым, Н.Л. Раковским проводились разработки методов депарафинизации месторождений России, Украины, Азербайджана. Опытно-конструкторские изыскания в данной области проводились И.М. Аметовым, Н.К. Байбаковым, А.Р. Гарушевым, А.Х. Мирзаджанзаде, Я.А. Мустаевым и другими. Многие из разработок так и остались на этапе проектирования, в связи с отсутствием надежного внутрискважинного оборудования. С ростом технической оснащенности и появлением новых технологических решений в конце 20-го века появились работы, направленные исключительно на тепловые методы борьбы. К подобным исследованиям следует отнести работы таких ученых как Р.А. Абдуллин, А.А. Абрамзон, Г.А. Бабалян, Л.Ф. Волков, П.П. Галонский, Ш.С.

Гарифуллин, В.Н. Глущенко, С.Н. Головки, А.И. Гужов, И.А. Гуськова, М.Ю. Долوماتов, Ю.В. Зецман, Н.Г. Ибрагимов, Я.М. Каган, А.И. Комиссаров, С.Ф. Люшин, Б.А. Мазепа, Р.А. Максотов, Т.М. Мамедов, И.Т. Мищенко, В.Ф. Нежевенко, Н.Н. Непримеров, В.А. Рагулин, В.А. Рассказов, Ю.В. Ревизский, М.К. Рогачев, З.А. Ростэ, В.А. Сахаров, Ф.Л. Саяхов, В.В. Сизая, В.Н. Силян, Б.М. Сучков, А.Г. Телин, В.П. Тронов, З.А. Хабибуллин, Н.И. Хисамутдинов, Ю.В. Шамрай, Д.М. Шейх-Али и др. В начале 21-го века активизировались исследования в области увеличения дебита «проблемных» скважин. Помимо скважин с низким дебитом к проблемным относятся обводненные скважины, скважины с высоким содержанием парафина и т.д. Среди таких исследований, можно отметить работы, проводимые А.А. Аббасовым, и М.Л. Сургучевым, в которых рассмотрено движение нефти в неоднородных средах. В области парафинообразования стоит отметить работы таких ученых, как З.И. Сюняев, Р.З. Сафиева, В.Д. Рябов, Л.П. Казакова, Ф.Г. Унгер, В.П. Тронов, Р.З. Сахабутдинов, Б.А. Мазепа, Г.А. Бабалян, А.З. Биккулов, М.Н. Персиянцев, А.Г. Телин, Ш.С. Гарифуллин, Н.Г. Ибрагимов, В.В. Рагулин, В.Н. Глущенко, В.Н., внесших большой вклад в понимание и описание физико-химической структуры парафинообразования. В частности, был определен ряд микроэлементов (Si, Fe, Al, Ca, Mg, P, V, Ni, Co, Pb, Cu, Ag, Hg, Mo), оказывающих влияние на прочность образовавшегося АСПО. Благодаря этому появились ингибиторы – химические вещества, отвечающие за разрушение АСПО и предотвращающие его образование. Так же ими была введена классификация парафиновых отложений:

- 1) асфальтеновый – $P/(A+C) < 1$;
- 2) парафиновый – $P/(A+C) > 1$;
- 3) смешанный – $P/(A+C) \sim 1$,

где P , A , C содержание (% мас.) парафинов, смол и асфальтенов, соответственно. Однако, применение разработанных методов и технологий носит локальный характер, связанный главным образом с уникальностью каждого месторождения. С целью совершенствования технологий борьбы с АСПО, начиная с 1960-х годов, разработанные методы стали рассматривать в единстве с техническими возможностями автоматического управления.

Первые работы были направлены на решение задач теплопроводности стенок НКТ и направленного потока нефти. К таким работам можно отнести работы Г. Карслоу, Д. Егер, Э.М. Карташова, Н.С. Кошлякова, А.В. Лыкова. Научный потенциал реализуется за счет применения методов математического моделирования, а позже - с помощью интеллектуальных систем. В частности, нейросетевой подход, предложенный в работах А.Н. Васильева, показал возможность поиска новых методов решения эллиптических и параболических уравнений. Указанные исследования были

продолжены в работах К.Е. Бурнаева, продемонстрировавшего частный случай решения дифференциальных уравнений; при помощи нейронных сетей. В работах, проводимых А.Г. Бутковским и развиваемых научной школой Э.Я. Рапопорта, приводятся результаты по моделированию и разработке схем автоматизации технологического процесса транспортировки высокопарафинистой нефти по магистралям. В работах Э.Я. Рапопорта приведена разработка и методика применения индукционного нагревательного элемента. Численно-аналитические методы Фредгольма, Вольтерра, доработанные В. В. Велик и В. В. Кафаровым позволили связать воедино многосвязную структуру сосредоточенных передаточных функций. Учет пространственной протяженности объектов управления появился в работах А.Г. Бутковского, Т.К. Сиразитдинова, Г.Л. Дегтярева и был продолжен в работах И.М. Першина, В.А. Ковалья, V. Wertz, P. Demise, I.S. Meditch, и др. Структурное представление распределенных систем, представленное в работах Бутковского А.Г., Рапопорта Э.Я., опирается на фундаментальное решение краевой задачи (функцию Грина) осуществляющее представление распределенных объектов в виде комплексных передаточных коэффициентов по собственным функциям. Использование теории распределенных систем с подвижными точечными источниками тепловой энергии, развиваемой в работах Пустыльниковой Л.М., Кубышкина В.А., Чубарова Е.П., осложняется в связи с трудностью создания высокоскоростных источников воздействия.

Таким образом, основной задачей направленной на повышение экономикой эффективности добычи нефти является исследование линейных автоматических систем добычи нефти, построение их оптимальных структур, поиск методов и алгоритмов управления, законов оптимального функционирования технологического процесса.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка системы управления процессом импульсного нагрева потока высокопарафинистой нефти в насосно-компрессорных трубах малодебитовых нефтяных скважин, направленных на снижение себестоимости добычи нефти, за счёт предотвращения образования асфальтосмолопарафиновых отложений.

Объект исследования

Технологические тепловые процессы высокопарафинистой нефти в скважинах с низким дебитом

Предмет исследования

Модели и методы анализа и синтеза линейных импульсных систем с распределенными параметрами

В соответствии с целью, объектом и предметом исследования решены следующие основные **задачи**:

1. Анализ температурных полей и синтез импульсного управления температурным полем на основе функции Грина стенки многосекционного нагревателя с учётом пространственной конфигурации насосно-компрессорной трубы.

2. Разработка математической модели и синтез системы диагностики температурной деформации насосно-компрессорной трубы вследствие теплообменных процессов.

3. Обоснование и выработка на основе математической модели рекомендаций по выбору конфигурации многосекционной импульсной установки, обеспечивающей требуемый технологический режим добычи.

4. Разработка метода оптимальной дискретизации насосно-компрессорной трубы исходя из заданной погрешности измерения.

5. Автоматизация технологического процесса добычи высокопарафинистой нефти из малодебитовых месторождений.

6. Разработка специализированного программного продукта, обеспечивающего расчет пространственно распределенного секционного, импульсного нагревательного элемента в стенке НКТ.

7. Разработка технического устройства обеспечивающего техническую реализацию передачи управляющих команд на нагревательные элементы насосно-компрессорной трубы, включающая нагревательный элемент и блок управления.

8. Разработка метода адаптации математического алгоритма для разработанного блока управления.

9. Разработка специализированного программного обеспечения, обеспечивающего передачу управляющего сигнала на нагревательный элемент.

Результаты, научная новизна и теоретическая значимость исследования.

1. Концептуальная модель системы управления технологическим процессом добычи высокопарафинистой нефти.

Данная модель отличается иерархической структурой, обоснованным выбором входных, внутренних, измеряемых и управляемых величин, что позволяет на ее основе разрабатывать математическую модель управляемого процесса пространственного нагрева. В рамках данного положения проведен системный анализ технологического процесса добычи нефти. Выделены элементы входной, выходной и оперативной информации.

Составлена иерархическая модель взаимодействующих подсистем. Определены факторы, влияющие на парафинообразование и описаны методы, направленные на устранение этого явления. Проведен многофакторный анализ, определивший оптимальные способы подавления парафинообразования.

2. Динамическая математическая модель температурного поля пространственно-распределенного объекта с неоднородной средой распространения тепла.

Динамическая математическая модель температурного поля трехмерного пространственно-распределенного объекта характеризуется неоднородностью среды распространения теплового потока от нагревательных элементов через многослойную поверхность устройства цилиндрической формы и учетом реологических свойств нефти и начального пространственного распределения температуры в объекте. На основании концептуальной модели составлена динамическая математическая модель распространения тепла в технологическом пространстве. Определены граничные условия и начальное распределение температуры. Учтена сложная геометрическая конфигурация НКТ, заключающаяся в наличии двух стенок, разделенных переборками, и импульсных нагревательных элементов внутри устройства.

3. Аналитические модели управляемого температурного поля с использованием функции Грина.

Одно-, двух- и трехмерные аналитические модели управляемого температурного поля с импульсными нагревательными элементами отличительной особенностью которых являются использование функции Грина с целью ускорения получения процессов по сравнению с конечно-разностными моделями. В рамках данного исследования Проведено глубокое исследование взаимовлияния температурных полей, создаваемых тепловыми источниками. Установлены закономерности протекания процессов.

4. Методика анализа температурного поля объекта управления.

Методика позволяет провести глубокий анализ объекта на основе его аналитической модели. В процессе получения данной методики проведен ряд вычислительных экспериментов, в результате которых выявлены закономерности распространения температурного поля в объекте. Разработан способ оценки тепловой деформации объекта вследствие теплового расширения металла.

5. Методика синтеза системы управления с импульсным управляющим воздействием.

Методика построения системы управления температурным полем объекта, которая в отличие от известных характеризуется применением

импульсного управляющего воздействия, что позволяет сократить энергетические затраты.

6. Метод оптимального размещения нагревательных элементов.

Метод позволяет обеспечить равномерное распределение температуры и базирующийся на полученной температурной зависимости от числа элементов. В рамках данного метода выявлена закономерность формирования температурных входных воздействий. Определена желаемая температурная кривая. Проведены численные эксперименты работы синтезированного регулятора. Установлен критерий оптимального количества нагревательных элементов. Получены функции определения места и времени включения нагревательных элементов. Определено их количество и мощность. Получена методика определения оптимального количества нагревательных элементов.

Основные положения диссертации изложены в более чем 100 работах, из них 4 монографии, 28 работ - входящих в перечень изданий рекомендованных ВАК, входящие в базу Scopus – 25 шт., патенты и иные объекты интеллектуальной собственности -33 шт.

Практическая значимость и реализация работы.

В рамках диссертационного исследования получен ряд технических решений, позволяющих осуществить модернизацию технологического процесса добычи сверх вязкой нефти. К таким техническим решениям следует отнести:

1. Патент РФ на полезную модель № 162036 оснащенный электронными компонентами, включающими топологию интегральной микросхемы № 2015630036 или №2016630074 позволяет осуществить вскрытие нефтяного пласта сложной геологической структуры и осуществить его последующую эксплуатацию, препятствуя образованию АСПО, тем самым существенно продлевая его срок эксплуатации.

2. Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611880, 2018663073, 2020616220, 2018662630 позволяют осуществлять компьютерное моделирование поведения нефтяного потока в пласте сложной формы.

3. Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616322, 2017663220 позволяют проводить компьютерное моделирование распространения температурного поля в буровых установках, на этапе вскрытия и эксплуатации месторождений сверхвязкой нефти.

4. В рамках данной работы получен принципиально новый прибор: пространственно-распределенный датчик температурного поля,

позволяющий в режиме реального времени формировать трехмерную температурную кривую измеряемого пространственного объекта. Его фотографии и описание принципа работы приведены в главе 5 диссертационного исследования.

5. Иные свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, БД и ТИМ позволяющие осуществлять компьютерное моделирование тепловых процессов при решении частных задач нефтедобывающей отрасли.

Проведенная в рамках диссертационного исследования работа нашла свое отражение в следующих работах:

научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (10 шт.):

1. НИОКР № 7 от 3.12.2008 г. Источник финансирования: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям).

2. НИОКР № 8 от 3.12.2008 г. Источник финансирования: Фонд содействия инновациям. № ЦИТиС: 1200902032, 2009-2009 гг.

3. НИОКР № 23 от 1.02.2011 г. Источник финансирования: Фонд содействия инновациям. № ЦИТиС: 1201174138, 2011 — 2012 гг.

4. НТПиНИР № НИ-0033 от 1.06.2011 г. Источник финансирования: Малое инновационное предприятие «БИОКРОН».

5. Хоздоговор № 15043 от 01.06.2015 г. Источник финансирования: Санкт-Петербургский горный университет.

6. НИР № 19.59.31 Срок действия 1.09.2012-1.09.2016 год. Источник финансирования: Министерство образования и науки РФ, Санкт-Петербургский горный университет.

7. Грант Ученого совета Санкт-Петербургского Горного университета. Источник финансирования: Санкт-Петербургский горный университет.

8. НИР № 18.57.34 Срок действия 1.09.2017-1.09.2019 год. Источник финансирования: Министерство образования и науки РФ, Санкт-Петербургский горный университет.

9. Хоздоговор № СУЭК-КУЗ-19/4724У (19147 хд) от 01.11.2019 г. Источник финансирования: АО Сибирская угольная энергетическая компания-Кузбасс. (1.11.2019-1.10.2021)

10. НИР № 18.56.01 Срок действия 1.09.2020-1.09.2023 год. Источник финансирования: Министерство образования и науки РФ, Санкт-Петербургский горный университет.

патенты на изобретения, патенты (свидетельства) на полезную модель, свидетельства на программу для электронных вычислительных машин, базы данных, топологию интегральных микросхем,

зарегистрированные в установленном порядке (всего 33 объектов интеллектуальной собственности):

1. Патент РФ на полезную модель № 132938, 142770, 142847, 149392, 162036.

2. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013614896, 2013619131, 2013660602 и др.

3. Свидетельство о государственной регистрации БД № 2016620522.

4. Свидетельство о государственной регистрации топологии интегральной микросхемы № 2015630036, 2016630074.

акты о реализации материалов диссертационного исследования:

1. МИП "БИОКРОН", ООО «Дубль», ООО «ЦентрСтрой», АО «Специальное конструкторско-технологическое бюро по электрохимии с опытным заводом», АО «Научно-исследовательский центр электронной вычислительной техники», АО «Концерн радиостроения «Вега», АО «ВНИГРИ», АО «ГМС НЕФТЕмаш», ООО «РН – Северо Запад», ЗАО НАЦ НПФ «Русская лаборатория», «СПБГЕОПРОЕКТ – Нефтедобывающая компания».

На защиту выносятся следующие положения

1. Концептуальная модель системы управления технологическим процессом добычи высокопарафинистой нефти.

2. Динамическая математическая модель температурного поля пространственно-распределенного объекта с неоднородной средой распространения тепла.

3. Аналитические модели управляемого температурного поля с использованием функции Грина.

4. Методика анализа температурного поля объекта управления.

5. Методика синтеза системы управления с импульсным управляющим воздействием.

6. Метод оптимального размещения нагревательных элементов.

Апробация работы. Всего соискателем по теме диссертации опубликовано более 100 печатных работ из них 28 работ входящих в перечень ВАК, 25 работ включены в наукоёмкую базу Scopus, 4 монографии, 33 объекта интеллектуальной собственности, имеется 10 актов о внедрении результатов диссертационного исследования.

Научные и прикладные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС-2009), г. Пятигорск; 4-й Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика (ССПС - 2011) г. Пятигорск; XI Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование

систем управления», г. Санкт-Петербург; 10 конференции «Актуальные проблемы развития профессионального образования в современных социально-экономических условиях», г. Кисловодск; 2-й ежегодной Всероссийской научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий», г. Новосибирск; VII Международной научно-практической «Перспективные вопросы мировой науки», Болгария; 3-й Международной научно-практической конференции «Перспективы развития информационных технологий», Новосибирск; 10 Международной Чапаевской конференции, г. Казань; Международной молодежной научной конференции «Математическая физика и ее приложения» (МФП-2012) в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 - 2013 годы», г. Пятигорск; Materially VIII mezinarnodnivedecko- praktickaconference «Zpravuyvedeckedeje- 2012». Dil 23.- Praha; Евразийского научного форума 22-23 ноября 2012 года, г. Санкт-Петербург; VI Международной научно-теоретической конференции «Коммуникативные стратегии информационного общества», г. Санкт-Петербург; V Международной научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», г. Пятигорск; 6 Всероссийской научно-практической конференции РАРАН «Актуальные проблемы защиты и безопасности», г. Москва; IV международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире 24-25 декабря 2013», г. Санкт-Петербург; «Computer Modeling and Simulation: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference», 2-4 July 2014., St. Petersburg.; II Международной научно-практической конференции «Sensorica - 2014», г. Санкт-Петербург; «Системный анализ в проектировании и управлении» сб. науч. тр. XIX международной научно-практической конференции 1-3 июля 2015 г., г. Санкт-Петербург; Третий национальный научный форум «Нарзан - 2015», г. Кисловодск; 5-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015).г. Таганрог; IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2015», г. Санкт-Петербург.; VIII Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» Ростов-на-Дону, Таганрог; X Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика – 2017». Санкт-Петербург; Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Control in Technical Systems, 2017, Санкт-Петербург; Proceedings of 2017 IEEE 6th Forum Strategic Partnership of Universities and Enterprises of Hi-Tech Branches (Science. Education. Innovations), SPUE 2017; X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018», Санкт-Петербург.; International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying

Geology and Mining Ecology Management 2018, София. ; Международной научной конференции «IEEE Northwest Russia Conference On Mathematical Methods In Engineering And Technology: MMET NW 2018», Санкт-Петербург, 2018 ; Международной научно-практической конференции молодых ученых, студентов и аспирантов «Анализ и прогнозирование систем управления в промышленности и на транспорте», Санкт-Петербург, 2019; IX Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика», 2019 Ростов-на-Дону; III Международной научной конференции по проблемам управления в технических системах (CTS'2019). Санкт-Петербург. 30 октября - 1 ноября 2019 г.; XXII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2019). Санкт-Петербург. 23 – 25 мая 2019 г.; XI Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2019». Санкт-Петербург. 21-25 октября 2019; 22nd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2019 May 2019; 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019 October 2019; 23rd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2020, May 2020, Докладывались на секции процессов управления дома ученых им. Горького РАН в 2016, 2017 годах;

Структура и объём работы.

Диссертационное исследование состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из 311 источников, в том числе 43 иностранных, содержит 19 приложений. Работа изложена на 277 страницах, содержит 83 рисунка и 25 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность диссертационного исследования, определены цели задачи.

В первой главе рассмотрены основные направления развития сырьевого рынка. Показана динамика развития нефтяной отрасли. Рассмотрена геологическая структура планеты, выявлены основные особенности залегания нефтяных пластов во всем мире. Выявлены характерные для Российской Федерации особенности залегания нефтеносных пластов, особенности их разработки и эксплуатации. Выявлен существенный осложняющий фактор – наличие большого количества нефти с высоким содержанием парафина. Рассмотрены основные способы борьбы с высоким содержанием парафина в нефтяных месторождениях и последствиями его

образования. Проанализированы технологические процессы, протекающие в них. Проведен многофакторный анализ способов и технологий борьбы с парафинообразованием. Выявлены наиболее эффективные средства борьбы с парафинообразованием. Переведена и детально проанализирована технологическая схема добычи нефти в месторождениях с высоким содержанием парафина. Проанализированы технологические схемы механического и химического способов удаления асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО). Рассмотрен ряд литературных источников с целью анализа способов удаления и предотвращения образования АСПО. В ходе ~~литературного~~ и многофакторного анализа, сделан вывод о наибольшей эффективности применения тепловых методов борьбы с АСПО. Но его применение зачастую коммерчески не целесообразно из-за высокой себестоимости. Таким образом, ставится цель исследования – повышение эффективности АСУ процессами добычи нефти за счет разработки АСУ процессом добычи высокопарафинистой нефти на основе динамических моделей внутрискважинного оборудования, методов их функционирования, алгоритмов, программной и технической реализацией АСУТП. Эффективность разработанной системы оценивается по наличию/отсутствию АСПО на элементах внутрискважинного оборудования.

Во второй главе проведен анализ нефтяного промысла как объекта управления. Выявлена пятиуровневая структура информационного взаимодействия нефтяного промысла, имеющая три основных уровня, представленных на Рисунке 1. Главным элементом данной структуры является центральная инженерно-технологическая служба, являющаяся центральным элементом сбора, обработки и хранения информации, поступающих от кустовых комплексов.

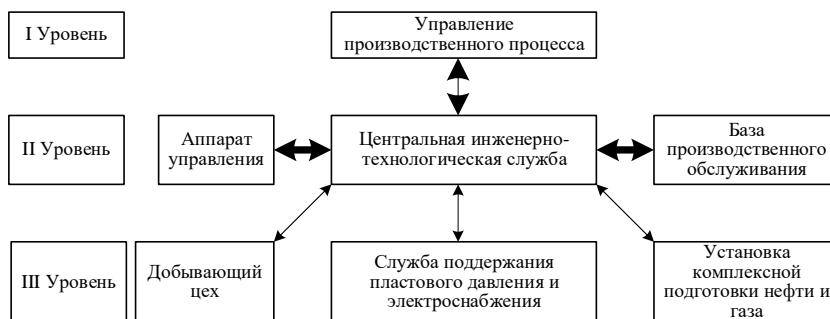


Рисунок 1. Трехуровневая структура информационных потоков НГДУ

Получая команды от управления производственного процесса на центральную инженерно-технологическую службу возлагается основная задача по их выполнению и контролю.

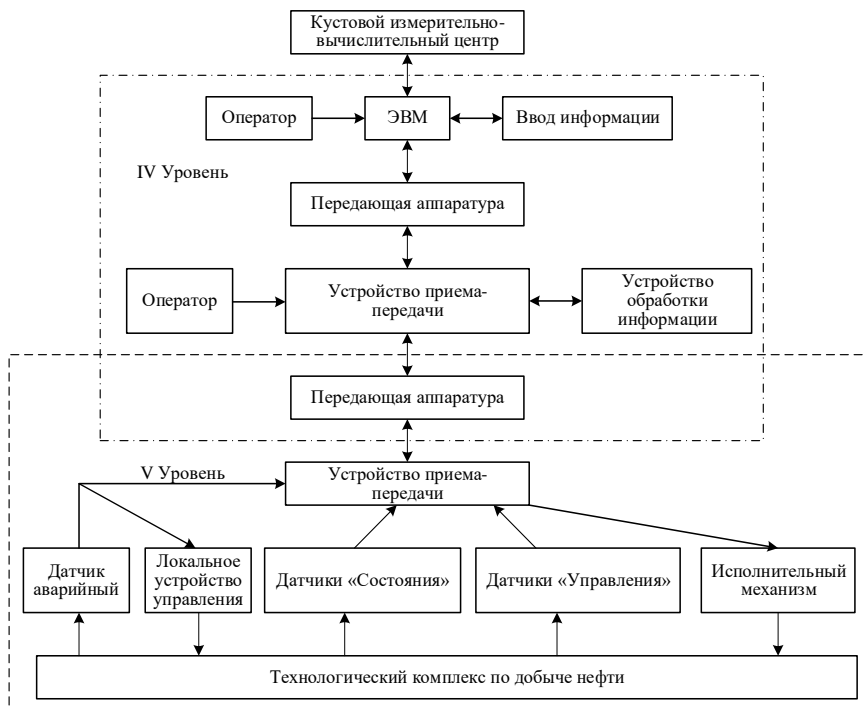


Рисунок 2. Схема информационных потоков в НГДУ в части технологических комплексов по добыче нефти

Кустовой измерительно-вычислительный центр осуществляет снабжение центральной инженерной службы в режиме реального времени оперативной информацией о техническом состоянии и режимах функционирования эксплуатируемого месторождения (см. Рисунок 2). В процессе применения действий по удалению АСПО в данной информационной схеме ничего не меняется, так как технологический процесс удаления АСПО не является частью общего технологического процесса, а является сторонней, разовой процедурой. В проводимом исследовании разработанные технические устройства становятся неотъемлемой частью технологического процесса, и общая схема информационных потоков модернизируется элементами, показанными на Рисунке 3.

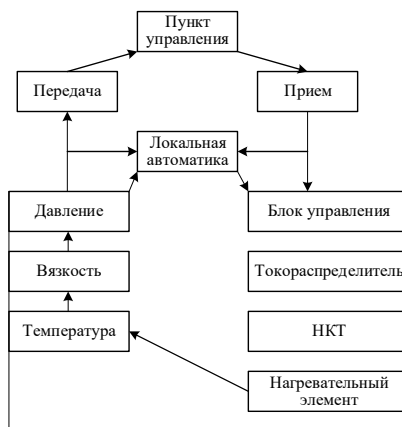


Рисунок 3. Схема информационных потоков нефтяной скважины с установленными нагревательными

Таким образом, сформирована концептуальная модель системы управления технологическим процессом добычи высокопарафинистой нефти, на основе которой в последующих главах построен ряд математических моделей и технических решений. На основе данной модели в главе приведена структурная схема и построена математическая модель месторождения как объекта управления.

Третья глава посвящено комплексному математическому исследованию объекта управления. Синтезированы пространственно-распределенные регуляторы. Построены их трехмерные плоскостные фазовые портреты. Рассмотрены элементы внутрискважинного оборудования, представленные в виде математической:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a^2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right);$$

$$0 < x < l_x; 0 < y < l_y; 0 < z < l_z.$$

Граничные и начальные условия:

$$T(x, y, L_z, \tau) = U(x, y, \tau); \quad \frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} = 0;$$

$$T(x, 0, z, \tau) = T(x, l_y, z, \tau) = T(0, y, z, \tau) = T(l_x, y, z, \tau) = 0;$$

$$T(x, y, z, 0) = 0.$$

Физическое представление указанной математической модели можно наблюдать на Рисунке 4. Импульсные входные воздействия генерируемые источниками ξ_i , оказывают температурное воздействие на объект управления длиной L и диаметром R_i . Изменения температурного поля фиксируются датчиками x .

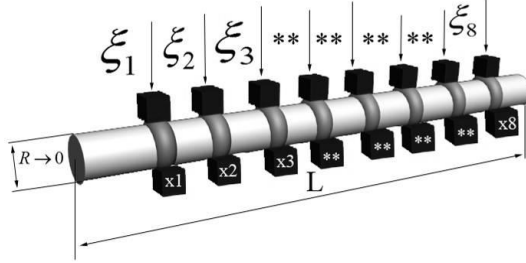


Рисунок 4. Объект управления

Анализируя данную математическую модель, получен ряд уравнений для решения задачи теплопроводности для переменного во времени температурного поля.

Одномерное уравнение:

$$T(x_j, t) = \sum_{i=1}^d \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 t \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_i + \\ + \sum_p \sum_{n=1}^k \frac{2}{l} \exp \left[- \left(\frac{\pi n a}{l} \right)^2 (t - \tau_p) \right] \sin \frac{\pi n}{l} x_j \sin \frac{\pi n}{l} \xi_{z(p)}.$$

Двухмерное уравнение:

$$T(x_j, y_j, t) = \sum_{i=1}^d \sum_{k,m=1}^{\infty} \frac{4}{l_1 \cdot l_2} \exp \left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} \right) \right] \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_j}{l_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho_i}{l_1} \right) \times \\ \times \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot y_j}{l_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot v_i}{l_2} \right) + \sum_p \sum_{k,m=1}^{\infty} \frac{4}{l_1 \cdot l_2} \cdot \exp \left[-a^2 \pi^2 \cdot (t - \tau_p) \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} \right) \right] \times \\ \times \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot y_j}{l_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_j}{l_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho_{z(p)}}{l_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot v_{z(p)}}{l_2} \right).$$

Трёхмерное уравнение:

$$G(x, y, z, \rho, v, \vartheta, t) = \frac{8}{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3} \cdot \sum_{k,m,n=1}^{\infty} B_{k,m,n}(\cdot) \cdot \exp \left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right]; \\ B_{k,m,n}(\cdot) = \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{l_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot y}{l_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{n \cdot \pi \cdot z}{l_3} \right) \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho}{l_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot v}{l_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{n \cdot \pi \cdot \vartheta}{l_3} \right).$$

Полученные зависимости позволяют провести численное моделирование поведения температурного поля во времени. Для одномерного уравнения график динамического изменения температурного поля в зависимости от количества нагревательных элементов будет выглядеть как показано на Рисунке 5.

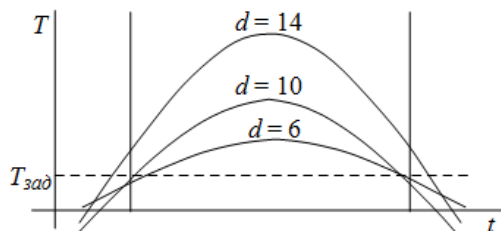


Рисунок 5 – Значения температурного поля в зависимости от времени для двухмерного объекта управления, представленного в виде двухмерной пластины, график функции показан на Рисунке 6.

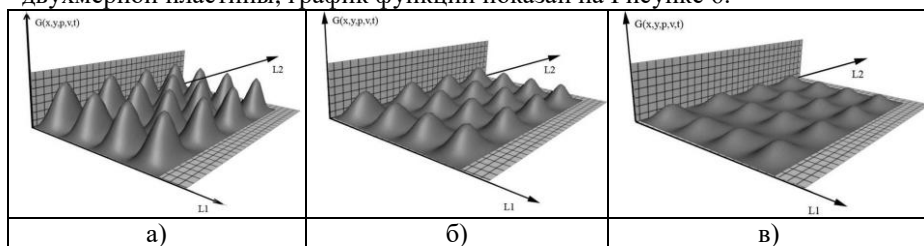


Рисунок 6 – Динамическое изменение температурного в зависимости от времени

Анализируя Рисунок 6 можно заметить, что формируемое температурное поле имеет циклический характер, а полученные алгоритмы управления задействуют не все нагревательные элементы расположенные на объекте управления. Таким образом можно определить оптимальное (наименьшее) число нагревательных элементов необходимых для поддержания заданного температурного режима. Для этой цели получены формулы для определения мест и времени включения нагревательных элементов исходя из сформулированного критерия оптимальности. Для двухмерного случая:

$$x = \arcsin \frac{4}{l_1 \cdot l_2} \cdot \sum_{k,m=1}^{\infty} \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot y}{l_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot v}{l_2}\right) \times \exp\left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2}\right)\right] \cdot \left(\frac{l_1}{k \cdot \pi}\right)$$

$$G(x, y, \rho, v, t)$$

$y =$

$$= \arcsin \frac{4 \cdot \sum_{k,m=1}^{\infty} \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot x}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot v}{l_2}\right) \times \exp\left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2}\right)\right]}{G(x, y, \rho, v, t)} \cdot \left(\frac{l_2}{m \cdot \pi}\right).$$

$t =$

$$= \frac{4 \cdot \sum_{k,m=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot y}{l_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{m \cdot \pi \cdot v}{l_2}\right) \cdot \exp\left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2}\right)\right]}{G(x, y, \rho, v, t)} \cdot \left(\frac{l_1^2 + l_2^2}{k^2 + m^2}\right) \cdot a^2 \pi^2.$$

И трехмерного случая:

$$x = \frac{l_1}{\pi} \arcsin \frac{8 \exp\left[-a^2 \pi^2 t \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right)\right] \cdot \sin \frac{\pi}{l_2} y \cdot \sin \frac{\pi}{l_3} z \cdot \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_i \cdot \sin \frac{\pi}{l_2} v_i \cdot \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_i}{l_1 l_2 l_3 T(x, y, z, t)}.$$

$$y = \frac{l_2}{\pi} \arcsin \frac{8 \exp\left[-a^2 \pi^2 t \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right)\right] \cdot \sin \frac{\pi}{l_1} x \cdot \sin \frac{\pi}{l_3} z \cdot \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_i \cdot \sin \frac{\pi}{l_2} v_i \cdot \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_i}{l_1 l_2 l_3 T(x, y, z, t)}.$$

$$z = \frac{l_3}{\pi} \arcsin \frac{8 \exp\left[-a^2 \pi^2 t \left(\frac{1}{l_1^2} + \frac{1}{l_2^2} + \frac{1}{l_3^2}\right)\right] \cdot \sin \frac{\pi}{l_1} x \cdot \sin \frac{\pi}{l_2} y \cdot \sum_{i=1}^d \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_i \cdot \sin \frac{\pi}{l_2} v_i \cdot \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_i}{l_1 l_2 l_3 T(x, y, z, t)}.$$

Определено время срабатывания нагревательного элемента

$$\tau_1 = \frac{1}{a^2 \pi^2 \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} + \frac{1}{l_3}\right)} \ln \left(\frac{8 \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_1 \sin \frac{\pi}{l_2} v_1 \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_1 \sum_{i=1}^N \sin \frac{\pi}{l_1} \rho_i \sin \frac{\pi}{l_2} v_i \sin \frac{\pi}{l_3} \vartheta_i}{l_1 l_2 l_3 T_{\text{зад}}} \right).$$

Таким образом, задача разработки регулятора выполнена в полном объеме.

В четвертой главе получены методики, обеспечивающие повышения качества регулирования разработанной системы управления. Полученные ранее аналитические решения позволяют сформулировать методики, позволяющие применять полученные экспериментальные исследования в классе систем с распределенными параметрами. В данной главе предложена методика определения наименьшего количества импульсных источников нагрева, обеспечивающих заданный температурный режим. Задача заключается в поиске наименьшего количества нагревательных элементов, которые необходимо расположить на стенке НКТ для вывода и удержания в заданном температурном режиме. В рамках в главе рассмотрена замкнутая система управления.

Проведен подробный алгоритм последовательности действий, необходимых для реализации данной методики. Проведены численные эксперименты. Единичный эксперимент при длине НКТ= 5 метров показан в таблице 1. В таблице показано что температура в точках измерений от 1 до 9 на 540 секунде эксперимента имеет указанное значение в d количестве нагревательных элементов.

Табл.1. Результат эксперимента

d=9	d=8	d=7	d=6	d=5
Тем [1,540]=2,0	Тем [1,540]=2,0	Тем [1,540]=1,9	Тем [1,540]=1,9	Тем [1,540]=1,8
Тем [2,540]=3,8	Тем [2,540]=3,7	Тем [2,540]=3,5	Тем [2,540]=3,3	Тем [2,540]=3,0
Тем [3,540]=5,1	Тем [3,540]=4,8	Тем [3,540]=4,4	Тем [3,540]=3,9	Тем [3,540]=3,0
Тем [4,540]=5,8	Тем [4,540]=5,2	Тем [4,540]=4,4	Тем [4,540]=3,3	Тем [4,540]=1,8
Тем [5,540]=5,8	Тем [5,540]=4,8	Тем [5,540]=3,5	Тем [5,540]=1,9	Тем [5,540]=1,7
Тем [6,540]=5,1	Тем [6,540]=3,7	Тем [6,540]=1,9	Тем [6,540]=1,1	-
Тем [7,540]=3,8	Тем [7,540]=2,0	Тем [7,540]=1,4	-	-
Тем [8,540]=2,0	Тем [8,540]=1,8	-	-	-
Тем [9,540]=1,2	-	-	-	-

Также в главе получены методы, обеспечивающие качество регулирования: метод поиска оптимального шага дискретизации импульсных управляющих, обеспечивающих заданный технологический режим трехмерного объекта управления. Необходимость данной методики обуславливается составным характером НКТ, которые обычно состоят из труб по 9-10 метров каждая. Предложенная методика позволит определять оптимальное количество нагревательных элементов при секционном расположении НКТ оборудованных импульсными секционными нагревателями. В рамках данной методики в главе рассмотрена трехмерная математическая модель

$$\frac{\partial Q(x, y, z, t)}{\partial t} - a^2 \left[\frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 Q(x, y, z, t)}{\partial z^2} \right] = f(x, y, z, t) \cdot$$

При следующих начальных и граничных условиях

$$\begin{aligned} Q(0, y, z, t) &= q_1(y, z, t); \quad Q(l_1, y, z, t) = q_2(y, z, t); \quad Q(x, 0, z, t) = q_3(y, z, t); \\ Q(x, l_2, z, t) &= q_4(x, z, t); \quad Q(x, y, 0, t) = q_5(x, y, t); \quad Q(x, y, l_3, t) = q_6(x, y, t); \\ 0 \leq x \leq l_1; \quad 0 \leq y \leq l_2; \quad 0 \leq z \leq l_3; \quad t \geq 0; \quad a > 0. \end{aligned}$$

Простроена трехмерная функция Грина и ее передаточная функция

$$\begin{aligned} G(x, y, z, \rho, \nu, \vartheta, t) &= \frac{8}{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3} \cdot \sum_{k, m, n=1}^{\infty} B_{k, m, n}(\cdot) \cdot \exp \left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2} \right) \right]; \\ B_{k, m, n}(\cdot) &= \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot x}{l_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot y}{l_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{m \cdot \pi \cdot z}{l_3} \right) \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho}{l_1} \right) \cdot \sin \left(\frac{k \cdot \pi \cdot \nu}{l_2} \right) \cdot \sin \left(\frac{n \cdot \pi \cdot \vartheta}{l_3} \right). \end{aligned}$$

Синтезирована замкнутая система управления температурным полем насосно-компрессорной трубы.

$$\begin{aligned}
 G(x_j, y_j, z_j, \rho, v, \vartheta, t) = & \sum_{i=1}^d \frac{8}{l_1 \cdot l_2 \cdot l_3} \cdot \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_j}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot y_j}{l_2}\right) \times \\
 & \times \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho_i}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot v_i}{l_2}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z_j}{l_3}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \vartheta_i}{l_3}\right) \times \\
 & \times \exp\left[-a^2 \pi^2 \cdot t \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2}\right)\right] \cdot \sum_p \sum_{k,m,n=1}^{\infty} \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot x_j}{l_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot y_j}{l_2}\right) \times \\
 & \times \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot z_j}{l_3}\right) \cdot \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \rho_{z(p)}}{l_1}\right) \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot v_{z(p)}}{l_2}\right) \times \sin\left(\frac{k \cdot \pi \cdot \vartheta_{z(p)}}{l_3}\right) \times \\
 & \times \exp\left[-a^2 \pi^2 \cdot (t - \tau) \cdot \left(\frac{k^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2} + \frac{n^2}{l_3^2}\right)\right]
 \end{aligned}$$

Поставлен численный эксперимент и получена модель распространения температурного поля, показанная на рисунке 7.

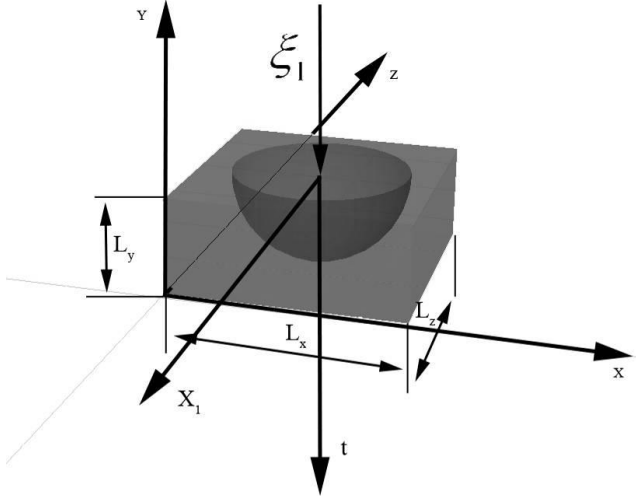


Рисунок 7. Графическое отображение распространения температурного поля

Оборудованные импульсными нагревательными элементами насосно-компрессорные трубы, склонны к тепловой деформации. В рамках данной главы рассмотрен объект управления, представленный на рисунке 7.

Построена его математическая модель, начальные и граничные условия.

Температурное поле в стенке изделия

$$\frac{dT_1(x, r, \Theta, \tau)}{d\tau} = a_1 \cdot \left(\frac{d^2 T_1(x, r, \Theta, \tau)}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT_1(x, r, \Theta, \tau)}{dr} + \frac{d^2 T_1(x, r, \Theta, \tau)}{dx^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d^2 T_1(x, r, \Theta, \tau)}{d\Theta^2} \right),$$

$$0 < x < L, R_2 < r < R_1, 0 < \Theta < 360^\circ.$$

Температурное поле внутри изделия

$$\frac{dT_2(x, r, \Theta, \tau)}{d\tau} = a_2 \cdot \left(\frac{d^2 T_2(x, r, \Theta, \tau)}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT_2(x, r, \Theta, \tau)}{dr} + \frac{d^2 T_2(x, r, \Theta, \tau)}{dx^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d^2 T_2(x, r, \Theta, \tau)}{d\Theta^2} \right),$$

$$0 < x < L, 0 < r < R_2, 0 < \Theta < 360^\circ.$$

Граничные условия для фазовой переменной T_1

$$\lambda_1 \frac{dT_1(x, R_1, \Theta, \tau)}{dr} = \lambda_B \frac{dT_B(x, R_1, \Theta, \tau)}{dr},$$

$$T_1(x, R_1, \Theta, \tau) = T_B(x, R_1, \Theta, \tau); 0 < x < L, 0 < \Theta < 360^\circ.$$

Граничные условия для фазовой переменной T_1

$$\lambda_1 \frac{dT_1(x, R_2, \Theta, \tau)}{dr} = \lambda_2 \frac{dT_2(x, R_2, \Theta, \tau)}{dr};$$

$$T_1(x, R_2, \Theta, \tau) = T_2(x, R_2, \Theta, \tau); 0 < x < L, 0 < \Theta < 360^\circ; \frac{dT_2(x, 0, \Theta, \tau)}{dr} = 0.$$

торцевые грани объекта

$$T_1(0, r, \Theta, \tau) = T_1(L, r, \Theta, \tau) = 0; R_2 < r < R_1;$$

$$T_2(0, r, \Theta, \tau) = T_2(L, r, \Theta, \tau) = 0; 0 < r < R_2;$$

Получено итоговое уравнение для оценки тепловой деформации ствола НКТ.

$$f = \sum_{j=1}^N \arctg((\Delta x_j - \Delta x) / (2R_3)).$$

Проведен численный эксперимент демонстрирующий работу данной методики. Рассмотрен импульсный нагревательный элемент как звено системы управления.

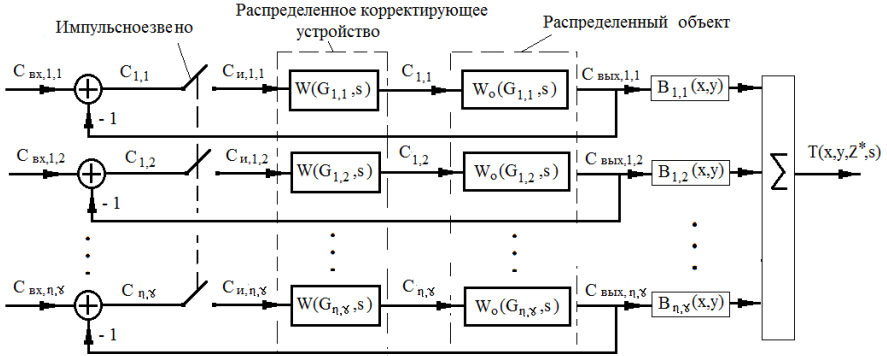


Рисунок 8. Структурная схема импульсной системы

Получена передаточная функция разомкнутой системы управления, которая записана следующим образом.

$$W^*_{P}(G_{\eta, \gamma}, s) = (1 - \exp(-st)) \cdot \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{t} \cdot \sum_{r=-\infty}^{r=\infty} ((E_1 \cdot \left[\frac{n_1 - 1}{n_1} + \frac{1}{n_1} \cdot G_{\eta, \gamma} \right] + E_4 \cdot \left[\frac{n_4 - 1}{n_4} + \frac{1}{n_4} \cdot G_{\eta, \gamma} \right] \cdot \frac{1}{s} + E_2 \cdot \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} + \frac{1}{n_2} \cdot G_{\eta, \gamma} \right] \cdot s) \cdot \frac{\exp(\beta(G_{\eta, \gamma} \cdot z^*) + \exp(-\beta(G_{\eta, \gamma} \cdot z^*)))}{\lambda \cdot \beta(G_{\eta, \gamma}) \cdot (\exp(\beta(G_{\eta, \gamma}) \cdot z_L) - \exp(-\beta(G_{\eta, \gamma}) \cdot z_L))},$$

$$\beta = \left(\frac{s + jr\omega_u}{a} + G_{\eta, \gamma} \right)^{1/2}, (\eta, \gamma = \overline{1, \infty})$$

Построен критерий Найквиста как набор единичных окружностей вытянутый по каждой пространственной моде.

Радиус окружностей $r=1$

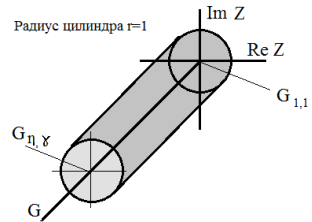
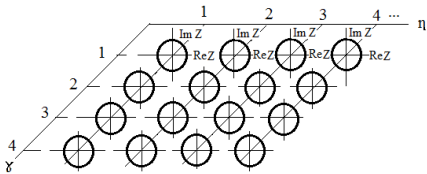


Рисунок 9. Переход от бесконечного набора окружностей к цилиндру

Сформулирован и построен пространственный годограф импульсной распределенной системы управления.

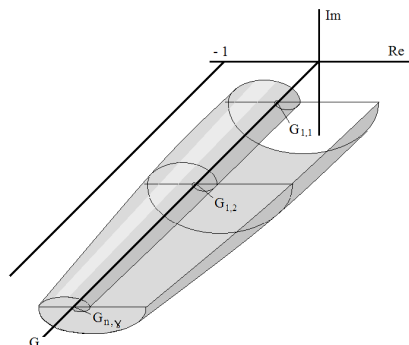


Рисунок 10. Пространственный годограф импульсной системы

Данный критерий устойчивости может быть применен, если рассматривать систему с динамически изменяющимся коэффициентом теплопроводности. В этом случае полученный критерий может быть применен для определения устойчивости разомкнутой системы автоматического управления с распределенными параметрами.

В пятой главе предложены технические решения, направленные на реализацию разработанных методик. Представлена схема насосно-компрессорная труба с импульсными секционными нагревателями (см. Рисунок 11), состоящая из внешнего 3 и внутреннего 4 кожухов и установленными между ними нагревательными элементами импульсного типа 2, разделенные переборками с токоподводящим каналом внутри. Продемонстрировано блок управления нагревательными элементами состоящий из четырех арифметико-логических устройств.

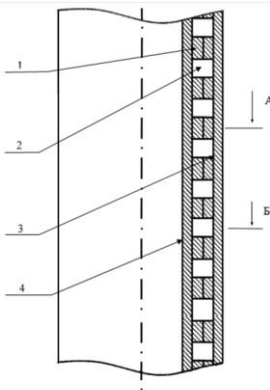


Рисунок 11. Схема насосно-копресорной трубы с импульсными секционными нагревателями

Данные логические элементы соединены параллельно, что обеспечивает высокую скорость выработки командных сигналов. На рисунке 12 показана основная схема управления с индикаторами выхода управляющих сигналов (на монтажной схеме показаны индикаторы).

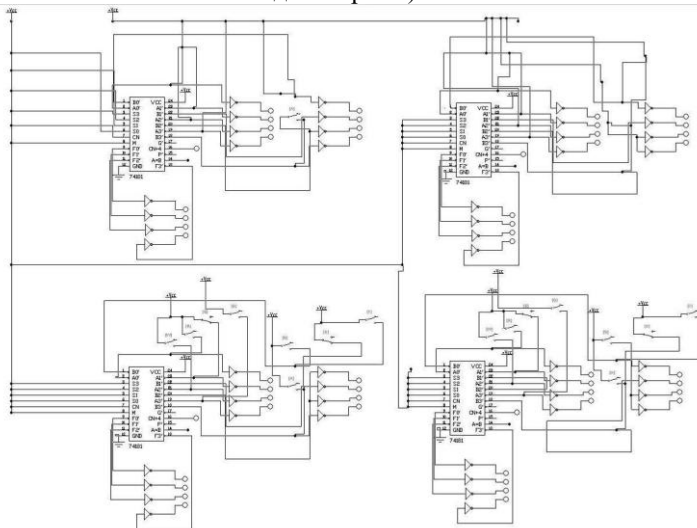


Рисунок 12 – Блок логических операций

Продемонстрированы ряд термобуров выполняющие различные специфические задачи геологоразведочного и термического бурения в условиях арктической зоны. Показаны схемы их работы. Показано частное решение задачи управления. Разработка нового технического устройства – карбидокремниевый нагревательный элемент. Продемонстрированы экспериментальные исследования на электронном микроскопе в различных режимах, демонстрирующих однородное прогревание металла. Показаны результаты эксперимента, демонстрирующие отсутствие разрушения структуры металла, вызванного импульсным нагревом.

С учетом всех разработанных изменений происходит модификация схемы автоматизации технологического процесса. В разделе 5.4. показана существующая схема автоматизации технологического процесса добычи высокопарафинистой нефти и схема, модернизированная с учетом предложенных в рамках данной работы устройств, методик и алгоритмов. Заключительные разделы пятой главы посвящены методам синтеза специализированного программного обеспечения, комплексам обеспечивающих подсистему АСУТП.

В заключении даны краткие выводы по работе. В работе детально проанализированная существующая схема автоматизации технологического процесса добычи нефти из месторождений с высоким содержанием парафина. Рассмотрен технологический процесс очистки скважинного оборудования от АСПО. Также были рассмотрены причина следственные связи формирования отложений. Проведен многофакторный анализ методов борьбы и предупреждения АСПО. На основе проделанной работы были сделаны выводы об эффективности применения тепловых методов борьбы, но и их высокой стоимости. В последующих главах исследования были сначала математически рассчитаны, а затем и реализованы в виде технических устройств элементы АСУТП, обеспечивающих более эффективную технологию борьбы и предотвращения образования АСПО. К основным задачам, реализованным в рамках исследования стоит отнести:

1. Проведен глубокий анализ схемы технологического процесса добычи высокопарафинистой нефти из месторождений с низким дебитом. В рамках которого проведен: анализ температурных полей и синтез импульсного управления температурным полем на основе функции Грина стенки многосекционного нагревателя с учетом пространственной конфигурации насосно-компрессорной трубы; построена математическая модель и синтезирована системы диагностики температурной деформации насосно-компрессорной трубы вследствие теплообменных процессов; разработана методика оптимальной дискретизации насосно-компрессорной трубы исходя из заданной погрешности измерения; разработана схема автоматизации технологического процесса добычи высокопарафинистой нефти из малodeбитовых месторождений. Также разработан ряд специализированного математического обеспечения, обеспечивающего функционирование технической части представленного исследования. Разработан метод определения абсолютной устойчивости на основе критерия Найквиста для импульсных, распределенных систем, для которых существует фундаментальное решение в виде функции Грина. Проведено обоснование и выработка на основе математической модели рекомендаций по наименьшему количеству нагревательных элементов интегрированных в структуру насосно-компрессорных труб нефтяного месторождения.

2. В рамках исследования был разработан ряд устройств, обеспечивающих автоматизацию технологического процесса. А именно: разработана насосно-компрессорная труба с импульсными секционными нагревателями; разработаны ряд топологий интегральных микросхем, обеспечивающих функционирование НКТ с импульсными секционными нагревателями; разработан ряд нагревательных элементов с импульсными секционными нагревателями.

3. Разработан ряд специализированного программного обеспечения, обеспечивающего моделирование и функционирование схем разработанного технологического процесса.

Таким образом, все задачи, поставленные в данном исследовании выполнены в полном объёме. Полученные технические устройства прошли опытно-эксплуатационные испытания, о чем свидетельствуют приложенные к работе акты о внедрении.

В приложении находятся схемы АСУТП, чертежи элементов управления, фрагменты программного кода и актов о внедрении.

Основные публикации по теме диссертации

Монографии:

1. Ильюшин, Ю.В. Автоматизация и управление технологическими процессами: состояние, проблемы и перспективы. Проблемы подготовки специалистов / Ю.В. Ильюшин, С.Е. Абрамкин, С.Е. Душин, Е.Л. Крылова, А.В. Малков, И.М. Першин, и др. всего 13 чел.// Пятигорск: Издательство ПФ СКФУ, 2019. – 144 с.
2. Ильюшин, Ю.В. Моделирование температурного поля на основе функции Грина. Моделирование тепловых процессов в изотропных объектах/ Ю.В. Ильюшин, // AV Akademikerverlag GmbH & Co/KG Heinrich-Bocking, Saarbrucken, Deutschland, 2013. – 73 с.
3. Ильюшин, Ю.В. Моделирование релейно-импульсных распределенных систем/ Ю.В. Ильюшин, А.Б. Чернышев, В.Ф. Антонов // Пятигорск: издательство «Пятигорский государственный гуманитарно-технологический университет», 2012. – 248 с.
4. Ильюшин, Ю.В. Синтез замкнутой системы управления температурным полем туннельной печи конвейерного типа. / Ю.В. Ильюшин // Пятигорск: издательство «Пятигорский государственный гуманитарно-технологический университет», 2012. – 184 с.

Основные работы, опубликованные в изданиях входящих в базу Scopus (id 56465735900):

5. Pyushin, Y., Golovina, E. Stability of temperature field of the distributed control system (2020) ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 15 (5), pp. 664-668.
6. Pyushin, Yu.V., Novozhilov, I.M. Automation of the Paraffin Oil Production Technological Process (2019) Proceedings of 2019 3rd International Conference on Control in Technical Systems, CTS 2019, статья № 8973352, pp. 164-167. DOI: 10.1109/CTS48763.2019.8973352

7. Пыушин, Y.V., Novozhilov, I.M. Methodology of inspection of absolute stability of pulse distributed control system (2019) Proceedings of 2019 22nd International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2019, статья № 8903839, pp. 102-106. DOI: 10.1109/SCM.2019.8903839
8. Пыушин, Y., Mokeev, A. Distribution of temperature in a spatially onedimensional object as a result of the active point source (2019) ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 14 (6), pp. 1238-1243.
9. Пыушин, Y.V., Novozhilov, I.M. Analyzing of distributed control system with pulse control (2017) Proceedings of 2017 20th IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2017, статья № 7970565, pp. 296-298. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970565
10. Пыушин, Y., Mokeev, A. Tunnel furnace of a conveyor type: Technical controlling of the temperature field (2017) International Journal of Applied Engineering Research, 12 (20), pp. 9377-9389.
11. Пыушин, Y., Mokeev, A. Technical realization of the task of controlling the temperature field of a tunnel furnace of a conveyor type (2017) International Journal of Applied Engineering Research, 12 (8), pp. 1500-1510.
12. Пыушин, Y.V., Afanasieva, O.V. Synthesis of a distributed control system (2016) International Journal of Control Theory and Applications, 9 (30), pp. 41-60.
13. Пыушин, Y.V., Pervukhin, D.A., Afanasieva, O.V., Afanasyev, M.P., Kolesnichenko, S.V. Solution of problem of heating elements' location of distributed control objects (2016) Global Journal of Pure and Applied Mathematics, 12 (1), pp. 585-602.
14. Пыушин, Y.V., Pervukhin, D.A., Afanasieva, O.V., Afanasyev, M.P., Kolesnichenko, S.V. The methods of the synthesis of the nonlinear regulators for the distributed one-dimension control objects (2015) Modern Applied Science, 9 (2), pp. 42-61. DOI: 10.5539/mas.v9n2p42

***Основные работы, опубликованные в изданиях входящих в базу
Web of Science (ResearcherID Y-5877-2019):***

15. Пыушин, Y.V., Afanasieva, O.V. Development of Scada-model for trunk gas pipeline's compressor station// Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 240. P. 686-693 DOI: 10.1109/SCM.2019.8903839

Основные работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК:

16. Ильюшин Ю.В. Математические модели объектов с распределёнными параметрами с импульсным входным воздействием/ Ю.В. Ильюшин, И.М. Новожилов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №4, 2019.- С. 48-52.

17. Ильюшин Ю.В. Применение модифицированного критерия Найквиста для анализа импульсных распределенных систем/ Ю.В. Ильюшин, М.Ю. Шестопапов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №3, 2019.- С. 42-46.
18. Ильюшин Ю.В. Методика определения устойчивости пространственно распределенного объекта управления с импульсным входным воздействием/ Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин// Известия ЮФУ № 5. - Таганрог, 2018. С. 186-198.
19. Ильюшин Ю.В. Анализ пространственно-распределенных температурных полей импульсной системы управления добычей высокопарафиновой нефти// Известия ЮФУ № 5. - Таганрог, 2018.- С. 174-186
20. Ильюшин Ю.В. Анализ импульсных систем автоматического управления// «Современная наука и инновации» № 2 (22) – Пятигорск, Издательство: ФГАОУ ВПО «Северо-Кавказский федеральный университет» филиала СКФУ в г. Пятигорске, 2018.- С. 57-64.
21. Ильюшин Ю.В. Преобразование случайного векторного воздействия линейным элементом системы с целью его компенсации при добыче подземных вод/ Ю.В. Ильюшин, В.Е. Трушников// Горный информационно-аналитический бюллетень № 1. – Москва: Изд-во Горная книга, 2017.- С. 97-104.
22. Ильюшин Ю.В. Метод управления температурным полем на основе функции Грина/ Ю.В. Ильюшин, И.М. Першин// Записки Горного института / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2015. Т.214.- С 57 -70.
23. Ильюшин Ю.В. Синтез импульсной системы управления// Научное обозрение № 7 – Москва, 2015. - С. 58-62.
24. Ильюшин Ю.В. Решение задачи моделирования поведения температурного поля в распределенных объектах управления/ Ю.В. Ильюшин, И.М. Новожилов, А.Л. Ляшенко, И.А. Кучеренко // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» №7/2014 –СПб, Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014.- С. 48-51.
25. Ильюшин Ю.В. Моделирование температурного поля восходящего для процесса бурения нагнетательных скважин добычи полезных ископаемых/ Ю.В. Ильюшин, И.А. Кучеренко //Научное обозрение №4 – Москва, 2013. - С. 98 -101.
26. Ильюшин Ю.В. Методика синтеза нелинейных регуляторов для распределенного объекта управления// Научное обозрение №5- Москва, 2012. - С. 14-17.

27. Ильюшин Ю.В. Проектирование распределенной системы со скалярным воздействием // Научное обозрение №4. – Москва, 2011. - С. 85-90.
28. Ильюшин Ю.В., Определение шага дискретизации для расчета теплового поля трехмерного объекта управления/ Ю.В. Ильюшин, А.Б. Чернышев // Известия ЮФУ № 6. – Таганрог, 2011. - С. 192-200.
29. Ильюшин Ю.В. Методика расчета оптимального количества нагревательных элементов в зависимости от значений температурного поля // Научно технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление № 6-2(138). Том 2. -2011.- С. 48-53.
30. Ильюшин Ю.В. Проектирование системы управления температурными полями туннельных печей конвейерного типа // Научно технические ведомости СПбГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление № 3(126). – 2011.- С. 67-72.
31. Ильюшин Ю.В. Устойчивость распределенных систем с дискретными управляющими воздействиями / Ю.В. Ильюшин, А.Б. Чернышев. // Известия ЮФУ № 12. –Таганрог, 2010. - С. 166-171.

Основные патенты на изобретения, патенты (свидетельства) на полезную модель, свидетельства на программу для электронных вычислительных машин, базы данных, топологию интегральных микросхем, зарегистрированные в установленном порядке.

32. Ильюшин Ю.В. Чернышев А.Б. Моделирование замкнутой системы управления трехмерным объектом с распределенными параметрами// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614896. Дата регистрации 20.05.2013. Бюллетень № 6, 2013.
33. Ильюшин Ю.В. Чернышев А.Б. Первухин Д.А. Карбидокремниевый нагревательный элемент с импульсными секционными нагревателями// Патент РФ на полезную модель № 132938. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Изобретения. Полезные модели, 20.01.2014, № 02, 2014
34. Ильюшин Ю.В. Афанасьева О.В. Расчет температурных характеристик колонкового бура// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663220. Дата регистрации 27.11.2017. Бюллетень № 12, 2017
35. Ильюшин Ю.В. Сидоренко С.А. Моделирование импульсной, распределенной системы управления температурным полем ледового бура// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616322. Дата регистрации 29.05.2018. Бюллетень № 6, 2018
36. Ильюшин Ю.В. Афанасьева О.В. Расчет температурного поля, создаваемого импульсными нагревательными элементами в колонне

насосно-компрессорной трубы нефтедобывающей скважины// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018663073. Дата регистрации 19.10.2018. Бюллетень № 11, 2018

37. Ильюшин Ю.В. Афанасьева О.В. Программа для анализа и управления температурным полем насосно-компрессорной трубы при добыче высокопарафинистой нефти в скважине с низким дебитом// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611880. Дата регистрации: 11.02.2020 Бюллетень № 3, 2020

38. Ильюшин Ю.В. Сандыга М.С. Программа для моделирования теплофизических свойств высокопарафинистой нефти// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616220. Дата регистрации: 15.06.2020 Бюллетень № 7, 2020

Публикации в других изданиях:

39. Ильюшин Ю.В. Взаимодействие информационных потоков технологического процесса добычи высокопарафинистой нефти// Сборник трудов XI Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2019». Санкт-Петербург. 21-25 октября 2019 / Под ред. проф. С.А. Козлова.– СПб: Университет ИТМО, 2019. С. 192-193

40. Ильюшин Ю.В. Автоматизация технологического процесса добычи высокопарафинистой нефти с помощью импульсной распределенной системы управления// tIX Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2019. С. 422-428

41. Ильюшин Ю.В. Синтез импульсной системы управления температурным полем буровых шнеков// Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018». Санкт-Петербург. 15-19 октября 2018 / Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: Университет ИТМО, 2018. С. 181

42. Ильюшин, Ю.В. Поведение теплового поля на основе функции Грина в релейной системе управления [текст]. / Ю.В. Ильюшин. // Альманах современной науки и образования № 3(46). Математика, физика, строительство, архитектура и технические науки. – Тамбов, изд. Грамота, 2011. С 78-87

43. Ильюшин, Ю.В. Параметрический синтез управляющих воздействий для стабилизации температурного поля изотропного стержня [текст]. / Ю.В. Ильюшин.// Системный синтез и прикладная синергетика.// 4-Международная научная конференция. Сб. докладов. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. С 205-212

44. Ильюшин, Ю.В. Стабилизация температурного поля в пространственно двухмерном объекте на основе функции Грина [текст]. / Ю.В. Ильюшин.// Перспективы развития информационных технологий.// Сборник материалов 3-й Международной научно-практической конференции. – Новосибирск, Издательство НГТУ, 2011. С 45-49
45. Ильюшин, Ю.В. Стабилизация температурного поля на основе функции Грина [текст]. / Ю.В. Ильюшин.// «Управление и информационные технологии». Межвузовский сборник. Пятигорск, «РИА-КМВ» 2010г. С 61-65

В виду ограниченности объема в автореферате приведены только наиболее значимые работы по теме диссертации

Соискатель:



Ю.В. Ильюшин