

На правах рукописи



ГУДКОВА Екатерина Александровна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ОПАРАФИНИВАНИЯ РАСХОДОМЕРНОЙ
ТРУБКИ КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА**

**Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ (технические науки)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА – 2024

Работа выполнена на кафедре «Информационные технологии и системы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный технологический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Таранцева Клара Рустемовна

Официальные оппоненты: **Ковальногов Владислав Николаевич**,
доктор технических наук, профессор,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ульяновский государственный
технический университет», заведующий
кафедрой «Тепловая и топливная энергетика»;

Блинков Юрий Анатольевич,
доктор физико-математических наук,
доцент, федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский
национальный исследовательский
государственный университет имени
Н. Г. Чернышевского», заведующий кафедрой
«Математическое и компьютерное
моделирование»

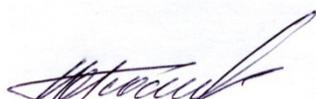
Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технологический
университет»

Защита диссертации состоится 21 ноября 2024 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета 24.2.357.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета и на сайте университета: https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/gudkova

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Косников Юрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В связи с уменьшением запасов нефти для компенсации снижения добычи в последние годы разрабатываются месторождения с запасами трудно извлекаемых высокопарафинистых нефтей. Сохранение объемов добычи крайне важно для поддержания российской экономики и является одной из приоритетных задач. В нашей стране большинство высокопарафинистых нефтей находится в Волго-Уральском, Западно-Сибирском и Северо-Кавказско-Мангышлакском бассейнах, доля их на этих месторождениях составляет около 30 %. Наличие в данных нефтях большого количества насыщенных углеводородов (парафинов), ароматических соединений, циклоалканов и неуглеводородных соединений (смола и асфальтенов) приводит к образованию парафиновых отложений не только на стенках трубопроводов, но средствах измерения массового расхода.

В нефтегазовой отрасли в качестве средств измерения массового расхода широко применяются кориолисовы расходомеры, так как они обладают высокой точностью и возможностью прямого измерения плотности, скорости потока и массового расхода нефти. Доля их среди других средств измерения массового расхода в отрасли в 2023 г. составила около 28 %. Отложение парафина на стенках расходомерной трубки кориолисового расходомера приводит к сужению ее поперечного сечения и, как следствие, к уменьшению объема жидкости, участвующей в создании кориолисовой силы. Кроме того, отложения парафина на внутренней поверхности трубки приводят к увеличению ее массы, изменению собственной частоты системы и возникновению погрешностей расчета массового расхода нефти.

Натурный эксперимент с расходомерами данного типа дорог и требует отключения системы встроженных поправок со стороны фирмы-разработчика, аналитическое решение таких задач затруднительно ввиду сложности процесса и большого количества факторов, влияющих на него. Основным методом исследования процессов проектирования, оптимизации и анализа работы кориолисовых расходомеров выступает математическое моделирование. Вклад в развитие методов математического моделированием элементов кориолисовых расходомеров внесли многие отечественные ученые (В. П. Бескачко, О. Л. Ибряева, И. А. Лех, М. Ю. Михеев, В. А. Романов, Д. Д. Салов, А. С. Семенов, П. А. Тараненко, Д. В. Телегин, В. А. Юрманов, А. А. Яушев и др.) и зарубежные ученые (G. Bobovnik, J. Kutin, R. Baker, J. Nemp, I. Vajsić, G. Sultan, M. Henry, C. P. Stack и др.). Однако существует очень ограниченное количество работ, посвященных анализу влияния опарафинивания расходомерных трубок на погрешность измерений (М. Ю. Прахова, А. Н. Краснов), в них рассмотрен частный случай равномерного опарафинивания U-образного расходомера. В то же время на практике чаще распространено неравномерное опарафинивание расходомеров. Имеющиеся модели опарафинивания разработаны только для трубопроводов и не учитывают высокочастотные колебания трубки кориолисова расходомера, приводящие к неравномерному отложению парафина по ее сечению, которые необходимо учитывать для снижения погрешностей измерения. Работ, посвященных исследованию

влияния неравномерного осаждения парафина на внутренней поверхности трубки кориолисова расходомера в зависимости от ее формы на точность измерения параметров массового расхода не обнаружено.

Таким образом, для повышения точности измерения и улучшения характеристик кориолисовых расходомеров необходимо решить актуальную задачу учета влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрии на точность измерения параметров массового расхода высокопарафинистых нефтей.

Цель диссертационного исследования – повышение достоверности измерений кориолисовых расходомеров на основе оценки влияния формы парафиновых отложений в расходомерной трубке на точность определения параметров массового расхода высокопарафинистой нефти.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Провести модификацию метода математического моделирования опарафинивания трубопроводов, необходимую для учета неравномерности распределения гидродинамического давления по сечению расходомерной трубки, вызванного наличием силы Кориолиса в протекающей жидкости, и прогнозирования формы парафиновых отложений на внутренней поверхности расходомерной трубки.

2. Разработать методику численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» в виде совокупности алгоритмов для получения зависимостей параметров массового расхода от характеристик потока жидкости, конфигурации расходомерной трубки, толщины и формы парафиновых отложений.

3. Разработать вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с применением спрогнозированной формы парафиновых отложений.

4. Разработать и протестировать комплекс программ на основе разработанных методики и алгоритмов, решить задачу оценки влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрии на точность измерения параметров массового расхода при различных характеристиках измеряемой жидкости.

5. Дать практические рекомендации для нефтегазовой отрасли по снижению погрешности измерения кориолисова расходомера при измерении высокопарафинистых нефтей на основе математического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с установлением зависимостей влияния неравномерной формы парафиновых отложений в расходомерной трубке на точность определения параметров массового расхода и обоснованием выбора геометрической формы расходомерной трубки, менее подверженной опарафиниванию и позволяющей достичь высокой чувствительности измерений.

Объект исследования – система «расходомерная трубка – парафин – жидкость» кориолисова расходомера в процессе ее равномерного и неравномерного опарафинивания.

Предмет исследования – методы математического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» кориолисова расходомера для оценки влияния неравномерной формы парафиновых отложений в расходомерной трубке на точность определения параметров массового расхода.

Методы исследования. Для достижения цели и решения поставленных задач использовались методы математического моделирования физических процессов турбулентного течения жидкости в колеблющейся расходомерной трубке, итерационный численный метод решения систем линейных уравнений, методы конечных элементов, линейной интерполяции.

Соответствие паспорту специальности: п. 3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента. п. 8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента. п. 9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки).

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена модификация метода математического моделирования опарафинивания трубопроводов, отличающаяся учетом неравномерного гидродинамического давления по сечению расходомерной трубки, вызванного наличием силы Кориолиса в протекающей жидкости, что дает возможность спрогнозировать форму парафиновых отложений на внутренней поверхности расходомерной трубки.

2. Предложена методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», реализованная в виде комплекса алгоритмов, отличающаяся автоматическим перестроением геометрии расходомерной трубки в зависимости от значения радиуса кривизны и учетом сопряжения парафиновых отложений с расходомерной трубкой, передающего колебания от трубки к жидкости и получающего ответные воздействия, вызванные силой Кориолиса. Методика позволяет определять параметры массового расхода с учетом совокупного изменения характеристик потока жидкости, толщины и формы парафиновых отложений, конфигурации расходомерной трубки, что повышает точность и достоверность моделирования процесса опарафинивания в кориолисовых расходомерах.

3. Разработан вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», являющийся основой взаимодействия программ комплекса, отличающийся применением спрогнозированной формы парафиновых отложений, что позволяет упростить работу с интерфейсом прикладной программы для численного моделирования, рассчитать и визуализировать полученные результаты параметров массового расхода в зависимости от скорости потока, геометрии расходомерной трубки, толщины и формы парафиновых отложений.

4. Получены в результате вычислительных экспериментов с применением разработанного комплекса программ зависимости совокупного изменения параметров массового расхода при различных профилях сечения отложений парафина, отличающиеся тем, что учитывают влияние формы отложений (при неизменности их массы) на точность измерения параметров расхода, что позволяет дать практические рекомендации для нефтегазовой отрасли по снижению погрешности измерения кориолисова расходомера при измерении расхода высокопарафинистых нефтей.

Практическая значимость результатов диссертации обусловлена ее прикладной направленностью. Предложенные модифицированный метод исследования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» и алгоритмы для проведения вычислительного эксперимента реализованы в виде единого программного комплекса с решением задачи комплексирования составляющих его программ для использования при расчете новых более сложных параметров опарафинивания трубки.

Разработанный комплекс распространяется на модели кориолисовых расходомеров с одной трубкой и состоит из:

- 1) программы параметрической настройки математической модели и управления численным расчетом;
- 2) программы для линейной интерполяции и расчета параметров массового расхода;
- 3) программы вычисления и визуализации измерений между экспериментами, анализ разброса результатов.

Разработан удобный интерфейс, позволяющий визуализировать полученные результаты расчетов погрешностей измерения массового расхода в зависимости от скорости потока, геометрии расходомерной трубки, толщины парафиновых отложений. С помощью разработанного комплекса программ были рассчитаны параметры массового расхода при равномерных с вариацией толщины от 0,1 до 1 мм с шагом в 0,1 мм и различных неравномерных формах отложений парафина, выявлено и численно рассчитано их влияние на абсолютную и относительную погрешности измерения.

Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Информационные технологии и системы» Пензенского государственного технологического университета в период с 2012 по 2024 г. в соответствии с грантом «Разработка кориолисова расходомера инерционного типа в составе поверочного комплекса» (2013–2014), РФФИ № 23-21-10046 «Метод решения в машинной графике задачи взаимозакрываемости 3D-моделей при подвижном наблюдателе» (2023–2024), госбюджетной НИР, проводимой в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (1 этап, 7.7765.2013 от 01.02.2013) «Разработка средств поверки кориолисовых расходомеров на месте их эксплуатации» (регистрационный номер: 7.7765.2013).

Достоверность и обоснованность результатов работы, сформулированных в диссертации, обеспечены использованием современных методов математического моделирования, вычислительными экспериментами, сопоставлением теоретических утверждений с результатами численных расчетов,

а также сопоставлением полученных данных модели без опарафинивания с результатами натуральных экспериментов других авторов.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Модифицированный метод математического моделирования опарафинивания трубопроводов с учетом неравномерного гидродинамического давления по сечению расходомерной трубки, вызванного наличием силы Кориолиса в протекающей жидкости, для прогнозирования формы парафиновых отложений на внутренней поверхности расходомерной трубки.

2. Методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с возможностью автоматического перестроения геометрии расходомерной трубки в зависимости от значения радиуса кривизны и учетом сопряжения парафиновых отложений с расходомерной трубкой, передающего колебания от трубки к жидкости и получающего ответные воздействия, вызванные силой Кориолиса, для определения параметров массового расхода в зависимости от характеристик потока жидкости, конфигурации расходомерной трубки, толщины и формы парафиновых отложений.

3. Вычислительный алгоритм, являющийся основой взаимодействия программ комплекса для автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с применением спрогнозированной формы парафиновых отложений, расчета и визуализации параметров массового расхода в зависимости от скорости потока, геометрии расходомерной трубки, толщины и формы парафиновых отложений.

4. Комплекс программ на основе разработанных методики и алгоритмов с автоматизированным параметрическим моделированием системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» кориолисова расходомера, решающий задачу оценки влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрии на точность измерения параметров массового расхода при различных характеристиках измеряемой жидкости.

5. Выявленные зависимости в виде совокупного изменения собственной частоты системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» и временной задержки с учетом влияния различных форм отложений парафина при неизменности их массы.

Реализация работы и внедрение результатов. Результаты исследований реализованы в алгоритмах программных продуктов, зарегистрированных в государственном реестре Российской Федерации. Разработанный комплекс программ внедрен в учебный процесс кафедры «Информационные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» по дисциплине «Имитационное моделирование информационных систем», что подтверждено актом о внедрении. Сформированные в диссертационном исследовании рекомендации представляют практический интерес и могут применяться при понижении температуры потока газового конденсата на коммерческих узлах замера установок комплексной подготовки газа Ачимовских добывающих объектов ООО «Газпром добыча Уренгой», что подтверждено актом о внедрении.

Апробация работы. Результаты, излагаемые в диссертации, были представлены на следующих конференциях и форумах: Международная конференция «Методы и средства измерений в системах контроля и управления» (г. Пенза, 26–28 ноября 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Современные информационные технологии» (г. Пенза, 30 марта 2018 г.); V Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований» (г. Пенза, 1–10 ноября 2021 г.); XIV и XV Международные молодежные форумы «Образование. Наука. Производство» (г. Белгород, 13–14 октября 2022 г., 23–24 октября 2023 г.); Международная научно-практическая конференция «Проблемы внедрения результатов инновационных исследований и пути их решения» (г. Омск, 27 мая 2023 г.); Всероссийская конференция «Передовые технологии нефтегазовой отрасли» (г. Сургут, 24 ноября 2023 г.); Национальная с международным участием научно-практическая конференция студентов, аспирантов, ученых и специалистов «Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе» (г. Тюмень, 20–22 декабря 2023 г.); Международная научная конференция «Перспективные научные исследования: теория, методология и практика применения» (г. Санкт-Петербург, 14 апреля 2024 г.); VII Всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» (г. Казань, 28–30 мая 2024 г.).

Публикации. Основные научные результаты диссертации отражены в 21 научной работе: 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 1.2.2; 1 статья в издании, индексируемом SCOPUS; 1 статья в издании, рекомендованном ВАК при Минобрнауки России по смежным научным специальностям; 10 статей в сборниках трудов конференций; 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все изложенные в диссертации основные результаты получены автором лично. Автором осуществлялись: математическая постановка задачи, модификация метода математического моделирования, разработка методики и комплекса программ, проведение вычислительных экспериментов, обработка и интерпретация их результатов. Из работ, выполненных в соавторстве, в диссертацию вошли только результаты, полученные ее автором.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит четыре главы, введение, заключение, список литературы и 4 приложения. Диссертация изложена на 134 страницах основного текста, содержит 47 рисунков, 5 таблиц. Список литературы содержит 140 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость; представлены основные результаты, выносимые на защиту, приведена степень достоверности и апробация результатов диссертационной работы.

В первой главе проанализированы физическая природа моделируемого явления, принцип работы кориолисова расходомера, критерии, влияющие на точность измерения массового расхода, и синтезировано математическое описание системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» для исследования взаимосвязанного влияния параметров расходомерной трубки и измеряемой жидкости.

Выявлено, что существующие в настоящее время математические модели и алгоритмы расчета не позволяют исследовать влияние дополнительной неравномерно распределенной массы парафина в расходомерной трубке на параметры массового расхода. Отсутствует также решение задачи поиска наиболее приемлемой геометрии расходомерной трубки с учетом ее опарафинивания и свойств среды.

Проведен анализ существующих методов моделирования процессов в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость». Установлено, что из-за сложности, а в ряде случаев и невозможности, аналитического решения таких моделей чаще используются различные численные методы.

Многие исследователи применяли одномерный подход к численному моделированию элементов кориолисовых расходомеров с использованием методов: конечных разностей, спектральных элементов или конечных элементов. В наиболее распространенных 1D-моделях расходомерная трубка рассматривается как балка Эйлера – Бернулли или балка Тимошенко, а жидкость моделируется однородной нерастяжимой массивной нитью, протягиваемой вдоль оси трубы с постоянной скоростью. Однако из-за сложности взаимодействия элементов системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» такие модели не позволяют учесть влияние неравномерного опарафинивания расходомерной трубки на ее колебания. Поэтому необходима разработка 3D-модели без упрощения геометрии расходомерной трубки и позволяющая учитывать взаимосвязанное влияние параметров расходомерной трубки и измеряемой жидкости.

Анализ подходов к численному решению уравнений математической модели системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» показал, что прямой метод по сравнению с итеративным требует более укрупненных узлов сетки конечных элементов для того, чтобы эффективно решить общую систему уравнений, используя доступные вычислительные ресурсы компьютера. Однако деление сетки на крупные узлы негативно сказывается на точности моделирования. В то же время итеративный подход позволяет использовать отдельный математический аппарат для эффективного решения уравнений движения жидкости, акустических и механических колебаний расходомерной трубки. Для обеспечения точности моделирования в данном случае требуется сопряжение получаемых численных решений на основе жестко связанных алгоритмов.

Сделан вывод, что связь расходомерной трубки и жидкости, учитывая их мультифизическое взаимодействие, необходимо моделировать как взаимодействие акустической конструкции (*ASI*), а не как взаимодействие жидкости и конструкции (*FSI*), так как высокочастотные колебания расходомерной

трубки вызывают ее структурные деформации, приводящие к возникновению перепадов давления в жидкости, которые, в свою очередь, приводят к излучению звука от вибрирующих конструкций. Таким образом, при описании математической модели необходимо реализовать это сопряжение в виде двусторонней итеративной связи.

Был выполнен синтез математической модели для исследования взаимосвязанного влияния параметров системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость». Состояние расходомерной трубки описано математической моделью линейной упругости. Для описания линейно-упругой краевой задачи использовали уравнения сохранения импульса (уравнение равновесия), уравнения сохранения упругости (геометрические соотношения Коши, устанавливающие зависимости между перемещениями и деформациями), уравнение закона Гука в обратной форме. Напряжения по закону Гука (обратная форма) выражались через деформации, а деформации – через перемещения из соотношения Коши, далее шла подстановка в уравнения равновесия.

Основное уравнение равновесия выводится из второго закона Ньютона в формулировке Лагранжа:

$$0 = \nabla \cdot S + F_v, \quad (1)$$

где S – тензор напряжений; F_v – объемная сила.

Общий тензор напряжений Коши S в законе Гука дополняется тензором внешних напряжений S_{ext} и тензором дополнительного напряжения из-за вязкого демпфирования S_q :

$$S = S_{ad} + C : \epsilon_{el}, \quad (2)$$

$$S_{ad} = S_0 + S_{ext} + S_q. \quad (3)$$

Слагаемое C описывает свойства материала во всех трех пространственных измерениях как функцию модуля Юнга E и числа Пуассона ν :

$$C = C(E, \nu). \quad (4)$$

Тензор упругой деформации ϵ_{el} представляет собой разницу между полной деформацией ϵ и всеми неупругими деформациями ϵ_{inel} :

$$\epsilon_{el} = \epsilon - \epsilon_{inel}, \quad (5)$$

$$\epsilon_{inel} = \epsilon_0 + \epsilon_{ext} + \epsilon_{th} + \epsilon_{hs} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{cr} + \epsilon_{vp} + \epsilon_{ve}, \quad (6)$$

с вектором перемещения трубки u , сформулированным в виде уравнения:

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u]. \quad (7)$$

Обозначения с индексом 0 указывают на начальные значения соответствующих переменных, начальные векторы перемещений и сил равны 0 в x , y и z направлениях.

Математическое моделирование системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» основано на предположении, что влияние акустических возмущений трубки на среднее поле скорости течения жидкости

незначительно, таким образом, стационарное поле скорости жидкости можно определить независимо.

Среднее установившееся поле скоростей смоделировано с помощью уравнения Навье – Стокса и уравнения неразрывности потока.

Уравнения модели сформулированы в терминах турбулентной кинетической энергии $K = (\mu + \mu_T)(\nabla_u + (\nabla_u)^T)$ и удельной скорости диссипации ω :

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F, \quad (8)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0, \quad (9)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k)^{\nabla k}] + P - \beta_0^* \rho \omega k, \quad (10)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k)^{\nabla \omega}] + \frac{\gamma}{\mu_T} - \rho \beta_0 \omega^2 + 2(1 - f_{v1}) \frac{\sigma_{\omega 2} \rho}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, \quad (11)$$

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4, \quad \ell_w = \frac{1}{G} - \frac{\ell_{ref}}{2}, \quad (12)$$

где $P = \min(P_k, 10\rho\beta_0^*\rho k\omega)$, $P_k = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)]$.

Турбулентная вязкость определялась по уравнению

$$\mu_T = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, S f_{v2})},$$

где S – характерная величина градиентов средней скорости $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$.

Константы модели определялись путем интерполяции соответствующих внутренних и внешних значений $\phi = f_{v1}\phi_1 + (1 - f_{v1})\phi_2$, $\phi = \beta, \gamma, \sigma_k, \sigma_\omega$.

Математическое описание акустического поля представлено линеаризованными уравнениями Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \rho_t}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 u_t + \rho_t u_0) = M, \quad (13)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u_t}{\partial t} + (u_t \cdot \nabla)u_0 + (u_0 \cdot \nabla)u_t \right) + \rho_t (u_0 \cdot \nabla)u_0 = \nabla \cdot \sigma + F - u_0 M, \quad (14)$$

$$\rho_0 C_p \left(\frac{\partial T_t}{\partial t} + (u_t \cdot \nabla)T_0 + (u_0 \cdot \nabla)T_t \right) + \rho C_p (u_0 \cdot \nabla)T_0 - \alpha_p T_0 \left(\frac{\partial p_t}{\partial t} + (u_t \cdot \nabla)p_0 + (u_0 \cdot \nabla)p_t \right) - \alpha_p T_t (u_0 \cdot \nabla)p_0 = \nabla \cdot (k \nabla T_t) + \Phi + Q. \quad (15)$$

где p_t, u_t, T_t – акустические возмущения давления, скорости и температуры соответственно. Индекс t указывает на то, что акустические переменные представляют собой полные поля, т.е. сумму возможных фоновых акустических полей и рассеянных полей.

При решении линеаризованных уравнений Навье – Стокса во временной области необходимо учитывать развитие линейных волн физической неустойчивости, так называемую неустойчивость Кельвина – Гельмгольца.

Членами, ответственными за нестабильности, являются реактивные члены в основных уравнениях Навье – Стокса. Для их подавления в работе использован стабилизированный метод наименьших квадратов Галеркина (GLS), а именно подавление средних градиентов давления потока:

$u_t \cdot \nabla p_0 = 0, u_0 \cdot \nabla p_0 = 0$; подавление градиентов средней скорости потока: $\nabla \cdot u_0 = 0, u_t \cdot \nabla u_0 = 0, u_0 \cdot \nabla u_0 = 0$; подавление средних градиентов температуры: $u_t \cdot \nabla T_0 = 0, u_0 \cdot \nabla T_0 = 0$.

Далее было реализовано акустическое сопряжение, позволяющее учесть ускорение колеблющейся трубки, передаваемое жидкости, и нагрузку от жидкости, влияющей на расходомерную трубку. Математическое условие на границе сопряжения имеет вид

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) = -n \cdot u_{tt}, F_A = p_t n, \quad (16)$$

где ρ_c – плотность материала расходомерной трубки; p_t – общее акустическое давление; q_d – термин однородного постоянного фонового потока, конвектирующего (переносящего) звуковое поле; n – нормаль к поверхности; u_{tt} – ускорение расходомерной трубки; F_A – нагрузка, т.е. сила на единицу площади или давление, испытываемое стенками расходомерной трубки.

Для сопряжения линеаризованных уравнений Навье – Стокса с уравнениями движения расходомерной трубки использована аэроакустическая связь, необходимая для моделирования взаимодействия фонового потока жидкости и акустического поля расходомерной трубки во временной области. Аэроакустическая связь реализует непрерывность поля смещений между двумя разными областями и описана уравнениями:

$$u_{t,fluid} = \frac{\partial u_{solid}}{\partial t}, -n \cdot (k \nabla T_t) = 0, \quad (17)$$

где $u_{t,fluid}$ – общая скорость жидкости, включая фоновую составляющую; u_{solid} – смещение расходомерной трубки. Сопряжение обеспечивает непрерывность напряжения на границе между двумя областями.

Таким образом, предложенный итеративный подход позволил использовать отдельный математический аппарат для решения уравнений движения жидкости, акустических и механических колебаний расходомерной трубки.

Вторая глава посвящена модификации метода математического моделирования, разработке методики численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», реализованной в виде совокупности алгоритмов, для получения параметров массового расхода в зависимости от характеристик потока жидкости, конфигурации расходомерной трубки, толщины и формы парафиновых отложений.

Модифицирован метод математического моделирования опарафинивания трубопроводов путем его адаптации к области кориолисовых расходомеров за счет учета влияния неравномерности гидравлического давления по сечению расходомерной трубки вследствие действия сил Кориолиса.

Во время течения высокопарафинистой нефти отложения осаждаются при температуре ниже температуры кристаллизации. Для расчета скорости осаждения парафина использована моделью молекулярной диффузии:

$$\frac{dm_x}{dt} = -\rho_0 A \delta_x \left[\frac{dw_x}{dT} \frac{dT}{dr} \right],$$

где m_x – масса парафинообразующего компонента; t – время; ρ_0 – плотность нефти; δ_x – эффективный коэффициент диффузии парафинообразующего компонента; A – площадь осаждения; w_x – массовая доля парафинообразующего компонента; r – внутренний радиус; dT/dr – радиальный градиент температуры; dw_x/dT – коэффициент растворимости кристаллов парафина в масляной фазе.

Профиль градиента давления рассчитывается путем решения уравнения количества движения, описывающего установившийся несжимаемый однофазный поток через горизонтальный трубопровод:

$$\rho u \frac{du}{dx} = -\frac{dp}{dx} - \frac{f\rho u^2}{2d} - \rho g \sin a.$$

Общее давление по всему трубопроводу (включая составляющие гравитации g , ускорения a и трения f) определяется уравнением, в которое добавляется дополнительная оригинальная составляющая давления, вызванная кориолисовой силой Δp_c :

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_a + \Delta p_f + \Delta p_c.$$

Разработана и реализована в пакете мультифизического моделирования *COMSOL* методика в виде совокупности алгоритмов:

- 1) алгоритм численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» (рисунок 1);
- 2) алгоритм, реализующий двустороннюю итеративную связь между жидкостью и расходомерной трубкой с учетом парафиновых отложений (рисунок 2).

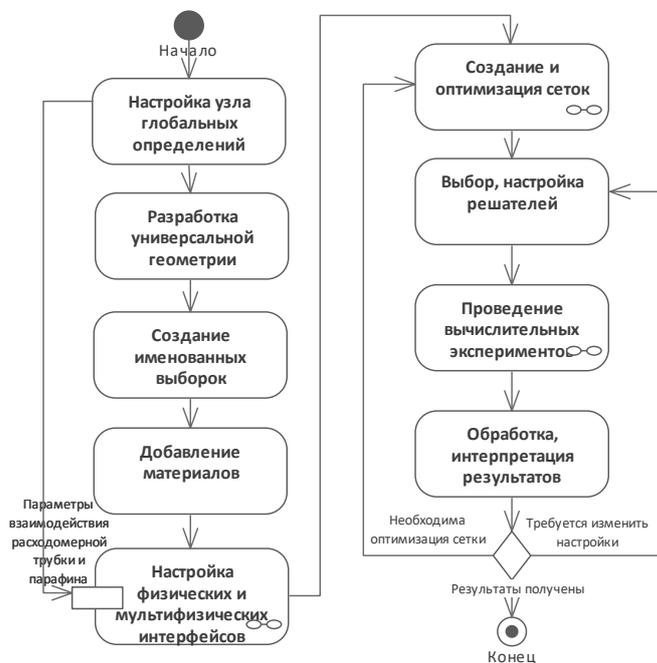


Рисунок 1 – Алгоритм численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Алгоритмы реализованы с использованием *UML* в программном продукте *Enterprise Architect*.

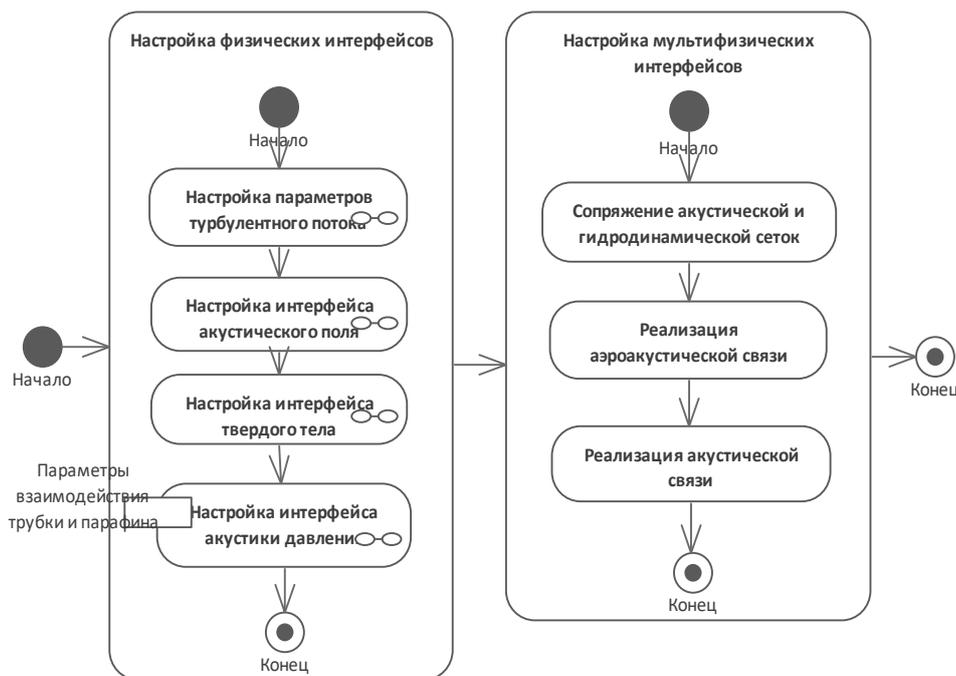


Рисунок 2 – Алгоритм двустороннего взаимодействия системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» состоит из следующих этапов:

1. Настройка узла глобальных определений *Global Definitions*, хранящего определяемые пользователем параметры, переменные и функции, доступные на всех уровнях построителя модели.

2. Разработка изменяемой геометрии расходомерной трубки с возможностью автоматического перестроения формы расходомерной трубки в зависимости от значения радиуса кривизны. Радиус кривизны расходомерной трубки – параметр изгиба, выраженный в градусах и позволяющий изменять геометрию трубки от прямоотрубной (0°) до U-образных конструкций (до 90°).

3. Создание именованных выборок *Selections*: жидкость, трубка, парафин, стенки, входные и выходные границы для потока – необходимых при назначении свойств материала, граничных условий и других параметров модели.

4. Добавление материалов для жидкой и структурной составляющих модели, выбор типа парафина.

5. Настройка физических и мультифизических интерфейсов, в которых заданы уравнения математической модели, геометрическая выборка для интерфейсов, добавление условий и ограничений, указание областей приложения нагрузок.

6. Создание и оптимизация сетки представляет процесс при создании модели конечных элементов, непосредственно влияющий на достоверность результатов.

7. Выбор, настройка решателей и получение решения уравнений (которые составляют математическую модель) за удовлетворительное время вычислений, проверка адекватности полученных результатов.

8. Проведение серии вычислительных экспериментов по интересующим параметрам.

9. Обработка и интерпретация результатов моделирования, составление отчетных таблиц и графиков.

Пункт 5 «Настройка физических и мультифизических интерфейсов» представляет наиболее важный этап проводимого исследования, для которого разработан алгоритм двустороннего взаимодействия системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» (см. рисунок 2), в котором мультифизические связи реализованы на основе выходных параметров физических интерфейсов.

Для моделирования трубки (рисунок 3) выбраны интерфейс *Solid Mechanics*, описывающий динамику твердого тела, и изотопная модель линейно-упругого тела *Linear Elastic Material*, представленная уравнениями (1)–(7). Для моделирования незатухающей вибрации системы источник колебаний представлен в виде гармонической силы, приложенной к центру трубки, $F(t) = F_0 \times \sin(2\pi f_1 t)$. Частота колебательной силы f_1 задана равной первой собственной частоте системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

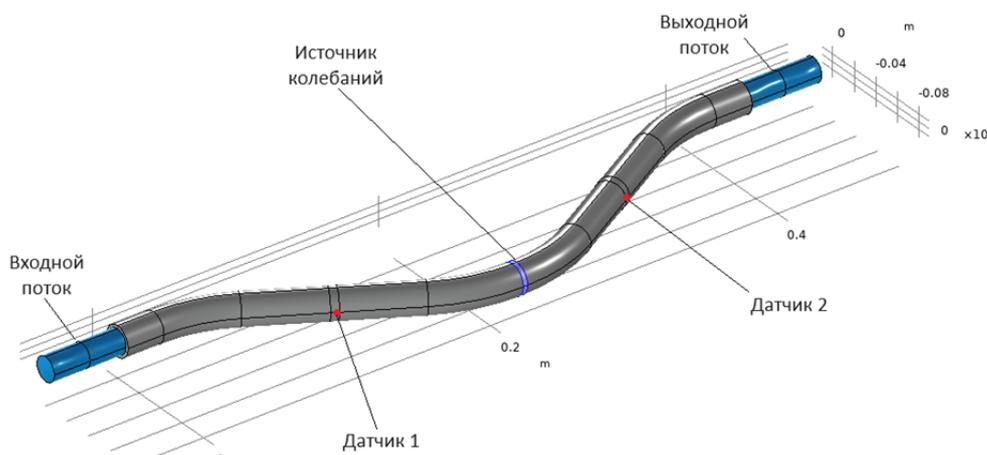


Рисунок 3 – Трехмерная модель системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Моделирование движения жидкости проводилось с использованием интерфейса *Turbulent Flow*. Заданы стандартные граничные условия на входе и выходе трубки, где на входном участке задан полностью развитый профиль потока $\frac{q_m}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^2}$ (q_m – массовый расход, R – внутренний радиус трубки, ρ – плотность жидкости) давление на выходе установлено равным нулю. Тензор турбулентного напряжения сдвига задан гипотезой вихревой вязкости, а вихревая вязкость представлена с помощью стандартной модели турбулентности *SST* (перенос сдвигового напряжения) для турбулентных потоков, объединяющая преимущества поведения модели $k - \omega$ в пристеночной области с надежностью модели $k - \epsilon$. Уравнения, решаемые с помощью интерфейса *Turbulent Flow*, *SST*, представляют собой осредненное по числу Рейнольдсу уравнение Навье – Стокса для сохранения импульса и уравнение неразрывности для сохранения массы.

Приняты следующие допущения: жидкость ньютоновская и представляет собой несжимаемый поток, поскольку отношение скорости потока к скорости звука для жидкости меньше 0,3 (число Маха); поле скоростей стационарно и не зависит от времени; плотность жидкости ρ постоянна.

Для реализации сопряжения взаимодействия расходомерной трубки и парафиновых отложений в качестве двух непересекающихся, но имеющих общую границу объемных тел был использован узел *Identity Boundary Pair* для создания идентификационной пары. В качестве границ выбраны внутренняя поверхность трубки и внешняя поверхность парафинового слоя, зазор между ними отсутствует, что полностью соответствует физическому характеру налипания парафина (рисунок 4). Для моделирования поведения парафина при колебаниях расходомерной трубки и для учета сил, действующих со стороны измеряемой жидкости, использовалась физика твердого тела, реализуемая уравнениями (1)–(7). На рисунке 5 представлен поперечный профиль сечения парафина от полностью круглого (равномерное распределение) до эллипсного (неравномерное) (D – внутренний диаметр трубки, a, b – главные оси эллипса). Эллипсность рассчитывается в виде отношения осей, выраженного в процентах.

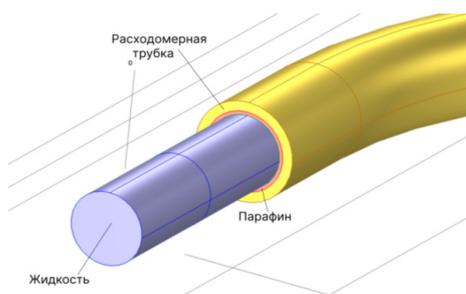


Рисунок 4 – Трехмерная модель системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с равномерным отложением парафина

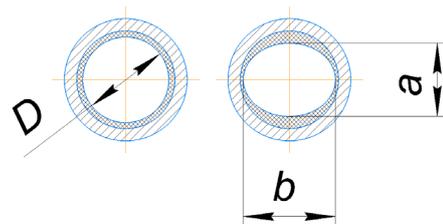


Рисунок 5 – Поперечный профиль сечения отложений парафина, слева – равномерный, справа – неравномерный вследствие сил Кориолиса

Данное решение позволило смоделировать процесс опарафинивания расходомерной трубки, когда отложившийся парафин колеблется вместе с трубкой и передает колебания моделируемой жидкости. При использовании этого сопряжения также передается ответное воздействие жидкости на опарафиненную трубку. Гидродинамическая сетка и акустическая сетка представляют собой две независимые сетки. Отображение решения из гидродинамической сетки на акустическую реализовано с помощью мультифизической связи *Background Fluid Flow Coupling* и исследования *Mapping*. Переменные среднего фонового давления потока p_0 , поля скорости v_0 , плотности ρ_0 , температуры T_0 и турбулентной вязкости μ_T соотносятся с соответствующими переменными в акустической сетке.

Акустическая связь реализована мультифизическим интерфейсом *Acoustic-Structure Boundary* на основе уравнений (16). Аэроакустическая связь реализована мультифизическим интерфейсом *Aeroacoustic-Structure Boundary* на основе уравнений (17).

Предложенная методика численного моделирования отличается от существующих тем, что в ней впервые учтены:

1) отложения парафина и реализовано их сопряжение с расходомерной трубкой, позволяющее передавать колебания от трубки к жидкости и получать ответные воздействия, вызванные силой Кориолиса, в отличие от существующих исследований, где парафиновые отложения учитывают в качестве добавленной массы трубки;

2) изменяемая геометрия расходомерной трубки – от прямой до U-образной формы в зависимости от радиуса кривизны (от 0° до 90°), что позволило исследовать влияние геометрии трубки на погрешность измерений кориолисова расходомера, без необходимости разработки и настройки новых численных моделей для различных форм расходомерных трубок;

3) воздействие неравномерного гидродинамического давления жидкости на стенки расходомерной трубки, вызванного осесимметричным профилем скорости потока вследствие действия сил Кориолиса, что позволило исследовать влияние и характер отложений парафина на определение параметров массового расхода.

В третьей главе разработан вычислительный алгоритм (рисунок 6), реализующий автоматизированное параметрическое моделирование системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с применением спрогнозированной формы парафиновых отложений, позволяющий рассчитать и визуализировать полученные результаты параметров массового расхода в зависимости от скорости потока, геометрии расходомерной трубки, толщины и формы парафиновых отложений.

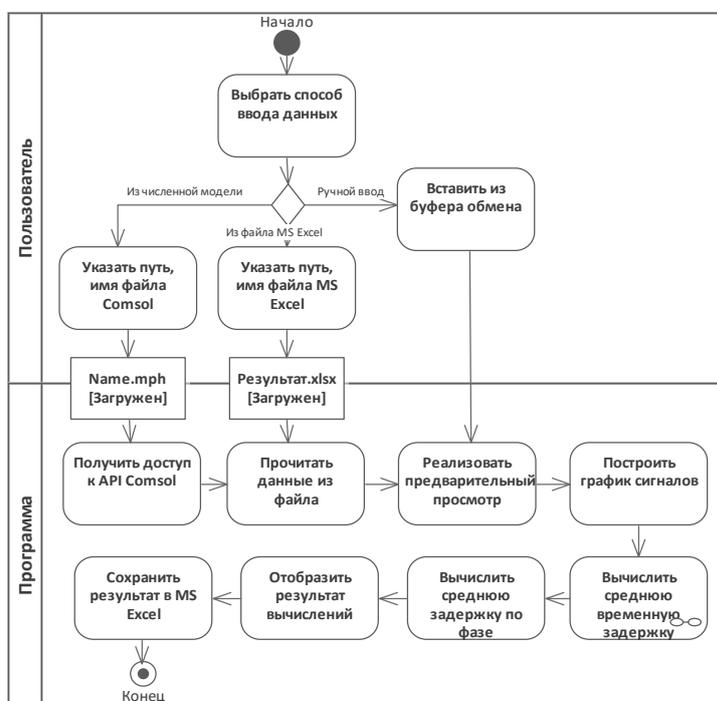


Рисунок 6 – Вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Результатом численного расчета являются сигналы колебаний расходомерной трубки в двух точках, расположенных равноудалено от центра трубки, соответствующих положениям датчиков 1 и 2 (см. рисунок 3). Для расчета средней временной задержки был разработан вложенный алгоритм, представленный на рисунке 7.

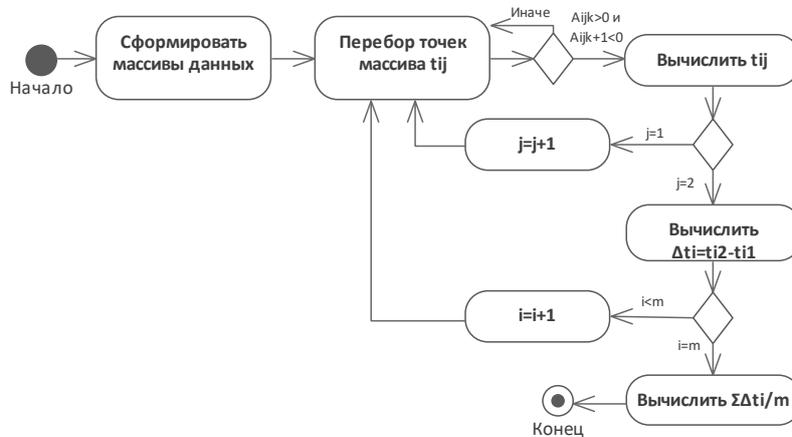


Рисунок 7 – Алгоритм расчета средней временной задержки

Согласно алгоритму вначале формируются массивы данных, получаемые в результате численного расчета модели. Далее осуществляется перебор точек для нахождения последней точки с положительным значением амплитуды и первой точки с отрицательным значением амплитуды. На основе линейной интерполяции вычисляется время при амплитуде $A = 0$ для датчиков 1 и 2, далее рассчитывается временная задержка Δt между сигналами датчиков для каждого полупериода, в конце это значение усредняется и получается среднее значение $\Delta \bar{t}$.

В результате средняя временная задержка определяется уравнением

$$\Delta \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^m (t_{id2} - t_{id1})}{m}, \quad (18)$$

где m – количество полупериодов; i – номер полупериода; индексы $d1$ и $d2$ обозначают датчик 1 и датчик 2; t_{id1} и t_{id2} определяются уравнениями:

$$t_{id1} = \frac{A_{i1k} \cdot t_{i1k+1} + A_{i1k+1} \cdot t_{i1k}}{A_{i1k+1} + A_{i1k}}, \quad t_{id2} = \frac{A_{i2k} \cdot t_{i2k+1} + A_{i2k+1} \cdot t_{i2k}}{A_{i2k+1} + A_{i2k}}, \quad (19)$$

где A_{ijk} , A_{ijk+1} – амплитуды временного сигнала для i -го полупериода для j -го датчика.

На основе значения средней временной задержки рассчитывалась средняя фазовая задержка $\Delta \bar{\varphi} = 2\pi \cdot f_1 \cdot \Delta \bar{t}$.

На основе алгоритма разработан программный комплекс (рисунок 8).

В программе I реализован интерфейс, управляющий численным моделированием. Изначально формируются начальные условия, поля ввода данных (радиус кривизны расходомерной трубки, количество периодов), выбирается тип исследования (1).

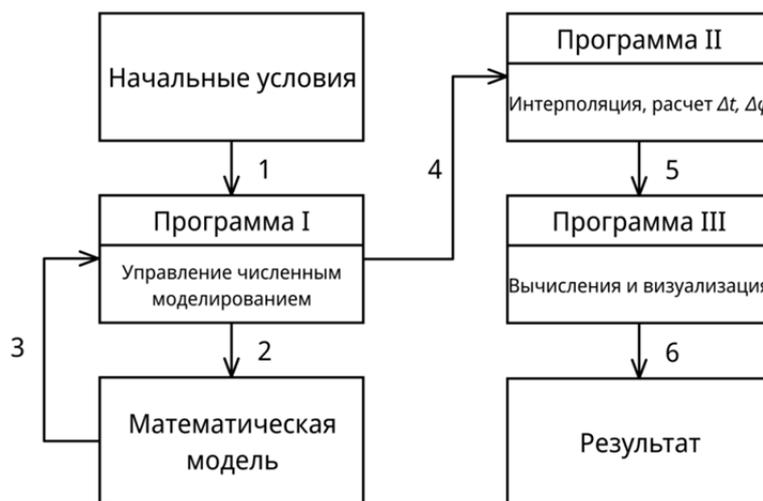


Рисунок 8 – Структурно-логическая схема программного комплекса

Затем запускается вычислительный эксперимент (2), его результаты передаются в программу I (3), и автоматически сформированные в нужном формате массивы передаются в программу II для линейной интерполяции и вычисления средних временной и фазовой задержек (4). Эти значения представляют основной результат вычислительного эксперимента: значение средней временной задержки пропорционально массовому расходу и также характеризует чувствительность расходомера. В программу III поступают обработанные результаты вычислительного эксперимента (5), происходит вычисление и визуализация измерений между экспериментами, анализ результатов (6). Проведенное тестирование программного комплекса на контрольных данных подтвердило его работоспособность.

В четвертой главе в результате вычислительных экспериментов с применением разработанного комплекса программ получены зависимости в виде совокупного изменения параметров массового расхода при различных профилях поперечного сечения отложений парафина, отличающиеся тем, что учитывают влияние формы отложений при неизменности их массы на точность изменения параметров расхода. Выполнено моделирование протекающего по расходомерной трубке полностью развитого турбулентного потока жидкости. В вычислительных экспериментах исследовались следующие массовые расходы жидкости: 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 кг/с (рисунок 9). Установлено, что модель хорошо коррелирует с теоретическими данными, подтверждая, что модель турбулентности SST с достаточной точностью отражает физические параметры потоков для U-образной геометрии трубки.

Поскольку процесс опарафинивания приводит к изменению массы системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», влияющей на точность определения параметров массового расхода, верификация разработанной модели выполнена путем установки дополнительной массы. Установка дополнительной массы применяется при оценке влияния датчиков на работу кориолисова расходомера. Данное исследование выполнено для оценки работоспособности модели.

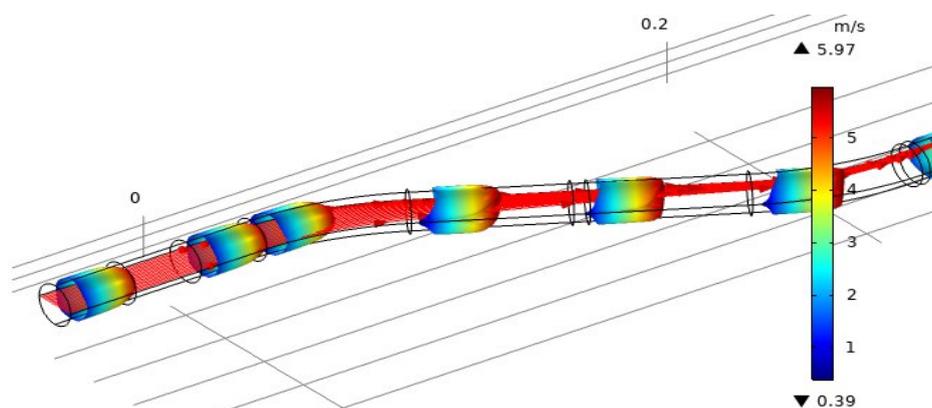


Рисунок 9 – Поле скоростей турбулентного потока жидкости с массовым расходом 2,0 кг/с для U-образной (30°) геометрии трубки

Из представленных результатов расчета видно (таблица 1), что собственная частота расходомерной трубки, заполненной жидкостью, уменьшается с увеличением величины добавленной массы датчиков, что приводит к относительной погрешности измерения δf . Полученные результаты соответствуют результатам известных исследований, что является подтверждением достоверности разработанной модели.

Таблица 1 – Зависимость собственной частоты системы от добавленной массы датчиков

Масса, г	0	5	10	15	20	25	30
Частота, Гц	477,59	472,92	468,37	463,94	459,63	455,42	451,32
δf , %	0	0,98	1,93	2,86	3,76	4,64	5,50

Для получения начальных данных выполнен анализ влияния геометрии расходомерных трубок без парафиновых отложений на чувствительность расходомера. В качестве критерия чувствительности принят параметр временной задержки для различных геометрий трубки (с радиусами кривизны трубок от 0° (прямотрубный расходомер) до 90° (U-образный расходомер) при одинаковых значениях массовых расходов потока от 0,1 до 2,5 кг/с.

Результаты исследований показали (рисунок 10), что кориолисовы расходомеры с U-образной формой трубки и радиусом кривизны от 60 до 90° обладают высокой чувствительностью измерений по сравнению с другими формами. Однако они сложны в эксплуатации из-за сильного опарафинивания в областях изгиба, тогда как у прямотрубной расходомерной трубки этот недостаток менее выражен, но она имеет низкую чувствительность измерений. Выявлено, что модель расходомерной трубки с радиусом кривизны 30° сохраняет положительные свойства прямотрубного расходомера и при больших значениях массового расхода, характерных для нефтегазовой отрасли, имеет достаточную чувствительность (рисунок 11), сопоставимую с чувствительностью U-образных расходомерных трубок с радиусом кривизны от 60 до 90°.

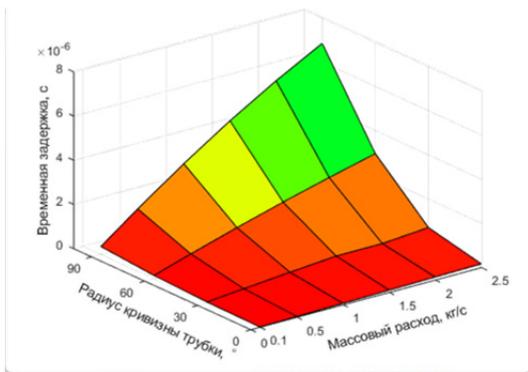


Рисунок 10 – Зависимость изменения временной задержки от радиуса кривизны трубки от 0 до 90°

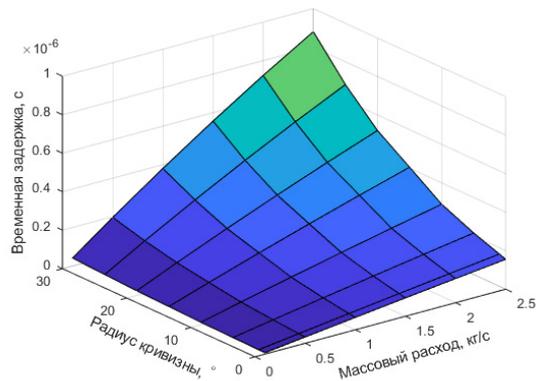


Рисунок 11 – Зависимость изменения временной задержки от радиуса кривизны трубки от 0 до 30°

Далее было выполнено моделирование расходомерной трубки в процессе ее опарафинивания с толщиной слоя парафина от 0,1 до 1 мм и определены временные задержки и собственные частоты в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

Выявлена линейная зависимость между толщиной слоя парафина и величиной временной задержки (рисунок 12), что обусловлено сокращением эффективного диаметра расходомерной трубки и уменьшением количества жидкости, участвующей в создании силы Кориолиса. Помимо изменения временных задержек, наличие парафиновых отложений приводит и к изменению собственных частот колебания расходомерной трубки, вызванному наличием дополнительной массы. На рисунке 13 представлены изменения первой собственной частоты колебаний в зависимости от толщины парафинового слоя в трубке моделируемой системы.

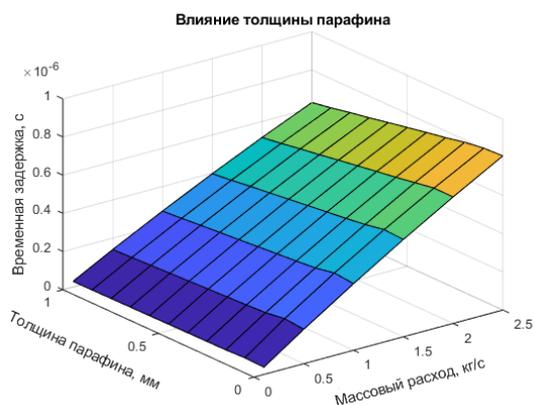


Рисунок 12 – Влияние толщины отложений на временную задержку

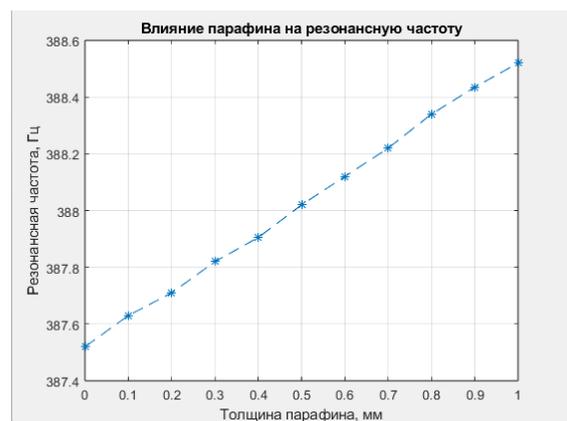


Рисунок 13 – Влияние толщины отложений на собственную частоту системы

Видно, что толщина парафиновых отложений вносит определенный вклад в показатели собственной частоты. На рисунке 14 приведено сравнение временных задержек в системе с парафином толщиной 1 мм и без него.

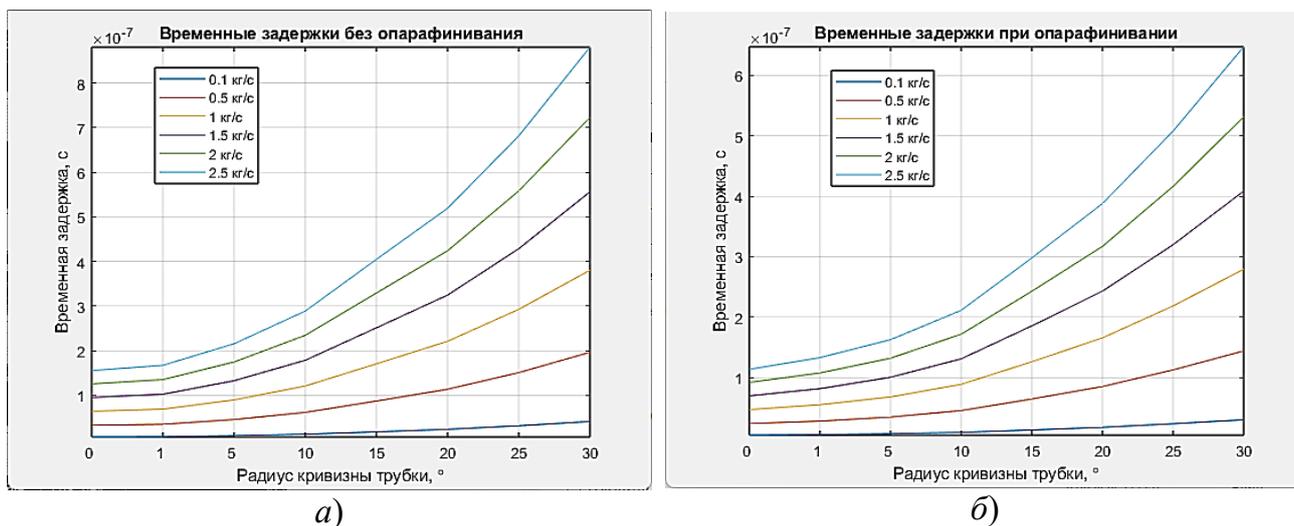


Рисунок 14 – Временная задержка в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость» в зависимости от радиуса кривизны трубки:
a – без парафина; *б* – с парафином толщиной 1 мм

Дальнейший анализ показал, что величины абсолютной и относительной погрешностей измерения массового расхода меняются неравномерно с изменениями временной задержки для различных радиусов кривизны расходомерной трубки (рисунки 15, 16). Это обусловлено тем, что трубки с малыми радиусами кривизны обладают большей жесткостью и наличие парафиновых отложений меньше влияет на изменение временных задержек сигнала.

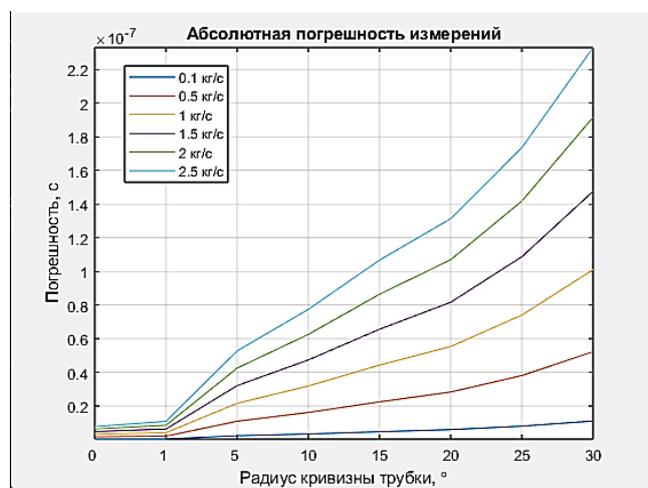


Рисунок 15 – Зависимость абсолютной погрешности измерений от радиуса кривизны

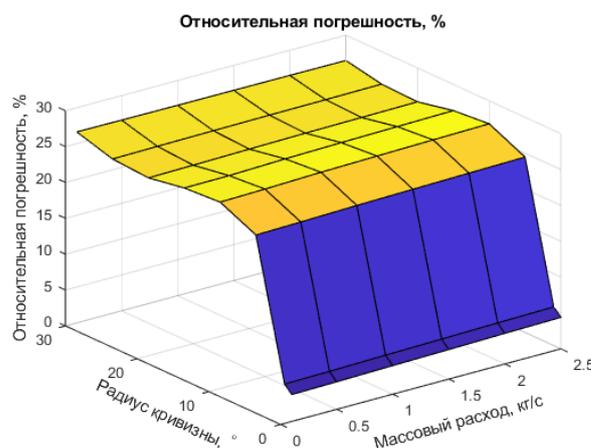


Рисунок 16 – Зависимость относительной погрешности измерений от радиуса кривизны трубки и массового расхода

Наличие парафиновых отложений толщиной в 1 мм (что составляет 12,5 % от площади поперечного сечения трубки) вызывает отклонения в показателях массового расхода, достигающих 26,5 %.

Влияние силы Кориолиса приводит к неравномерности давления по осям симметрии поперечного сечения расходомерной трубки (рисунок 17). Давление служит критерием, влияющим на скорость отложения парафинов.

Таким образом, разность давления по осям приводит к возникновению неравномерных парафиновых отложений.

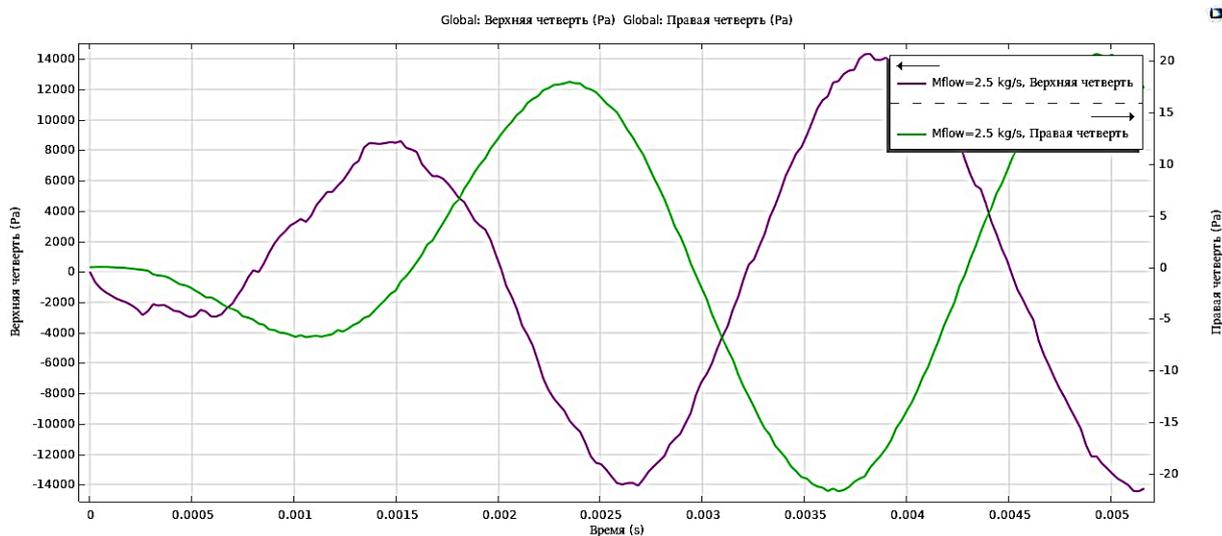


Рисунок 17 – Распределение давления по четвертям расходомерной трубки

Для оценки влияния неравномерности парафиновых отложений на погрешность определения массового расхода было проведено исследование на модели U-образной трубки с радиусом кривизны 30° . Масса парафина была одинаковой, менялась лишь форма отложений от круглой до эллипсной (см. рисунок 5) с разницей между диагоналями эллипса от 1 до 5 % (рисунок 18).

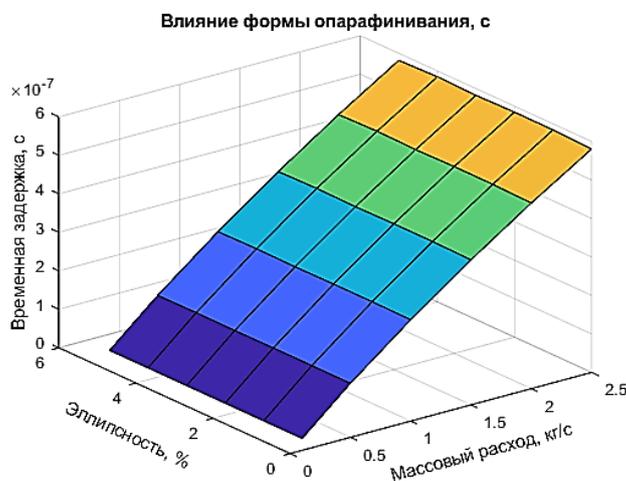


Рисунок 18 – Зависимость временной задержки от эллипсности отложений с массовым расходом тока от 0,1 до 2,5 кг/с

Проведенные вычислительные эксперименты показали, что относительная погрешность при определении временной задержки опарафиненной трубки достигает 0,867 % при 5 % эллипсности отложений и массовом расходе 2,5 кг/с. На рисунке 19 представлены зависимости влияния неравномерности (эллипсности) на абсолютную и относительную погрешности измерений.

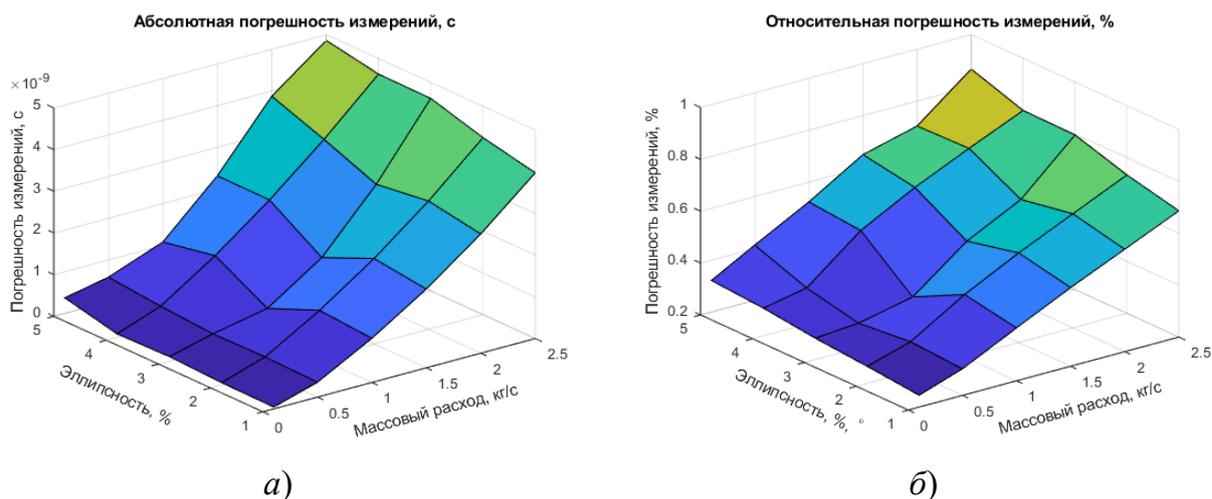


Рисунок 19 – Зависимости абсолютной (а) и относительной (б) погрешности измерений опарафиненной трубки от эллипсности отложений с массовым расходом потока от 0,1 до 2,5 кг/с

Таким образом, в результате экспериментов выявлены зависимости, демонстрирующие влияние формы парафиновых отложений при условии неизменности их массы на определение таких параметров массового расхода, как временная задержка и собственная частота системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость». На основе этого сформулированы практические рекомендации для нефтегазовой отрасли.

В приложениях приведены графики зависимостей временной задержки от толщины и формы парафиновых отложений, свидетельства о регистрации программ и программных комплексов для ЭВМ, акты о внедрении.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе рассматривалась и решалась актуальная задача учета влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрии на точность измерения параметров массового расхода высокопарафинистых нефтей. Комплексное исследование данной научной и технической задачи проводилось с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента. Реализованы методика численного моделирования и алгоритмы в виде комплекса проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента. В процессе выполнения работы получены следующие результаты:

1. Предложена модификация метода математического моделирования опарафинивания трубопроводов, отличающаяся учетом неравномерного гидродинамического давления по сечению расходомерной трубки, вызванного наличием силы Кориолиса в протекающей жидкости, что позволило спрогнозировать неравномерную форму парафиновых отложений на внутренней поверхности расходомерной трубки.

2. Предложена методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», реализованная в виде совокупности алгоритмов, с возможностью автоматического перестроения геометрии расходомерной трубки в зависимости от значения радиуса кривизны. В отличие

от существующих методик, где парафиновые отложения учитывают в качестве добавленной массы трубки, в данной методике учитывается сопряжение между трубкой и парафиновыми отложениями, позволяющее передавать колебания от опарафиненной трубки к жидкости и получать ответные воздействия, вызванные силой Кориолиса. Это позволило определить параметры массового расхода с учетом совокупного изменения характеристик потока жидкости, толщины и формы парафиновых отложений, конфигурации расходомерной трубки, что повышает точность и достоверность моделирования процесса опарафинивания в кориолисовых расходомерах.

3. Разработан вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», являющийся основой взаимодействия программ комплекса, отличающийся применением спрогнозированной формы парафиновых отложений, для расчета и визуализации полученных параметров массового расхода в зависимости от скорости потока, геометрии расходомерной трубки, толщины и формы парафиновых отложений. Это позволило упростить работу с интерфейсом прикладной программы для численного моделирования и сократить временные затраты до 20 % на обработку результатов вычислений.

4. Разработан и протестирован комплекс программ на основе разработанных методики и алгоритмов для проведения вычислительных экспериментов и решения задачи оценки влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрической конфигурации на точность измерения параметров массового расхода при различных характеристиках измеряемой жидкости.

Выявлено, что наличие парафиновых отложений толщиной 1 мм вызывает отклонения в показателях массового расхода до 26,5 %.

5. В результате вычислительных экспериментов с применением разработанного комплекса программ получены зависимости в виде совокупного изменения параметров массового расхода при различных профилях сечения отложений парафина. В этих зависимостях учтено влияние формы парафиновых отложений от круглой до эллипсной (с разницей между диагоналями эллипса от 1 до 5 %) на точность измерения временной задержки и собственной частоты системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость». Выявлено, что чувствительность расходомерной трубки с радиусом кривизны 30° сопоставима с трубками, имеющими радиус кривизны от 60 до 90° , при этом данная форма менее подвержена опарафиниванию вследствие меньшего изгиба, что в настоящее время не учитывается при проектировании приборов учета данного вида. Установлено, что учет неравномерности опарафинивания расходомерной трубки может снизить относительную погрешность при определении массового расхода нефти на 0,867 %, что с учетом существующих объемов ее перекачивания (до 8 млн т в год) составляет до 70 000 т в год.

Полученные результаты позволили сформулировать практические рекомендации для нефтегазовой отрасли по снижению погрешности измерения кориолисова расходомера при измерении массового расхода высокопарафинистых нефтей. Результаты исследования могут быть использованы при моделировании

и проектировании приборов учета массового расхода нефти, а также при создании или совершенствовании соответствующих программных продуктов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, по заявленной специальности

1. Гудкова, Е. А. Алгоритмы для проведения компьютерного моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера и обработки его результатов / Е. А. Гудкова, К. Р. Таранцева // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2024. – Т. 12, № 2 (45). – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1560>

2. Гудкова, Е. А. Разработка программного комплекса для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2024. – № 2.

3. Гудкова, Е. А. Анализ и документирование требований для программного комплекса по проведению вычислительных экспериментов и численному исследованию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера // Моделирование и анализ данных. – 2024. – Т. 14, № 2. – С. 140–151. doi: <https://doi.org/10.17759/mda.2024140209>

4. Гудкова, Е. А. Сравнительный анализ численных и аналитических методов моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» в кориолисовых расходомерах / Е. А. Гудкова, К. Р. Таранцева, М. Ю. Михеев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11, № 3 (59). – С. 57–63. – doi: 10.46548/21vek-2022-1159-0009

5. Гудкова, Е. А. Анализ критериев, влияющих на точность измерения массового расхода жидкости / Е. А. Гудкова, К. Р. Таранцева, М. Ю. Михеев // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2022. – Т. 11, № 2 (58). – С. 49–54. – doi: 10.46548/21vek-2022-1158-0008

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS

6. Гудкова, Е. А. Исследование численными методами влияния опарафинивания кориолисова расходомера на точность измерения массового расхода нефти / Е. А. Гудкова, К. Р. Таранцева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2024. – № 9.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, по смежным специальностям

7. Гудкова, Е. А. Информационно-структурные модели системы сбора и обработки данных с кориолисова расходомера инерционного типа / М. Ю. Михеев, Е. А. Гудкова, А. А. Лепешев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 1. – С. 43–50.

Другие публикации автора по теме диссертации

8. Гудкова, Е. А. Численное моделирование гидромеханического взаимодействия жидкости и кориолисова расходомера / Е. А. Гудкова, К. Р. Таранцева // Интенсификация теплообменных процессов, промышленная безопасность и экология : материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции (Казань, 28–30 мая 2024 г.). – Казань : Конверс, 2024. – С. 404–408.

9. Гудкова, Е. А. Верификация численной модели системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера / Е. А. Гудкова // Перспективные научные исследования: теория, методология и практика применения : сборник статей Международной научной конференции (Санкт-Петербург, 14 апреля 2024 г.). – Санкт-Петербург : МИПИ им. Ломоносова, 2024. – С. 19–21. doi: 10.58351/240413.2024.11.39.002

10. Гудкова, Е. А. Анализ ошибок измерения, вызванных опарафиниванием расходомерной трубки кориолисова расходомера / Е. А. Гудкова // Энергосбережение и инновационные технологии в топливноэнергетическом комплексе : материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции (Тюмень, 20–22 декабря 2023 г.). – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2023. – С. 200–204.

11. Гудкова, Е. А. Проблемы измерения многофазных потоков в кориолисовых расходомерах / Е. А. Гудкова // Образование. Наука. Производство : материалы XV Международного молодежного форума (Белгород, 23–24 октября 2023 г.). – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2023. – С. 40–44.

12. Гудкова, Е. А. / Анализ собственных частот расходомерной трубки прямоотрубного кориолисова расходомера // Проблемы внедрения результатов инновационных исследований и пути их решения : сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции (г. Омск, 27 мая 2023 г.). – Стерлитамак : АМИ, 2023. – С. 149–153.

13. Гудкова, Е. А. Численное моделирование системы «расходомерная трубка – жидкость» в кориолисовых расходомерах / Е. А. Гудкова // Образование. Наука. Производство : материалы XIV Международного молодежного форума (Белгород, 13–14 октября 2022 г.). – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2022. – С. 41–44.

14. Гудкова, Е. А. Анализ способов измерения расхода сред в нефтехимии / Е. А. Гудкова, К. Р. Таранцева, М. В. Уланова // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований : сборник научных трудов всероссийской научно-практической конференции. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2021. – С. 178–180.

15. Гудкова, Е. А. Сравнительная характеристика и способы повышения точности расходомеров для многофазных сред / Е. А. Гудкова, К. Р. Таранцева, А. А. Романова // Актуальные вопросы современной науки: теория и практика научных исследований : сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. технол. ун-та, 2021. – С. 138–140.

16. Гудкова, Е. А. Имитационное моделирование кориолисова расходомера в среде MATLAB/SIMULINK / Е. Ю. Макарова, Е. А. Гудкова // Современные информационные технологии. – 2018. – № 27. – С. 17–22.

17. Гудкова, Е. А. Обработка информации в кориолисовых расходомерах / Е. А. Гудкова, Е. Ю. Макарова // Методы и средства измерений в системах контроля и управления : сборник статей Международной конференции (Пенза, 26–28 ноября 2016 г.) / под ред. Т. В. Жашковой. – Пенза : Пензенский государственный технологический университет, 2016. – С. 154–163.

Объекты интеллектуальной собственности

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024662511. Программа для обработки и визуализации данных численного моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера при различных параметрах опарафинивания / Гудкова Е. А., Таранцева К. Р. Заявка № 2024661226 от 21.05.2024 ; опубли. 29.05.2024.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024619073. Программный комплекс по параметрическому моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера для исследования процесса ее опарафинивания / Гудкова Е. А., Таранцева К. Р. Заявка № 2024616688 от 02.04.2024 ; опубли. 18.04.2024.

20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662407. Расчет временной задержки сигналов датчиков, получаемых в результате численного моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера / Гудкова Е. А., Таранцева К. Р., Никифоров А. А. Заявка № 2023661525 от 05.06.2023 ; опубли. 07.06.2023.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613114. Расчет параметров упругих элементов при проектировании кориолисовых расходомеров / Гудков К. В., Гудкова Е. А. ; правообладатель ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный технологический университет». Заявка № 2015610166 от 12.01.2015 ; опубли. 05.03.2015.

Научное издание

ГУДКОВА Екатерина Александровна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ОПАРАФИНИВАНИЯ РАСХОДОМЕРНОЙ
ТРУБКИ КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ (технические науки)

Редактор *А. Г. Темникова*
Технический редактор *Н. В. Иванова*
Компьютерная верстка *Н. В. Ивановой*

Подписано в печать 20.09.2024. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,39. Заказ № 389. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел.: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru