

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный технологический университет»

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)

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Таранцева Клара Рустемовна

Пенза – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ.....	14
1.1. Анализ физической природы моделируемого явления и существующих моделей	14
1.1.1. Физическая природа моделируемого явления	14
1.1.2. Свойства объекта.....	16
1.1.3. Физические принципы работы кориолисова расходомера.....	22
1.2. Анализ факторов, влияющих на точность измерения параметров массового расхода жидкости в кориолисовом расходомере	25
1.2.1. Влияние пульсации потока	26
1.2.2. Влияние перепада температур жидкости и окружающей среды	28
1.2.3. Влияние гидродинамических режимов течения жидкости	30
1.2.4. Влияние опарафинивания расходомерной трубки	33
1.2.5. Влияние давления жидкости.....	36
1.2.6. Влияние геометрии расходомерной трубки на силу Кориолиса.....	38
1.3. Исследование методов математического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость».....	42
1.3.1. Аналитические методы.....	42
1.3.2. Численные методы	43
1.3.3. Подходы к численному решению уравнений математической модели.....	48
1.3.4. Учет мультифизического взаимодействия компонентов системы.....	50
1.4. Синтез математической модели системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» и численные методы решения задачи.....	51
Основные результаты и выводы по главе 1.....	55
Глава 2. МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «РАСХОДОМЕРНАЯ ТРУБКА – ПАРАФИН – ЖИДКОСТЬ».....	58
2.1. Модифицированный метод математического моделирования опарафинивания трубопроводов.....	58

2.2. Методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость».....	60
2.3. Трехмерная модель системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» в <i>COMSOL</i>	64
2.3.1. Исследование собственных частот.....	68
2.3.2. Вычислительная гидродинамика.....	69
2.3.3. Реализация взаимодействия расходомерной трубки и парафина	69
2.3.4. Реализация взаимодействия жидкости и расходомерной трубки с парафином	71
Основные результаты и выводы по главе 2.....	72
Глава 3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОПАРАФИНИВАНИЯ РАСХОДОМЕРНОЙ ТРУБКИ КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА	74
3.1. Вычислительный алгоритм для расчета средней временной задержки сигналов.....	74
3.2. Программный комплекс для моделирования и численного исследования процесса опарафинивания.....	78
Основные результаты и выводы по главе 3.....	86
Глава 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.....	88
4.1. Анализ собственных частот	88
4.2. Моделирование течения жидкости	91
4.3. Моделирование колебаний расходомерной трубки с протекающей жидкостью.....	95
4.4. Исследование геометрии расходомерной трубки.....	97
4.5. Исследование равномерного опарафинивания расходомерной трубки.....	102
4.6. Исследование неравномерного опарафинивания расходомерной трубки.....	107
Основные результаты и выводы по главе 4.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	115
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты исследования толщины парафинового слоя	135

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Результаты исследования неравномерности парафинового слоя	137
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Внедрение результатов диссертационного исследования.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Свидетельства о государственной регистрации	141

ВВЕДЕНИЕ

В связи с уменьшением запасов нефти для компенсации снижения добычи в последние годы разрабатываются месторождения с запасами трудно извлекаемых высокопарафинистых нефтей [1]. 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 [2], доля их на этих месторождениях составляет около 30 % [3]. 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 % [4]. Отложение парафина на стенках расходомерной трубки кориолисового расходомера приводит к сужению ее 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 встроенных 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 является математическое моделирование. Вклад в развитие методов математического моделированием элементов кориолисовых расходомеров внесли многие отечественные ученые (Бескачко В. П., Ибряева О. Л., Лех И. А., Михеев М. Ю., Романов В. А., Салов Д. Д., Семенов А. С., Тараненко П. А., Телегин Д. В., Юрманов В. А., Яушев А. А. и др.) и зарубежные ученые (Bobovnik G., Kutin J., Baker R., Nemp J., Bajsić I., Sultan G., Henry M., Stack C. P. и др.). Однако существует очень ограниченное количество работ, посвященных анализу влияния опарафинивания расходомерных трубок на погрешность измерений (Прахова М. Ю., Краснов А. Н.), 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 данной 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), РНФ № 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 реализацией 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. Результаты работы и разработанный комплекс программ внедрены 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 Международный молодежный форум «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 Минобрнауки России по специальности 1.2.2; 1 статья в издании, индексируемом в SCOPUS; 1 статья в издании, рекомендованном ВАК 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 работы. 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.

Глава 1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

1.1. Анализ физической природы моделируемого явления и существующих моделей

1.1.1. Физическая природа моделируемого явления

Образование парафина на поверхности трубы в процессе перекачивания высокопарафинистой нефти происходит в пристенном слое вследствие его кристаллизации и осаждения. На процесс осаждения парафина влияют перепад температур, давление в трубопроводе, скорость течения нефти, ее обводненность и компонентный состав, вязкость, плотность, гидрофильность внутренней поверхности трубопровода и время его эксплуатации [2, 3].

С уменьшением температуры нефти в пограничном ламинарном слое до температур начала кристаллизации парафина вначале происходит зарождение кристаллов, а затем, по достижению ими критических размеров, выделение из нефти твердых парафинов. Увеличение градиента температур в пограничном слое приводит к увеличению количества осаждаемых парафинистых отложений.

Повышение давления в трубопроводе приводит к повышению температуры начала кристаллизации парафина и ускорению его осаждения на стенках труб. Напротив, с увеличением скорости подачи нефти уменьшается толщина пограничного ламинарного слоя и улучшаются условия для поддержания кристаллов парафина во взвешенном состоянии, препятствующем его осаждению [3].

Увеличение степени обводненности нефти приводит к снижению скорости осаждения парафина вследствие увеличения общей теплоемкости потока и из-за изменения краевого угла смачивания.

От состава нефти зависит ее растворяющая способность по отношению к парафину. Нефти с высоким содержанием углеводородов нафтенового

и ароматического рядов меньше склонны к формированию прочных парафиновых отложений, чем нефти, в составе которых преобладают соединения парафинового ряда [3].

При перекачивании маловязких нефтей с высоким содержанием легких фракций накопление отложений парафина происходит быстрее по сравнению с нефтями большей плотности и вязкости. Связано это с тем, что растворяющая способность нефтей, содержащих больше легких фракций, при одинаковых температурных условиях выше, чем у тяжелых нефтей. Вследствие этого температура начала кристаллизации парафина в них ниже.

Наличие смолисто-асфальтеновых веществ в нефти также оказывает большое влияние на опарафинивание. Присутствие асфальтенов в нефти ускоряет образование парафинистых отложений. Асфальтены не только сами выпадают в осадки, но и являются центрами соосаждения парафинов, приводя к образованию плотных отложений на внутренней поверхности труб.

На прочность сцепления парафина с поверхностью влияют свойства поверхности. Гидрофильные материалы (с высокой полярностью) обладают большим краевым углом смачиваемости и слабой адгезией к парафинам. Шероховатость поверхности оказывает влияние лишь на начальной стадии опарафинивания. По истечению времени, с образованием смоло-парафинистой прослойки на поверхности трубы, скорость накопления парафина уже не зависит от исходного качества металлической поверхности [3].

С течением времени слой парафина на поверхности трубы увеличивается. Это приводит к уменьшению теплопроводности металлической стенки и, как следствие, к уменьшению скорости процесса осаждения парафина из нефти.

Опарафинивание труб приводит к сужению внутреннего поперечного сечения трубопроводов и к увеличению гидравлического сопротивления, что приводит к дополнительным энергетическим затратам на перекачивание нефти. Кроме того, данный процесс может оказывать влияние на точность показаний приборов учета массового расхода нефти и вносить дополнительные погрешности в их показания, что влечет за собой большие материальные издержки. В связи

с этим необходимо провести моделирование и численное исследование процесса опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера.

1.1.2. Свойства объекта

При движении нефти по трубе в ней возникают силы внутреннего трения между соседними слоями жидкости, перемещающимися друг относительно друга, вызванные вязкостной природой [5–8]. Касательная сила T , которую необходимо приложить для сдвига, тем больше, чем больше градиент скорости $\frac{dw}{dn}$, характеризующий изменение скорости, приходящееся на единицу расстояния по нормали между слоями. Сила T пропорциональна площади соприкосновения S слоев, тогда $T = \mu S \frac{dw}{dn}$, где μ – коэффициент пропорциональности [6].

Сила сопротивления, возникающая внутри жидкости, равна приложенной силе T и направлена в противоположную сторону. Отношение этой силы к поверхности соприкосновения слоев представляет напряжение сдвига $\tau_w = -\mu \frac{dw}{dn}$. Это уравнение выражает закон внутреннего трения Ньютона, согласно которому напряжение внутреннего трения, возникающее между слоями жидкости при ее течении, прямо пропорционально градиенту скорости [6].

Коэффициент пропорциональности μ в уравнениях представляет вязкость [Па·с]. Кинематическая вязкость (ν) – отношение вязкости динамической к плотности жидкости $\nu = \mu / \rho$ [м²/с]. Вязкость проявляется только при движении, и чем она выше, тем больше требуется энергии на перемещение жидкости [6].

Линейный закон трения Ньютона справедлив лишь для жидкостей ньютоновского типа. Течение ньютоновских жидкостей начинается при каких угодно малых напряжениях сдвига, пропорциональных скорости сдвига, поэтому динамическая вязкость для них характеризуется одной постоянной величиной. Жидкости, у которых эти характеристики непропорциональны друг другу, называют неньютоновскими.

При протекании ньютоновских жидкостей по трубе повышенное напряжение сдвига у стенок трубы тормозит скорость течения в пристенном слое. Это приводит к ускорению течения жидкости в центре трубы и замедлению течения жидкости у стенок трубы. Результирующий профиль скорости является функцией от напряжения сдвига (рисунок 1.1).

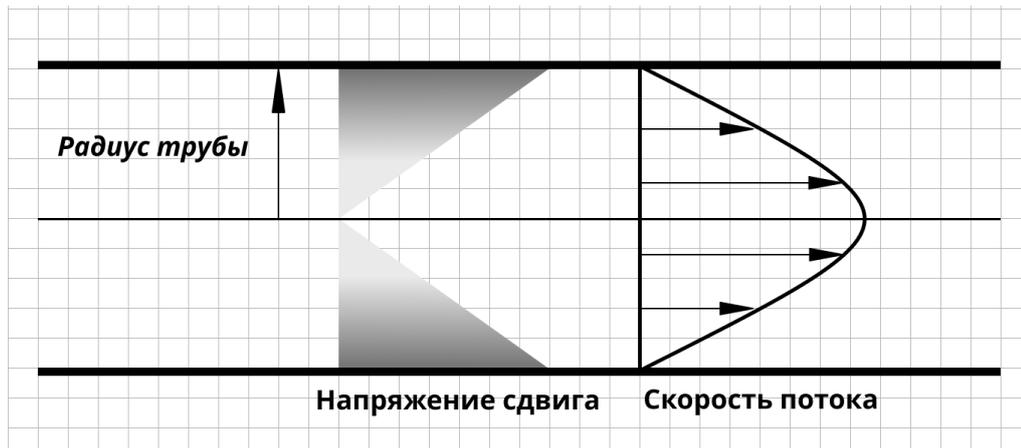


Рисунок 1.1 – Течение ньютоновской жидкости в трубе

Для неньютоновских жидкостей напряжение сдвига влияет не только на скорость, но и на вязкость жидкости. В связи с этим профиль скорости в трубе может стать асимметричным, изменяющимся и непредсказуемым [9].

Высокопарафинистые нефти при температурах ниже температуры кристаллизации, а также аномально вязкие нефти с высоким содержанием асфальтенов, структурированные коллоидные системы, используемые для повышения нефтеотдачи пласта, обладают выраженными реологическими свойствами и относятся к неньютоновским жидкостям [7, 10]. Как коллоидно-дисперсные системы они склонны при определенных условиях к образованию объемных структур с выраженной тиксотропией, т.е. способностью уменьшать вязкость при сдвиговом напряжении. Реологические параметры нефти оцениваются экспериментально по характеру зависимости напряжений сдвига от градиента сдвига [11].

Температура и давление представляют основные факторы, приводящие к резкому изменению реологических свойств нефтей. Изменение таких

параметров, как диаметр трубы и расход, также влияют на величину скорости и, следовательно, на процесс опарафинивания нефти [8].

Скорость частиц жидкости в потоке неодинакова, в расчетах обычно используют не истинные скорости, а среднюю скорость U_{cp} [м/с], представляющую отношение объемного расхода жидкости V [м³/с] к площади поперечного сечения S [м²] потока [6]:

$$U_{cp} = \frac{V}{S}. \quad (1.1)$$

Массовый расход M [кг/с] определяется по формуле [6]:

$$M = \rho U_{cp} S, \quad (1.2)$$

тогда массовый расход жидкости через единицу площади поперечного сечения [кг/(м²с)] равен [6]:

$$W = \rho U_{cp}. \quad (1.3)$$

Если скорости частиц потока и факторы (плотности, температуры, давления и др.) не изменяются во времени в каждой фиксированной точке пространства, через которую проходит жидкость, движение считают установившимся и для каждого сечения потока расходы жидкости постоянны во времени [6], т.е. $\frac{\partial w_x}{\partial t} = 0$, где t – время, с. При неустановившемся потоке факторы, влияющие на движение жидкости, изменяются во времени, $\frac{\partial w_x}{\partial t} \neq 0$ [6].

При движении жидкости скорость ее в общем случае изменяется в пространстве и во времени [6], т.е.:

$$w = f(x, y, z, t),$$

где x, y, z – пространственные координаты; t – время.

Следующее уравнение представляет собой дифференциальное уравнение неразрывности потока для неустановившегося движения сжимаемой жидкости [6]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0. \quad (1.4)$$

В установившемся потоке плотность не изменяется во времени, таким образом, уравнение (1.4) принимает вид [6]:

$$\frac{\partial(\rho w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w_z)}{\partial z} = 0. \quad (1.5)$$

Для капельных жидкостей, которые практически несжимаемы в условиях изотермического потока при скоростях, значительно меньших скорости звука, $p = const$ и, следовательно [6]:

$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0. \quad (1.6)$$

Уравнение (1.6) – дифференциальное уравнение неразрывности потока несжимаемой жидкости. Сумма изменений скорости вдоль осей координат в левой части уравнения (1.6) называется дивергенцией вектора скорости и обозначается через $div w$ [6].

Если рассматривать установившийся поток идеальной жидкости, движущейся без трения, то система уравнений движения примет вид [6]:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{dt} &= - \frac{\partial p}{\partial x} \\ \rho \frac{dw_y}{dt} &= - \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{dw_z}{dt} &= -\rho g - \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\}, \quad (1.7)$$

где субстанциональные производные соответствующих скоростей равны [6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw_x}{dt} &= \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_y}{dt} &= \frac{\partial w_y}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_y}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_z}{dt} &= \frac{\partial w_z}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_z}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z \end{aligned} \right\}. \quad (1.8)$$

Система уравнений (1.7) с учетом (1.8) представляет собой дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера для установившегося потока [6].

При неустановившемся движении скорость жидкости изменяется не только при перемещении частицы потока из одной точки пространства в другую, но и с течением времени в каждой точке [6]. В соответствии с уравнением

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial y} w_y + \frac{\partial u}{\partial z} w_z$$

составляющие ускорения в уравнении (1.7), выражаемые субстанциональными производными для неустановившихся условий, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw_x}{dt} &= \frac{\partial w_x}{\partial t} + \frac{\partial w_x}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_y}{dt} &= \frac{\partial w_y}{\partial t} + \frac{\partial w_y}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_y}{\partial z} w_z \\ \frac{dw_z}{dt} &= \frac{\partial w_z}{\partial t} + \frac{\partial w_z}{\partial x} w_x + \frac{\partial w_z}{\partial y} w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} w_z \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

Система уравнений (1.7) с учетом выражений (1.9) представляет собой дифференциальные уравнения движения идеальной жидкости Эйлера для неустановившегося потока [6].

При движении вязкой жидкости в потоке жидкости, помимо сил давления и массовых сил, действуют также силы трения, и система уравнений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{dw_x}{dt} &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 w_x \\ \rho \frac{dw_y}{dt} &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 w_y \\ \rho \frac{dw_z}{dt} &= \rho F_z - \rho g - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w_x \end{aligned} \right\} \quad (1.10)$$

где соответствующие субстанциональные производные выражены для установившегося и неустановившегося потоков уравнениями (1.7) или (1.9); F – массовые силы [6].

Уравнения (1.10) представляют собой уравнения Навье – Стокса, описывающие движение вязкой капельной жидкости, их можно записать в векторной форме [6]:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (W\nabla)W = F - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \nabla^2 W.$$

Если записать уравнения Навье – Стокса в безразмерном виде, то для двух гидродинамических подобных течений эти уравнения окажутся совершенно идентичными [6]:

$$\frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{u}^* = -\nabla^* p^* + \frac{1}{Re} \nabla^{*2} \mathbf{u}^* + \frac{1}{Fr^2} \hat{g},$$

где $\frac{\rho l U_\infty}{\mu} = Re$ – число Рейнольдса; $\frac{U_\infty^2}{gl} = Fr$ – число Фруда; $\mathbf{r}^* = \frac{\mathbf{r}}{L}$ и $\nabla^* = L\nabla$ – безразмерная переменная длины; $\mathbf{u}^* = \frac{\mathbf{u}}{U}$ – безразмерная переменная скорости; $t^* = \frac{t}{L/U}$ – безразмерная переменная времени; $p^* = \frac{p}{\rho U^2}$ – безразмерная переменная давления для маловязких жидкостей; $p^* = \frac{pL}{\mu U}$ – безразмерная переменная давления для высоковязких жидкостей; L – длина; U – скорость потока.

Для высоковязких жидкостей уравнение Навье – Стокса в безразмерном виде можно записать следующим образом:

$$Re \left(\frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{u}^* \right) = -\nabla^* p^* + \nabla^{*2} \mathbf{u}^*.$$

В предельных случаях, когда режим течения жидкости ламинарный и число $Re \rightarrow 0$ инерцией можно пренебречь, уравнение Навье – Стокса преобразуется к виду

$$Re \frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} = -\nabla^* p^* + \nabla^{*2} \mathbf{u}^*.$$

И, напротив, при турбулентном режиме течения жидкости, когда число $Re \rightarrow \infty$, вязкостью можно пренебречь; уравнение преобразуется к безразмерному уравнению Эйлера [12]:

$$\frac{\partial \mathbf{u}^*}{\partial t^*} + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{u}^* = -\nabla^* p^*.$$

Полное описание движения вязкой жидкости в его наиболее общей форме возможно путем решения уравнений Навье – Стокса совместно с уравнением неразрывности потока. Однако уравнения Навье – Стокса не всегда поддаются аналитическому решению в общем виде, поэтому решения могут быть найдены лишь для некоторых частных случаев.

1.1.3. Физические принципы работы кориолисова расходомера

Ввиду большого различия состава добываемой нефти в зависимости от географического расположения, времени эксплуатации скважины и степени ее разработки не существует единого способа измерения массового расхода, учитывающего все факторы, в том числе опарафинивание, с приемлемой точностью. Существуют различные конструкции массовых расходомеров в зависимости от физических принципов, заложенных в основу измерения. Кориолисовы расходомеры, в отличие от расходомеров других типов (с V -образным конусом, диафрагмой, трубкой Далла, трубкой Вентури и др.), широко используются в нефтяной промышленности из-за их высокой точности и небольшого перепада давлений, который они могут вызывать [13–20].

Основная механическая компонента кориолисова расходомера представлена [21] вибрирующей трубкой (или трубками), зажатой с обоих концов (рисунок 1.2). Трубка обычно имеет [21] U -образную или прямую форму и совершает вынужденные колебания под воздействием источника колебаний. Его компоненты расположены в середине трубки и передают вибрационное воздействие с заданной амплитудой и частотой, в результате чего поддерживается

собственная частота колебаний расходомерной трубки f_1 [25]. Датчики, расположенные равноудалено от центра в левой и правой половинах трубки, измеряют ее колебания.

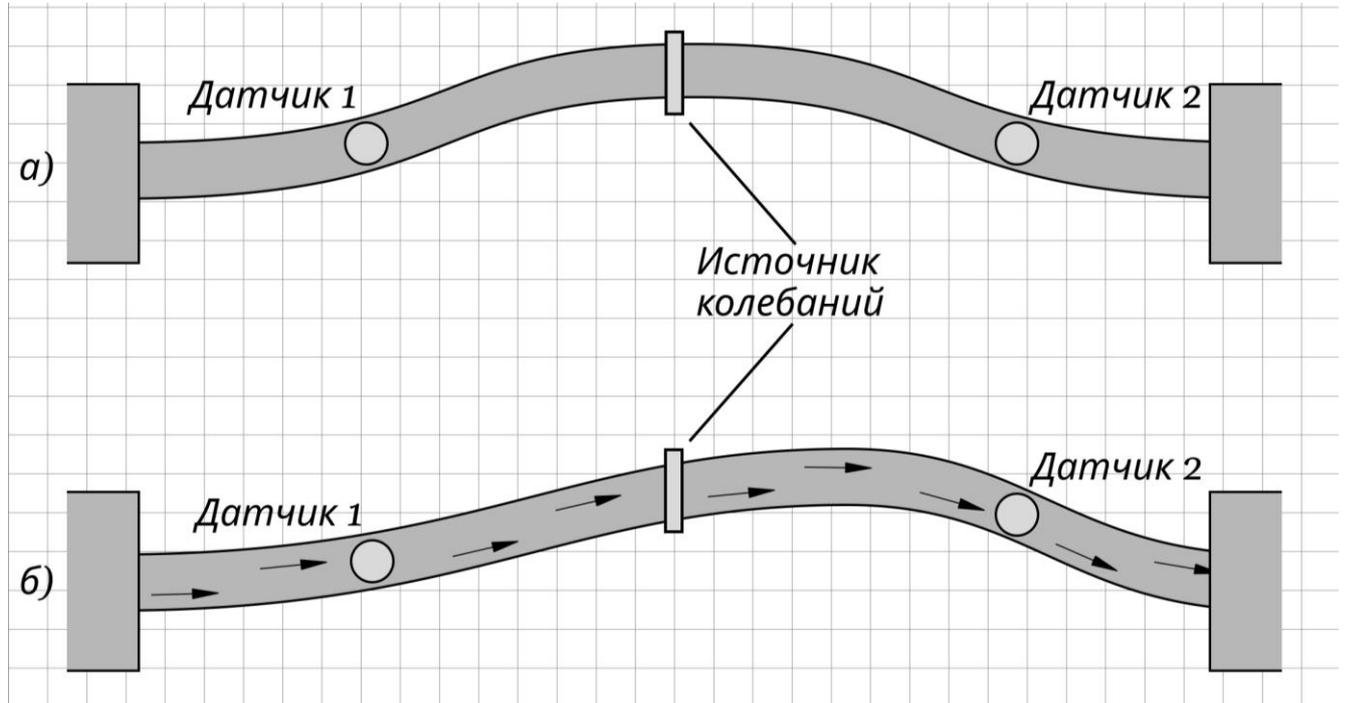


Рисунок 1.2 – Принцип работы кориолисова расходомера

Система «расходомерная трубка – парафин – жидкость» объединяет такие компоненты, как трубка кориолисова расходомера, включающая датчики и источник колебаний, измеряемая жидкость, парафиновые отложения. Без протекания жидкости через трубку оба датчика фиксируют одинаковое отклонение в один и тот же момент времени (рисунок 1.2,а). Как только через расходомерную трубку начинает протекать жидкость, на колебание трубки оказывает воздействие сила Кориолиса, приводящая к асимметричной деформации левого и правого концов расходомерной трубки из-за инерции жидкости (рисунок 1.2,а). Деформация приводит к временной задержке Δt (как показано на рисунке 1.3) или фазовой задержке $\Delta\varphi$ между сигналами двух датчиков [25].

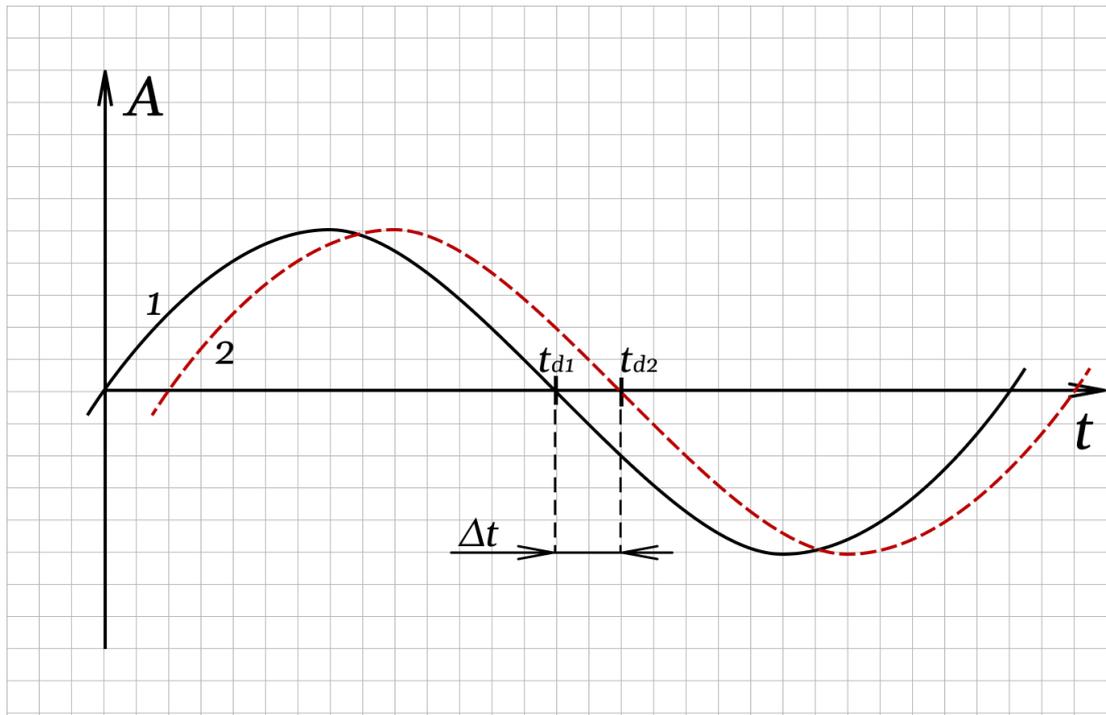


Рисунок 1.3 – Временное представление сигналов датчиков кориолисова расходомера при протекании жидкости, где по оси абсцисс – время t , а по оси ординат – амплитуда A

При этом массовый расход определяют уравнением (1.11) [21]. Подробный вывод и описание этого характеристического уравнения кориолисова расходомера было предоставлено Смитом [22]:

$$q_m = K \times (\Delta t - \Delta t_0), \quad (1.11)$$

где K – коэффициент калибровки расхода, связанный с чувствительностью измерения расхода кориолисовыми расходомерами; Δt_0 – временная задержка калибровки нулевого расхода [21]; $\Delta t = t_{d1} - t_{d2}$ – временная задержка сигналов 1 и 2 датчиков. В идеальных условиях K и Δt_0 постоянны, а массовый расход линейно пропорционален временной задержке Δt и не зависит от других параметров потока [25]. К основным параметрам массового расхода относят временную задержку Δt и собственную частоту системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

1.2. Анализ факторов, влияющих на точность измерения параметров массового расхода жидкости в кориолисовом расходомере

На точность измерения массового расхода жидкости кориолисовыми расходомерами влияет большое количество факторов [21, 23, 24], обусловленных условиями проведения процесса измерения (пульсации потока, изменение фазового состава жидкости и др.), особенностями конструкции и сборки (асимметричное демпфирование, условия монтажа и т.д.), внешними условиями эксплуатации (перепады давления, разница температур жидкости и окружающей среды и др.) [25].

Основными факторами, вызывающими ошибки при использовании кориолисовых расходомеров для измерения газосодержащих сред, считают пузырьковый и резонансный эффекты [26–31]. Пузырьковый эффект вызывает относительное движение газа и жидкости, что приводит к вторичному обтеканию пузырьков, обычно противоположному направлению вибрации трубы [27, 28]. Возникающие потери инерции жидкости приводят к недооценке фактического массового расхода. Резонансный эффект приводит к резкому снижению скорости звука в жидкости и увеличивает сжимаемость многофазной жидкости из-за наличия небольшого количества газа [26]. Если частота возбуждения расходомерной трубки близка к резонансной частоте жидкости, возникает резонансное движение. В этом случае скорость жидкости будет выше, чем у трубки, и жидкость будет создавать, большую, чем обычно, силу, что приведет к положительным ошибкам в плотности и массовом расходе.

Проблеме учета и компенсации газовой составляющей в потоке жидкости уделено достаточно внимания. Разработаны методика обработки сигналов, основанная на полосовых и режекторных фильтрах [32], метод матричных пучков [33], многочастотная технология [34], алгоритм Прони [35], метод «цифровых двойников» [36] и др., позволяющие учитывать влияние газосодержания в ходе работы кориолисовых расходомеров. Также проблему газосодержания в потоке решают методами нейросетевой обработки результатов измерений с последующей компенсацией ошибок [37].

Помимо вышеперечисленных факторов, в процессе перекачивания нефти происходит абразивное повреждение внутренней поверхности расходомерных трубок и образуются различные отложения. Абразивные повреждения относятся к неисправимым поломкам, а при детектировании отложений в расходомерной трубке останавливается производственный процесс, что приводит к простоям и негативно сказывается на экономической составляющей [38].

В рамках диссертационного исследования рассмотрены факторы, ухудшающие метрологические характеристики кориолисова расходомера и связанные с опарафиниванием внутренней поверхности расходомерной трубки, такие как пульсации потока, разницы температур рабочей жидкости и окружающей среды, давление жидкости, гидродинамические режимы потока, определяемые числом Рейнольдса и многофазность потока жидкости [25]. Ниже проанализировано их влияние на точность измерения параметров массового расхода и предложены решения для компенсации их негативного воздействия при моделировании.

1.2.1. Влияние пульсации потока

При перекачивании жидкости возникают многочисленные источники ее пульсации, вызванные работой различного оборудования (насосами, компрессорами и др.), приводящие к резонансным колебаниям труб и трубопроводной арматуры [23, 39, 40–43]

Теоретические исследования вибраций трубы, транспортирующей пульсирующий поток жидкости, описаны М. Paidoussis в работе [40]. Авторы [23, 39, 41–43] показали, что пульсации потока вызывают ошибки в измерениях среднего расхода жидкости. Аналитическое решение, позволяющее учесть влияние пульсаций потока на массовый расход жидкости, представлено в работах [25, 41].

А. Svete и соавторы [23] теоретически и экспериментально исследовали влияние пульсации потока на точность измерения параметров массового расхода. Анализ данных ряда коммерчески доступных расходомеров с различными

геометрическими формами показал, что пульсации потока влияют на работу расходомера в результате биения при его приводном движении. Экспериментальные исследования подтвердили, что в результате пульсации потока возникают не только вышеуказанные вибрации, но и колебания расходомерной трубки путем непосредственного возбуждения на частоте пульсаций. Результаты проверки [23] точности кориолисовых расходомеров при наличии пульсаций потока показали, что даже при относительно одинаковых индуцированных пульсациях потока средняя погрешность измерения массового расхода может значительно отличаться от одной модели расходомера к другой. Эта разница обусловлена различиями алгоритмов определения разности фаз между сигналами датчиков и методов коррекции поправочных коэффициентов у различных производителей расходомеров, которые представляют коммерческую тайну [25].

Установлено [41–43], что кориолисовы расходомеры дают ошибочные показания массового расхода для пульсаций потока на частоте, совпадающей с собственной частотой расходомера f_1 , и на частоте, представляющей собой сумму и разность частоты пульсаций (f_p) и собственной частоты расходомера – $f_p \pm f_1$, независимо от конструкции расходомера [41]. Фильтрация сигналов позволяет уменьшить или устранить эту проблему, однако она неэффективна в случае, если частота пульсации f_p приближена к собственной частоте расходомера f_1 . Совпадение частот представляет серьезную проблему для производителей расходомеров, поскольку увеличение собственных частот расходомерной трубки для избегания влияний пульсации по своей сути требует повышения жесткости трубки [23, 25].

Результаты исследований [23] показали, что доминирующей причиной погрешностей кориолисовых расходомеров из-за пульсаций потока является возбуждение дополнительных вибрационных движений расходомерной трубки на частоте, соответствующей следующей более высокой моде колебаний трубки f_2 (для большинства конструкций данных расходомеров частота возбуждения является основной собственной частотой) непосредственно или в результате

эффекта биений. В работе [23] рассмотрены ошибки калибровки кориолисовых расходомеров из-за пульсаций потока с частотами f_2 и $f_2 \pm f_1$ [25].

В работах [41–43] предложены методы для определения разности фаз между сигналами датчиков кориолисовых расходомеров, позволяющие устранить влияние всех частотных составляющих, кроме близких к собственной частоте f_1 .

N. Furuichi и соавторы [39] провели сравнительный анализ чувствительности кориолисовых, вихревых, турбинных, ультразвуковых, электромагнитных расходомеров к переменному расходу жидкости. Исследована реакция на внезапное повышение и резкое падение скорости потока, на частоту и амплитуду пульсации потока, оценено среднее значение расхода для различных расходомеров. Выявлено, что отклонение, вызванное пульсирующим потоком (как с низкой, так и с высокой частотой пульсации), у кориолисовых расходомеров намного меньше, чем у других испытанных расходомеров [39], что дает возможность использовать его в качестве эталонной системы измерения расхода [25].

1.2.2. Влияние перепада температур жидкости и окружающей среды

При изменениях температур окружающей среды и измеряемой жидкости, а также при их резком перепаде, возможны ошибки кориолисовых расходомеров в расчетной плотности и определении массового расхода. Для того чтобы не допустить ошибок в определении массового расхода и расчетной плотности, производители расходомеров устанавливают на расходомерной трубке датчик температуры. На основе значений измеряемой температуры вносятся корректировки в вычисляемые данные плотности и массового расхода рабочей жидкости. Также осуществляется настройка частоты колебаний в соответствии с изменением плотности для поддержания собственной частоты расходомерной трубки [25].

Модель, разработанная F. Costa и соавторами [44], позволяет скорректировать данные, измеренные кориолисовым расходомером, для учета

влияния изменения температуры окружающей среды. Исследовались потоки с массовым расходом от 1 до 15 кг/с в диапазоне температур от 12 до 45 °С. Данные расчета согласуются с экспериментальными в пределах $\pm 0,08$ %. Если пренебречь модулем сдвига (в форме коэффициента Пуассона), погрешность измерения массового расхода по предложенной модели составляет до 0,24 %.

М. MacDonald и соавторы [45] установили зависимость погрешности измерения кориолисовым расходомером от температуры в диапазоне от минус 40 до плюс 40 °С. Установлено, что, если температура расходомера сильно отличается от температуры поступающей среды, ошибки могут составлять до 15 % даже при низких расходах жидкости (до 0,5 кг/мин).

Поскольку температура жидкости, поступающей в кориолисов расходомер, определяется с помощью датчика температуры, закрепленного на внешней стенке расходомерной трубки, значение температуры, выдаваемое преобразователем расхода кориолисова расходомера, основано на измерении температуры стенки трубки [25].

Исследования [46] показали, что температура жидкости согласно таким показаниям увеличилась с 19 до 25,5 °С, в то время как фактически температура жидкости увеличилась только с 19 до 21,5 °С. Временная задержка, в течение которой наблюдался дрейф из-за повышения температуры окружающего воздуха, составила около 15 мин. Результаты исследований G. Lindsay и соавторов [47] подтвердили ошибки кориолисова расходомера при определении расчетной плотности, вызванные разницей температуры окружающего воздуха и рабочей среды. По мере увеличения перепада температур между рабочей жидкостью и температурой окружающего воздуха погрешность возрастала. Это указывает на то, что в представленных моделях температурной компенсации присутствуют ограничения, вызывающие ошибки измерения в полевых условиях [25].

Таким образом, в измерительных системах с изменяющимися свойствами протекающей жидкости необходимо, чтобы расходомер динамически компенсировал эти влияния без ручного вмешательства. Для этого необходимо соответствующее программное обеспечение.

1.2.3. Влияние гидродинамических режимов течения жидкости

Работа кориолисовых расходомеров зависит от гидродинамики и структуры потока, протекающего по расходомерной трубке. Гидродинамический режим описывается критерием Рейнольдса (Re), который характеризует отношение сил инерции к силам вязкости в потоке жидкости. Соответственно потоки жидкости можно описать как находящиеся в одном из трех состояний: турбулентном ($Re > 10000$), ламинарном ($Re < 2300$) или переходном ($2300 < Re < 10000$).

Сужение диаметра расходомерной трубки и применение конструкций с различной формой трубок и степенью их шероховатости может вызвать возникновение вихрей (вторичных потоков жидкости) даже при малых значениях чисел Рейнольдса. Так, в наиболее распространенных расходомерах [21] со средними скоростями потока существуют ограничения, связанные с возникновением силы Кориолиса при ламинарном течении жидкости. В ламинарном режиме создается вторичная осциллирующая поперечная сила, и часть силы Кориолиса тратится на преодоление этой вторичной силы, в результате вносится меньший вклад в создание фазового сдвига (т.е. запаздывания по времени) [48]. Следовательно, показания кориолисова расходомера оказываются ниже фактического массового расхода. С увеличением числа Рейнольдса толщина сдвигового слоя экспоненциально уменьшается и отношение силы сдвига к силе Кориолиса становится пренебрежимо малым [25].

Число Рейнольдса в расходомерной трубке рассчитывается как: $Re = \frac{4q_m}{n_t \pi \mu d}$, где q_m – массовый расход; n_t – количество расходомерных трубок; μ – динамическая вязкость; d – внутренний диаметр расходомерной трубки.

Для определения сдвига в отклике сигнала расходомера авторы работы [48] разделили члены скорости, давления и напряжения сдвига в уравнениях Навье – Стокса на стационарную и осциллирующую составляющие, а затем из осциллирующей составляющей получили в дифференциальной форме уравнение баланса импульса для колеблющегося потока.

G. Vobovnik и соавторы [49] изучили влияние профиля скорости на точность работы кориолисова расходомера оболочечного типа с прямой трубкой для

различных соотношений сторон и указали на заметную потерю чувствительности расходомера при низких числах Рейнольдса. Потеря чувствительности для двух разных длин расходомерной трубки ($\alpha = 20$ и 40) составила около 8 % для наименьшего значения массового расхода (при $Re = 3000$).

Авторы [50] подтвердили эту оценку и указали на то, что потеря чувствительности расходомера при низких числах Рейнольдса представляет серьезные недостатки для применения кориолисовых расходомеров оболочечного типа. Чувствительность расходомера $K = \Delta\phi/q_m$ определялась как отношение разности приращением массового расхода $\Delta\phi$ к величине массового расхода q_m ,

$$q_m = \rho_0 \int_0^{R_i} V_{x0}(r) 2\pi r dr = \rho_0 V_0 \pi R_i^2,$$

где V_0 – средняя скорость потока.

Моделирование выполнено для равномерно распределенного профиля скорости $V_{x0}(r) = V_0$, для турбулентного профиля, задаваемого степенным законом:

$$V_{turb}(r) = V_0 \cdot \frac{60}{49} \left(1 - \frac{r}{R_i}\right)^{\frac{1}{7}}, Re \approx 10^5,$$

и, как предельный случай ламинарного профиля, задаваемого параболическим законом:

$$V_{lam}(r) = V_0 \cdot 2 \left(1 - \left(\frac{r}{R_i}\right)^2\right), Re < 2000.$$

Соответствующие значения чувствительности расходомера обозначены K_0 , K_{turb} и K_{lam} соответственно.

В работе [50] чувствительность расходомера к массовому расходу жидкости представлена в виде отношения профиля, полученного для выбранной скорости, к равномерно распределенному профилю:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{\int_0^{R_i} V_{x0}(r) \overline{W}_x(r) r dr}{V_0 \int_0^{R_i} \overline{W}_x(r) r dr}.$$

Анализ размерностей математической модели, используемой для вывода уравнения, показывает, что это отношение является функцией безразмерных характеристик:

$$\frac{K}{K_0} = \frac{K}{K_0} \left(Re, n, \frac{L}{R}, j, \frac{s}{L}, \frac{h}{R}, \frac{\rho}{\rho_0}, v \right).$$

J. Kutin и соавторы [51] выполнили численный расчет двух различных гидродинамических режимов прямой расходомерной трубки. Было обнаружено существенное отклонение в работе расходомера при малых Re . Заметный рост показаний временной задержки, пропорциональной массовому расходу, наблюдался при $Re \approx 1300$, что соответствует ламинарному потоку жидкости.

R. Luo и J. Wu [52] обнаружили, что в случае ламинарного или нестационарного потока ($Re \approx 4000$) отклонение является флуктуирующим, в то время как в турбулентном потоке это отклонение незначительно.

Известно, что жидкости с разной вязкостью могут иметь разный коэффициент демпфирования [48]. В случае, если колебания в структурной области затухают во время движения жидкости, источник колебаний должен возбуждать дополнительную силу, чтобы компенсировать потерю амплитуды, вызванную демпфированием жидкости. Поскольку демпфирование влияет на собственную частоту расходомерной трубки, коэффициент расхода изменяется, и это влияет на массовый расход. Эффект снижения собственной частоты вызван взаимодействием между жидкостью и стенками трубки расходомера. В связи с этим необходимо учитывать демпфирующий эффект.

В работе [53] авторы оценили производительность кориолисовых расходомеров с различными конфигурациями трубок, а также исследовали влияние таких факторов, как местоположения датчиков, амплитуды и частоты колебаний, на временную задержку в режиме ламинарного потока. Выявлено, что наиболее заметный рост показаний временной задержки наблюдался при $Re = 1300$.

Описание движения вязкой жидкости, к которой относятся парафинистые нефти, в его наиболее общей форме возможно путем решения уравнений

Навье – Стокса совместно с уравнением неразрывности потока. Однако уравнения Навье – Стокса не всегда могут быть решены в общем виде, имеются решения только для некоторых частных случаев. В связи с этим необходима разработка методики численного решения данной задачи.

1.2.4. Влияние опарафинивания расходомерной трубки

Перекачивание нефти по трубопроводам, пролегающим под водой, или в условиях низких температур связано с процессом отложения парафинов, асфальтенов и других отложений на стенках трубопроводов. Во время течения высокопарафинистой нефти парафин осаждается на стенках труб при температуре ниже температуры кристаллизации. Этот процесс характерен и для расходомеров, установленных на трубопроводах. Отложения парафинов на стенках расходомерной трубки кориолисового расходомера приводят к сужению проходного сечения, что уменьшает объем жидкости, участвующей в создании кориолисовой силы. Также отложения на трубке выступают как дополнительная масса при расчете собственной частоты системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», что в свою очередь влияет на точность определения массового расхода.

Механизм образования отложений в трубах и скважинах описывают с помощью молекулярной диффузии, сдвиговой дисперсии [54–56], броуновской диффузии [57, 58], гравитационного осаждения [59, 60] и теплопередачи [61, 62]. Наиболее часто в работах описываются модели молекулярной диффузии и теплопередачи [63].

Механизм молекулярной диффузии разработан на основе закона диффузии Фика. Компоненты парафина осаждаются в виде твердых кристаллов в зоне, прилегающей к стенке трубы, когда температура стенки трубы ниже температуры появления парафина. Если объемная температура выше температуры стенки трубы, то вблизи стенки образуется градиент концентрации молекул парафина. Он приводит к диффузии и осаждению молекул парафина на стенке [64, 65].

Модель Matzain основана на механизме молекулярной диффузии, скорость парафинообразования рассчитывается по формуле [66]:

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\Pi_1}{1+\Pi_2} D_{wo} \left[\frac{dC_w}{dT} \frac{dT}{dr} \right],$$

где δ – толщина слоя парафина, нанесенного на стену [м]; D_{wo} – коэффициент диффузии; C_w концентрация парафина в растворе [мас. %], r – радиальное расстояние трубы [м]; T – температура жидкости [°C].

Модель RRR основана на теории молекулярной диффузии и эффекте сдвиговой дисперсии для многофазных потоков. Данная модель неприменима для ламинарных течений жидкости в трубопроводе. Объемная скорость парафиноотложения рассчитывается по формуле [66]:

$$Vol_{wax}^{diff} = \sum_{i=1}^{N_{wax}} \frac{D_{wo,i}(C_{wb,i}-C_{ws,i})S_{wet}M_{wax,i}}{\delta_{lam}\rho_{wax,i}} 2\pi r_s L,$$

где N_{wax} – количество парафиновых компонентов; $D_{wo,i}$ – коэффициент диффузии; $C_{wb,i}$ и $C_{ws,i}$ – молярные концентрации парафинового компонента i , растворенного в масляной фазе в объеме и на поверхности осадка соответственно [моль/м³]; S_{wet} представляет собой смоченную часть окружности; $M_{wax,i}$ – молярная масса парафинового компонента i [кг/моль]; δ_{lam} – толщина подслоя [м]; $\rho_{wax,i}$ – плотность i -го парафинового компонента [кг/м³]; r_s – текущий внутренний радиус трубы [м]; L – длина участка трубы [м].

Модель Heat Analogy позволяет рассчитать скорость массопереноса парафина. Скорость теплопередачи при этом рассчитывается по формуле [66]:

$$\dot{Q} = h(T_{wb} - T_{ws}),$$

где h – коэффициент теплопередачи; T_{wb} – объемная температура жидкости; T_{ws} – температура поверхности отложения.

Скорость массопереноса вычисляется по формуле [66]:

$$\dot{M}_i = m_i(C_{wb,i} - C_{ws,i}),$$

где m_i – коэффициент массоотдачи, зависящий от числа Рейнольдса и Прандтля.

Для моделирования осаждения парафина в трубах используют и коммерческие инструменты. Наиболее часто применяется алгоритм *OLGA* от Schlumberger. Он включает в себя три модели парафиноотложения: модель *RRR*, модель Matzain и модель Heat Analogy [66].

Другая модель LedaFlow от Kongsberg основана на упрощенной одномерной модели осаждения парафина [66, 68]. В ней описываются не стационарные многофазные потоки путем моделирования двух основных процессов, а именно отложения парафина на стенках трубки и его кристаллизация. Для описания этих процессов используется формула, описывающая скорость осаждения растворенных молекул парафина [66, 68]:

$$r = k_r [C - C^{sat}(T)],$$

где k_r – константа скорости осадков, рассчитываемая по формуле

$$k_r = k_d A_p \rho_n = \left(\frac{Sh_p D_{wo}}{d_p} \right) A_p \rho_n,$$

где k_d – коэффициент массопереноса, зависящий от чисел Шервуда, Рейнольдса и Шмидта; A_p – площадь поверхности; ρ_n – плотность числа парафиновых отложений.

К ограничениям данной модели относят отсутствие учета влияния давления на температуру осаждения парафина и отсутствие учета изменения потока из-за образования парафиновых отложений во время проведения моделирования.

Рассмотренные выше механизмы парафиноотложения не учитывают особенностей работы расходомерных трубок кориолисовых расходомеров и относятся только к процессу опарафинивания трубопроводов.

Отечественные авторы также исследовали процессы образования парафиновых отложений применительно к скважинам и пластам и методы борьбы с ними [69–73]. Отдельное внимание уделялось процессам старения парафиновых отложений [74–77], приводящим к изменению плотности и механических свойств отложений и негативно влияющим на точность определения параметров массового расхода нефти.

В работе [78] предпринята попытка определения влияния парафиноотложений на работу U -образного кориолисова расходомера. Однако авторы не учитывали физические свойства расходомерной трубки и тип течения жидкости (ламинарный/турбулентный), парафин представлен в виде дополнительной массы. Несмотря на эти ограничения, авторами выявлена ошибка фазовой задержки, вызванная опарафиниванием расходомерной трубки

В работе [79] проанализировано влияние отложений парафина на точность определения скорости жидкости в турбинном расходомере и показано снижение метрологической надежности из-за появления парафинового слоя в измерительной линии.

Патентный поиск показал, что парафинообразование в расходомерной трубке кориолисова расходомера можно учесть путем выявления дополнительной массы и путем вычисления отношения первых двух собственных частот [80, 81]. Это позволяет обнаружить наличие парафиновых отложений, но не оценить их влияние на точность определения массового расхода.

Таким образом, влияние опарафинивания и учет неравномерности его осаждения в расходомерной трубке под воздействием силы Кориолиса мало исследованы и требуют дальнейшего изучения. В связи с этим необходимо 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.

1.2.5. Влияние давления жидкости

Дополнительные погрешности кориолисова расходомера при определении массового расхода могут возникать из-за изменения давления жидкости в ходе технологического процесса вследствие того, что оно отличается от калибровочного давления.

В работах [24, 82, 83] показано, что перепад давления жидкости может вызывать эффект смещения нуля, т.е. влиять на калибровку нулевого значения. Поскольку взаимосвязь между давлением и нулевым значением кориолисова расходомера сложно идентифицировать, на практике [83] рекомендуется проверка нулевого значения при рабочем давлении, а затем повторное обнуление, если значение не соответствует спецификации. Нулевое значение кориолисова расходомера следует периодически проверять на соответствие техническим характеристикам устройства. Динамический коэффициент компенсации давления следует использовать там, где это возможно. Другой вариант – использовать коэффициент статической компенсации. Однако он не подходит для процессов со значительными колебаниями давления [25].

Анализ распределения давления внутри расходомерной трубки показывает, что оно неравномерно из-за наличия инерционных сил, в частности сил Кориолиса.

G. Bobovnik и соавторы [49] предложили разбить сечение расходомерной трубки на четверти в зависимости от направления действия основных сил. Графическое представление распределения деформаций [49], в частности деформаций, вызванных силами Кориолиса, как имеющих наибольший вклад в неравномерность давления в колеблющейся трубке, представлено на рисунке 1.4.

Наличие неравномерности давления не сказывается на изменении плотности жидкости, но является одним из главных критериев, влияющих на скорость осаждения парафинов. Если для трубопроводов профиль сечения отложений не играет существенной роли, то для колеблющейся на собственной частоте расходомерной трубки с находящимися внутри нее жидкостью и осевшим парафином, неравномерность массы по сечению является критической, так как она вносит изменения в колебательную систему «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

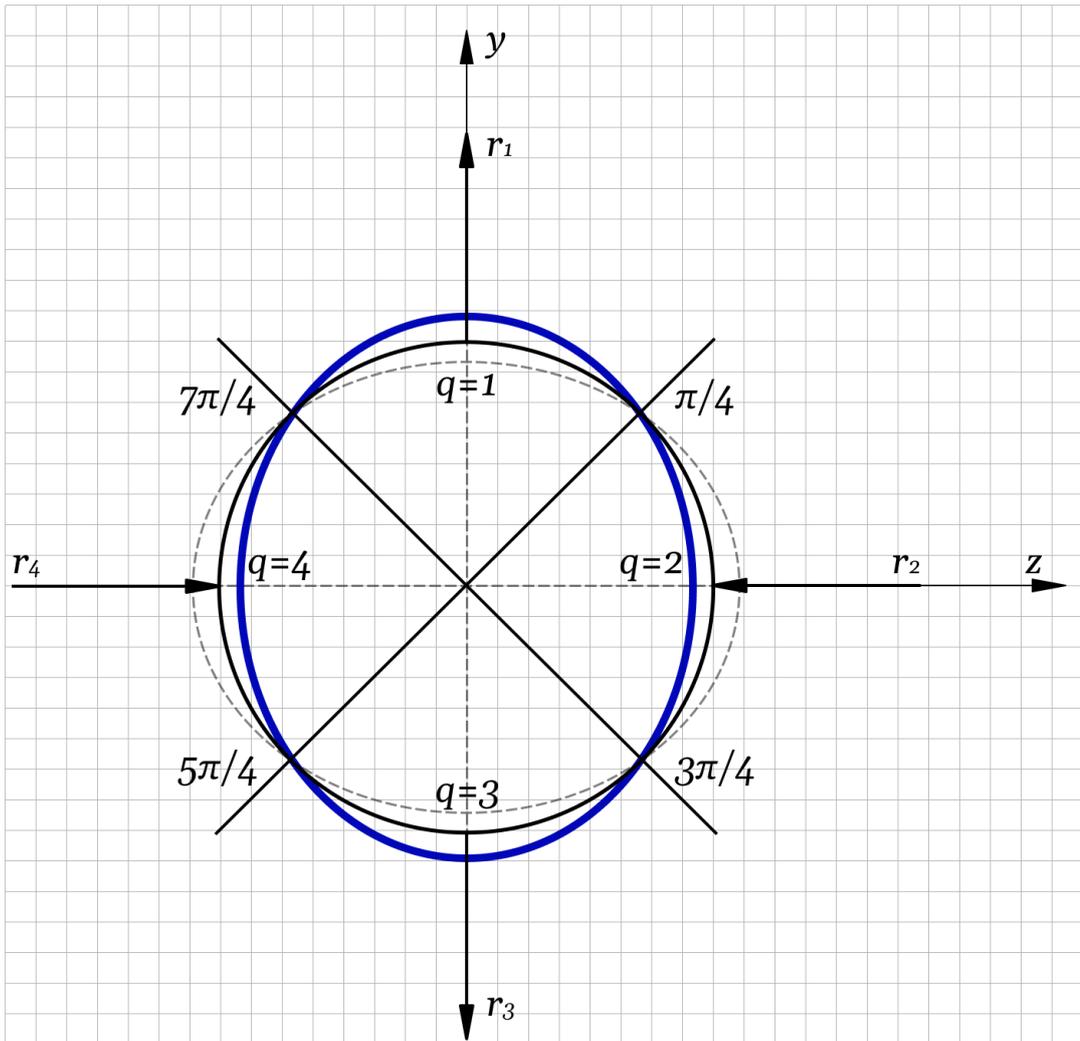


Рисунок 1.4 – Распределение давления по четвертям расходомерной трубки [49]

В связи с этим необходимо 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.

1.2.6. Влияние геометрии расходомерной трубки на силу Кориолиса

Существующие кориолисовы расходомеры различаются формой расходомерных трубок. Для увеличения сил Кориолиса стремятся увеличить

длину трубки и радиусы кривизны. При больших радиусах кривизны достигаются большие угловые скорости, и при протекании жидкости сильнее проявляется деформация половин расходомерных трубок под воздействием инерционных сил, в частности силы Кориолиса [21, 53]. Однако, помимо этого, необходимо сохранить жесткость расходомерных трубок, а также предусмотреть возможность их очистки от различных отложений, образующихся при перекачивании вязких сред, содержащих парафины, воски, асфальтены и др.

Условно все существующие геометрии расходомерной трубки кориолисова расходомера можно разделить по двум признакам: прямая или изогнутая конструкция, и с разделением потока вещества или без. Наиболее распространенными изогнутыми формами трубки являются U -образная, омега-образная, дельта-образная и ромбовидная. Исследования показали, что форма трубки позволяет увеличить чувствительность расходомера [21]. Установлено [53, 84], что среди всех прочих конфигураций расходомер с трубкой омега-образной формы регистрирует самый высокий диапазон временной задержки для применяемого в эксперименте диапазона Re . Тогда как расходомер с конфигурацией дельта (треугольной) формы трубки находится на втором месте. Расходомеры с U -образной и ромбовидной трубками оказались непригодными для измерения скорости потока в ламинарном режиме потока. Тем не менее сложность изготовления омегаобразных трубок обусловила их ограниченное применение. Вследствие изогнутой геометрии расходомерной трубки такие кориолисовы расходомеры занимают много места, кроме того, они не имеют преимущества в стабильности нулевой точки, поскольку внешние возмущения также усиливаются [21, 53, 84].

В большинстве современных расходомеров Кориолиса используются эффективные технологии цифровой обработки сигналов, обеспечивающие высокое разрешение для измерения фазы, что позволяет использовать компактные конструкции трубки, в частности прямые. В расходомерах с разделением потока вещества используются две симметричные трубки, вибрирующие в противофазе. Эта симметрия обеспечивает наилучшие характеристики для отделения измерительной системы от технологической среды [21, 53]. Однако для

конструкции с двумя трубками требуются делители потока, которые не рекомендуются для применений в средах, склонных к закупорке. Для таких сред однотрубные расходомеры обладают большими преимуществами.

Существуют две различные конструкции однотрубных расходомеров [21]. В расходомерах первого типа трубки сгибают, образуя двойную петлю. Эта конструкция похожа на двухтрубный расходомер с той разницей, что трубки соединены последовательно, а не параллельно. Такие однотрубные расходомеры обладают теми же преимуществами, что и двухтрубные расходомеры, и лишены недостатков делителей потока. Однако при такой конструкции длина трубки резко увеличивается, что приводит к повышенным потерям давления из-за гидравлического сопротивления [21, 53].

Однотрубные расходомеры второго типа состоят из прямой или слегка изогнутой трубки. Слегка изогнутые трубки имеют преимущество, заключающееся в том, что они обеспечивают лучший дренаж. Форма трубки существенно влияет на температурный диапазон измерений и балансировку. У прямиотрубных расходомеров влияние температуры на физические свойства жестко закрепленной трубки гораздо выше, чем у изогнутой. Разделение потока вещества на две трубки делает конструкцию сбалансированной, в то время как для однотрубных расходомеров необходима балансировка [21]. Однако при измерении массового расхода высокопарафинистых нефтей прямиотрубные расходомеры имеют преимущества.

В связи с этим необходимо исследование влияния геометрии расходомерной трубки для определения ее чувствительности как функции от временной задержки. Это позволит выявить наиболее приемлемую геометрию расходомерной трубки в зависимости от вязкости перекачиваемой жидкости.

Таким образом, анализ параметров, влияющих на точность измерения массового расхода жидкости в кориолисовом расходомере, показал следующее:

– пульсации потока жидкости в расходомерной трубке вызывают ошибки в измерениях среднего расхода на собственной частоте кориолисовых расходомеров f_1 , на частоте, представляющей собой сумму и разность частоты

пульсаций (f_p) и собственной частоты $f_p \pm f_1$, на частоте, соответствующей следующей более высокой моде колебаний трубки f_2 , и частоте $f_2 \pm f_1$;

– изменения температуры окружающей среды и измеряемой жидкости приводят к ошибкам кориолисовых расходомеров в расчете плотности и массового расхода в связи с изменением вязкости рабочей среды;

– изменение давления измеряемой жидкости влияет на калибровку нулевого значения прибора, а также на характер формирования парафиновых отложений на внутренней поверхности расходомерной трубки, равномерный и неравномерный;

– ламинарный режим течения жидкости негативно влияет на деформацию расходомерной трубки, поскольку создается вторичная осциллирующая поперечная сила и часть силы Кориолиса тратится на ее преодоление, в результате вносится меньший вклад в создание фазового сдвига. Кроме того, данный режим способствует парафинообразованию на стенках расходомерной трубки.

Поэтому при создании численной методики моделирования необходимо учесть и скомпенсировать влияние вышеописанных факторов, а также ввести компонент, отвечающий за парафиновые отложения, т.е. исследовать систему «расходомерная трубка – парафин – жидкость». Это позволит учитывать воздействия между взаимосвязанными элементами системы. Необходимо также исследовать неравномерность распределения парафиновых отложений по стенкам трубки для оценки влияния этого параметра на точность определения параметров массового расхода. Поскольку геометрия расходомерной трубки кориолисова расходомера существенно влияет на температурный диапазон измерений, на балансировку и на чувствительность измерения прибора, то необходимо дополнительно исследовать геометрию трубки расходомера с целью выбора приемлемой формы для измерения высокопарафинистых нефтей при сохранении высокой чувствительности расходомера.

1.3. Исследование методов математического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Для обеспечения высокой точности моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» кориолисова расходомера в процессе опарафинивания проведено исследование математических методов и подходов [85], позволяющих учитывать и компенсировать комбинированное воздействие факторов (см. разд. 1.2).

Прежде чем были получены теоретические основы принципов измерения кориолисовых расходомеров, производители эмпирически конструировали массовые расходомеры Кориолиса [43]. В. А. Романов и П. А. Тараненко [86] отмечают, что в настоящее время литература по данному вопросу весьма обширна в связи с прикладным значением задач измерения массового расхода, а созданные модели кориолисовых расходомеров разнообразны и могут быть классифицированы с различных точек зрения, например: распределены или сосредоточены их параметры, модели допускают аналитическое или только численное решение, расходомерная трубка и жидкость рассматриваются как одно- или трехмерная система и пр. Ниже рассмотрены существующие подходы.

1.3.1. Аналитические методы

Применение аналитических методов [41–43, 87–92] позволяет провести исследование в общем виде, независимо от численных значений параметров кориолисовых расходомеров. Однако аналитические методы применимы в основном для простых моделей, например для исследования кориолисовых расходомеров с простой геометрической формой расходомерной трубки (*U*-образная трубка, прямая). Из-за громоздкости аналитических выражений или невозможности их получения применение аналитических методов ограничено, поэтому используются различные численные методы, позволяющие решать более широкий круг задач, при этом полученные численные решения зачастую носят частный характер [85].

В то же время аналитическая форма является основной при изложении и развитии математического аппарата течения жидкости в кориолисовых расходомерах в общем виде. Однако взаимное влияние жидкости и расходомерной трубки в аналитических моделях сильно упрощено, а принятые упрощения аналитических моделей не позволяют одновременно учесть все факторы, оказывающие влияние на точность измерения параметров массового расхода, и динамически меняющееся влияние этих фактов на процесс измерения [85].

1.3.2. Численные методы

Один из первых подходов численного $1D$ -моделирования, подтвержденных экспериментально для потоков воды, был представлен G. Sultan и J. Hemp [93], где расходомер описывался вибрирующими балками Эйлера, взаимодействующими с одномерным потоком жидкости. С. Р. Stack и соавторы [94] представили метод конечных элементов для решения основных уравнений для балки Тимошенко, транспортирующей жидкость. После этих работ численный метод моделирования получил широкое распространение в исследовании кориолисовых расходомеров.

В более поздних $1D$ -моделях трубка рассматривалась так же, как балка Эйлера – Бернулли [91, 95, 96] или балка Тимошенко [42, 97, 98], а течение жидкости в расходомерной трубке моделировалось как одномерное течение с постоянной скоростью [86]. G. Bobovnik и соавторы [96] впервые использовали код вычислительной гидродинамики (*computational fluid dynamics – CFD*) для моделирования прямолинейной расходомерной трубки. На каждом временном шаге задавалось отклонение трубки, и момент, создаваемый силами жидкости, использовался для оценки чувствительности модели расходомера.

Применение $1D$ -моделей ограничено простыми конфигурациями расходомерной трубки, и не позволяет исследовать влияние характеристик потока на выходной сигнал расходомера [99]. Т. Wang и R. Baker [21] отмечают, что $1D$ -модели, так же как и аналитические выражения, используют «упрощенный

принцип прямой связи между протекающей жидкостью и расходомерной трубкой», т.е. слабосвязные алгоритмы сопряжения при моделировании. Принцип прямой связи не учитывает итеративное взаимное влияние протекающего потока на расходомерную трубку и движение расходомерной трубки, оказывающей влияние на жидкость. *1D*-модели используются в ряде случаев для описания отдельных аспектов при измерении расхода жидких сред кориолисовыми расходомерами и для разработки более совершенных инструментов. Тем не менее существующий разрыв между *1D*-моделями и взаимодействием жидкости и расходомерной трубки кориолисовых расходомеров, задействованных в эксплуатации, не позволяет использовать данные модели на практике.

Движение расходомерной трубки влияет на поле скорости потока жидкости, а затронутое поле скорости жидкости, в свою очередь, также нарушает движение трубки. Это взаимное влияние потребовало создание итеративных моделей с «двусторонней связью» [21], т.е. с жесткосвязными алгоритмами сопряжения между связанными задачами моделирования расходомерной трубки и жидкости. Авторы [21] пришли к выводу, что разработка модели, способной имитировать работу кориолисова расходомера с учетом мультифизического характера его работы, остается открытым вопросом.

В последние годы для моделирования кориолисовых расходомеров применялись итерационные методы моделирования Fluid-Structural Interaction (*FSI*) с двусторонней связью. *FSI* – это взаимодействие некоторой подвижной или деформируемой структуры с внутренним или окружающим потоком жидкости, в данном случае взаимодействие колеблющейся расходомерной трубки с протекающим потоком жидкости. Впервые такой подход был предложен G. Bobovnik и соавторами [100], они представили отдельный численный подход для рассмотрения взаимодействия жидкости с конструкцией в прямой расходомерной трубе кориолисова расходомера для оценки влияния профиля скорости на работу расходомера. Анализ модели был реализован комбинацией метода конечного объема (*finite-volume method, FVM*) для потока жидкости и метода конечных элементов (*finite-element method, FEM*) для конструкции

трубки. Течение потока описывалось уравнениями Навье – Стокса, осредненными по Рейнольдсу (*RANS*), а расходомерная трубка моделировалась как оболочечная структура [99]. Авторы использовали этот метод, чтобы найти собственные частоты и разность фаз в прямотрубном кориолисове расходомере.

N. Mole, G. Bobovnik и соавторы [101] расширили трехмерную модель [100] для учета вынужденной вибрации при различных условиях течения потока. Позже [100] эта модель использовалась для изучения влияния ошибок монтажа кориолисовых расходомеров. Влияние установки оценивалось путем сравнения чувствительностей массового расхода, полученных для возмущенного и полностью сформированного потока в расходомерной трубке. Выявлено, что для одиночной прямой трубки ошибки зависят от положения датчика и уменьшаются по мере увеличения длины трубки.

Модель, предложенная G. Bobovnik и соавторами [100], была применена другими исследователями для изучения влияния потока жидкости на работу кориолисовых расходомеров. В работе [102], S. Enz исследовал зависимость временного сдвига от профиля скорости путем моделирования на основе модели G. Bobovnik и соавторов. V. Kumar и соавторы [48] изучали влияние малых значений числа Рейнольдса на работу кориолисовых расходомеров с использованием разделенной модели *FSI*.

В работе В. А. Романова и В. П. Бескачко [103] проводилось 3D-моделирование установившихся колебаний трубки расходомера с помощью модели *FSI* для идеальной жидкости. Показано, что величина регистрируемого расходомером фазового сдвига зависит как от особенностей распределения гироскопических сил, так и от связанности колебательной и информационной подсистем возбуждения. В данной работе были рассмотрены различные формы расходомерных трубок и для каждой из них установлена зависимость распределения фазового сдвига от перемещения датчиковой аппаратуры по длине трубки. Показано, что оптимизация формы расходомерной трубки по критерию максимальности фазового сдвига ограничена взаимным влиянием колебательной системы расходомера и системой детектирования данных.

А. А. Яушев и соавторы [104] путем расчетов и экспериментально определили формы колебаний кориолисова расходомера в зависимости от его размеров и плотности среды. Для определения оцениваемых режимов параметрических колебаний на основе метода конечных элементов была сформирована модель расходомера, позволяющая оценить влияние изменений размера расходомера и плотности рабочей среды на частоту работы расходомера. Результаты расчетов модели подтверждены модальными испытаниями расходомера.

Авторы [105] выявили влияние на стабильность нуля упругодемпфирующих свойств закрепления двухтрубного кориолисового расходомера. Установлено, что на величину смещения нуля оказывают совместное влияние три фактора: наличие вблизи рабочей частоты одной из собственных частот системы «кориолисов расходомер – трубопроводы», величина демпфирования и дисбаланс двух расходомерных трубок. При сближении собственной частоты системы «кориолисов расходомер – трубопроводы» с «рабочей» разность фаз колебаний двух расходомерных трубок меняется на порядок больше, чем влияние смещения нуля, поэтому ее предложено использовать при диагностике смещения нуля, вызванного влиянием условий закрепления.

В вышеупомянутых исследованиях использовались традиционные методы дискретизации – метод конечных объемов и метод конечных элементов. Существуют также альтернативные подходы, такие как метод решеток Больцмана (*lattice Boltzmann method, LBM*), подробные обзоры данного метода представлены в работах [106, 107]. Параллельный алгоритм этого метода, и его применение к широкому спектру условий потока и различным конструкциям расходомерной трубки представляют большие возможности для моделирования элементов кориолисовых расходомеров.

Более поздние публикации [84, 99, 108] по применению численных методов направлены на увеличение точности моделирования, поиск единых методологий моделирования и экспериментальное подтверждение результатов моделирования.

В исследовании [36] проанализированы характеристики расходомера Кориолиса с использованием *CFD*-моделирования, основанного на итеративном

двустороннем *FSI* и экспериментальных измерениях. Экспериментально подтверждено, что моделирование с использованием двусторонней связи *FSI* позволяет достичь высокой точности измерения.

Е. Shavrina и соавторы [99] отмечают необходимость единой методологии моделирования для исследования динамики потока жидкости и его влияния на работу кориолисовых расходомеров. Сложность при этом заключается в том, что нет единого мнения относительно выбора модели турбулентности и приемлемых упрощений конфигурации расходомерной трубки в кориолисовых расходомерах [99]. Кроме того, при исследовании упрощений конфигурации трубки авторы пришли к выводу, что для повышения точности моделирования следует учитывать массу датчиков и источника колебаний, распорки расходомерной трубки, а также не следует использовать концепцию эквивалентной длины трубки [99].

В то же время в работе [84] отмечается, что создание более точных и практичных моделей невозможно без практической проверки этих моделей на кориолисовых расходомерах, установленных на трубопроводах, транспортирующих жидкость.

Таким образом, анализ имеющихся данных показал, что в большинстве исследований применялся одномерный подход к моделированию элементов кориолисовых расходомеров, использующий упрощение *3D*-модели до *1D*-и методы: конечных разностей, спектральных элементов или конечных элементов. В распространенных *1D*-моделях расходомерная трубка рассматривалась как балка Эйлера – Бернулли [91, 93, 95, 96] или балка Тимошенко [21, 42, 94, 97, 109], а жидкость моделировалась однородной нерастяжимой массивной нитью, протягиваемой вдоль оси трубы с постоянной скоростью [86].

Одномерные модели довольно легко численно реализовать, однако из-за сложности взаимодействия элементов измерительной системы кориолисовых расходомеров такие модели зачастую не отражают физическую природу процессов, протекающих в кориолисовых расходомерах.

В свою очередь высокоточные трехмерные модели [48, 84, 100–108, 110] служат эффективным средством моделирования расходомерной трубки с протекающей по ней жидкостью. При этом итеративный характер проектирования может потребовать большого количества моделирований с вариациями множества параметров, и даже при использовании простой численной методологии становится сложной ресурсоемкой задачей. К ограничениям применения данных моделей стоит отнести высокую стоимость и сложность их развертывания на отдельных вычислительных машинах с установленным современным программным обеспечением, наличием соответствующих специалистов для проектирования. Поэтому в настоящее время применение алгоритмов высокоточных численных методов с целью компенсации погрешностей конкретного расходомера на месте эксплуатации в режиме реального времени невозможно ввиду высоких вычислительных и временных затрат.

С учетом вышеизложенного в основу работы положены численные методы исследования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», в частности метод конечных элементов.

1.3.3. Подходы к численному решению уравнений математической модели

При численном решении задач используют прямой и итеративный подходы. Прямой подход подразумевает построение единой математической модели и дальнейшую дискретизацию, результатом которой является формирование общей системы алгебраических уравнений [111]. Итеративный – основан на независимом решении систем уравнений каждой подзадачи, что приводит к необходимости реализации какой-либо дополнительной процедуры, обеспечивающей выполнение условий согласования решений подзадач на границах сопряжения [111]. Данные подходы реализованы в современных программных продуктах, таких как *ANSYS*, *COMSOL Multiphysics*, *SolidWorks* и пр.

Преимущество прямого подхода в том, что не требуется выполнять итерации при решении жидкостных и структурных задач. В итерационном подходе время моделирования увеличивается за счет увеличения количества итераций связи на каждом временном шаге, и там, где итерации сопряжения раздельного подхода сходятся медленно, целесообразно использование монолитного подхода. Также этот подход лучше соответствует физической природе моделируемого явления, поскольку позволяет непосредственно получить согласованное решение для жидкости и конструкции, однако обладает и рядом недостатков [112]. Во-первых, одновременное решение всех уравнений достаточно громоздко и требует больших вычислительных затрат. Во-вторых, такой метод по определению требует использования общего математического аппарата для решения всех уравнений, что не позволяет, в частности, учесть специфику подзадач для эффективной организации вычислений [112].

Одно из преимуществ итеративного подхода состоит в том, что он позволяет использовать признанные и эффективные алгоритмы, разработанные с использованием различных методов решения уравнений жидкости и уравнений расходомерной трубки по отдельности [84]. Однако он проявляет неустойчивость, так как на каждом временном шаге численные решения физических подзадач не согласованы между собой [112]. Алгоритмы, обеспечивающие сопряжение между связанными задачами, подразделяют по степени сопряжения на слабосвязные/явные и жесткосвязные/неявные [112]. Алгоритм сопряжения должен обеспечивать минимальные вычислительные затраты и высокую точность. Дополнительное сравнение прямого и итеративного подходов подробно представлено в работах [112–114].

Для моделирования и численного исследования процесса опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера предпочтительно использовать итеративный подход, так как:

– 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;

– 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.

1.3.4. Учет мультифизического взаимодействия компонентов системы

При моделировании взаимодействий некоторой подвижной или деформируемой структуры с внутренним или окружающим потоком жидкости используют специальный термин «взаимодействие жидкости с конструкцией» (*FSI*) [115], т.е. колебательными взаимодействиями между деформируемой структурой расходомерной трубки и внутренним потоком жидкости. В ряде задач *FSI* деформации конструкции весьма малы и изменения во времени также относительно медленны, и поэтому деформация не сильно влияет на поведение жидкости. Однако в кориолисовом расходомере изменения во времени быстрые, превышающие несколько циклов в секунду, и даже небольшие структурные деформации приводят к возникновению перепадов давления в жидкости, которые в свою очередь приводят к излучению звука от вибрирующих конструкций.

На основе вышеизложенного взаимодействие расходомерной трубки и жидкости уместно рассматривать как взаимодействие акустической системы (*Acoustic-Structure Interaction (ASI)*), а не как взаимодействие жидкости и конструкции *FSI*. Это позволит повысить точность моделирования напряженно-деформированного состояния кориолисова расходомера в процессе опарафинивания за счет двусторонней итеративной связи, при которой ускорение колеблющейся трубки влияет на жидкость, а нагрузка от жидкости воздействует на расходомерную трубку.

1.4. Синтез математической модели системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» и численные методы решения задачи

На основе исследования методов математического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» выполнен синтез математической модели системы с учетом всех выбранных методов и алгоритмов.

Напряженно-деформированное состояние расходомерной трубки описано математической моделью линейной упругости. Уравнения, описывающие линейно-упругую краевую задачу, основаны на трех группах уравнений: сохранения импульса (уравнение равновесия), геометрических (соотношения Коши), физических (закон Гука).

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

$$0 = \nabla \cdot S + F_v, \quad (1.12)$$

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 :

$$S = S_{ad} + C : \epsilon_{el}, \quad (1.13)$$

$$S_{ad} = S_0 + S_{ext} + S_q. \quad (1.14)$$

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

$$C = C(E, \nu). \quad (1.15)$$

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

$$\epsilon_{el} = \epsilon - \epsilon_{inel}, \quad (1.16)$$

$$\epsilon_{inel} = \epsilon_0 + \epsilon_{ext} + \epsilon_{th} + \epsilon_{hs} + \epsilon_{pl} + \epsilon_{cr} + \epsilon_{vp} + \epsilon_{ve}, \quad (1.17)$$

с вектором перемещения трубки u , сформулированным в виде уравнения

$$\epsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u]. \quad (1.18)$$

Здесь 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. Данное предположение справедливо при решении многих термо- и аэроакустических задач с малым числом Маха [116].

Для получения информации о фоновом течении, на первом этапе проведено моделирование установившегося течения. Для высоких чисел Рейнольдса (Re) среднее установившееся течение жидкости смоделировано с помощью осредненных по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса для сохранения импульса и уравнения неразрывности для сохранения массы [117].

Уравнения модели сформулированы в терминах турбулентной кинетической энергии $K = (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T)$ и удельной скорости диссипации ω [117]:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pl + K] + F, \quad (1.19)$$

$$\rho \nabla \cdot u = 0, \quad (1.20)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k)^{\nabla k}] + P - \beta_0^* \rho \omega k, \quad (1.21)$$

$$\rho(u \cdot \nabla)\omega = \nabla \cdot [(\mu + \mu_T \sigma_k)^{\nabla \omega}] + \frac{\gamma}{\mu_T} - \rho \beta_0 \omega^2 + 2(1 - f_{v1}) \frac{\sigma_{\omega 2} \rho}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, \quad (1.22)$$

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G (\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4, \quad \ell_w = \frac{1}{G} - \frac{\ell_{ref}}{2}, \quad (1.23)$$

где $P = \min(P_k, 10\rho\beta_0^*\rho k\omega)$; P_k задано в уравнении

$$P_k = \mu_T [\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T)].$$

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

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

Константы модели определяются посредством 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 [118]:

$$\frac{\partial \rho_t}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 u_t + \rho_t u_0) = M, \quad (1.24)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u_t}{\partial t} + (u_t \cdot \nabla) u_0 + (u_0 \cdot \nabla) u_t \right) + \rho_t (u_0 \cdot \nabla) u_0 = \nabla \cdot \sigma + F - u_0 M, \quad (1.25)$$

$$\begin{aligned} & \rho_0 C_p \left(\frac{\partial T_t}{\partial t} + (u_t \cdot \nabla) T_0 + (u_0 \cdot \nabla) T_t \right) + \rho C_p (u_0 \cdot \nabla) T_0 - \\ & - \alpha_p T_0 \left(\frac{\partial p_t}{\partial t} + (u_t \cdot \nabla) p_0 + (u_0 \cdot \nabla) p_t \right) - \alpha_p T_t (u_0 \cdot \nabla) p_0 = \nabla \cdot (k \nabla T_t) + \Phi + Q, \end{aligned} \quad (1.26)$$

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 [118].

Членами, ответственными за неустойчивости, являются реактивные члены в основных уравнениях Навье – Стокса. Для их подавления в работе использован стабилизированный метод наименьших квадратов Галеркина (*GLS*) [118], 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 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 [119, с. 614]:

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) = -n \cdot u_{tt}, \quad (1.27)$$

$$F_A = p_t n,$$

где ρ_c – плотность материала расходомерной трубки; p_t – общее акустическое давление; q_d – термин однородного постоянного фонового потока, звукового поля, возникающего в результате конвекции жидкости; n – нормаль к поверхности; u_{tt} – ускорение расходомерной трубки; F_A – нагрузка (сила на единицу площади), испытываемая расходомерной трубкой.

Для сопряжения линеаризованных уравнений Навье – Стокса с уравнениями движения расходомерной трубки использована аэроакустическая связь. Она необходима для моделирования взаимодействия фонового потока жидкости и акустического поля расходомерной трубки во временной области. Аэроакустическая связь реализует непрерывность поля смещений между двумя разными областями [119, с. 618], как в уравнении (1.17):

$$u_{t,fluid} = \frac{\partial u_{solid}}{\partial t}, \quad (1.28)$$

$$-n \cdot (k \nabla T_t) = 0,$$

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, синтезированное математическое описание для расходомерной трубки с протекающей по ней жидкостью необходимо

реализовать в программном продукте для численного моделирования методом конечных элементов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. В результате анализа методов математического моделирования движения жидкости в расходомерных трубках кориолисова расходомера установлено:

- Аналитические методы позволяют установить влияние лишь отдельного конкретного фактора на точность измерения параметров массового расхода, а также получать упрощенные модели расходомеров с возможностью выполнения расчетов без специального программного обеспечения на микропроцессорах в составе измерительного устройства.

- Существующие аналитические зависимости и модели с допущениями, основанные на теориях балок или оболочек с предполагаемыми одномерными потоками жидкости (*1D*-модели / односторонние *FSI*-модели / модели с низкой точностью и слабосвязными алгоритмами сопряжения), используют при моделировании принципа связи между жидкой и структурной областями, при котором не учитывается постоянное двустороннее взаимодействие между расходомерной трубкой и протекающей жидкостью. Поэтому эти модели не могут учесть одновременное воздействие всех факторов, влияющих на точность измерения параметров массового расхода.

2. Модели, основанные на итеративной связи отдельных моделей расходомерной трубки и жидкой среды (*3D*-модели / двусторонние итеративные модели / модели с жесткосвязными алгоритмами сопряжения) подходят для моделирования и численного исследования процесса опарафинивания расходомерной трубки, поскольку учитывают влияние параметров трубки и параметров измеряемой жидкости.

3. Анализ подходов к численному решению уравнений математической модели 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.

4. Анализ мультифизического взаимодействия выявил что, для повышения точности моделирования взаимодействие расходомерной трубки и жидкости следует исследовать как взаимодействие акустической системы (*ASI*), а не как взаимодействие жидкости и конструкции (*FSI*), поскольку высокочастотные колебания расходомерной трубки вызывают ее структурные деформации, которые приводят к волнам давления в жидкости, а они, в свою очередь, приводят к излучению звука от вибрирующих конструкций. Таким образом, при синтезе математической модели необходимо реализовать это сопряжение в виде двусторонней итеративной связи.

5. Осуществлен синтез математической модели системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»:

- Расходомерная трубка описана математической моделью линейной упругости. Уравнения, описывающие линейно-упругую краевую задачу, основаны на трех группах уравнений: уравнении сохранения импульса, полученном из второго закона Ньютона в формулировке Лагранжа; соотношениях Коши, описывающих связь между компонентами вектора перемещений и компонентами тензора деформаций; законе Гука, определяющем уравнения, устанавливающие связь компонентов тензоров напряжений и деформаций.

- Установившееся течение жидкости описано с помощью осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса для сохранения импульса и уравнения

неразрывности для сохранения массы. Уравнения модели сформулированы в терминах турбулентной кинетической энергии и удельной скорости диссипации.

- Акустическое поле представлено линеаризованными уравнениями Навье – Стокса. Для подавления неустойчивости Кельвина – Гельмгольца при решении уравнений во временной области использован стабилизированный метод наименьших квадратов Галеркина.

- Выполнены сопряжения на основе жесткосвязных алгоритмов: акустическая связь, позволяющая учесть нагрузку жидкости на расходомерную трубку и ускорение трубки, испытываемое жидкостью; аэроакустическая связь, моделирующая взаимодействия фонового потока жидкости и акустического поля расходомерной трубки во временной области, и учитывающая непрерывность поля смещений между ними.

Глава 2

**МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
СИСТЕМЫ «РАСХОДОМЕРНАЯ ТРУБКА – ПАРАФИН – ЖИДКОСТЬ»**

**2.1. Модифицированный метод математического моделирования
опарафинивания трубопроводов**

Проведенный в разд. 1.2.4 анализ влияния опарафинивания и учета неравномерности его осаждения в расходомерной трубке под воздействием силы Кориолиса, выявил необходимость модификации метода математического моделирования опарафинивания трубопроводов. Был модифицирован метод математического моделирования опарафинивания трубопроводов на основе модели молекулярной диффузии [65] путем его адаптации к области кориолисовых расходомеров за счет учета влияния неравномерности гидравлического давления по сечению расходомерной трубки вследствие действия сил Кориолиса.

Для расчета скорости осаждения парафина использована модель молекулярной диффузии [65]:

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

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; а dw_x/dT – коэффициент растворимости кристаллов парафина в масляной фазе.

Профиль градиента давления рассчитан путем решения уравнения количества движения, описывающего установившийся несжимаемый однофазный поток через горизонтальный трубопровод [65]:

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

Общее давление по всему трубопроводу (включая составляющие гравитации g , ускорения a и трения f) определено уравнением 2.1 [65], в которое добавлена дополнительная оригинальная составляющая давления Δp_c , вызванная кориолисовой силой:

$$\Delta p = \Delta p_g + \Delta p_a + \Delta p_f + \Delta p_c. \quad (2.1)$$

Влияние гравитационной составляющей пренебрежимо мало. Ее учет вызывает незначительное изменение скорости дрейфа частиц, который накладывается на их колебательное движение. Это вызывает изменение скорости вертикального перемещения частиц, которая значительно меньше, чем скорость перемещения потока в расходомерной трубке, поэтому гравитационная составляющая не учитывается при дальнейшем моделировании [27, 95, 120].

Таким образом, спрогнозирована форма парафиновых отложений на внутренней поверхности расходомерной трубки с учетом неравномерности распределения гидродинамического давления по сечению расходомерной трубки, вызванного наличием силы Кориолиса в протекающей жидкости. На рисунке 2.1 представлен поперечный профиль сечения парафина от полностью круглого (равномерное распределение) до эллипсного (неравномерное), где D – внутренний диаметр трубки; a, b – главные оси эллипса.

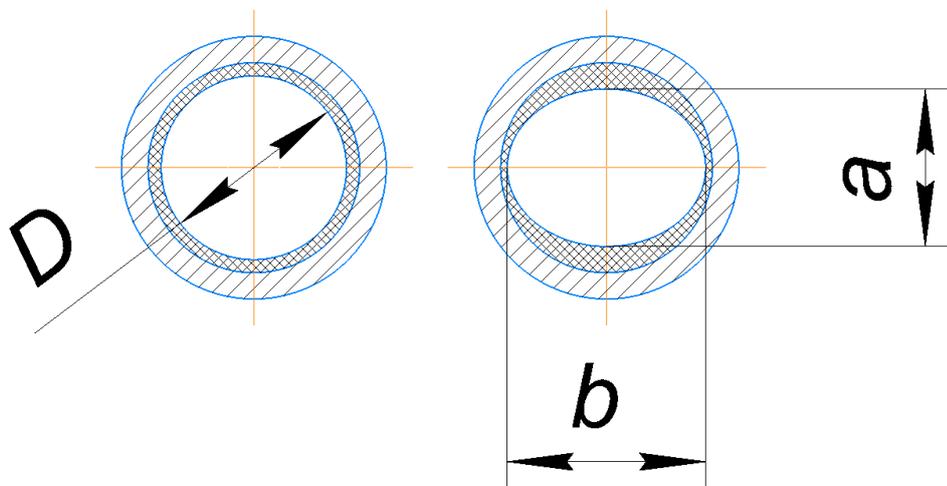


Рисунок 2.1 – Неравномерность опарафинивания ввиду наличия силы Кориолиса в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Эллипсность рассчитана из отношения осей в процентах. В рамках диссертационного исследования принимались значения эллипсности от 1 до 5 %, что характеризует налипание парафиновых отложений в расходомерной трубке с течением времени на практике. Для оценки влияния формы отложений на собственную частоту системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», а также на изменения временной задержки была проведена серия вычислительных экспериментов, результаты которых представлены в разд. 4.6.

2.2. Методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

На основе синтезированной математической модели предложены алгоритмы численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» и двустороннего взаимодействия системы и разработана методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» для исследования процесса опарафинивания [121].

Модель представляет собой информацию о моделируемой системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость» (геометрия, свойства, состояние, внешние воздействия), о способе моделирования (математическая модель, параметры, используемые методы решения задачи, конечно-элементная сетка), представленную в определенном формате (текстовом или бинарном) и передаваемую решателю в качестве входных данных [122].

Модель реализована в пакете мультифизического моделирования *COMSOL Multiphysics* (далее *COMSOL*) с использованием метода конечных элементов. В качестве исходной выбрана модель № 51831 из галереи приложений *COMSOL* [123], далее она была существенно дополнена и расширена в результате введения:

- 1) изменяемой геометрии трубки;
- 2) составляющей для учета акустического взаимодействия во времени;
- 3) дополнительного компонента парафина;
- 4) блока, учитывающего воздействие неравномерного гидравлического давления жидкости на стенки расходомерной трубки.

Методика реализована в виде совокупности разработанных алгоритмов:

- 1) алгоритм численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» (рисунок 2.2);
- 2) алгоритм, реализующий двустороннюю итеративную связь между жидкостью и расходомерной трубкой с учетом парафиновых отложений (рисунок 2.3).

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

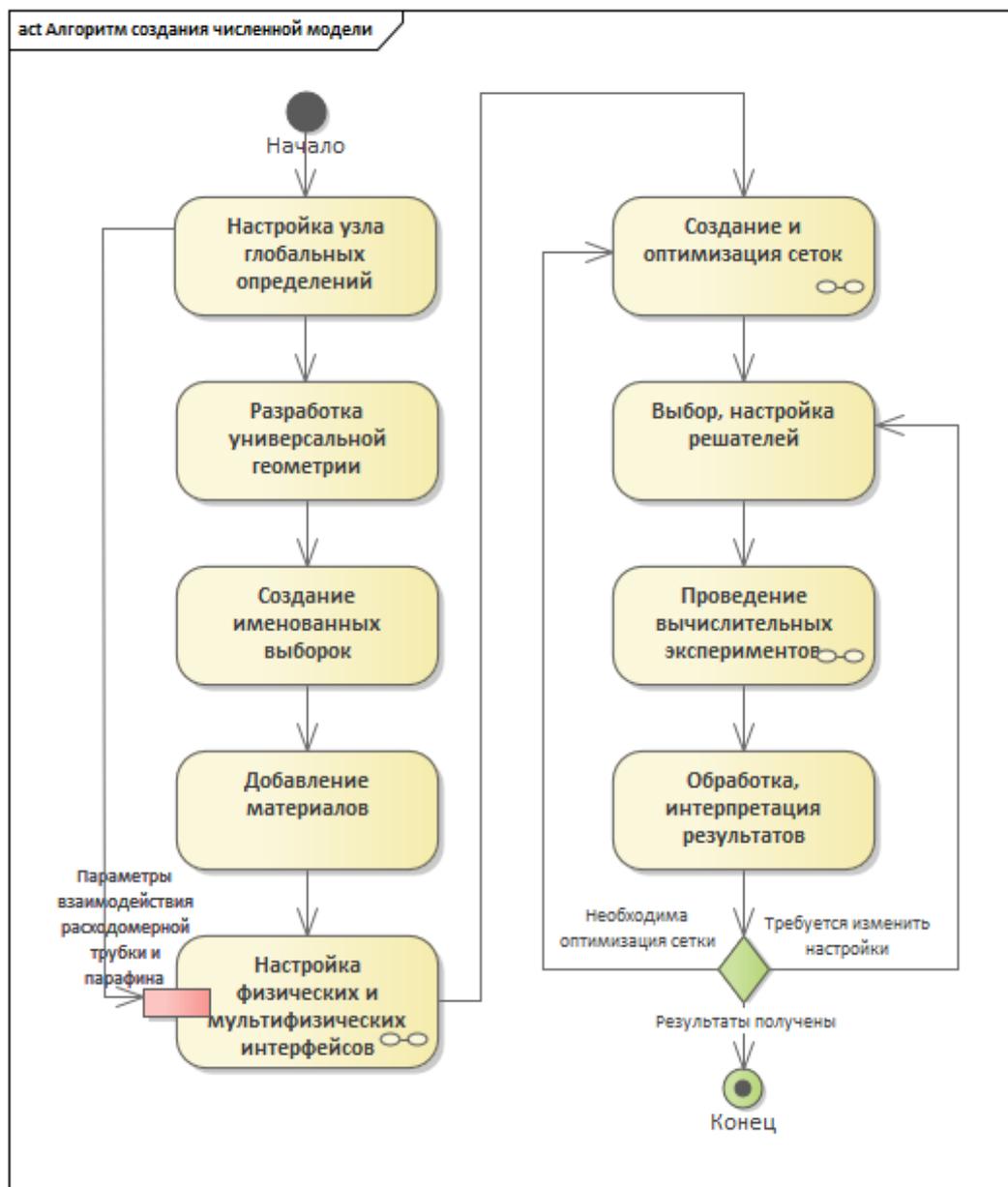


Рисунок 2.2 – Алгоритм численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» состоит из следующих этапов [121]:

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 прямотрубной (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 при создании модели конечных элементов как процесс, непосредственно влияющий на достоверность результатов.

7. Выбор, настройка решателей и получение решения уравнений, составляющих 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 него

разработан алгоритм двустороннего взаимодействия системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» (рисунок 2.3), в котором мультифизические связи реализованы на основе выходных параметров физических интерфейсов.

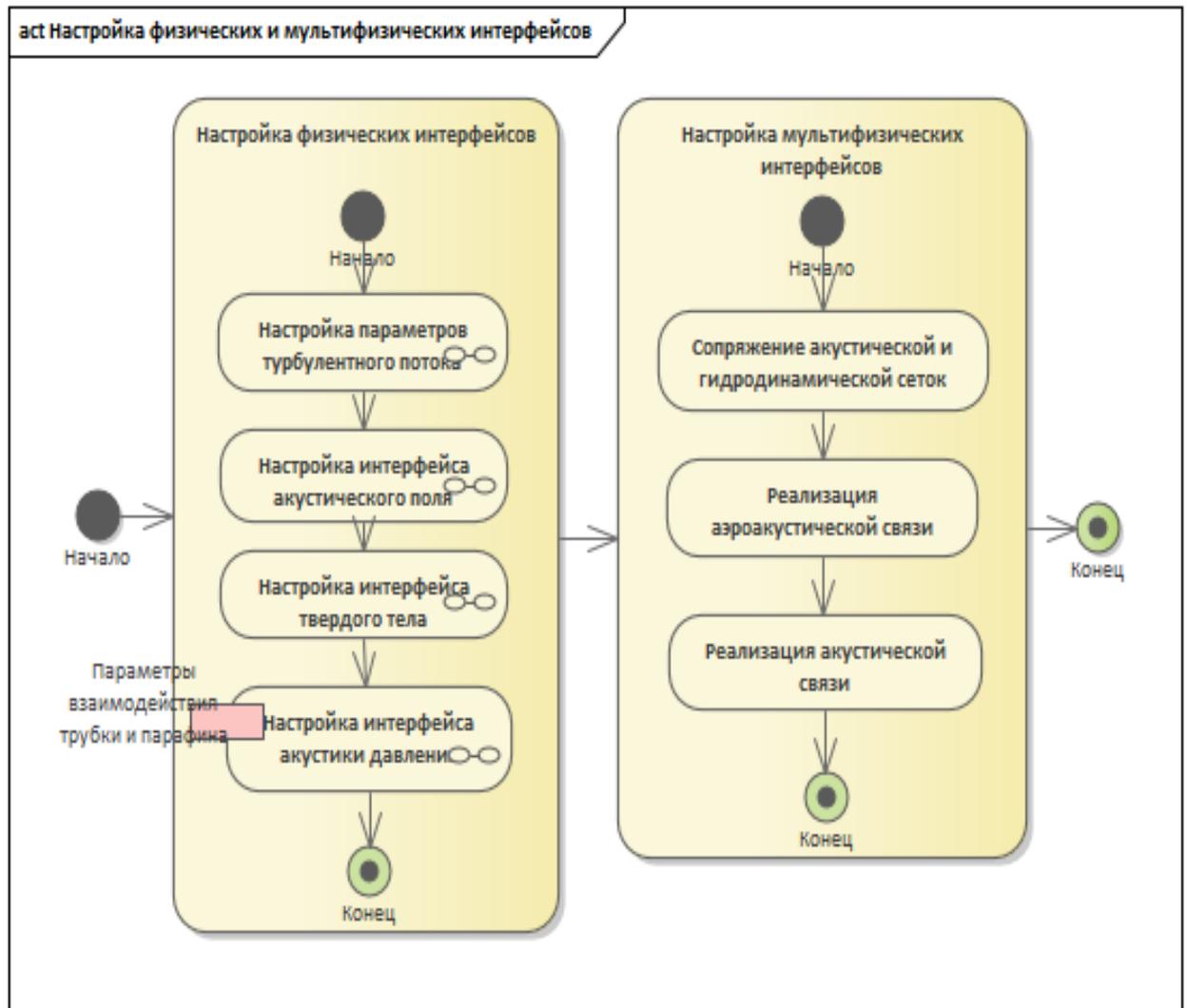


Рисунок 2.3 – Алгоритм двустороннего взаимодействия системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Алгоритм представляет собой последовательность действий, при этом мультифизические связи реализованы на основе выходных параметров физических интерфейсов. На основе разработанных алгоритмов и синтеза математической модели (разд. 1.4) была сформирована трехмерная модель системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» в *COMSOL*.

2.3. Трехмерная модель системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» в *COMSOL*

С помощью пакета *COMSOL* вначале была разработана и верифицирована прямоотрубная геометрия расходомерной трубки кориолисова расходомера [124, 125] (рисунок 2.4). Расходомерная трубка жестко закреплена с обоих концов фланцами, являющимися областями фиксации, что можно отнести к описанию граничных условий моделирования. Внутренний диаметр трубки составляет 16 мм, толщина стенки 2 мм.

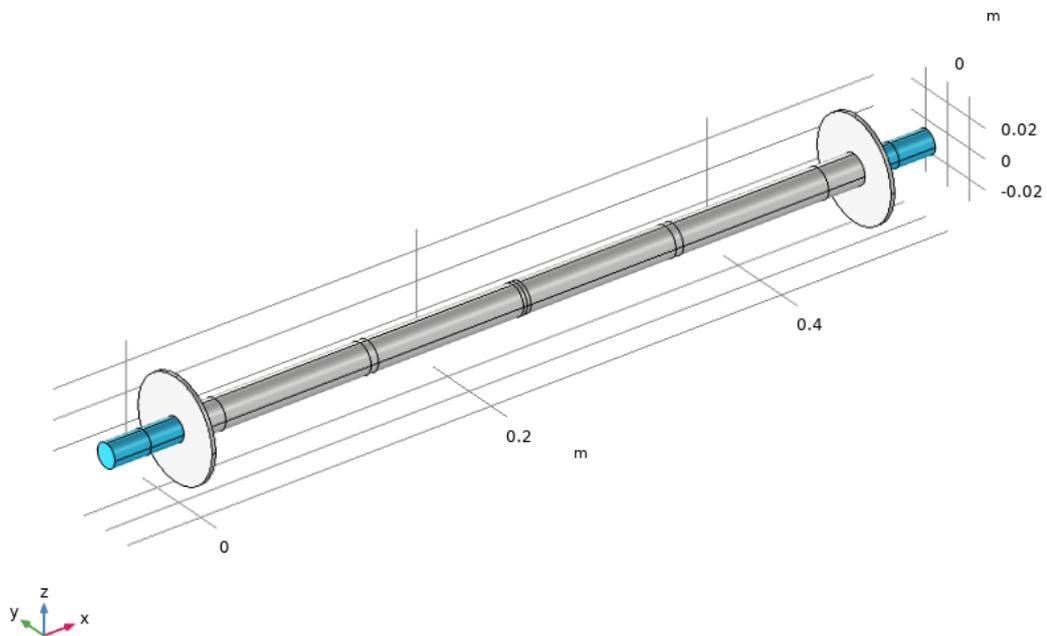


Рисунок 2.4 – Прямотрубная геометрия расходомерной трубки

Далее была разработана изменяемая геометрия расходомерной трубки, принимающая *U*-образные формы в зависимости от радиуса кривизны. На рисунке 2.5 представлен пример сформированной геометрии расходомерной трубки с радиусом кривизны 30° . В отличие от представленной выше модели прямоотрубного расходомера, у *U*-образной модели отсутствуют соединительные фланцы, но это не влияет на работу модели. Роль фланца выполняют торцы расходомерной трубки, которые также жестко закреплены, т.е. абсолютно неподвижны.

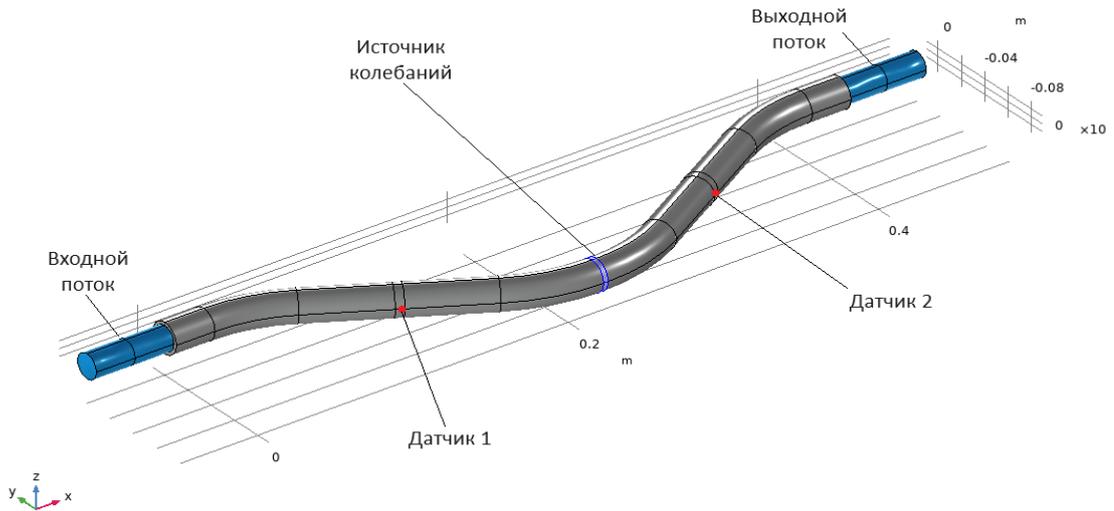


Рисунок 2.5 – U-образная геометрия расходомерной трубки с кривизны 30°

На рисунке 2.5 представлены основные элементы кориолисова расходомера согласно представленному в разд. 1.1.3 описанию. Разработка модели с изменяемой геометрией расходомерной трубки позволила проводить вычислительные эксперименты без необходимости выполнения алгоритмов (представленных на рисунках 2.2 и 2.3) численной методики на каждую форму трубки, что снизило трудоемкость и вероятные ошибки при настройке большого количества параметров в модели.

В качестве материала трубки выбрана сталь *Steel AISI 4340* (аналог стали 12X18H10T), свойства которой представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Свойства материала трубки

Свойство	Значение	Ед. изм.
Плотность	7850	кг/м ³
Модуль Юнга	$205 \cdot 10^9$	Па
Коэффициент Пуассона	0,28	1
Относительная проницаемость	1	1
Электрическая проводимость	$4,032 \cdot 10^6$	Ом ⁻¹
Коэффициент температурного расширения	$12,3 \cdot 10^{-6}$	1/К
Теплоемкость при постоянном давлении	475	Дж/(кг·К)
Относительная диэлектрическая проницаемость	1	1
Теплопроводность	44,5	Вт/(м·К)

В качестве измеряемой жидкости выбрана среда, свойства которой представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Свойства измеряемой жидкости при 20 °С

Свойство	Значение	Ед. изм.
Объемная вязкость	$2,8154 \cdot 10^3$	Па·с
Динамическая вязкость	Па·с	Па·с
Соотношение удельных теплоемкостей	1,0067	1
Теплоемкость при постоянном давлении	4186,9	Дж/(кг·К)
Плотность	998,21	кг/м ³
Скорость звука	1481,3	м/с
Коэффициент температурного расширения	$2,0804 \cdot 10^{-4}$	1/К
Электрическая проводимость	$5,5 \cdot 10^{-6}$	Ом ⁻¹
Теплопроводность	0,59422	Вт/(м·К)

Для исследования влияния опарафинивания в модель добавлен компонент парафин, его свойства представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Свойства парафина

Свойство	Значение	Ед. изм.
Плотность	911	кг/м ³
Модуль Юнга	$0,9 \cdot 10^9$	Па
Коэффициент Пуассона	0,4	1
Теплоемкость при постоянном давлении	2348	Дж/(кг·К)
Теплопроводность	0,21	Вт/(м·К)
Частотный коэффициент	$4,43 \cdot 10^{16}$	1/с
Энергия активации	$1,3 \cdot 10^5$	Дж/моль

Далее в модели были определены области твердого тела и жидкости, установлены граничные условия на входе и выходе расходомерной трубки и на ее стенке. Для моделирования трубки выбраны интерфейс *Solid Mechanics* (динамика твердого тела) и изотопная модель линейно-упругого тела *Linear Elastic Material*, представленная уравнениями (1.12)–(1.18).

Для моделирования незатухающих колебаний трубки источник колебаний представлен в виде гармонической силы, приложенной к центру трубки,

$F(t) = F_0 \cdot \sin(2\pi f_1 t)$). Частота колебательной силы f_1 задана равной первой собственной частоте системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

Моделирование жидкости проводилось с использованием интерфейса *Turbulent Flow*. Для области жидкости использованы стандартные граничные условия на входе и выходе, где на входном участке задан полностью развитый профиль потока $\frac{q_m}{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot R^2}$, где R – внутренний диаметр трубки, ρ – плотность жидкости, давление на выходе установлено равным нулю. Как входные, так и выходные граничные условия были изолированы от поверхности, чтобы свести к минимуму влияние ошибок граничных условий на результаты моделирования. На границе раздела «жидкость – стенка трубки» была задана граница без проскальзывания. Структурная численная сетка, используемая в моделировании, представлена на рисунке 2.6.

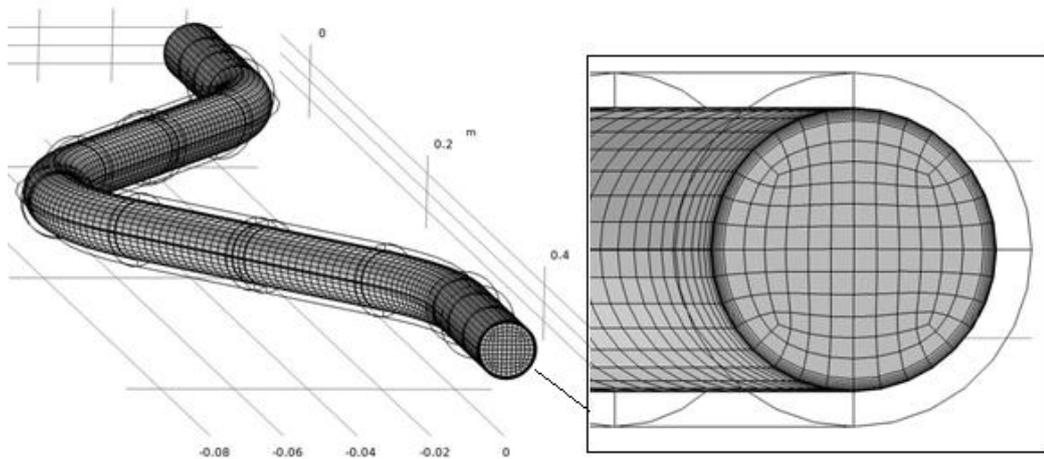


Рисунок 2.6 – Структурная численная сетка для жидкости

Высота ячейки рядом с колеблющейся стенкой определялась на основе толщины пограничных слоев, зависящих от чисел Рейнольдса и Стокса [126]. Тензор турбулентного напряжения сдвига задан гипотезой вихревой вязкости, а вихревая вязкость представлена с помощью стандартной модели турбулентности *SST* (перенос сдвигового напряжения) для турбулентных потоков [126], объединяющая преимущества поведения модели $k - \omega$ в пристеночной

области с надежностью модели $k-\varepsilon$. Уравнения, решаемые с помощью интерфейса *Turbulent Flow, SST*, представляют собой осредненное по Рейнольдсу уравнение Навье – Стокса для сохранения импульса и уравнение неразрывности для сохранения массы (уравнения (1.19)–(1.23)).

2.3.1. Исследование собственных частот

Анализ собственных частот позволил определить подходящие значения частот колебаний расходомерной трубки, заполненной жидкостью, для достижения максимальной точности измерений расходомера. Для решения методом конечных элементов уравнения движения расходомерной трубки представлены в матричной форме [127]:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t),$$

где M – матрица масс; C – матрица вязкого демпфирования; K – матрица жесткости; \ddot{u} , \dot{u} , u – векторы ускорений, скоростей, перемещений узлов модели; F – вектор приложенных сил. M и K рассчитаны на основе данных геометрии и базовых свойств материала: плотности и модуля Юнга. Матрица C учитывает совместный вклад разных механизмов потерь [127].

Предполагая, что возбуждение и отклик являются гармоническими функциями, уравнение в частотной области имеет следующий вид [127]:

$$(-\omega^2 M + i\omega C + K)\tilde{u} = \tilde{F},$$

здесь \tilde{u} и \tilde{F} являются комплексными переменными.

Среди n мод, соответствующих n степеням свободы системы, рабочая мода соответствует максимальному отношению амплитуд участвующих мод [108]:

$$r = \max \left(\frac{F_0(\omega_i)}{F_0(\omega_1)} \right); i = 1, 2, \dots, 6,$$

где $F_0(\omega_1)$ представляет собой амплитуду первой естественной модальной формы; $F_0(\omega_i)$ – амплитуды других модальных форм.

При настройке этой группы исследования внесена возможность учета массы дополнительных элементов, устанавливаемых на трубку. В качестве дополнительных элементов могут выступать датчики колебаний, ответная часть источника колебаний, датчики температуры и т.д. Эти объекты будут реализовываться сосредоточенными массами. В разд. 4.1 представлены результаты исследования влияния добавленных масс на изменение собственных частот расходомерной трубки, заполненной жидкостью.

2.3.2. Вычислительная гидродинамика

На первом этапе рассчитывалось поле скоростей течения жидкости внутри расходомерной трубки и анализировалось распределение давления и напряжения сдвига в поле потока. Моделирование жидкости проведено на основе следующих допущений, аналогичных известным исследованиям [108, 120]:

- жидкость является ньютоновской;
- жидкость представляет несжимаемый поток, поскольку отношение скорости потока к скорости звука для жидкости составляет число Маха меньше 0,3;
- поле скоростей стационарно и не зависит от времени;
- плотность жидкости ρ постоянна.

В вычислительных экспериментах использованы следующие массовые расходы жидкости: 0,1; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 кг/с. Результаты моделирования течения жидкости представлены в разд. 4.2.

2.3.3. Реализация взаимодействия расходомерной трубки и парафина

Для моделирования и численного исследования процесса опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера в модель введен дополнительный элемент – парафин (рисунок 2.7). Было принято допущение, что при турбулентном потоке гравитационной составляющей можно пренебречь. Тогда отложения парафина на стенках расходомерной трубки равномерны.

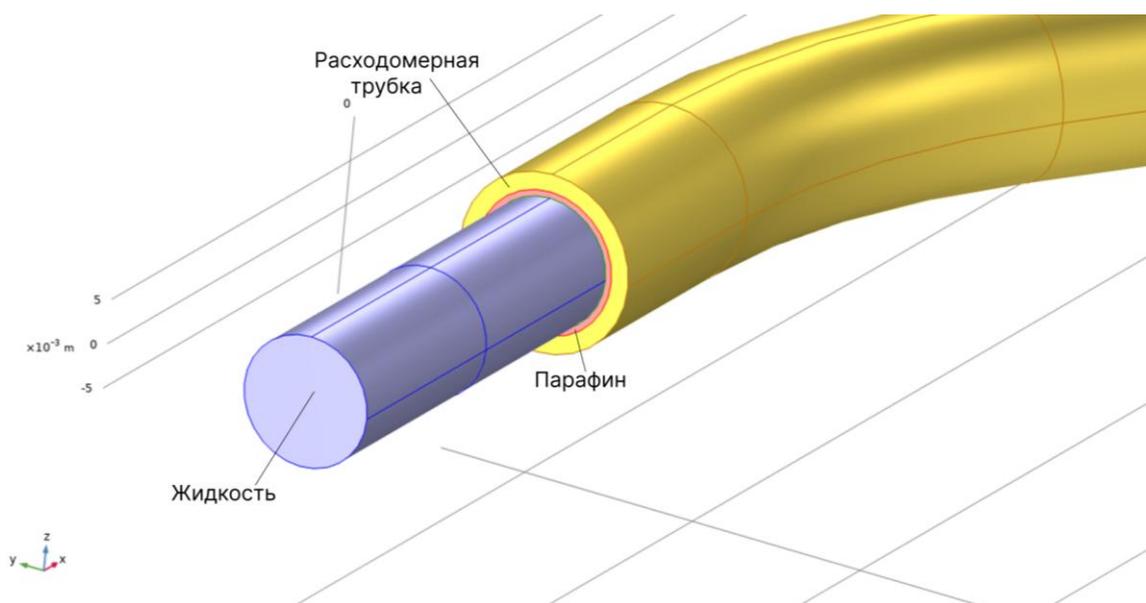


Рисунок 2.7 – Трехмерная модель системы
«расходомерная трубка – парафин – жидкость»
с равномерным отложением парафина

Для моделирования поведения парафина при колебаниях расходомерной трубки и для учета сил, действующих со стороны измеряемой жидкости, использовалась физика твердого тела, реализуемая уравнениями (1.12)–(1.18).

На основе этого реализовано сопряжение 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. При этом зазор между объектами отсутствует, что полностью соответствует физическому характеру налипания парафина.

Данное решение позволило реализовать сопряжение парафиновых отложений и внутренней стенки расходомерной трубки. Парафин колеблется совместно с расходомерной трубкой и передает колебания моделируемой жидкости. Ответное воздействие жидкости, приложенные к ней силы и ее собственное воздействие на опарафиненную трубку также передаются при использовании этого сопряжения.

2.3.4. Реализация взаимодействия жидкости и расходомерной трубки с парафином

В модели гидродинамическая сетка и акустическая сетка представляют собой две независимые сетки с разным разрешением из-за разных масштабов длины, толщины пограничного слоя и т.д. [128]. Реализовано отображение решения из гидродинамической сетки на акустическую, для того чтобы избежать внесения нежелательных числовых эффектов в решение акустической задачи. Это сопоставление в *COMSOL* выполнено 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 были сопоставлены с соответствующими переменными в акустической сетке.

Акустическое связь реализована мультифизическим интерфейсом *Acoustic-Structure Boundary* на основе уравнений (1.27). Аэроакустическая связь реализована мультифизическим интерфейсом *Aeroacoustic-Structure Boundary* на основе уравнений (1.28).

Таким образом, разработана методика численного моделирования, включен компонент, отвечающий за парафиновые отложения, реализовано взаимодействие расходомерной трубки, парафина и жидкости. Также для численного моделирования определены четыре группы исследований:

- 1) анализ собственных частот, позволяющий определить значения частот колебаний системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»;
- 2) вычисление гидродинамических параметров течения турбулентного потока;
- 3) исследование, отображающее решение из гидродинамической конечно-элементной сетки на акустическую;
- 4) акустические колебания расходомерной трубки с учетом двустороннего итеративного взаимодействия опарафиненной трубки и жидкости.

При этом необходимо разработать вычислительный алгоритм, реализующий обработку массивов данных вычислительного эксперимента; разработать и

протестировать комплекс программ для расчета параметров массового расхода при равномерных (с вариацией толщины от 0,1 до 1 мм) и различных неравномерных (с вариацией эллипсности от 1 до 5 %) формах отложений парафина с учетом геометрии расходомерной трубки при различных скоростях потока измеряемой жидкости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. Модифицирован метод математического моделирования опарафинивания трубопроводов, отличающийся 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.

Таким образом, решена задача 1 диссертационного исследования.

2. Синтезирован алгоритм, отличающийся реализацией двусторонней итеративной связи между жидкостью расходомерной трубкой с учетом ее опарафинивания, и обеспечивающий моделируемое поведение системы максимально приближенно к рабочим условиям эксплуатации кориолисова расходомера.

3. Разработана методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», реализованная в виде комплекса алгоритмов. 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.

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

1) отложения парафина и 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 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.

Таким образом, решена задача 2 диссертационного исследования.

ГЛАВА 3
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ПРОЦЕССА ОПАРАФИНИВАНИЯ РАСХОДОМЕРНОЙ ТРУБКИ
КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА

3.1. Вычислительный алгоритм для расчета средней временной задержки сигналов

Основные результаты численного моделирования представляют собой временное представление сигналов первого и второго датчиков расходомерной трубки. Временные задержки между колебаниями на двух датчиках определяются по смещениям и преобразуются в соответствующие массовые расходы с помощью уравнения (1.11). Временная задержка Δt рассчитывается при амплитуде $A = 0$ для каждого i -го полупериода сигналов с датчиков (рисунок 1.2) и усредняется [121]. На рисунке 3.1 представлен принцип линейной интерполяции и принятые обозначения.

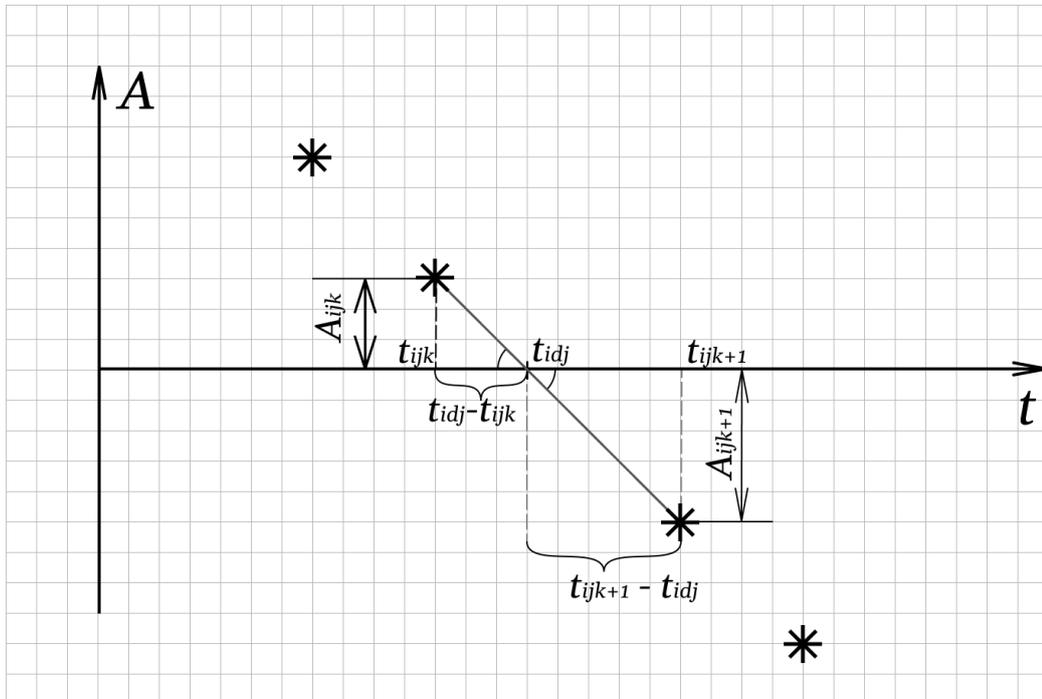


Рисунок 3.1 – Принцип линейной интерполяции,
 * – известные точки сигнала колебаний j -го датчика

Поскольку значение времени t_{idj} неизвестно (j – номер датчика), его можно вычислить за счет использования линейных интерполяций по известным точкам по обе стороны пересечения временного представления сигнала с осью времени.

Таким образом, средняя временная задержка определяется уравнением

$$\Delta \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^m (t_{id2} - t_{id1})}{m}, \quad (3.1)$$

где m – количество полупериодов; i – номер полупериода; индексы $d1$ и $d2$ обозначают датчик 1 и датчик 2; t_{id1} и t_{id2} определяются уравнениями [121]:

$$t_{id1} = \frac{A_{i1k} \cdot t_{i1k+1} + A_{i1k+1} \cdot t_{i1k}}{A_{i1k+1} + A_{i1k}}, \quad (3.2)$$

$$t_{id2} = \frac{A_{i2k} \cdot t_{i2k+1} + A_{i2k+1} \cdot t_{i2k}}{A_{i2k+1} + A_{i2k}}, \quad (3.3)$$

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

На основе значения средней временной задержки можно рассчитать среднюю фазовую задержку [121]:

$$\Delta \bar{\varphi} = 2\pi \cdot f_1 \cdot \Delta \bar{t}. \quad (3.4)$$

Разработан алгоритм (рисунок 3.2), реализующий обработку массивов данных вычислительного эксперимента и интерполяцию недостающих значений, позволяющий сократить временные затраты на обработку результатов вычислений.

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 первого и второго датчиков, далее рассчитывается разность Δt для каждого полупериода, в конце

это значение усредняется и получается среднее значение временной задержки $\Delta \bar{t}$ [121].

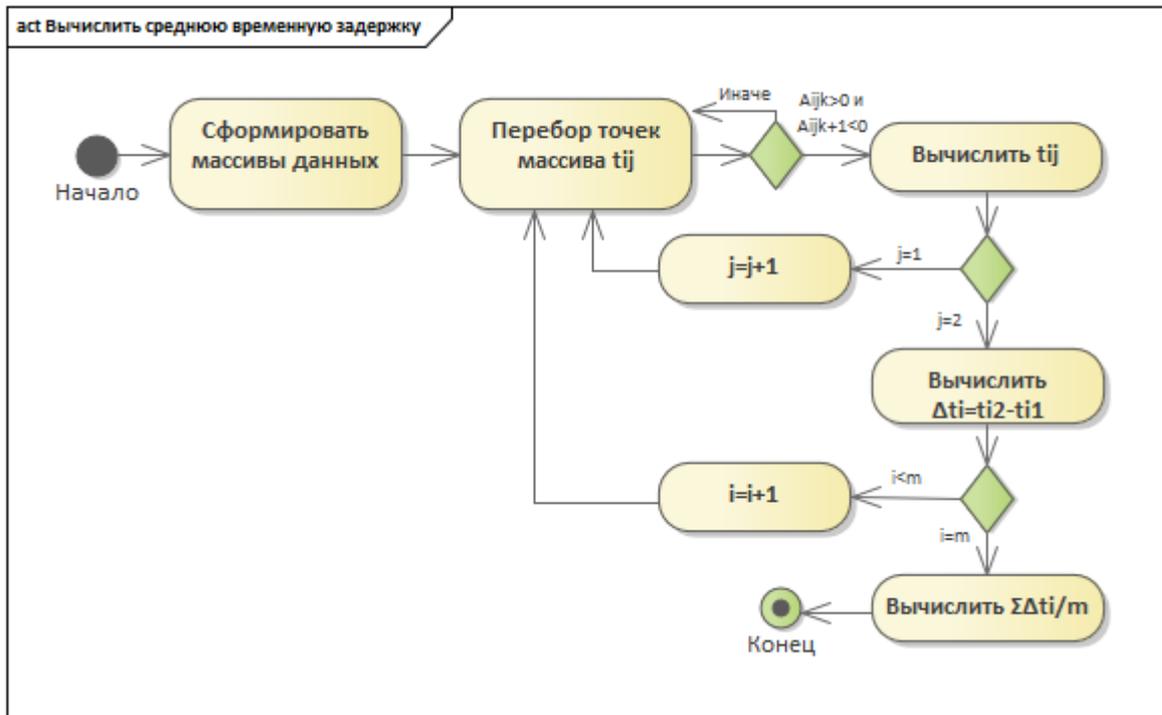


Рисунок 3.2 – Алгоритм расчета средней временной задержки

Разработан вычислительный алгоритм (рисунок 3.3) автоматизированного параметрического моделирования 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.

Алгоритм разделен на две дорожки, поскольку одни действия выполняются пользователем, другие – программным комплексом. Пользователь может выбрать способ ввода данных: скопировать данные вручную; выбрать файл *MS Excel* с результатами вычислительного эксперимента, содержащий массивы данных; выбрать файл численной модели и массивы данных считаются автоматически. Объекты в алгоритме (*name.mph* и результаты *.xlsx*) намеренно расположены

на границе раздела двух дорожек, что интерпретируется переходом к следующей деятельности в соседней дорожке только при готовности файла.

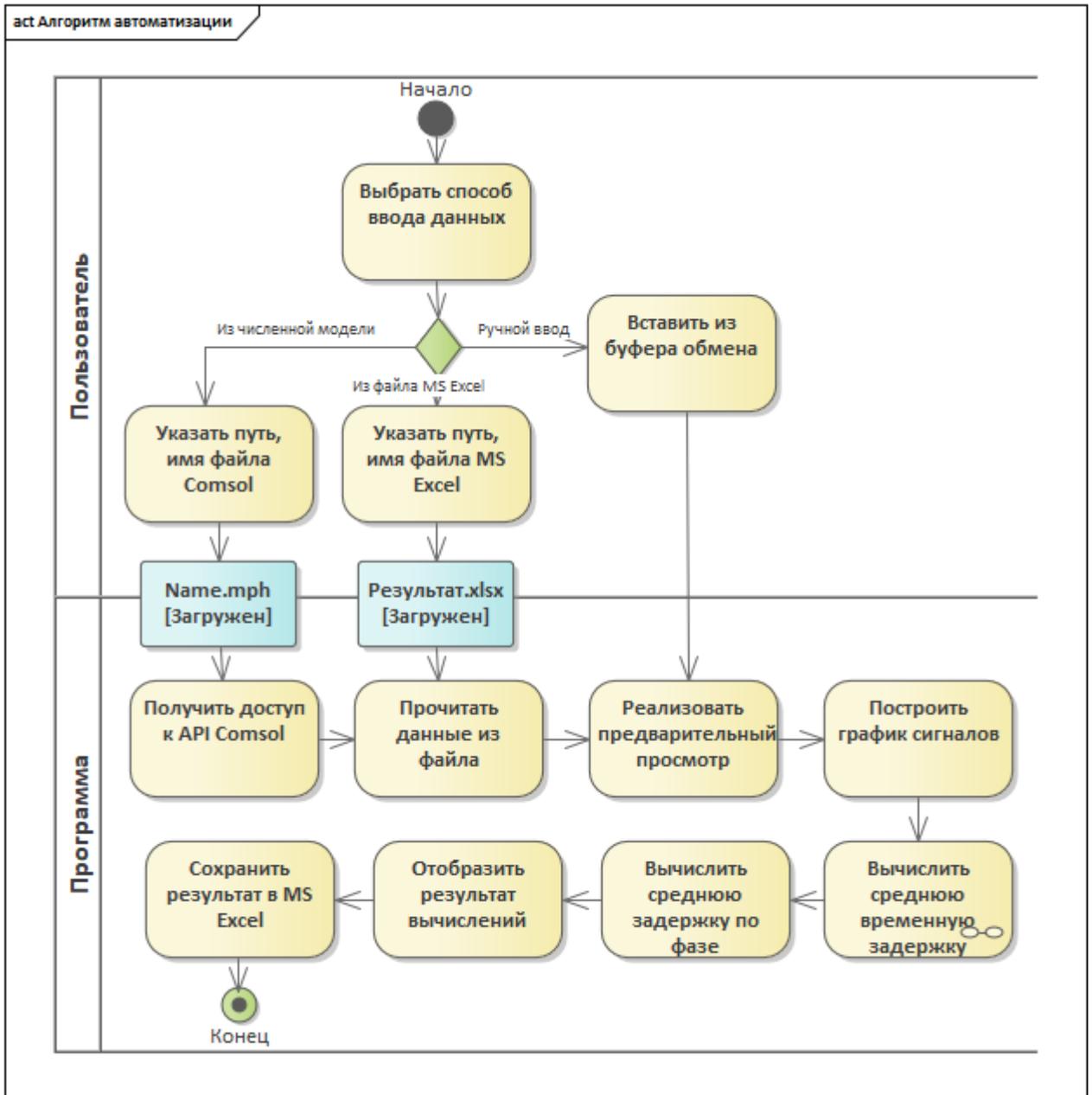


Рисунок 3.3 – Вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Далее программа реализует последовательность действий для вычисления средних временной и фазовой задержек и после вычисления сохраняет результат в файл *MS Excel* для документирования. Блок со значком ∞

обозначает вложенную деятельность, алгоритм для которой представлен на рисунке 3.3 [121].

3.2. Программный комплекс для моделирования и численного исследования процесса опарафинивания

С целью реализации численной методики и вычислительного алгоритма разработан программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов по исследованию процесса опарафинивания расходомерной трубки. Модели разработки программного обеспечения по-разному рассматривают этот процесс, но в любом случае они опираются на следующий базис: формирование требований, проектирование, конструирование, тестирование, внедрение, сопровождение [129]. Для программного комплекса сформированы требования в соответствии с классификацией требований к программным системам – *FURPS+* [130], отвечающей за функциональность, удобство использования, надежность, производительность и возможность поддержки.

Целью разработки и внедрения программного комплекса является автоматизированное параметрическое моделирование системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» кориолисова расходомера и решение задачи оценки влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрии на точность измерения параметров массового расхода при различных характеристиках измеряемой жидкости.

Функциональные требования к программному комплексу, а также задачи, направленные на их выполнение, включают:

а) выполнение вычислительных экспериментов:

– реализовать управление моделью, разработанной в среде *COMSOL* для численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»;

- обеспечить варьирование параметров моделирования: радиуса кривизны расходомерной трубки, количества периодов ее колебаний;

- формировать таблицы данных о расходе жидкости, частоте колебаний расходомерной трубки, сигналах с датчиков расходомерной трубки;

б) ввод данных:

- реализовать ввод параметров исследования (радиус кривизны расходомерной трубки, количество периодов ее колебаний) с клавиатуры;

- настроить визуальное отображение геометрии расходомерной трубки с введенным радиусом кривизны;

в) автоматизация алгоритмов обработки данных:

- реализовать алгоритм обработки данных вычислительного эксперимента;
- обеспечить возможность фильтрации, интерполяции данных сигналов датчиков для возможности расчета временной задержки;

- вычислить временную и фазовую задержки сигналов датчиков;

г) просмотр и документирование результатов:

- предоставить графический интерфейс для визуализации данных;
- реализовать функции построения 2D- и 3D-графиков, диаграмм и других наглядных средств для анализа и визуализации результатов экспериментов;

- генерировать отчет о проведении вычислительного эксперимента в *Microsoft Word*.

Нефункциональные требования к программному комплексу включают:

а) удобство использования:

- интуитивно понятный и удобный интерфейс пользователя;
- поддержка различных числовых форматов данных для ввода и вывода;

б) масштабируемость и гибкость:

- возможность внесения изменений в текст программ и их интерфейс;

в) надежность и производительность:

- обеспечение стабильной работы программного комплекса при обработке вычислительных экспериментов с большим количеством периодов колебаний и различными параметрами потоков;

– оптимизация алгоритмов для ускорения вычислений и повышения их эффективности.

Как показано на рисунке 3.4, комплекс состоит из трех программ: программа I для параметрической настройки математической модели и управления численным расчетом; программа II для линейной интерполяции и расчета параметров массового расхода; программа III для вычисления и визуализации измерений между экспериментами, анализа разброса результатов [131].

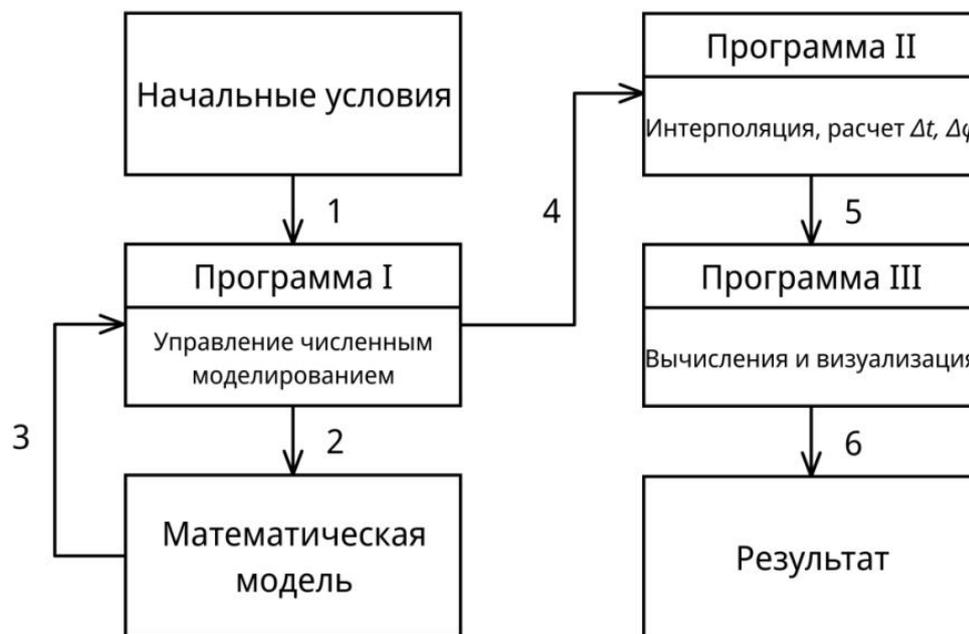


Рисунок 3.4 – Структурно-логическая схема программного комплекса

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). Затем запускается вычислительный эксперимент (2), его результаты передаются (3) в программу I (рисунок 3.5) и автоматически сформированные в нужном формате массивы передаются (4) в программу II для линейной интерполяции и вычисления средних временной и фазовой задержек. В программу III поступают (5) обработанные результаты вычислительного эксперимента, происходит

вычисление и визуализация измерений между экспериментами, анализ результатов (б) [131].

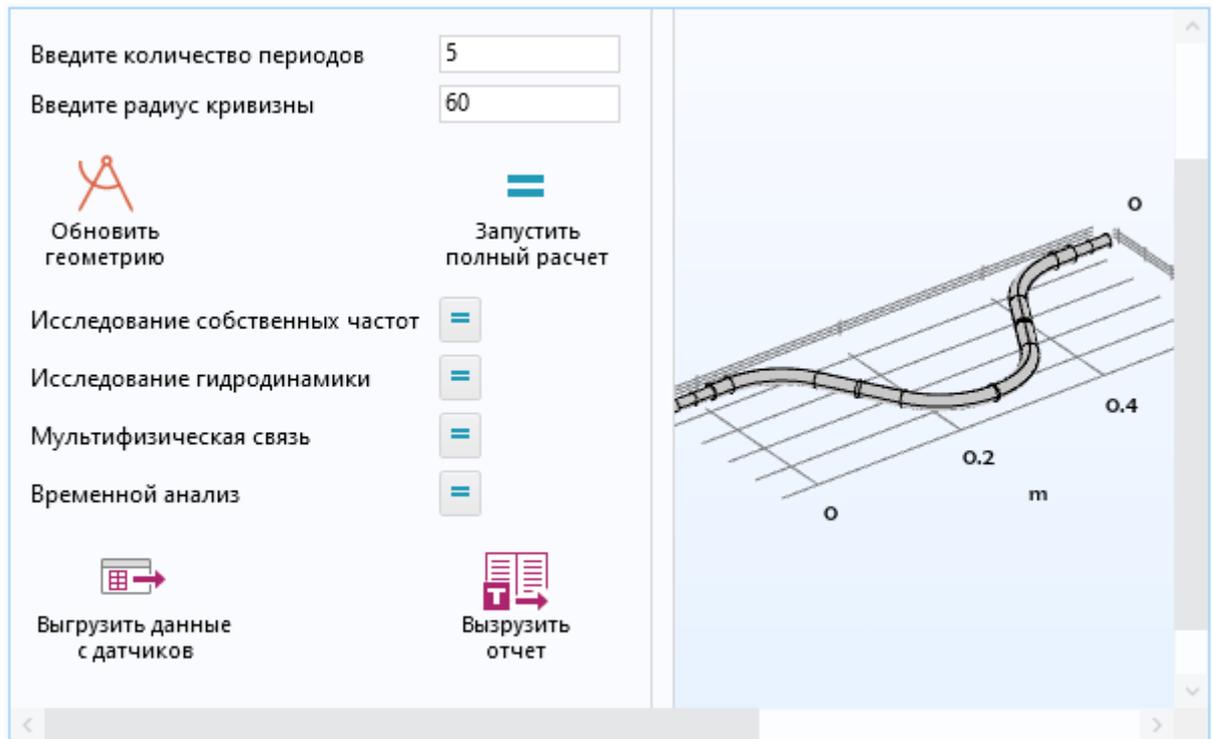


Рисунок 3.5 – Пример ввода параметров и обновления геометрии расходомерной трубки

Интерфейс программы I содержит поля ввода данных (радиус кривизны расходомерной трубки, количество периодов ее колебаний) и кнопки, при нажатии на которые выполняется соответствующее действие. Программа I использует модель кориолисова расходомера с универсальной геометрией, в поле можно вводить радиус кривизны расходомерной трубки и при нажатии кнопки «обновить геометрию» выполняется визуализация получившейся формы расходомерной трубки [131].

Реализованы возможности запуска полного расчета заданной последовательности исследований или расчета конкретного исследования. Из программы I сигналы с датчиков в виде табличных значений (рисунок 3.6) передаются в программу II (разработанную на языке *Python 3*) для их интерполяции и вычисления временной и фазовой задержек [131].

	A	B	C	D	E	F
1	Массовый расход, кг/с	Время,с	Датчик 1 (мм)	Датчик 2 (мм)	Центр3 (мм)	Собственная частота (Гц)
2347	2,5	0,022626	0,497014003	0,497990948	1,213144046	170,2
2348	2,5	0,022692	0,520375814	0,521240433	1,26756818	170,2
2349	2,5	0,022759	0,541117397	0,541862466	1,315205993	170,2
2350	2,5	0,022826	0,560236215	0,56085769	1,358908122	170,2
2351	2,5	0,022892	0,577290289	0,577783167	1,397690577	170,2
2352	2,5	0,022959	0,591142813	0,591501548	1,429378472	170,2
2353	2,5	0,023025	0,60310064	0,60332261	1,457024129	170,2
2354	2,5	0,023092	0,612657806	0,612739933	1,479606194	170,2
2355	2,5	0,023158	0,618617202	0,618557601	1,49487884	170,2
2356	2,5	0,023225	0,622574054	0,622372901	1,505946618	170,2

Рисунок 3.6 – Пример формирования таблицы данных

Программа I автоматизирует процесс формирования и выгрузки необходимых данных в заданном формате. Программа II обладает графическим интерфейсом пользователя, который позволяет удобно осуществлять ввод результатов моделирования как вручную, так и из файла, и выгрузку расчетных данных. Данная программа реализует разработанный вычислительный алгоритм, представленный на рисунке 3.2. Программа II выполняет построение первоначального графика колебаний системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» для предварительной проверки результативности и адекватности вычислений [131].

Представленный на рисунке 3.7 сигнал с меньшей амплитудой представляет колебания центральной точки расходомерной трубки, а два других, визуально просматриваемые как один сигнал, представляют временные представления колебаний расходомерной трубки в точках, соответствующих положениям первого и второго датчиков [131]. При этом временной сдвиг визуализируется при достаточном масштабировании, как показано на рисунке 1.2. На рисунке 3.8 показан результат расчета фазовой и временной задержки сигналов.

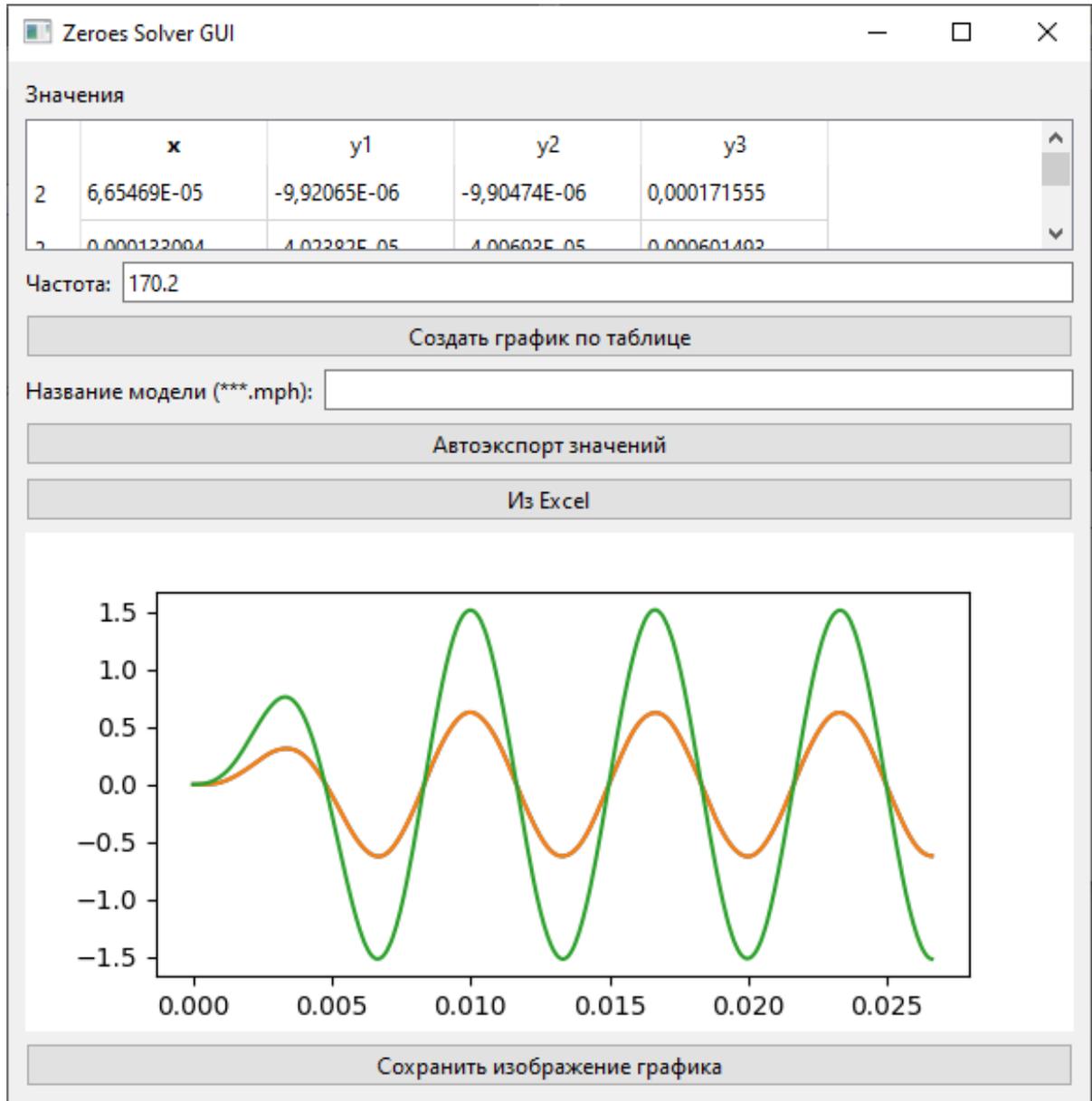


Рисунок 3.7 – Интерфейс программы II и пример расчета

Дополнительно программа II генерирует отчеты для документации результатов в *Microsoft Excel*. Программа III разработана на языке *MATLAB*, пример кода программы представлена на рисунке 3.9.

Программа III на основе данных скорости потока жидкости, временной задержки и прочих результатов вычислительного эксперимента позволяет рассчитать необходимые параметры относительной и абсолютной погрешностей, и визуализировать полученные результаты в виде 2D- и 3D-графиков.

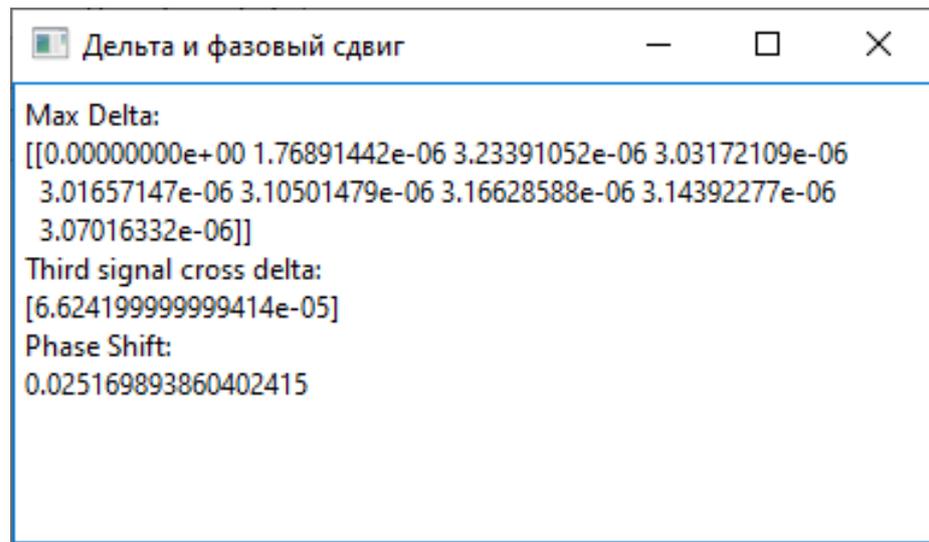


Рисунок 3.8 – Пример расчета фазовой и временной задержки сигналов

```

71 R30 = reshape(r30, 12, []);
72 R30(1:2,:) = [];
73 R30(6:7,:) = [];
74 plot(r30);
75 hold off
76
77
78 E1 = R1 - R0;
79 E2 = R2 - R0;
80 E3 = R20 - R0;
81 E4 = R10 - R0;
82 E6 = R15 - R0;
83
84 Er1 = abs((E1./R0)*100);
85 Er2 = abs((E2./R0)*100);
86 Er3 = abs((E3./R0)*100);
87 Er4 = abs((E4./R0)*100);
88 Er6 = abs((E6./R0)*100);
89
90 plot(Y30, '-*')
91 grid on
92 xlabel('Количество периодов, шт', 'FontSize', 11)
93 ylabel('Временная задержка, с', 'FontSize', 11)
94
95 xh = get(gca, 'XLabel'); % Handle of the x label
96 set(xh, 'Units', 'Normalized')
97 yh = get(gca, 'YLabel'); % Handle of the y label
98 set(yh, 'Units', 'Normalized')
99
100 title('Радиус кривизны трубки 30^\circ', 'FontSize', 11);
101
102 legend('0.1 кг/с', '0.5 кг/с', '1 кг/с', '1.5 кг/с', '2 кг/с', '2.5 кг/с');
  
```

Рисунок 3.9 – Код программы в среде *MATLAB*

В главе 4 представлены и описаны результаты расчета относительной и абсолютной погрешностей измерения параметров массового расхода, зависимости временной задержки от толщины и характера налипания парафиновых отложений и пр., полученные в программе III.

Спланировано и проведено тестирование программного комплекса с целью обеспечения корректности, производительности и надежности его компонентов. Каждая программа I, II и III была протестирована отдельно. Проверена корректность формирования начальных условий и полей ввода данных в программе I, правильность выполнения линейной интерполяции и вычисления средних значений в программе II, а также корректность анализа и визуализации результатов в программе III. Взаимодействие между программами I, II и III также было протестировано, чтобы убедиться, что данные корректно передаются между ними на каждом этапе. Например, результаты вычислительного эксперимента из программы I правильно обрабатывались в программе II и далее передавались в программу III.

Было подтверждено, что все функции работают согласно сформулированным требованиям, включая проверку ввода данных, выбора типа исследования, запуска вычислительного эксперимента, а также корректности всех расчетов и визуализаций. Производительность вычислительных экспериментов была проверена, особенно при увеличении объема данных, например при большом количестве периодов. Было установлено, что комплекс способен обрабатывать данные в разумные сроки без существенных задержек. Также выполнена проверка корректности вычислений временной и фазовой задержек, поскольку значение средней временной задержки пропорционально массовому расходу и характеризует чувствительность расходомера.

Пользовательское тестирование подтвердило удобство использования интерфейса. Интерфейс оказался интуитивно понятным и предоставлял все необходимые данные в удобном формате. Комплекс был протестирован на устойчивость к ошибкам ввода данных, некорректным условиям и другим потенциальным сбоям.

Результаты работы программного комплекса позволили численно оценить внесенные изменения в модель при проведении вычислительного эксперимента, рассчитать отклонения от данных базовой модели, а также вычислить и

визуализировать различия измерений между экспериментами, выявить разброс результатов, проанализировать их повторяемость.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Разработан вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», являющийся основой взаимодействия программ комплекса, отличающийся применением спрогнозированной формы парафиновых отложений, необходимый 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.

Таким образом, решена задача 3 диссертационного исследования.

2. Сформированы требования для программного комплекса, позволившие создать четкий план разработки, определить базовые параметры, функциональные и нефункциональные возможности комплекса, что, в свою очередь, повысило эффективность его дальнейшей реализации.

3. Разработан и протестирован комплекс программ, на основе разработанных методики и алгоритмов, 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. Программный комплекс состоит из трех проблемно-ориентированных программ: программа I для параметрической настройки математической модели и управления численным расчетом; программа II для линейной интерполяции и расчета параметров массового расхода; программа III для вычисления и визуализации измерений между экспериментами, анализа разброса результатов.

Разработанный комплекс предоставляет полезный инструмент для различных групп пользователей и организаций, связанных с анализом работы кориолисовых расходомеров и оптимизацией их параметров. Он может быть использован как для научных исследований, так и в промышленных и образовательных целях.

Результаты оценки влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрии на точность измерения параметров массового расхода при различных характеристиках измеряемой жидкости, полученные с использованием программного комплекса, представлены в 4 главе.

Таким образом, решена задача 4 диссертационного исследования.

Глава 4

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной главе представлены результаты вычислительных экспериментов, для этого в программе I выполнены численные расчеты системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» при ее различных параметрах: добавленная масса датчиков, радиус кривизны расходомерной трубки, отсутствие и наличие парафиновых отложений, толщина парафинового слоя, эллипсность парафинового слоя. Расчет временных и фазовых задержек выполнен в программе II, результаты вычислительных экспериментов получены и визуализированы в программе III.

4.1. Анализ собственных частот

Были определены потенциально возможные типы мод в системе, значения собственных частот, а также их факторов участия [125]. При этом учтены все заданные фиксации и импеданс, однако нагрузки любой природы на данном этапе игнорированы. Результаты исследования собственных частот представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Собственные частоты прямотрубной расходомерной трубки, заполненной жидкостью, без парафиновых отложений

Собственная частота (Гц)	Угловая частота (рад/с)	Коэффициент демпфирования	Добротность системы
$477,59 + 4,63E-11i$	$3000,79 + 2,90E-10i$	$9,70E-14$	$5,16E + 12$
$1269,56 + 105,90i$	$7976,89 + 665,40i$	$8,31E-02$	$6,01E + 00$
$1283,70 + 1,04E-9i$	$8065,76 + 6,58E-9i$	$8,16E-13$	$6,13E + 11$
$2438,74 + 2,44E-8i$	$15323,06 + 1,53E-7i$	$1,00E-11$	$4,98E + 10$
$2537,61 + 214,19i$	$15944,30 + 1345,82i$	$8,41E-02$	$5,94E + 00$

Поскольку в системе задано демпфирование, собственные частоты имеют комплексные значения, также определена добротность. На рисунке 4.1 показаны формы колебаний первых трех собственных частот прямотрубной геометрии расходомерной трубки.

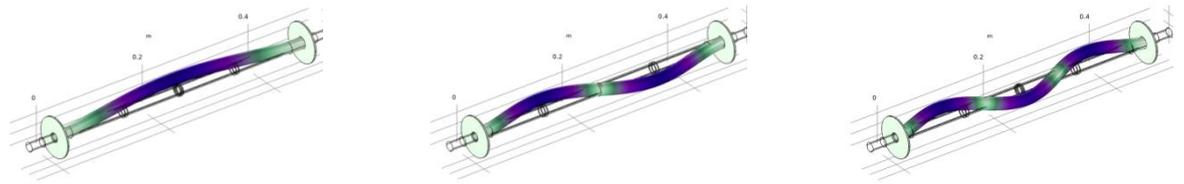


Рисунок 4.1 – Формы колебаний на собственных частотах для прямотрубной конструкции расходомера

Для верификации модели выполнен анализ влияния дополнительной массы на точность определения параметров массового расхода. Для этого были учтены не только масса трубки и жидкости, но и масса дополнительных элементов, установленных на трубку. Наибольшее влияние на результаты моделирования элементов кориолисовых расходомеров оказывает масса датчиков [99]. Это связано с тем, что ответная часть источника колебаний расположена строго по центру трубки и обладает минимальной массой, а датчики температуры размещают за пределами расходомерной трубки. Была проведена серия моделирований для исследования влияния массы датчиков на собственные частоты расходомерной трубки, заполненной жидкостью, без парафиновых отложений. Результаты продемонстрированы для собственной частоты (таблица 4.2, рисунок 4.2). Поскольку комплексная часть числа очень мала, ею можно пренебречь.

Таблица 4.2 – Зависимость собственной частоты расходомерной трубки, заполненной жидкостью, без парафиновых отложений от добавленной массы датчиков

Масса датчика, 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

По результатам моделирования рассчитана относительная погрешность значения собственной частоты $\delta f = \frac{|f_{s0} - f_{si}|}{f_{s0}}$ для случая, когда масса датчиков не учитывается; f_{s0} – собственная частота без добавленной массы датчиков, f_{si} – собственная частота с учетом добавленной массы датчиков.

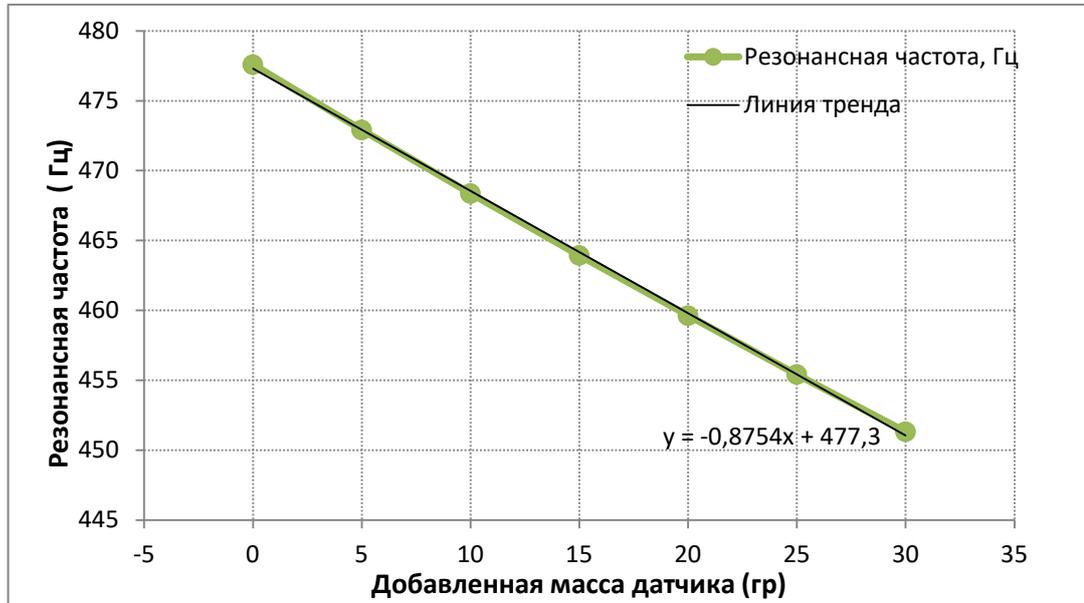


Рисунок 4.2 – График зависимости значений собственной частоты расходомерной трубки, заполненной жидкостью, от добавленной массы датчиков

Как видно из представленных результатов моделирования (таблица 4.2 и рисунок 4.2), собственная частота системы уменьшалась с увеличением величины добавленной массы датчиков. Линейная линия тренда имеет величину достоверности и аппроксимации $R^2 = 0,9995$, экспоненциальная: $R^2 = 0,9998$. Величина достоверности отличается только в 4-й значащей цифре, и оба значения практически идеально подходят для данных, однако с практической точки зрения в инженерной практике лучше использовать линейную линию тренда.

Проведенное исследование демонстрирует высокую чувствительность разработанной модели. Данная чувствительность присуща для различных размеров расходомерной трубки, что позволяет диагностировать минимальные (от 5 г) изменения массы в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

Полученные результаты соответствуют результатам экспериментальных исследований других авторов [99], что служит подтверждением достоверности разработанной модели.

Также было проведено исследование в частотной области *Frequency domain* в *COMSOL*, получена амплитудно-частотная характеристика для прямотрубного кориолисова расходомера [125]. На рисунке 4.3 представлена зависимость амплитуды вынужденных колебаний расходомерной трубки от частоты вынуждающей силы в диапазоне частот от 400 до 600 Гц.

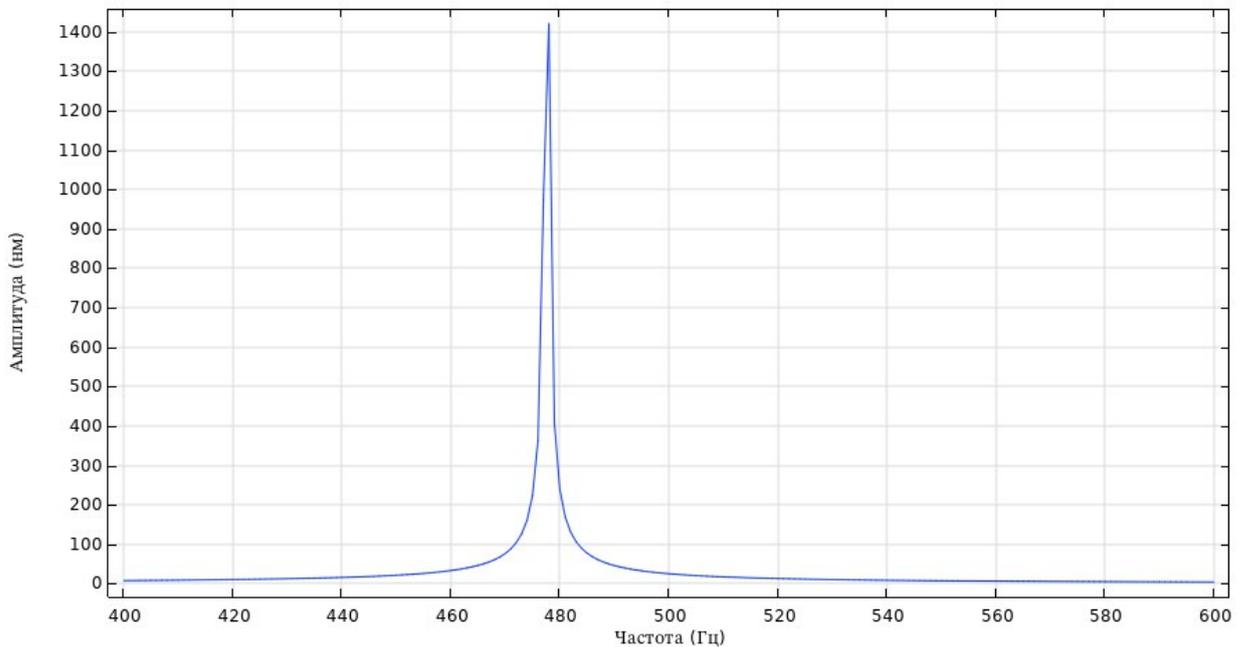


Рисунок 4.3 – Зависимость изменения амплитуды от частоты для прямотрубной конструкции расходомера

Как видно из графика, при некоторой определенной частоте амплитуда колебаний достигает максимального значения, эта частота и является собственной частотой колебаний расходомерной трубки.

4.2. Моделирование течения жидкости

Было выполнено моделирование протекающего по расходомерной трубке полностью развитого турбулентного потока жидкости с помощью осредненных

по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса и модели турбулентности *SST*. Диапазон скоростей показан на шкале справа. Для наглядности здесь показана только левая часть прямой расходомерной трубки (рисунок 4.4).

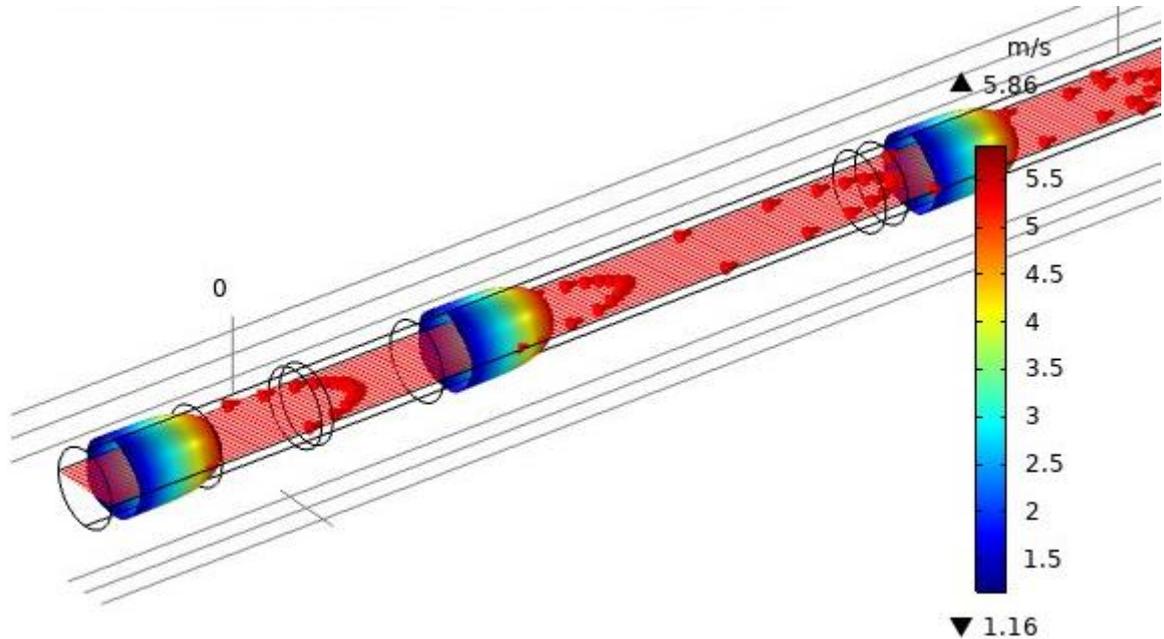


Рисунок 4.4 – Поле скоростей турбулентного потока жидкости (2,0 кг/с) для прамотрубной геометрии трубки

Результаты показывают скорость потока жидкости при его движении по расходомерной трубке. Как видно из рисунка 4.4, поток имеет параболический профиль скорости.

На рисунке 4.5 показан аналогичный результат моделирования для *U*-образной геометрии трубки с радиусом кривизны 30°.

Как видно из рисунков 4.4 и 4.5, моделирование хорошо коррелирует с теоретическими данными (см. разд. 2.2), показывая, что модель турбулентности *SST* с достаточной точностью отражает физические параметры потока и его кривизну для *U*-образной геометрии трубки [132].

Поскольку в работе промоделирован сценарий течения потока жидкости, в котором присутствуют границы раздела расходомерной трубки и жидкости, то эффекты пограничного слоя имеют решающее значение для точности результатов. Поэтому оптимизация сетки пограничного слоя (согласно разд. 6

методики численного моделирования) повторялась, пока не было достигнуто точное моделирование границы раздела сред. Этот параметр в *COMSOL* характеризуется разрешением стенки, выраженным в единицах вязкости.

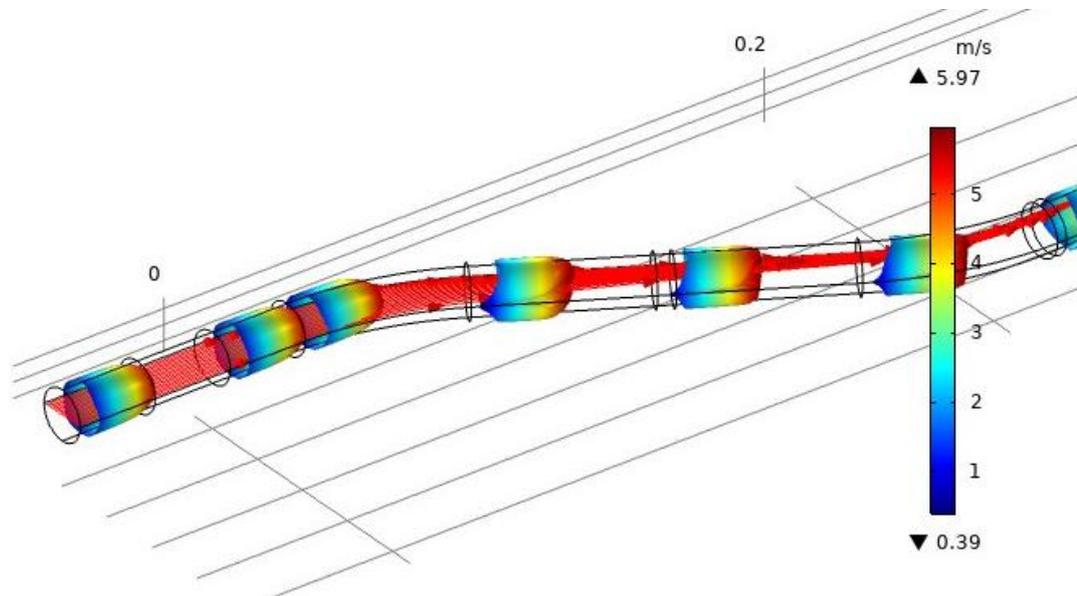


Рисунок 4.5 – Поле скоростей турбулентного потока жидкости (2,0 кг/с) для U-образной (30°) геометрии трубки

На рисунке 4.6 представлен результат моделирования разрешения стенки для U-образной геометрии трубки, прямотрубная конструкция имеет аналогичные характеристики.

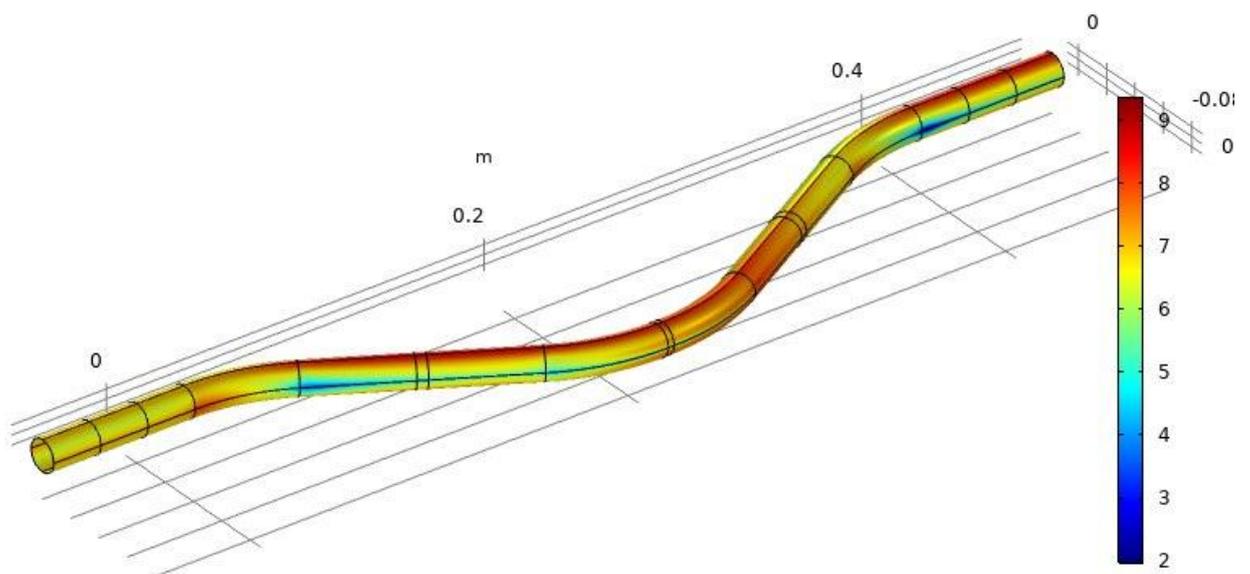


Рисунок 4.6 – Параметр «Разрешение стенки» в единицах вязкости

Как видно из рисунка 4.6, полученные значения на протяжении всей трубки значительно меньше 100, что говорит о том, что граничная сетка на стенках достаточно уточнена [132, 133].

На рисунке 4.7 показан контурный график распределения давления жидкости.

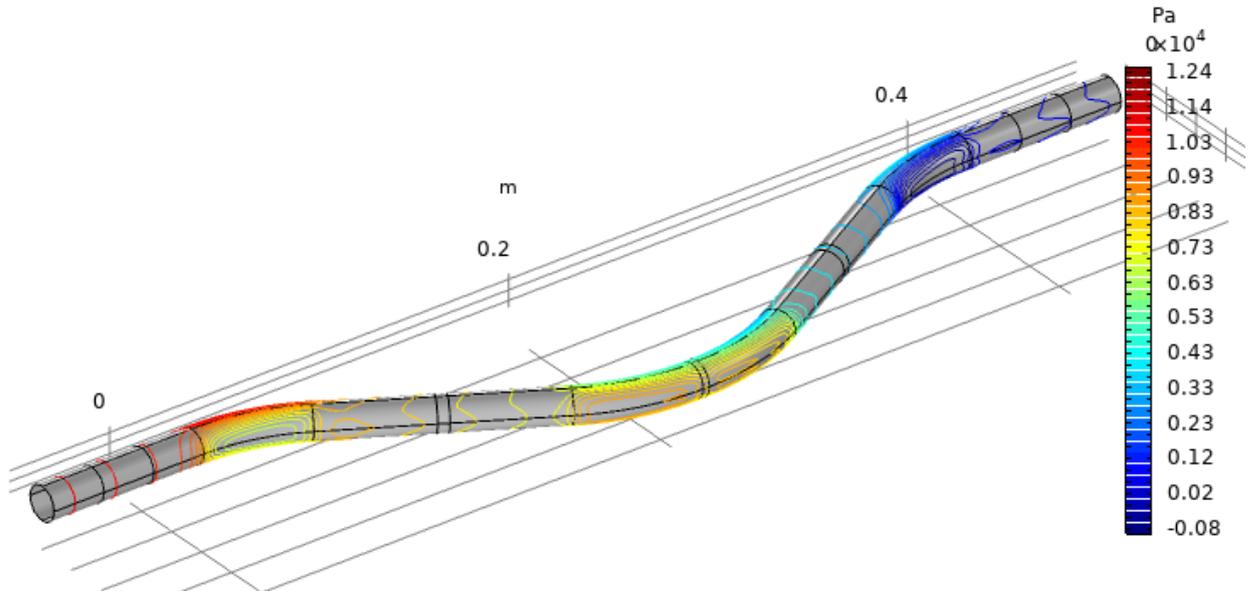


Рисунок 4.7 – Контурный график распределения давления жидкости для U-образной (30°) геометрии трубки

Как видно, давление жидкости неравномерно распределено по контурам всей конструкции расходомерной трубки. Неравномерность характерна для изогнутых участков и обусловлена наличием центробежных сил.

На выходе давление стремится к 0, что соответствует заданным граничным условиям.

Таким образом, было проведено моделирование стационарного полностью развитого потока жидкости, протекающего по расходомерной трубке. На этом этапе реализовано одностороннее влияние жидкости на конструкцию расходомерной трубки.

4.3. Моделирование колебаний расходомерной трубки с протекающей жидкостью

На этом этапе согласно реализованным алгоритмам численной методики была осуществлена двусторонняя итеративная связь системы между расходомерной трубкой и протекающей жидкостью [134]. На рисунке 4.8 представлена деформация трубки с увеличенной для наглядности амплитудой.

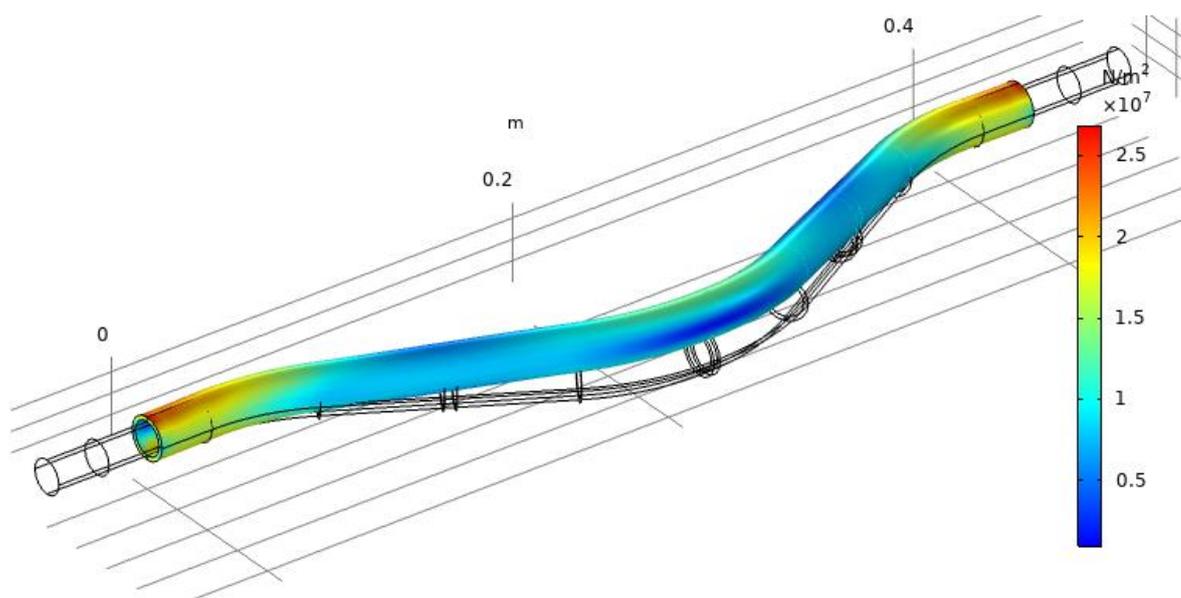


Рисунок 4.8 – Деформация U-образной (30°) расходомерной трубки

Полученные результаты моделирования показывают, что колебательный процесс установившийся и амплитуда колебаний постоянна (рисунок 4.9). Амплитуда перемещения точек левой и правой половин расходомерной трубки намного больше, чем величина различия их траекторий. Для наглядности масштабирован диапазон, в котором левая и правая половины расходомерной трубки пересекают горизонтальный уровень, что представлено на рисунке 4.10.

Как видно из рисунка 4.10, левая и правая половины расходомерной трубки под воздействием сил Кориолиса имеют различия в форме колебаний, выраженное в виде временной задержки между колебаниями половин расходомерной трубки. Результаты моделирования соответствуют другим исследованиям [97, 108, 135], что говорит о достоверности модели.

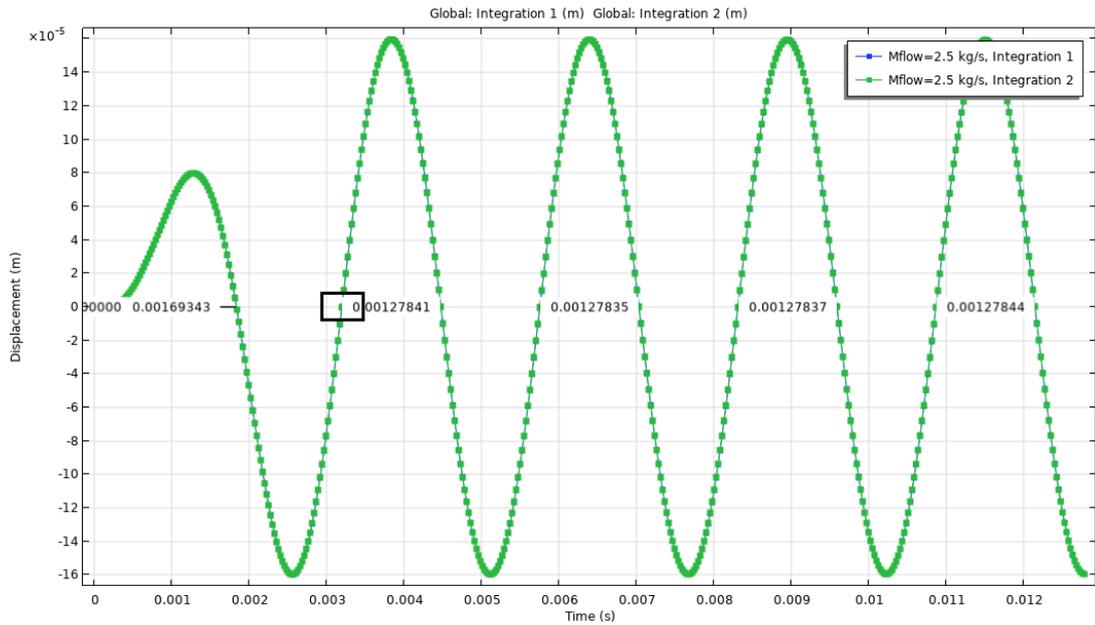


Рисунок 4.9 – Перемещение точек на половинах расходомерной трубки

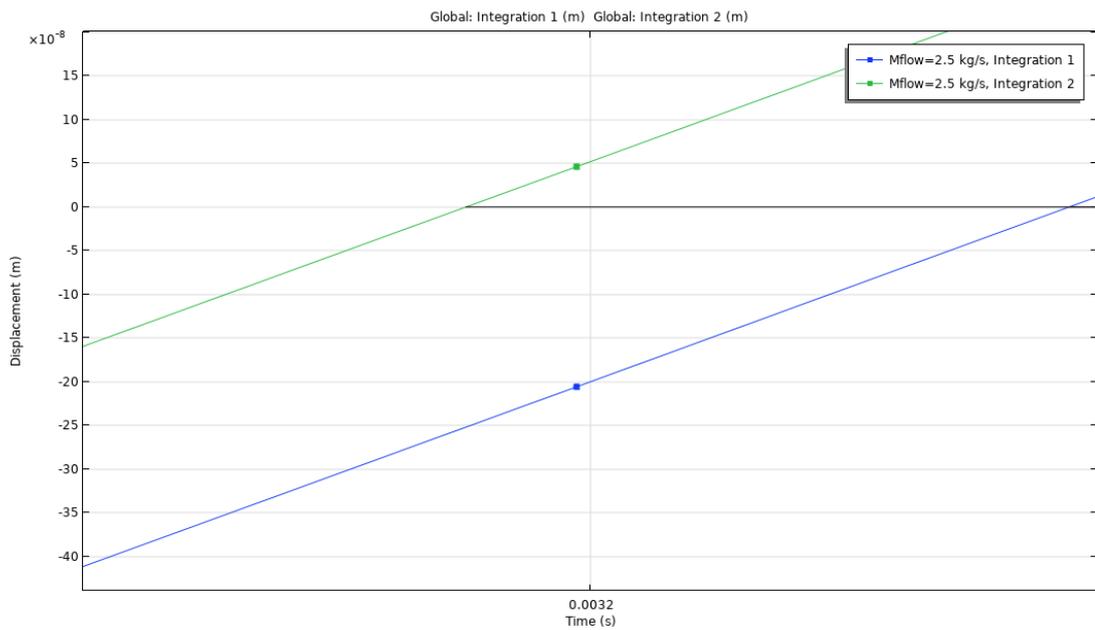


Рисунок 4.10 – Временная задержка при прохождении горизонтального уровня между половинами расходомерной трубки

На рисунке 4.11 представлен результат моделирования расходомерной трубки с протекающей жидкостью в виде фазовой задержки между половинами расходомерной трубки. Временная и фазовая задержки позволяют рассчитать значение скорости измеряемой жидкости для известных форм и параметров расходомерной трубки. На графике видно, что с увеличением массового расхода

увеличивается разность фаз двух выходных сигналов с датчиков в левой и правой частях расходомерной трубки. Нелинейность зависимости фазового сдвига от величины массового расхода обусловлена ограничениями эластичности материала расходомерной трубки.

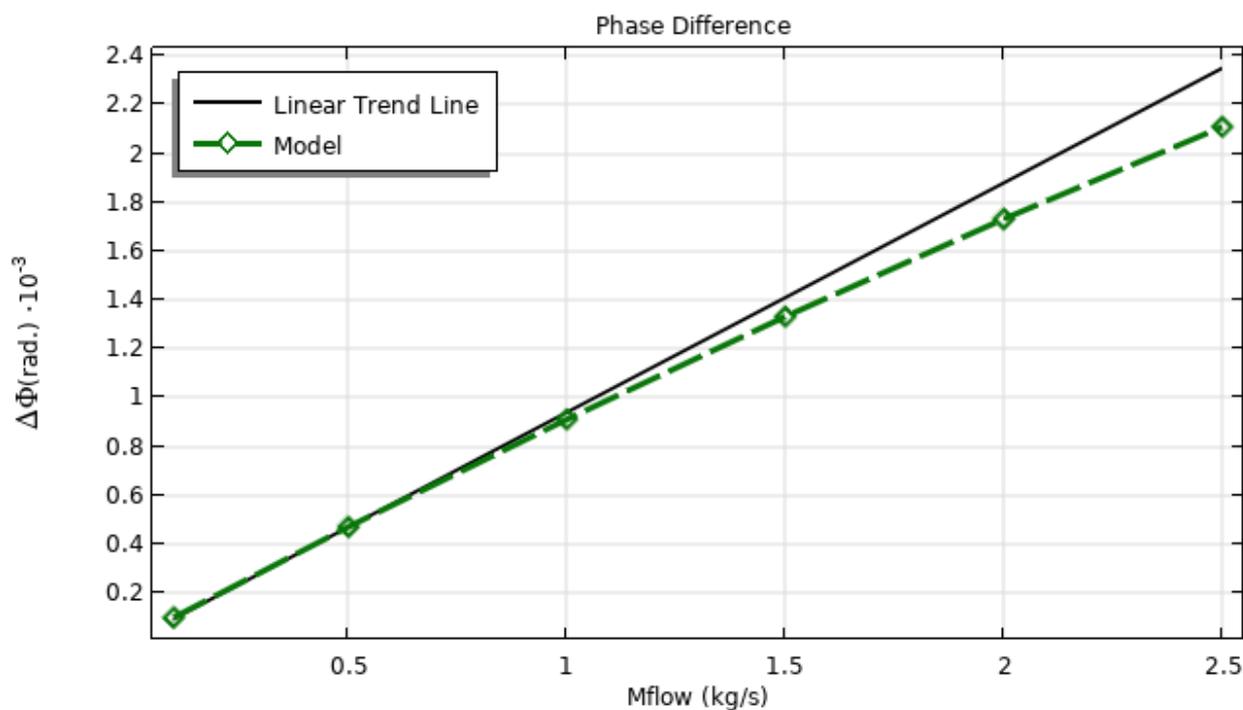


Рисунок 4.11 – Фазовая задержка сигналов

Результаты моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» представлены в диссертационном исследовании в виде временной задержки. Это обусловлено удобством оценки влияния различных факторов и возможностью анализа динамики при формировании установившихся процессов.

4.4. Исследование геометрии расходомерной трубки

Было проведено сравнительное исследование геометрических форм расходомерной трубки, отличающихся радиусами кривизны трубок от 0° (прямотрубный расходомер) до 90° (U-образный расходомер) с шагом 30°. Моделирование выполнялось на трубках с одинаковым диаметром. С ростом

радиуса кривизны длина расходомерной трубки увеличивалась ввиду сохранения жесткости конструкции расходомерной трубки. Варианты геометрий расходомерной трубки представлены на рисунке 4.12.

Данное исследование проводилось с целью анализа чувствительности измерения массового расхода как функции от временной задержки.

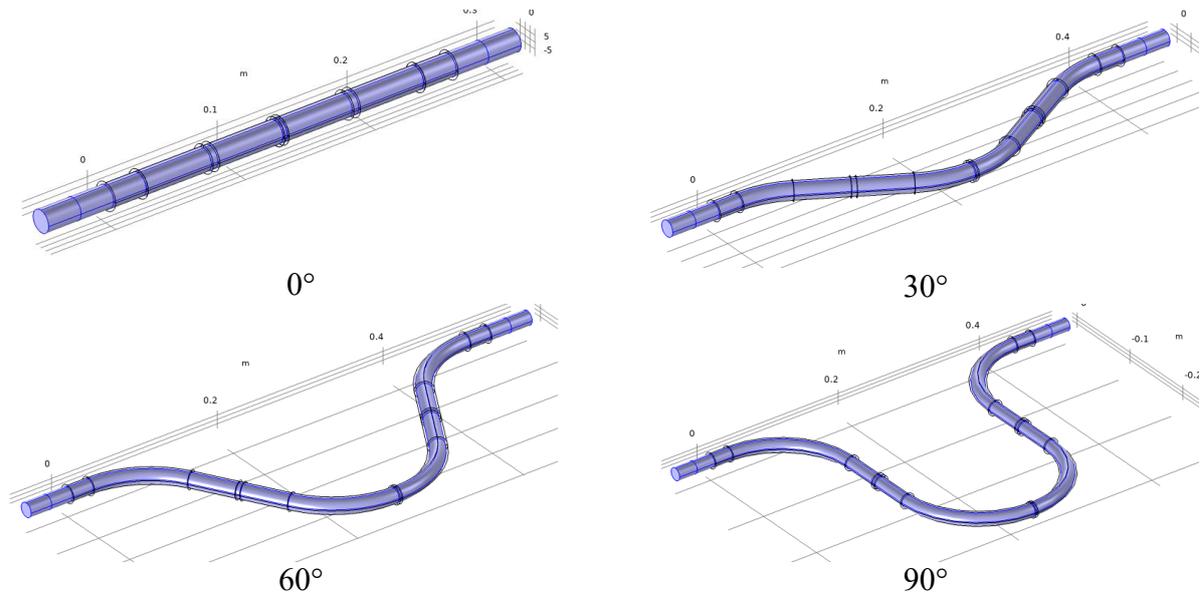


Рисунок 4.12 – Исследованные геометрические формы трубок

На рисунке 4.13 представлена зависимость временной задержки от массового расхода и радиуса кривизны расходомерной трубки.

Полученные результаты (рисунок 4.13) позволяют заметить, что прямотрубные конструкции и *U*-образные конструкции с радиусом кривизны до 30° обладают гораздо меньшей чувствительностью по сравнению с другими формами. Это обусловлено их длиной, а следовательно, количеством жидкости в трубке и жесткостью расходомерной трубки. С точки зрения удобства эксплуатации при измерении многофазных потоков наиболее целесообразно применять прямотрубные расходомеры. Но сложность их изготовления и низкая чувствительность прямой трубки без балансира, который еще больше усложняет производство и настройку, не позволяют применять такие конструкции повсеместно в нефтегазовой отрасли. Кориолисовы расходомеры с *U*-образной

формой трубки обладают гораздо большей чувствительностью, но при этом более сложны в эксплуатации применительно к нефтегазовой отрасли.

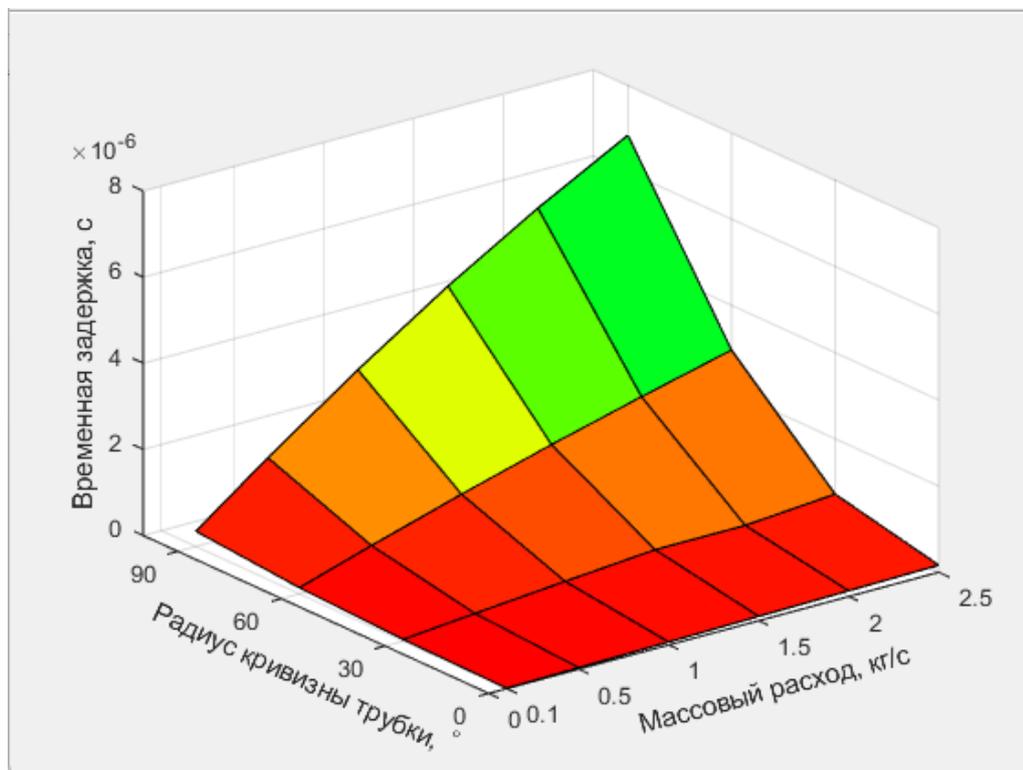


Рисунок 4.13 – Зависимость временной задержки от массового расхода и радиуса кривизны расходомерной трубки

Наличие в конструкции расходомерной трубки большего радиуса кривизны, помимо увеличения чувствительности, приводит к возникновению дополнительных инерционных сил, связанных с кривизной трубки и возникающих из-за этих центробежных сил в жидкости. Их вектор направлен перпендикулярно векторам сил Кориолиса, имеет локальное размещение и практически не влияет на определение массового расхода. Но если рассматривать процесс опарафинивания расходомерной трубки, то наличие дополнительного давления, возникающего от действия центробежных сил, особенно при высоких скоростях потока, приведет к дополнительным отложениям парафина, что негативно скажется на работе расходомера, создавая дополнительную массу.

При этом модель с радиусом кривизны расходомерной трубки 30° демонстрирует форму, при которой положительные свойства прямотрубного

расходомера частично сохраняются, но при этом увеличивается чувствительность. Далее предлагается исследовать модели с малыми радиусами кривизны расходомерной трубки, так как они менее подвержены опарафиниванию.

Для того чтобы выполнить численное сравнение результатов моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с опарафиниванием и без него, проведен вычислительный эксперимент с расходомерными трубками малого радиуса кривизны от 0° до 30° с шагом 5° (рисунок 4.14) и при скоростях потока, соответствующих массовому расходу от 0,1 до 2,5 кг/с без наличия парафиновых отложений.

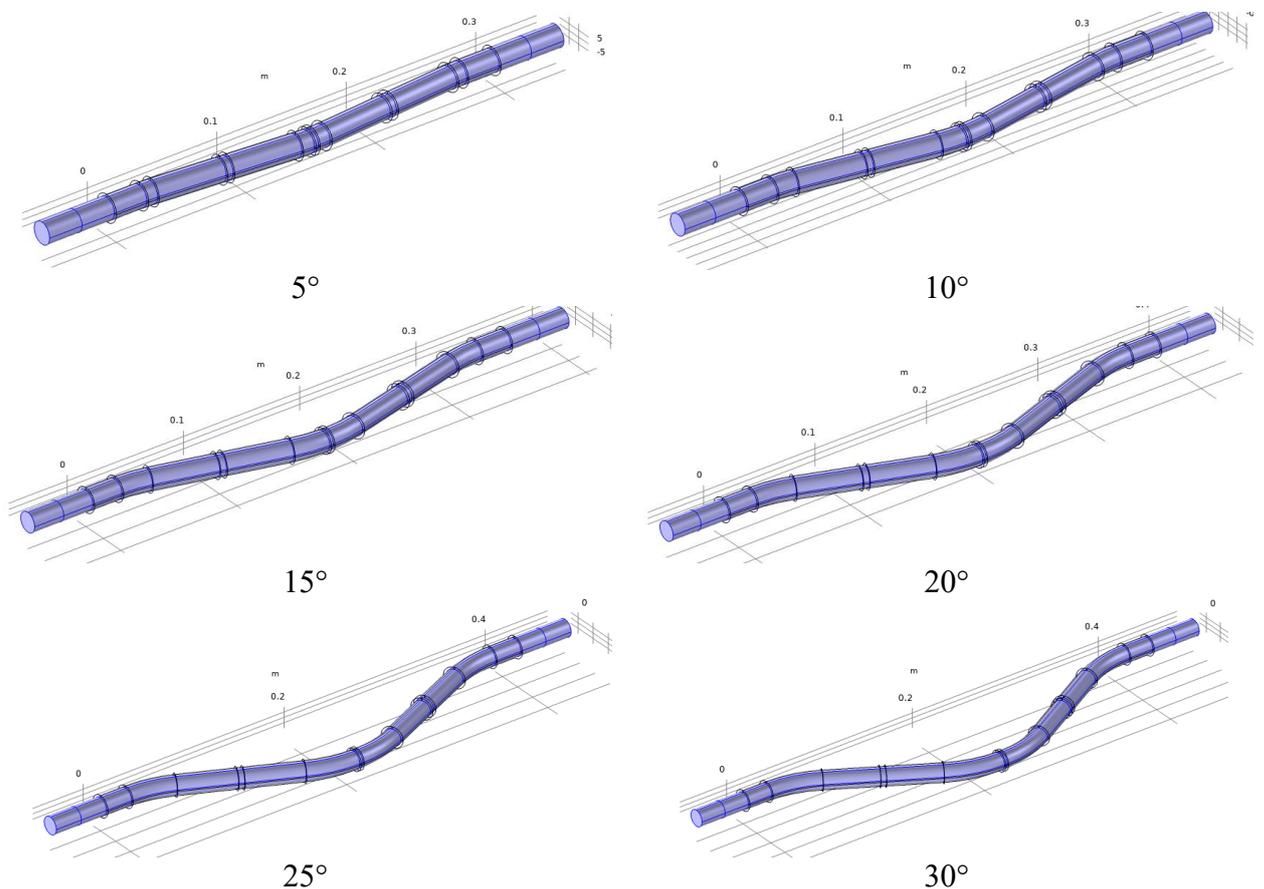


Рисунок 4.14 – Формы расходомерных трубок малого радиуса кривизны от 0° до 30° с шагом 5°

Чувствительность расходомерных трубок, представленных на рисунке 4.14, оценивалась по величине временной задержки у представленных форм расходомерных трубок при указанных массовых расходах потока.

Как видно из рисунка 4.15, чувствительность возрастает с увеличением угла изгиба трубки. Это также объясняется увеличивающейся длиной расходомерной трубки при сохранении жесткости системы, что подтверждается многочисленными исследованиями [87, 95, 136].

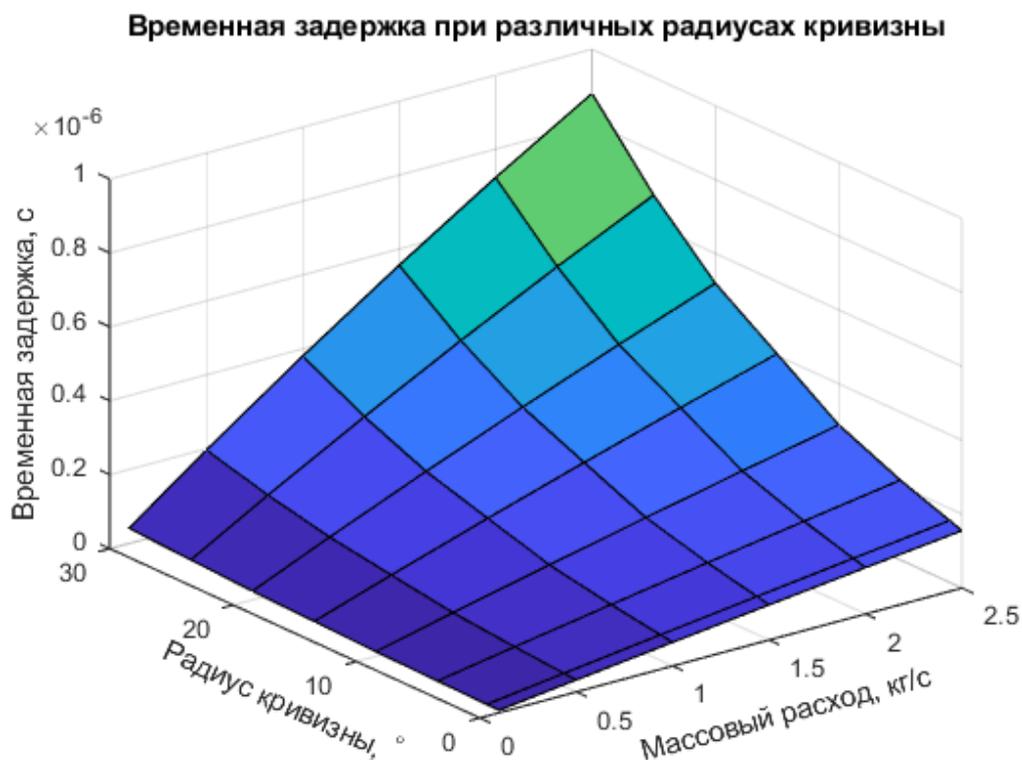


Рисунок 4.15 – Зависимость изменения временной задержки от радиуса кривизны трубки от 0° до 30° и массового расхода потока от 0,1 до 2,5 кг/с без учета опарафинивания

Существующие системы контроля опарафинивания трубопроводов, применяемые для прогнозирования опарафинивания расходомеров, не позволяют спрогнозировать нелинейность/неравномерность отложений. Наличие дополнительной массы или ее неравномерное распределение по длине расходомерной трубки широко рассматривалось в научной литературе [99]. Но неравномерность опарафинивания не рассматривалась как источник возникновения локальных центров с дополнительной массой на расходомерной трубке. Поэтому далее промоделировано влияние осаждения парафина на точность определения параметров массового расхода, а также представлена

оценка чувствительности моделируемой системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» в зависимости от радиуса кривизны и наличия парафиновых отложений.

4.5. Исследование равномерного опарафинивания расходомерной трубки

Была проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию работы системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» кориолисова расходомера с отложениями парафина. Во всех экспериментах массовые расходы изменяются от 0,1 до 2,5 кг/с, радиус кривизны изменяется от 0° до 30° с шагом 5° . Форма отложений – равномерная, соответствующая отложениям в нефтеперекачивающих трубах при турбулентном потоке жидкости [137–139].

Результаты моделирования изменений значений временной задержки с учетом опарафинивания трубки представлены на рисунке 4.16. Для наглядности сравнения на рисунке 4.16,*а* представлены результаты без опарафинивания, а на рисунке 4.16,*б* – с учетом слоя парафина 1 мм.

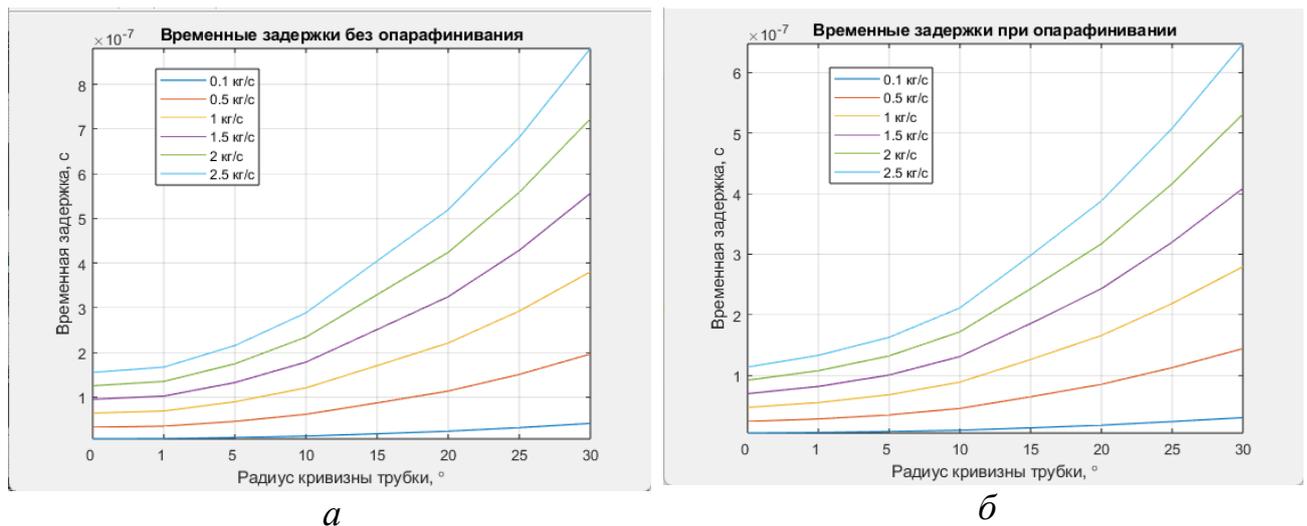


Рисунок 4.16 – Сравнение результатов моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»
а – без опарафинивания; *б* – с опарафиниванием в 1 мм

Трехмерный график, показывающий зависимость временной задержки при опарафинивании расходомерной трубки при различных параметрах радиуса кривизны расходомерной трубки и различных массовых расходах, представлен на рисунке 4.17.

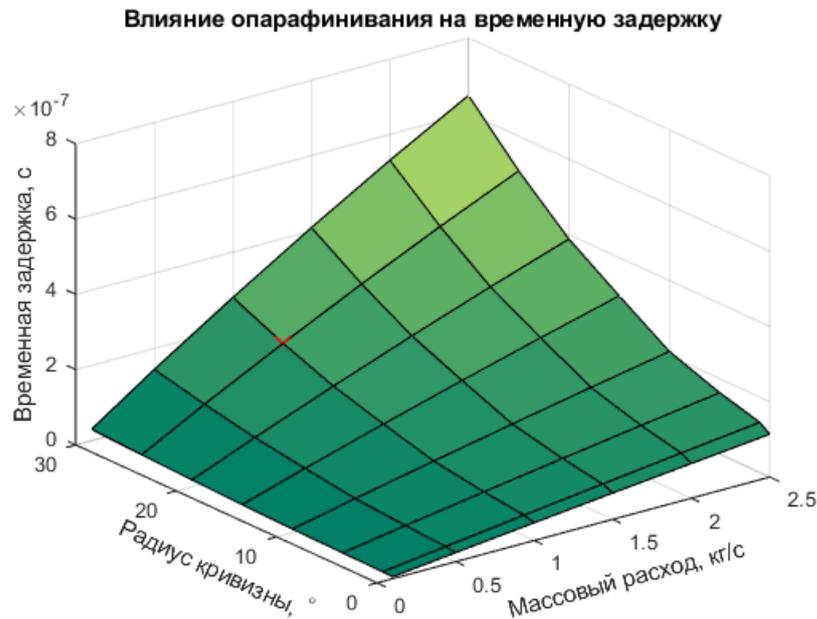


Рисунок 4.17 – Зависимость изменения временной задержки от радиуса кривизны трубки и массового расхода потока с учетом опарафинивания в 1 мм

Представленная оценка чувствительности различных форм расходомерных трубок при протекании через них потоков показывает, что форма распределения временной задержки в зависимости от угла изгиба и массового расхода жидкости не изменили свою форму, но изменились числовые значения [140]. Рассмотрим абсолютную погрешность измерений, вызванную опарафиниванием трубки (рисунок 4.18).

Как видно из рисунка 4.18, величина абсолютной погрешности изменяется неравномерно с изменениями временной задержки для каждого радиуса кривизны расходомерной трубки. Это говорит о том, что величина относительной погрешности будет нелинейной для каждого из рассмотренных радиусов [140]. Относительная погрешность представлена на рисунке 4.19.

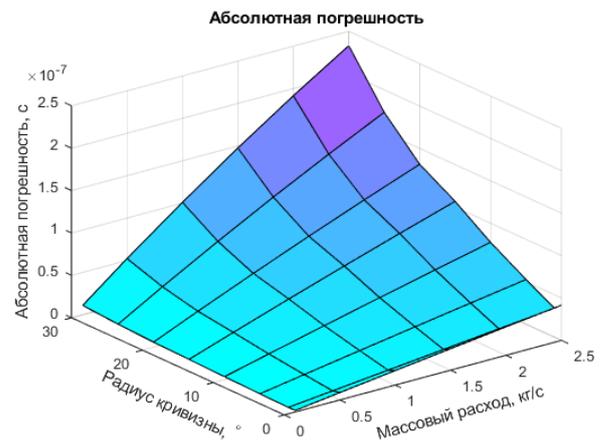
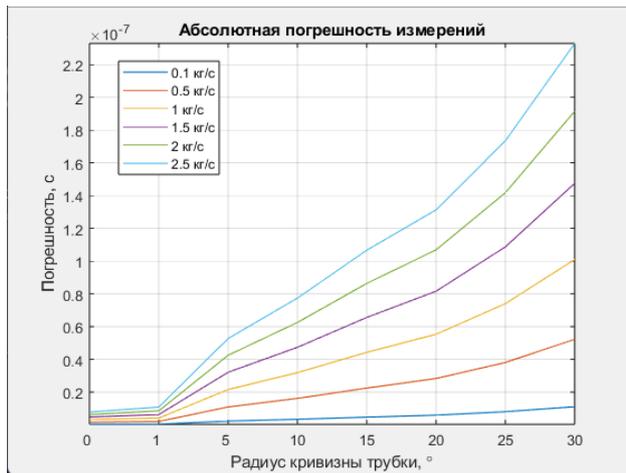


Рисунок 4.18 – Абсолютная погрешность измерений в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость», вызванная опарафиниванием

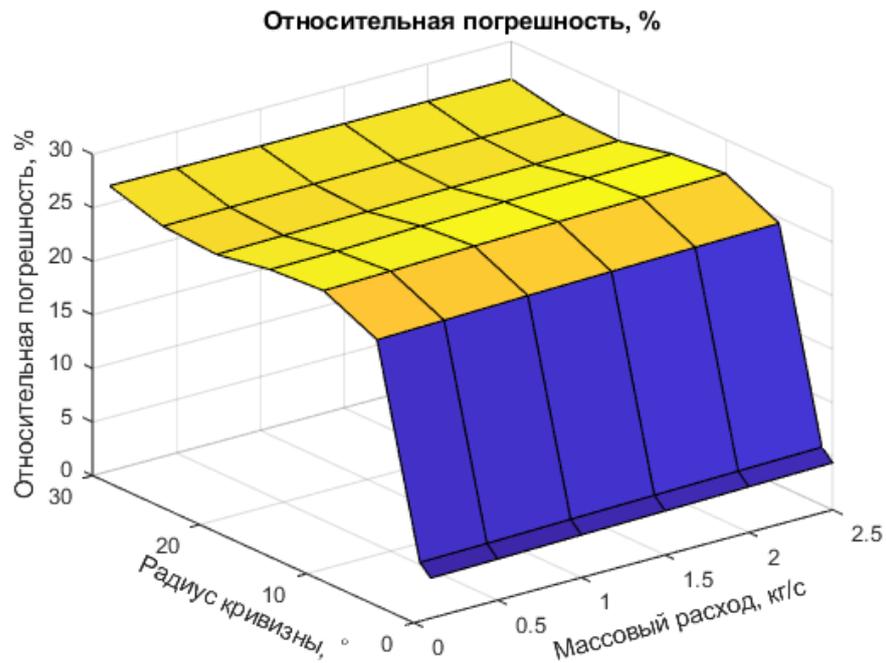


Рисунок 4.19 – Относительная погрешность измерений временной задержки в моделируемой системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость» при наличии опарафинивания трубки

Как видно из рисунка 4.19, величина относительной погрешности значительно изменяется при изменении радиуса кривизны расходомерной трубки. Это может быть обусловлено тем, что трубки с малыми радиусами кривизны обладают большей жесткостью и наличие парафиновых отложений в меньшей

степени влияет на точность определения параметров массового расхода [140]. Величина относительной погрешности, достигающая 26,5 %, обусловлена большой толщиной парафиновых отложений, составляющих 12,5 % от внутреннего диаметра расходомерной трубки в моделируемой системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

Для оценки влияния толщины парафиновых отложений на изменение временной задержки проведена серия вычислительных экспериментов по моделированию системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» с различными количественными параметрами. В частности, исследовано влияние толщины парафина, изменяющееся от 0,1 до 1 мм с шагом в 0,1 мм. Результаты эксперимента представлены на рисунке 4.20 и более подробно в приложении А.

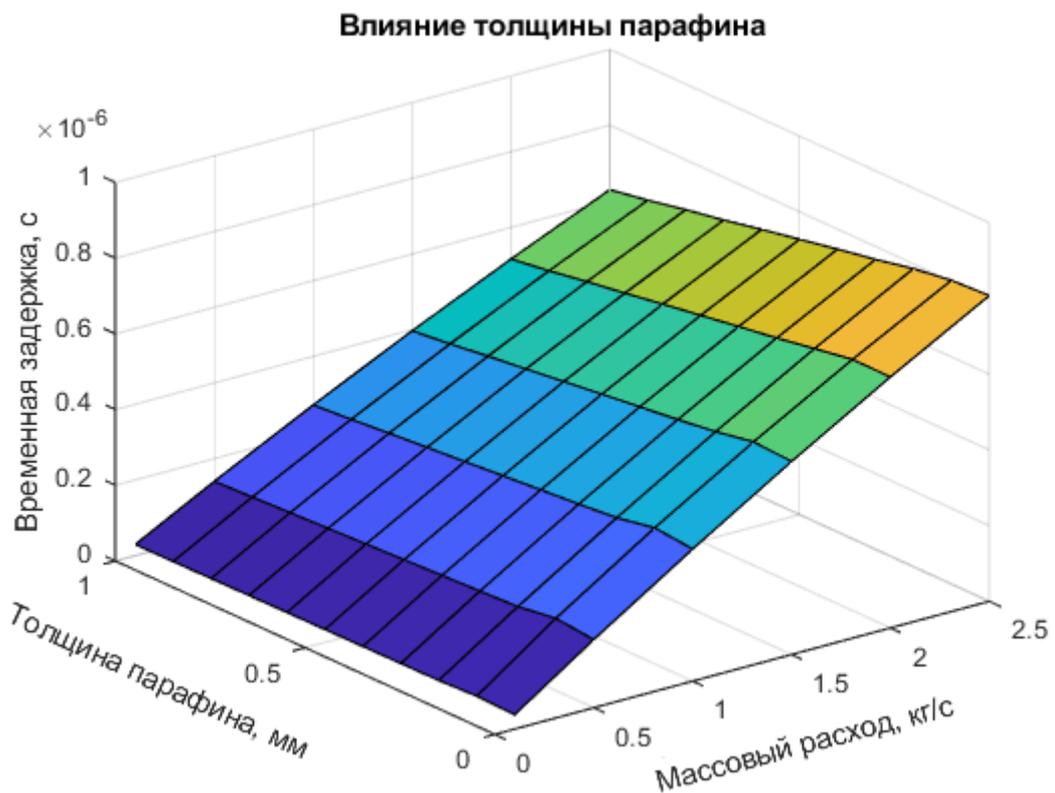


Рисунок 4.20 – Влияние толщины парафина на временную задержку

Помимо изменения временных задержек у расходомеров с парафиновыми отложениями в трубке наблюдалось и изменение собственных частот. Это объясняется наличием дополнительной массы в трубке. Графики распределения

собственных частот представлены на рисунке 4.21. На нем представлены изменения первой собственной частоты колебаний в зависимости от толщины парафинового слоя в трубке моделируемой системы.

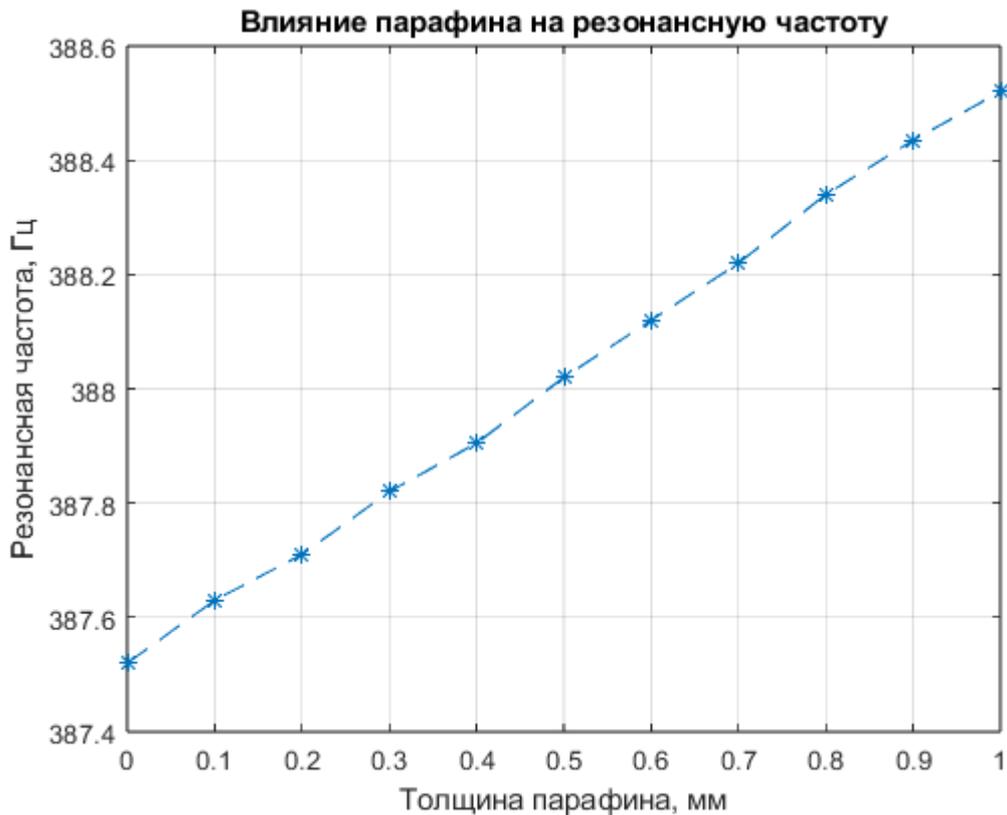


Рисунок 4.21 – Влияние толщины парафинового слоя на собственную частоту системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость»

Как видно из рисунка 4.21, толщина парафиновых отложений вносит вклад в показатели собственной частоты. Оценить его в численном виде затруднительно ввиду различия форм расходомерных трубок и сложности вычисления вклада собственной частоты на массовый расход каждой формы трубки.

Полученные результаты согласуются с теоретическими расчетами и экспериментами других авторов [78], что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

4.6. Исследование неравномерного опарафинивания расходомерной трубки

Далее исследовано неравномерное опарафинивание расходомерной трубки, для этого выполнен анализ распределения давления в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость» при реализованной двусторонней итерационной связи (рисунок 4.22). Приведенные результаты демонстрируют неравномерность распределения давления по сечению трубки, что полностью соответствует математической модели G. Bobovnik и соавторов [49], рассмотренной в разд. 1.2.5. Результат моделирования представлен на рисунке 4.22.

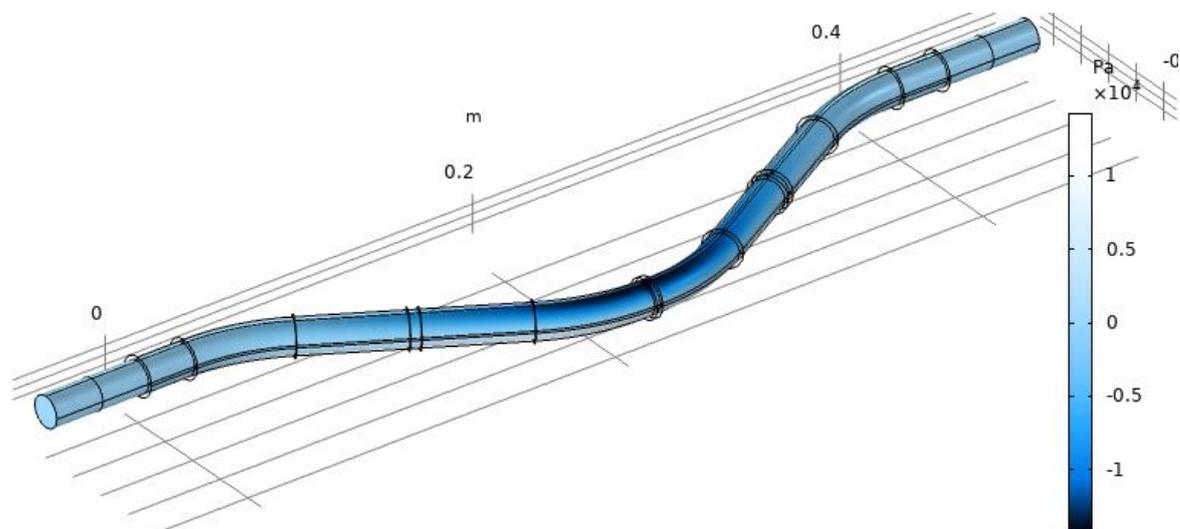


Рисунок 4.22 – Распределение давления вызванного силой Кориолиса по расходомерной трубке

Для сравнения численных показателей проанализирована величина давления в точках из первой и второй четвертей (см. рисунок 1.4). При моделировании для большей наглядности выбран поток с массовым расходом 2,5 кг/с как максимальный для моделируемой системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость».

Результаты моделирования представлены на рисунке 4.23.

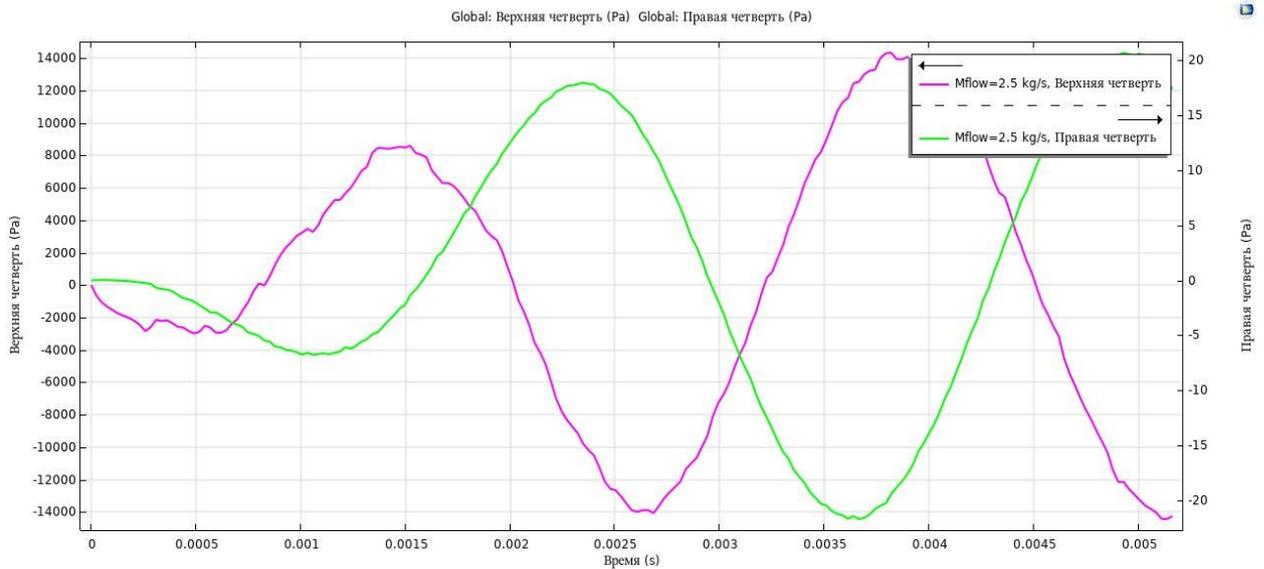


Рисунок 4.23 – Распределение давления по четвертям

Поскольку под действием Кориолисовой силы распределение давления по четвертям сечения расходомерной трубки неравномерно, то и толщина осажденного парафина неравномерна. Форма отложений отличается от круглой и имеет форму эллипса.

Построена модель, позволяющая оценить влияние неравномерности парафиновых отложений на стенках расходомерной трубки на параметры массового расхода. Моделирование проведено на модели с радиусом кривизны трубки в 30° . В качестве эталона используется модель с равномерным опарафиниванием. Количество парафина в экспериментах одинаково, изменялась только форма отложений от круглой до эллипсной с разницей между диагоналями эллипса от 1 до 5 % (см. рисунок 2.1). В ходе вычислительного эксперимента оценено влияние формы отложений на собственную частоту системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», а также на изменение временной задержки.

При моделировании период колебаний разбивался на 100 шагов. Данного разбиения достаточно для слабо изменяющегося сигнала. Количество периодов – 6, так как система приходит в установившийся режим, после 2-го периода, что было установлено в ходе вычислительных экспериментов

на длительных временных интервалах и коррелируется с результатами других авторов [49].

На рисунке 4.24 представлена зависимость временной задержки от формы парафинового слоя и массового расхода жидкости.

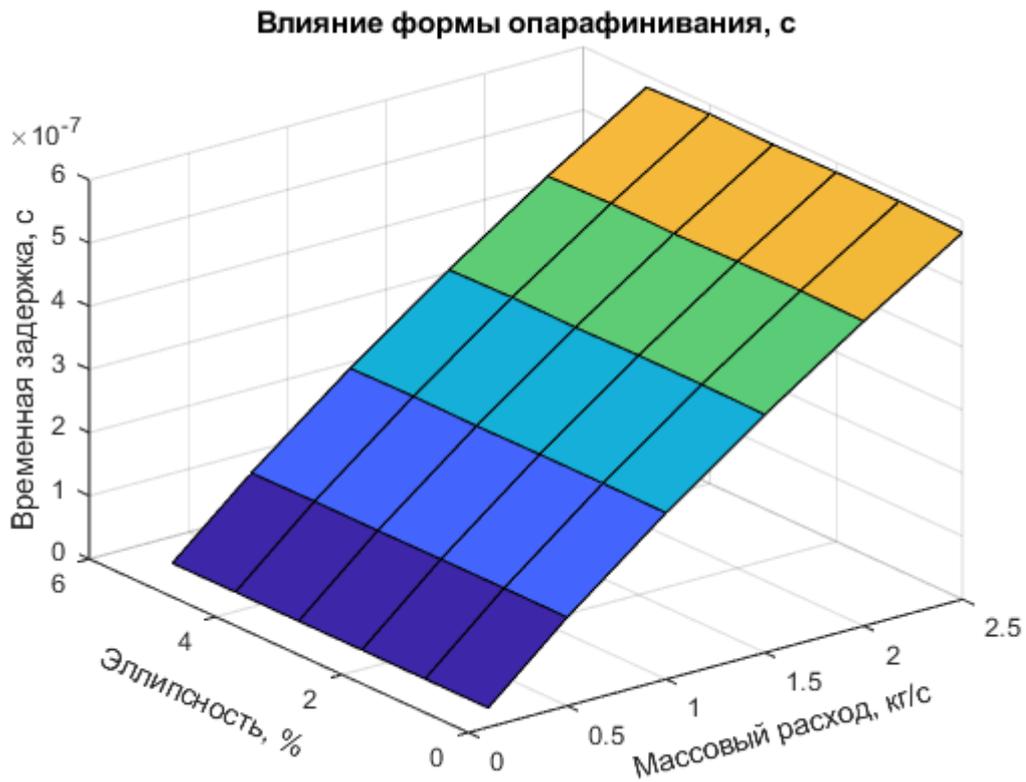


Рисунок 4.24 – Зависимость временной задержки от формы парафинового слоя и массового расхода жидкости

Двумерные графики зависимостей временной задержки от формы парафиновых отложений приведены в приложении Б.

Для проверки точности моделирования был проведен дополнительный эксперимент с более высокой точностью сетки. При этом результаты уточненной модели отличались в численном выражении не более чем на 0,075 % при сохранении форм колебаний. Также были проведены экспериментальные исследования для верификации модели с увеличенным количеством отсчетов на период колебаний, которое составило 500 шт. Точностных изменений и искажений формы не было выявлено. Усредненные значения временной задержки

для различных параметров массового расхода при эллипсности в 5 % приведены на рисунке 4.25.

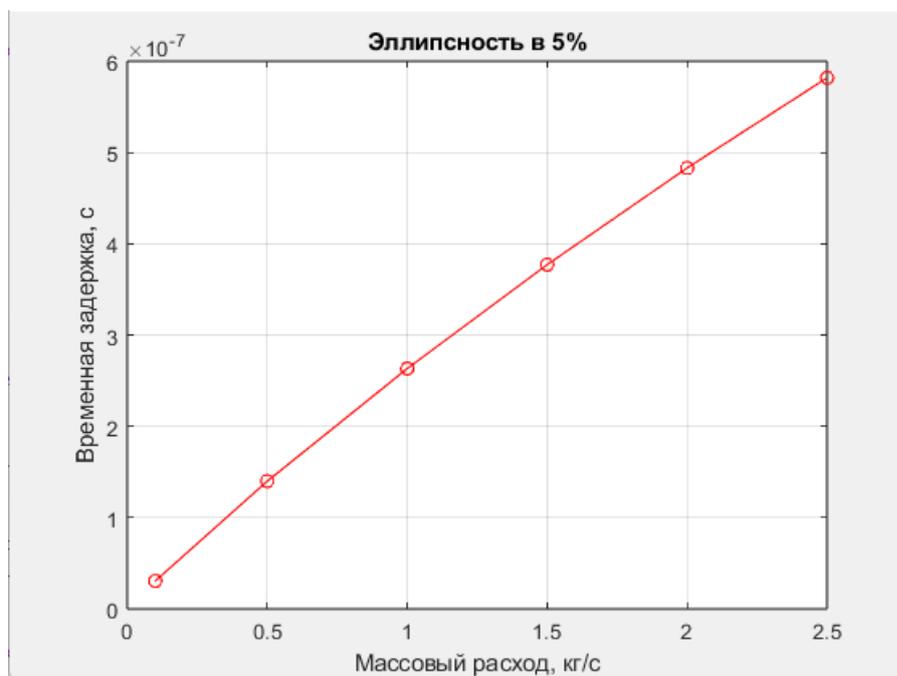


Рисунок 4.25 – Усредненные значения временной задержки для различных параметров массового расхода при эллипсности в 5 %

Усредненные значения позволяют наглядно визуализировать изменение параметра временной задержки, полученной в модели. Для числовой оценки влияния формы отложений на определение параметров массового расхода вычислены значения абсолютной (рисунок 4.26) и относительной погрешности. В качестве истинного значения приняты значения временной задержки, полученные в модели с равномерным распределением парафина. На графиках она обозначается как «Эллипсность, 0 %».

Разработанные модели показали, что относительная погрешность при определении временной задержки сигналов между левой и правой половинами расходомерной трубки в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость» достигает 0,867 % [140]. На рисунке 4.27 приведены относительные погрешности, вызванные неравномерным опарафиниванием и полученные при различных скоростях потока.

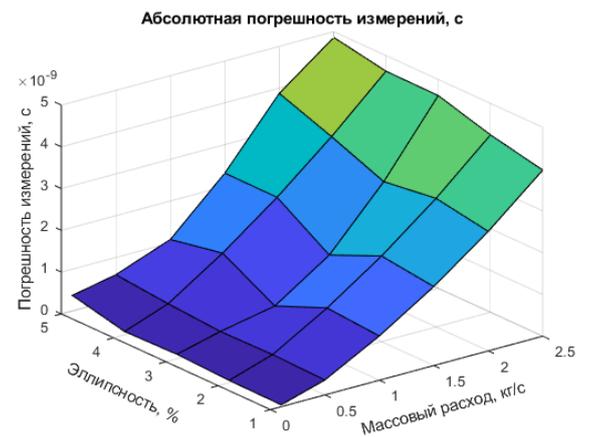
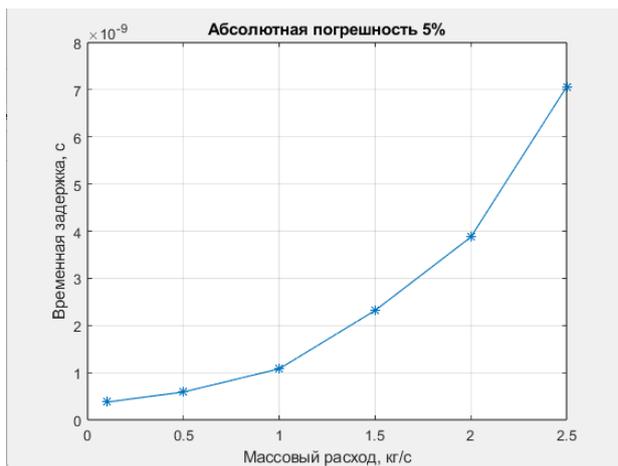
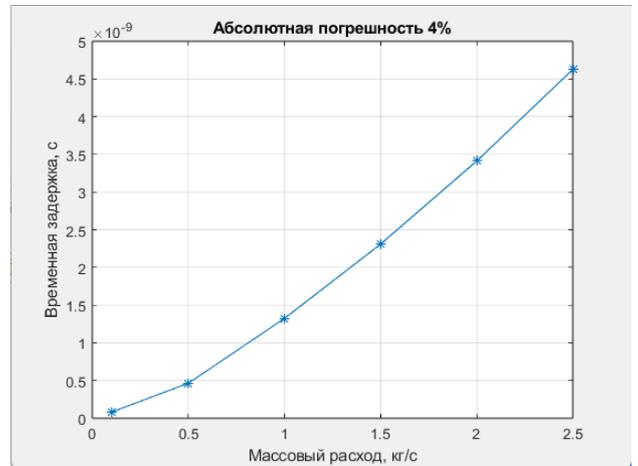
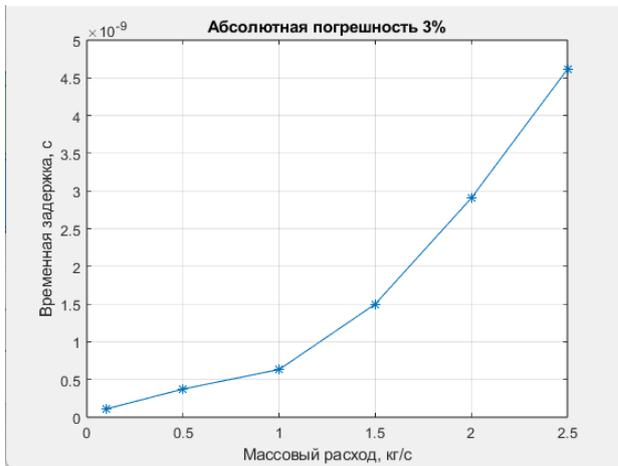
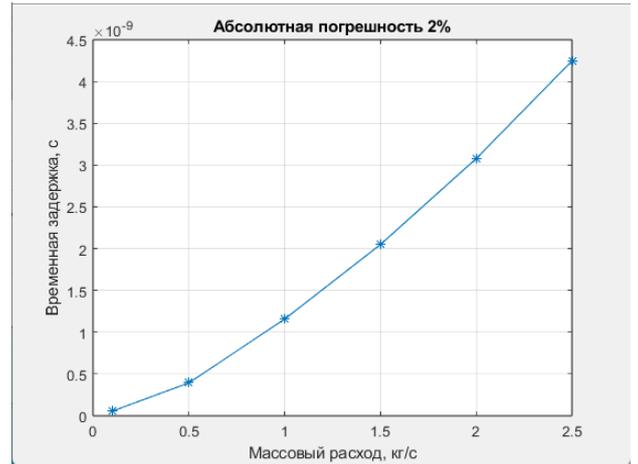
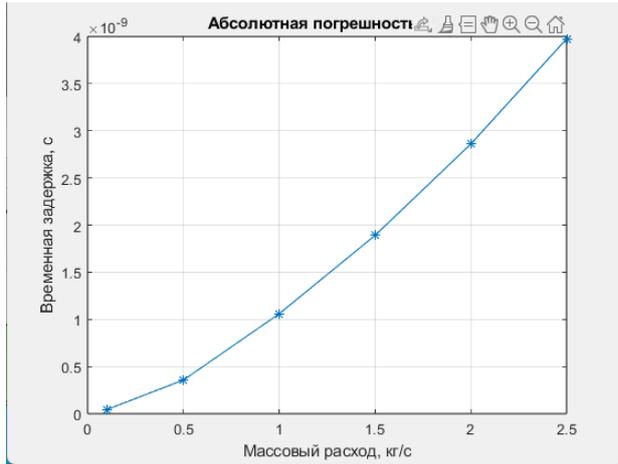


Рисунок 4.26 – Абсолютная погрешность измерений для различных форм опарафинивания

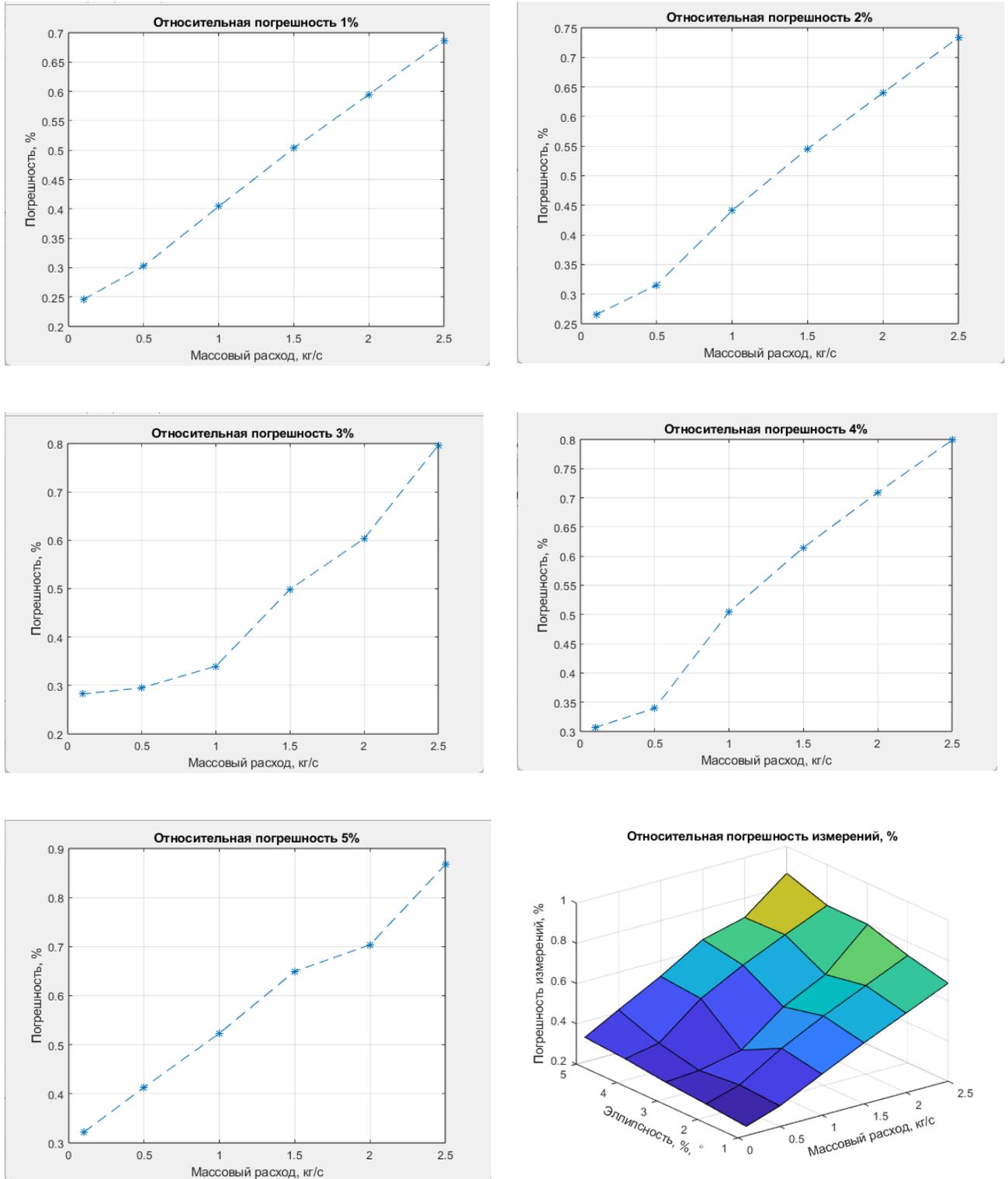


Рисунок 4.27 – Относительная погрешность измерений для различных форм опарафинивания

Таким образом, неравномерность опарафинивания приводит к искажению результатов измерений. С учетом того, что расчеты выполнены с условием

равенства массы парафина при различных значениях эллипсности, можно предположить, что в промышленных условиях, где данное условие не соблюдается, искажения измеряемых величин будут еще больше.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

1. Выявлено, что установка дополнительной массы датчиков на расходомерную трубку массой 10 г вызывает погрешность измерений более 2 %. В качестве дополнительной массы были рассмотрены датчики, расположенные симметрично на входной и выходной половинах расходомерной трубки.

2. Выявлен значительный рост чувствительности (временной задержки) при увеличении радиуса кривизны расходомерной трубки свыше 30°.

3. Установлено влияние толщины парафиновых отложений от 0,1 до 1 мм на определение временной задержки и собственной частоты системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость». Наличие парафиновых отложений толщиной в 1 мм вызывает отклонения в показателях массового расхода, достигающих 26,5 %.

4. Выполнено моделирование неравномерности распределения давления от влияния центробежных и инерционных сил (сила Кориолиса). Влияние силы Кориолиса на изменение давления составляет 14000 Па при массовом расходе 2,5 кг/с.

5. Впервые исследовано отличие эллипсной формы парафиновых отложений по сравнению с кольцевой формой при одинаковой массе. Установлено, что временная задержка изменится на 0,867 % при различии главных осей на 5 % и массовом расходе в 2,5 кг/с.

6. Результаты вычислительных экспериментов позволяют сделать вывод, что получены новые, ранее неизвестные зависимости в виде 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. Это позволило дать практические рекомендации для нефтегазовой отрасли по снижению погрешности измерения кориолисова расходомера при измерении расхода высокопарафинистых нефтей.

Таким образом, решена задача 5 диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе рассматривалась и решалась актуальная задача оценки влияния равномерного и неравномерного 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теньковская, Л. И. Конъюнктура мирового рынка нефти / Л. И. Теньковская // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. Серия: Социальные науки. – 2022. – № 2 (70). – С. 32–40.
2. Ильин, А. Н. Высокопарафинистые нефти: закономерности пространственных и временных изменений их свойств / А. Н. Ильин, Ю. М. Полищук, И. Г. Яценко // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2007. – № 2. – С. 28.
3. Полищук, Ю. М. Физико-химические свойства нефтей: статистический анализ пространственных и временных изменений / Ю. М. Полищук, И. Г. Яценко. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004. – 109 с.
4. Анализ рынка расходомеров в России (с базой импорта-экспорта) [Электронный ресурс] // URL: <https://drgroup.ru/1755-Analiz-rynka-raskhodomeroov-v-Rossii.html> (дата обращения: 10.09.2023).
5. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – Москва : Физматгиз, 1959. – 700 с.
6. Лаптев, А. Г. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике : пособие к расчету аппаратов / А. Г. Лаптев, М. И. Фарахов. – Казань : Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. – 729 с.
7. Ануфриев, Р. В. Влияние ультразвуковой обработки на структурно-механические свойства и состав нефтяных дисперсных систем : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук / Ануфриев Р. В. ; Ин-т химии нефти СО РАН. – Томск, 2017. – 170 с.
8. Семихина, Л. П. Влияние температуры и напряжения сдвига на реологические свойства нефтяных дисперсных систем / Л. П. Семихина, А. М. Пашнина, И. В. Ковалева, Д. В. Семихин // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 36–52. – doi: 10.21684/2411-7978-2018-4-3-36-52.

9. Васькин, В. В. Точные решения для несжимаемой вязкой жидкости: разложение по базису / В. В. Васькин, В. Г. Лебедев, Т. Б. Иванова, В. П. Бовин // Химическая физика и мезоскопия. – 2021. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tochnye-resheniya-dlya-neszhimaemoy-vyazkoy-zhidkosti-razlozhenie-po-bazisu>
10. Реологические свойства нефти. Техническая Библиотека Neftegaz.RU. – URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/ngk/148005-reologicheskie-svoystva-nefti/>
11. Bentley, J. P. Principles of measurement systems / J. P. Bentley. – Ed. 4. – Harlow, England ; New York : Pearson Education Limited, 2005. – 528 p.
12. Уайт, Ф. М. Механика жидкости / Фрэнк М. Уайт. – 5-е изд. – Бостон : Макгроу-Хилл, 2003. – С. 188–189. – ISBN-9780072402179
13. Xuebo, Zheng Flow rate measurement of low GVF gas-liquid two-phase flow with a V-Cone meter / Xuebo Zheng, Xiaodong Sun, Bofeng Bai // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2018. – Vol. 91. – P. 175–183. – doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.10.022
14. Stewart, D. G. Derivation of an Expansibility Factor for the V-Cone Meter / D. G. Stewart, M. Reader-Harris, R. J. W. Peters // Flow Measurement 2001-International Conference, 2001. – URL: https://nciweb.net/mccrometer_pdfs/Vc/24508-74.pdf
15. Li, J. Mass flowrate measurement of wet steam using combined V-cone and vortex flowmeters / J. Li, C. Wang, H. Ding, H. Sun // 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – Torino, Italy, 2017. – P. 1–6. – doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969764
16. Benes, P. Cross correlation flowmeters with AE sensors / P. Benes // Proc. XVI IMEKO World Congress. – Vienna, 2000. – P. 9–12.
17. Vi Ton. A mathematical model of ultrasonic cross correlation flow meters based on industrial experience / Vi Ton // Flow Measurement and Instrumentation. – 2020. – Vol. 75. – P. 101775. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101775

18. Lysak, P. Analytical model of an ultrasonic cross-correlation flow meter, part 2: Application / P. Lysak, D. Jenkins, D. Capone, W. Brown // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2008. – Vol. 19 (1). – P. 41–46.

19. Лапин, А. П. Вихревой метод измерения расхода: модели вихреобразования и современные средства моделирования / А. П. Лапин, А. М. Дружков, К. В. Кузнецова // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника*. – 2014. – № 3. – С. 19–22.

20. Patent USA. Insertion vortex flowmeter element / Nice R., Nice G. 10,605,635 B2, March 31, 2020.

21. Wang, T. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions / T. Wang, R. Baker // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2014. – Vol. 40. – P. 99–123. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.015

22. Patent USA. Method and structure for flow measurement / Smith J. E. 06348071. – 1983.

23. Svete, A. Theoretical and experimental investigations of flow pulsation effects in Coriolis mass flowmeters / A. Svete, J. Kutin, G. Bobovnik, I. Bajsić // *Journal of Sound and Vibration*. – 2015. – Vol. 352. – P. 30–45.

24. Юрманов, В. А. Анализ некоторых погрешностей кориолисовых расходомеров / В. А. Юрманов, К. В. Гудков // *Современные информационные технологии*. – 2006. – № 4. – С. 48–50.

25. 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.

26. Hemp, J. Theory of errors in Coriolis flowmeter readings due to compressibility of the fluid being metered / J. Hemp, J. Kutin // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2006. – Vol. 17. – P. 359–369.

27. Basse, N. T. A review of the theory of Coriolis flowmeter measurement errors due to entrained particles / Nils T. Basse // Flow Measurement and Instrumentation. – 2014. – Vol. 37. – P. 107–118.

28. Kunze, J. W. Coriolis Mass Flow Measurement with Entrained Gas / J. W. Kunze, R. Storm, T. Wang // Sensors and Measuring Systems. ITG/GMA Symposium (3–4 June 2014). – Nuremberg, Germany. – 2014. – ISBN 978-3-8007-3622-5

29. Малышев, С. В. Контроль и воспроизведение двухфазного потока на эталоне массового расхода газожидкостных смесей : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.11.13 / Малышев С. В. – Казань, 2017 – 140 с.

30. Chenquan, H. Wellhead metering based on bubble and resonance Coriolis effect with known gas-liquid ratio / Chenquan Hua, Shuning Sun, Hanqiu Yao, Hao Zhu, Lanchang Xing // Measurement. – 2020. – Vol. 155. – P. 107563.

31. Chenquan, H. Each-Phase Metering with Gas-Liquid Stratified Flow Based on the Multi-Frequency Coriolis Principle / Chenquan Hua, Yixiang Yin, Shuning Sun, Hao Zhu, Lanchang Xing // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10 (21). – P. 7747. – doi: 10.3390/app10217747

32. Li, M. Complex Signal Processing for Coriolis Mass Flow Metering in Two-Phase Flow / Ming Li, H. Manus // Flow Measurement and Instrumentation. – 2018. – Vol. 64 (10). – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.014

33. Ibryaeva, O. Matrix Pencil Method for Coriolis Mass Flow Meter Signal Processing in Two-Phase Flow Conditions / O. Ibryaeva, D. Salov // 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2017. – May 4. – doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076363

34. Zhu, H. From disturbance to measurement: Application of Coriolis meter for two-phase flow with gas bubbles / Hao Zhu, Alfred Rieder, Wolfgang Drahm, Yaoying Lin, Andreas Guettler, Michael Wiesmann, Josef Hubensteiner // Flow Measurement and Instrumentation. – 2021. – Vol. 79. – P. 101892. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101892

35. Semenov, A. Novel Prony-based algorithm for estimating oscillation parameters of Coriolis flowmeter at two-phase flow / A. Semenov, I. Fedosov // 2019 XXIX International Scientific Symposium "Metrology and Metrology Assurance" (MMA). – Sozopol, Bulgaria, 2019. – P. 1–6. – doi: 10.1109/MMA.2019.8936046
36. Mahalingam, S. Using “Digital Twin” Of Coriolis Meters For Multiphase Flow Measurement / S. Mahalingam, M. Arsalan // Offshore Technology Conference. – 2020. – doi: 10.4043/30587-MS
37. Lu, J. Flow calibration method for gas-liquid two-phase flow of Coriolis flowmeter based on LSTM / Jiamin Lu, Li Liu, Guoyu Chen, Jinjin Li, Cheng Li, Yajun Liu // Journal of Physics: Conference Series. – 2022. – Vol. 2369 (1). – P. 012031. – doi: 10.1088/1742-6596/2369/1/012031
38. Sousa, A. M. On the economic impact of wax deposition on the oil and gas industry / A. M. Sousa, M. Joao Pereira, H. A. Matos, T. Pinto Ribeiro // Energy Conversion and Management: X. – 2022. – Vol. 16 (3). – P. 100291.
39. Furuichi, N. Experimental study to establish an evaluating method for the responsiveness of liquid flowmeters to transient flow rates / N. Furuichi, K. H. Cheong, T. Yoshida // Flow Measurement and Instrumentation. – 2021. – Vol. 82. – P. 102067.
40. Païdoussis, M. Fluid-structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow. Volume 1 / M. Païdoussis. – London : Academic Press, 1998. – 572 p.
41. Cheesewright, R. The effect of flow pulsations on Coriolis mass flow meters / R. Cheesewright, C. Clark // J. Fluids Struct. – 1998. – Vol. 12. – P. 1025–1039.
42. Belhadj, A. The simulation of Coriolis meter response to pulsating flow using a general purpose fencode / A. Belhadj, R. Cheesewright, C. Clark // J. Fluids Struct. – 2000. – Vol. 14. – P. 613–634.
43. Kazahaya, M. A mathematical model and error analysis of Coriolis mass flowmeters / M. Kazahaya // IEEE Trans. Instrum. Meas. – 2010. – Vol. 60. – P. 1163–1174.
44. Costa, F. Modeling Temperature Effects on a Coriolis Mass Flowmeter / F. Costa, J. Pope, K. Gillis // Flow Measurement and Instrumentation. – 2020. – Vol. 76 (3). – P. 101811. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101811

45. MacDonald, M. Calibration of hydrogen Coriolis flow meters using nitrogen and air and investigation of the influence of temperature on measurement accuracy / M. MacDonald, M. de Huu, R. Maury, O. Bükér // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2021. – Vol. 79. – P. 101915.

46. Lindsay, G. Profiling and trending of Coriolis meter secondary process value drift due to ambient temperature fluctuations / G. Lindsay, J. Hay, N. Glen, S. Shariatipour // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2018. – Vol. 59. – P. 225–232.

47. Lindsay, G. Coriolis meter density errors induced by ambient air and fluid temperature differentials / G. Lindsay, N. Glen, J. Hay, S. Shariatipour, M. Henry // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2020. – Vol. 73. – P. 101754.

48. Kumar, V. Fluid-Structure Interaction (FSI) Simulations on the Sensitivity of Coriolis FlowMeter Under Low Reynolds Number Flows / V. Kumar, M. Anklin, B. Schwenter // *Proceedings of the 15th Flow Measurement Conference (FLOMEKO)*. – Taipei, Taiwan, 2010. – P. 13–15.

49. Bobovnik, G. Estimation of velocity profile effects in the shell-type Coriolis flowmeter using CFD simulations / G. Bobovnik, J. Kutin, I. Bajsić // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2005. – Vol. 16 (6). – P. 365–373.

50. Kutin, J. Weight vector study of velocity profile effects in straight-tube Coriolis flowmeters employing different circumferential modes / J. Kutin, G. Bobovnik, J. Hemp, I. Bajsić // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2005. – Vol. 16 (6). – P. 375–385.

51. Kutin, J. Velocity profile effects in Coriolis mass flowmeters: Recent findings and open questions / J. Kutin, G. Bobovnik, J. Hemp, I. Bajsić // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2006. – Vol. 17 (6). – P. 349–358.

52. Luo, R. Fluid-Structure Coupling Analysis and Simulation of Viscosity Effect on Coriolis Mass Flowmeter / R. Luo, J. Wu. // *International Journal of Aerospace and Lightweight Structures (IJALS)*. – 2013. – Vol. 3 (2). – P. 253. – doi: 10.3850/S2010428613000652

53. Kolhe, V. A. Performance evaluation of Coriolis mass flow meter in laminar flow regime / Vikram A. Kolhe, Ravindra L. Edlabadkar // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2021. – Vol. 77. – P. 101837. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101837

54. Fusi, L. On the stationary flow of a waxy crude oil with deposition mechanisms / L. Fusi // *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*. – 2003. – Vol. 53, № 3-4. – P. 507–526.

55. Fasano, A. Mathematical models for waxy crude oils / A. Fasano, L. Fusi, S. Corraera // *Meccanica*. – 2004. – Vol. 39, № 5. – P. 441–482.

56. Venkatesan, R. Comments on analogies for correlated heat and mass transfer in turbulent flow / R. Venkatesan, H. S. Fogler // *AIChE Journal*. – 2004. – Vol. 50 (7). – P. 1623–1626. – doi:10.1002/aic.10146

57. Azevedo, L. F. A. A critical review of the modeling of wax deposition mechanisms / L. F. A. Azevedo, A. M. Teixeira // *Petroleum Science and Technology*. – 2003. – Vol. 21, № 3-4. – P. 393–408.

58. Todi, S. Experimental and modeling studies of wax deposition in crude-oil-carrying pipelines / S. Todi, M. Deo // *Offshore technology conference. OTC. C. OTC-18368-MS*, 2006.

59. Burger, E. D. Studies of wax deposition in the trans Alaska pipeline / E. D. Burger, T. K. Perkins, J. H. Striegler // *Journal of Petroleum technology*. – 1981. – Vol. 33, № 6. – P. 1075–1086.

60. Navaneetha Kannan, S. Settling and re-entrainment of wax particles in near-gelling systems / Seetharaman Navaneetha Kannan, Rama Venkatesan, N. Daraboina, Cem Sarica // *AIChE Journal*. – 2018. – Vol. 64, № 2. – P. 765–772.

61. Mehrotra, A. K. Predictions for wax deposition in a pipeline carrying paraffinic or ‘waxy’ crude oil from the heat-transfer approach / A. K. Mehrotra, S. Haj-Shafiei, S. Ehsani // *Journal of Pipeline Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1, № 4. – P. 428–435.

62. Geest, C. van der. Critical review on wax deposition in single-phase flow / C. van der Geest, Leticia Bizarre, A. Melchuna, A. Carlos Bannwart // *Fuel*. – 2021. – Vol. 293. – P. 120358.
63. Yang, J. Wax deposition mechanisms: Is the current description sufficient? / J. Yang, N. Daraboina, Yingda Lu, Cem Sarica // *Fuel*. – 2020. – Vol. 275. – P. 117937.
64. Fan, K. Development of wax molecular diffusivity correlation suitable for crude oil in wax deposition: Experiments with a cold-finger apparatus / K. Fan, S. Li, R. Li // *J. Pet. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 205. – P. 108851. – doi: 10.1016/j.petrol.2021.108851
65. Alade, L. Novel Approach for Improving the Flow of Waxy Crude Oil Using Thermochemical Fluids: Experimental and Simulation Study / L. Alade, A. Hassan, M. Mahmoud, D. Al-Shehri, A. Al-Majed // *ACS Omega*. – 2020. – Vol. 5 (8). – P. 4313–4321. – doi: 10.1021/acsomega.9b04268
66. Schlumberger, L. Eclipse 100 technical description and user manual / L. Schlumberger // *Technical Report*. – 2015.
67. Lee, H. S. Computational and Rheological Study of Wax Deposition and Gelation in Subsea Pipelines. PhD Thesis / H. S. Lee. – University of Michigan, 2008. – 127 p.
68. Hernandez, O. C. Improvements in single-phase paraffin deposition modeling / O. C. Hernandez, J. Brill, H. Hensley, C. Sarica // *SPE Production & Facilities*. – 2004. – Vol. 19, № 4. – P. 237–244.
69. Ilushin, P. Development of a New Model for the Formation of Wax Deposits through the Passage of Crude Oil within the Well / P. Ilushin, K. Vyatkin, A. Kozlov // *Sustainability* [Electronic resource]. – 2023. – Vol. 15 (12). – P. 9616. – doi: 10.3390/su15129616
70. Шрам, В. Г. Проблемы и методы борьбы с асфальтосмолопарафиновыми отложениями / В. Г. Шрам, Н. Ф. Орловская, С. И. Иванова, В. А. Крамаренко // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2022. – № 5. – С. 186–191.

71. Kayumov, M. S. Taking into account the peculiarities of the formation of asphalt-resin-paraffin deposits at the late stage of oil field development / M. S. Kayumov, V. P. Tronov, I. A. Guskova, A. A. Lipaev // *Oil Ind.* – 2006. – Vol. 3. – P. 48–49.
72. Ilyushin, P. Y. Development and verification of a software module for predicting the distribution of wax deposition in an oil well based on laboratory studies / P. Y. Ilyushin, K. A. Vyatkin, A. V. Kozlov // *Results in Engineering.* – 2022. – Vol. 16. – P. 100697.
73. Ilyushin, P. Y. Investigation of rheological properties of oil during the formation of wax deposits / P. Y. Ilyushin, K. A. Vyatkin, A. V. Kozlov // *Results in Engineering.* – 2022. – Vol. 14. – P. 100434.
74. Janamatti, A. Influence of operating temperatures on long-duration wax deposition in flow lines / A. Janamatti, S. Ravichandran, Y. Lu, C. Sarica // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* – 2019. – Vol. 183. – P. 106373.
75. Agarwal, J. Effect of hydrodynamic parameters on the wax mass density: scale up from laboratory flow loop to crude production pipelines / J. Agarwal, N. Daraboina, S. Ravichandran, C. Sarica // *Offshore Technology Conference. OTC. C. D011S011R003*, 2017.
76. Massah, M. A new theory for modeling transport and deposition of solid particles in oil and gas wells and pipelines / M. Massah, E. Khomehchi, S. Ali Mousavi-Dehghani // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2020. – Vol. 152. – P. 119568.
77. Quan, Q. Study on the aging and critical carbon number of wax deposition with temperature for crude oils / Q. Quan, J. Gong, W. Wang, G. Gao // *Journal of Petroleum Science and Engineering.* – 2015. – Vol. 130. – P. 1–5.
78. Prakhova, M. Y. Coriolis flowmeter for commercial accounting of crude oil / M. Y. Prakhova, A. N. Krasnov // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2020. – Vol. 1582 (1). – P. 012071.
79. Krasnov, A. N. Measurement of oil consumption by turbine flow meters in conditions of wax deposition / A. N. Krasnov, M. Y. Prakhova, Y. V. Novikova // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2021. – Vol. 2096 (1). – P. 012065.

80. Патент 2020140022 Российская Федерация. Способ оценки состояния измерительной системы кориолисового расходомера / Лобашев С. Е., Шилин М. Д., Горюнов Е. А., Яушев А. А., Логиновский В. А., Жестков А. В. ; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Элметро групп» ; заявл. 07.12.2020 ; зарег. 06.06.2022.

81. Патент 2023112486 Российская Федерация. Способ оценки состояния кориолисова расходомера для его поверки и/или диагностики / Яушев А. А., Логиновский В. А., Жестков А. В. ; правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «ЭлМетро-Инжиниринг» ; заявл. 11.05.2023 ; зарег. 05.09.2023.

82. Wang, T. Pressure effects on Coriolis mass flowmeters / T. Wang, Y. Hussain // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2010. – Vol. 21 (4). – P. 504–510.

83. Mills, C. The consistency of pressure effects between three identical Coriolis flow meters / C. Mills // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2021. – Vol. 80. – P. 102001. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102001

84. Birjandi, A. K. Development of a high-fidelity partitioned Fluid–Structure Interaction model of an Omega-shaped Coriolis Mass Meter and comparison with experimental data / A. K. Birjandi, Sh. Shayegan, K.-U. Bletzinger, R. Wüchner // *Journal of Fluids and Structures*. – 2022. – Vol. 110. – P. 103510. – doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2022.103510

85. 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

86. Романов, В. А. Оценка диссипативных свойств колебательной системы серийного образца расходомера Кориолиса / В. А. Романов, П. А. Тараненко // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2020. – № 2. – С. 134–144. – doi: 10.15593/perm.mech/2020.2.11

87. Ford, C. L. A simple parametric design model for straight-tube Coriolis flow meters / C. L. Ford // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2021. – Vol. 79. – P. 101958. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101958/

88. Cheesewright, R. Effect of mechanical vibrations on Coriolis mass flow meters / R. Cheesewright, A. Belhadj, C. Clark // *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control*. – 2003. – Vol. 125 (1). – doi: 10.1115/1.1539098

89. Zheng, D. Theoretical analysis and experimental study of Coriolis mass flow sensor sensitivity / D. Zheng, S. Wang, L. Bei, S. Fan // *Journal of Fluids and Structures*. – 2016. – № 65. – P. 295–312. – doi: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.06.004

90. Raszillier, H. Coriolis-effect in mass flow metering / H. Raszillier, F. Durst // *Arch. Appl. Mech.* – 1991. – Vol. 61 (3). – P. 192–214.

91. Kutin, J. An analytical estimation of the Coriolis meter's characteristics based on modal superposition / J. Kutin, I. Bajsić // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2002. – Vol. 12. – P. 345–351.

92. Wang, L. J. Analytical calculation of sensitivity for Coriolis mass flowmeter / L. J. Wang, L. Hu, Z. C. Zhu, P. Ye, X. Fu // *Measurement*. – 2011. – Vol. 44. – P. 1117–1127.

93. Sultan, G. Modelling of the Coriolis mass flowmeter / G. Sultan, J. Hemp // *Journal of Sound and Vibration*. – 1989. – Vol. 132 (3). – P. 473–489.

94. Stack, C. P. A finite element for the vibration analysis of a fluid-conveying Timoshenko beam / C. P. Stack, R. B. Garnett, G. E. Pawlas // *Proceedings of the 34th AIAA/ASME structures, structural Dynamics and Material Conference*. – 1993. – Vol. 4. – P. 2120–2129.

95. Samer, G. Modeling of Coriolis mass flow meter of a general plane-shape pipe / G. Samer, S. Fan // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2010. – Vol. 21 (1). – P. 40–47. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2009.11.004

96. Bobovnik, G. The effect of flow conditions on the sensitivity of the coriolis flowmeter / G. Bobovnik, J. Kutin, I. Bajsić // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2004. – Vol. 15. – P. 69–76. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2003.12.001

97. Ruoff, J. Finite element modelling of Coriolis mass flowmeters with arbitrary pipe geometry and unsteady flow conditions / J. Ruoff, M. Hodapp, H. Kück // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2014. – Vol. 37. – P. 119–126. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.03.010

98. Wang, T. An advanced numerical model for single straight tube Coriolis flowmeters / T. Wang, R. C. Baker // *Journal of Fluids Engineering*. – 2006. – Vol. 128 (6). – P. 1346–1350.

99. Shavrina, E. Fluid-Solid Interaction Simulation Methodology for Coriolis Flowmeter Operation Analysis / E. Shavrina, V.-T. Nguyen, Z. Yan, B. C. Khoo // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 8105. – doi: 10.3390/s21238105

100. Bobovnik, G. Coupled finite-volume/finite-element modelling of the straight-tube Coriolis flowmeter / G. Bobovnik, N. Mole, J. Kutin, B. Štok, I. Bajsi'c // *J. Fluids Struct.* – 2005. – Vol. 20. – P. 785–800.

101. Mole, N. An improved three-dimensional coupled fluid–structure model for Coriolis flowmeters / N. Mole, G. Bobovnik, J. Kutin, B. Štok, I. Bajsi'c // *J. Fluids Struct.* – 2008. – Vol. 24. – P. 559–575.

102. Enz, S. Factors Affecting Coriolis Flowmeter Accuracy, Precision, and Robustness / S. Enz. – Kgs. Lyngby, Denmark : Technical University of Denmark, 2010. – 210 p.

103. Романов, В. А. Идентификация гироскопических сил в колебательной системе расходомера Кориолиса / В. А. Романов, В. П. Бескачко // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика*. – 2021. – № 3. – С. 129–140. – doi: 10.15593/perm.mech/2021.3.12

104. Yaushev, A. A. Study of the oscillation modes of a Coriolis flowmeter using a parametric finite element model, verified by the results of modal testing / A. A. Yaushev, P. A. Taranenko, V. A. Loginovskiy // *Procedia Eng.* – 2016. – Vol. 150. – P. 336–340. – doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.027

105. Яушев, А. А. Расчетно-экспериментальное исследование стабильности нуля кориолисового расходомера в зависимости от упругодемпфирующих свойств закрепления / А. А. Яушев, П. А. Тараненко //

Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 47–55.

106. Haussmann, M. Fluid–Structure Interaction Simulation of a Coriolis Mass Flowmeter Using a Lattice Boltzmann Method / M. Haussmann, P. Reinshaus, S. Simonis, H. Nirschl, M. J. Krause // *Fluids*. – 2021. – Vol. 6. – P. 167. – doi: 10.3390/fluids6040167

107. Krause, M. J. OpenLB – Open source lattice Boltzmann code / M. J. Krause, A. Kummerländer, S. J. Avis, H. Kusumaatmaja // *Computers & Mathematics with Applications*. – 2021. – Vol. 81. – P. 258–288. – doi: 10.1016/j.camwa.2020.04.033

108. Gace, D. A. On the performance of a Coriolis Mass Flowmeter (CMF): experimental measurement and FSI simulation / D. A. Gace // *Int. J. Metrol. Qual. Eng.* – 2022. – Vol. 13 (3). – P. 15. – doi: 10.1051/ijmqe/2022002

109. Stack, C. P. Design and Analysis of Coriolis Mass Flowmeters using MSC/NASTRAN / C. P. Stack // *Conf. on MSC World Users*. – 1993. – P. 1–17.

110. Bobovnik, G. Numerical analysis of installation effects in Coriolis flowmeters: A case study of a short straight tube full-bore design / G. Bobovnik, J. Kutin, N. Mole, B. Štok, I. Bajsić // *Flow Measurement and Instrumentation*. – 2013. – Vol. 34. – P. 142–150. – doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2013.10.004

111. Кузьмин, И. М. Распределенные вычисления в сопряженных задачах взаимодействия течений газа и многих деформируемых тел / И. М. Кузьмин, Л. Е. Тонков // *Известия Института математики и информатики Удмуртского государственного университета*. – 2020. – Т. 56. – С. 30–40. – doi: 10.20537/2076-7633-2014-6-1-79-97

112. Копысов, С. П. Квазиньютоновский метод для неявного связывания сопряженных задач FSI / С. П. Копысов, И. М. Кузьмин, Н. С. Недожогин, А. К. Новиков, В. Н. Рычков, Л. Е. Тонков // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2015. – Т. 17, № 4. – С. 523–530.

113. Hon, A. Numerical methods for fluid-structure interaction – a review / A. Hon // *Commun. Comput. Phys.* – 2012. – Vol. 12. – P. 337–377. – doi: 10.4208/cicp.291210.290411s

114. Degroote, J. Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction / J. Degroote, K. J. Bathe, J. Vierendeels // *Computers & Structures*. – 2009. – Vol. 87. – P. 793–801. – doi: 10.1016/j.compstruc.2008.11.013

115. The Multiphysics Cyclopedia. Fluid-Structure Interaction. – URL: <https://www.comsol.com/multiphysics/fluid-structure-interaction>

116. Цай, Ц. Ч. Численное исследование переходного режима обтекания цилиндра и генерации звука / Ц. Ч. Цай, Ц. Пан, А. Крыжановский, Ш.-Ю. Е // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 343–360.

117. The Multiphysics Cyclopedia. What Are the Navier-Stokes Equations? – URL: <https://www.comsol.com/multiphysics/navier-stokes-equations?parent=modeling-conservation-mass-energy-momentum-0402-432-302>

118. Modeling Aeroacoustics with the Linearized Navier-Stokes Equations | COMSOL Blog. – URL: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-aeroacoustics-with-the-linearized-navier-stokes-equations>

119. Acoustics Module User's Guide. – URL: <https://doc.comsol.com/5.3a/doc/com.comsol.help.aco/AcousticsModuleUsersGuide.pdf>

120. Hu, Y.-C. Fluid-Structure Coupling Effects in a Dual U-Tube Coriolis Mass Flow Meter / Y.-C. Hu, Z.-Y. Chen, P.-Z. Chang // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21 (3). – P. 982. – doi: 10.3390/s21030982

121. 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://moitvivi.ru/ru/journal/pdf?id=1560>

122. Федорова, Н. Н. Основы работы в ANSYS 17 [Электронный ресурс] / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 210 с. – URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/364374/reading> (дата обращения: 10.11.2023).

123. Coriolis Flowmeter: FSI Simulation in the Frequency Domain. – URL: <https://www.comsol.com/model/coriolis-flowmeter-fsi-simulation-in-the-frequency-domain-51831>

124. 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.

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

126. Model Deforming Objects with the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method [Электронный ресурс] // URL: <https://www.comsol.com/blogs/model-deforming-objects-with-the-arbitrary-lagrangian-eulerian-method>

127. Задание различных видов демпфирования в COMSOL Multiphysics. [Электронный ресурс] // URL: <https://www.comsol.ru/blogs/how-to-model-different-types-of-damping-in-comsol-multiphysics>

128. Ganji, H. F. Assessment of the acoustic scattering matrix of a heat exchanger using ssCFD-LNSE simulation / H. F. Ganji, V. Kornilov, J. van Oijen, I. L. Arteaga // Proceedings Internoise 2022 Institute of Noise Control Engineering of the USA. – URL: <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-inconferencepublic/9d14f776b2f142f68ec5ab932a18d67a>

129. Брежнев, Р. В. Методы и средства проектирования информационных систем и технологий : учебное пособие / Р. В. Брежнев. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2021. – 216 с.

130. Бубнов, А. А. Разработка и анализ требований к программному обеспечению : учебник / А. А. Бубнов, С. А. Бубнов, К. А. Майков. – Москва : КУРС, 2022. – 176 с.

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

132. 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

133. Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application. [Электронный ресурс] // URL: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>

134. 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 : ООО «Конверс», 2024. – С. 404–408.

135. Liu, Y. A novel method of Coriolis flowmeter phase difference measurement based on improved correlation analysis method / Y. Liu, L. Wang, Y. Zhang, Qi Luo // Flow Measurement and Instrumentation. – 2021. – Vol. 80. – P. 101970.

136. Zhou, Z. Numerical analysis and test of vibration and interference characteristics of dual U-tube Coriolis flowmeter / Z. Zhou, L. Gao, H. Li, Z. Chen // Flow Measurement and Instrumentation. – 2023. – Vol. 93. – P. 102437.

137. Animate, F. Wax deposition and prediction in petroleum pipelines / F. Animate, M. Ziauddin // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 184. – P. 106385.

138. Yao, B. Prediction of wax deposits for crude pipelines using time-dependent data mining / B. Yao, J. Chen, Ch. Li, F. Yang // SPE Journal. – 2021. – Vol. 26, № 4. – P. 1980–2001.

139. Pal, S. Estimation of deposit thickness in single-phase liquid flow pipeline using finite volume modelling / S. Pal, R. Reddy Kottam, M. F. Lambert, P. Reddy Hanmaiahgari // Journal of Pipeline Science and Engineering. – 2024. – Vol. 4, № 1. – P. 100145.

140. 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.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЛЩИНЫ ПАРАФИНОВОГО СЛОЯ

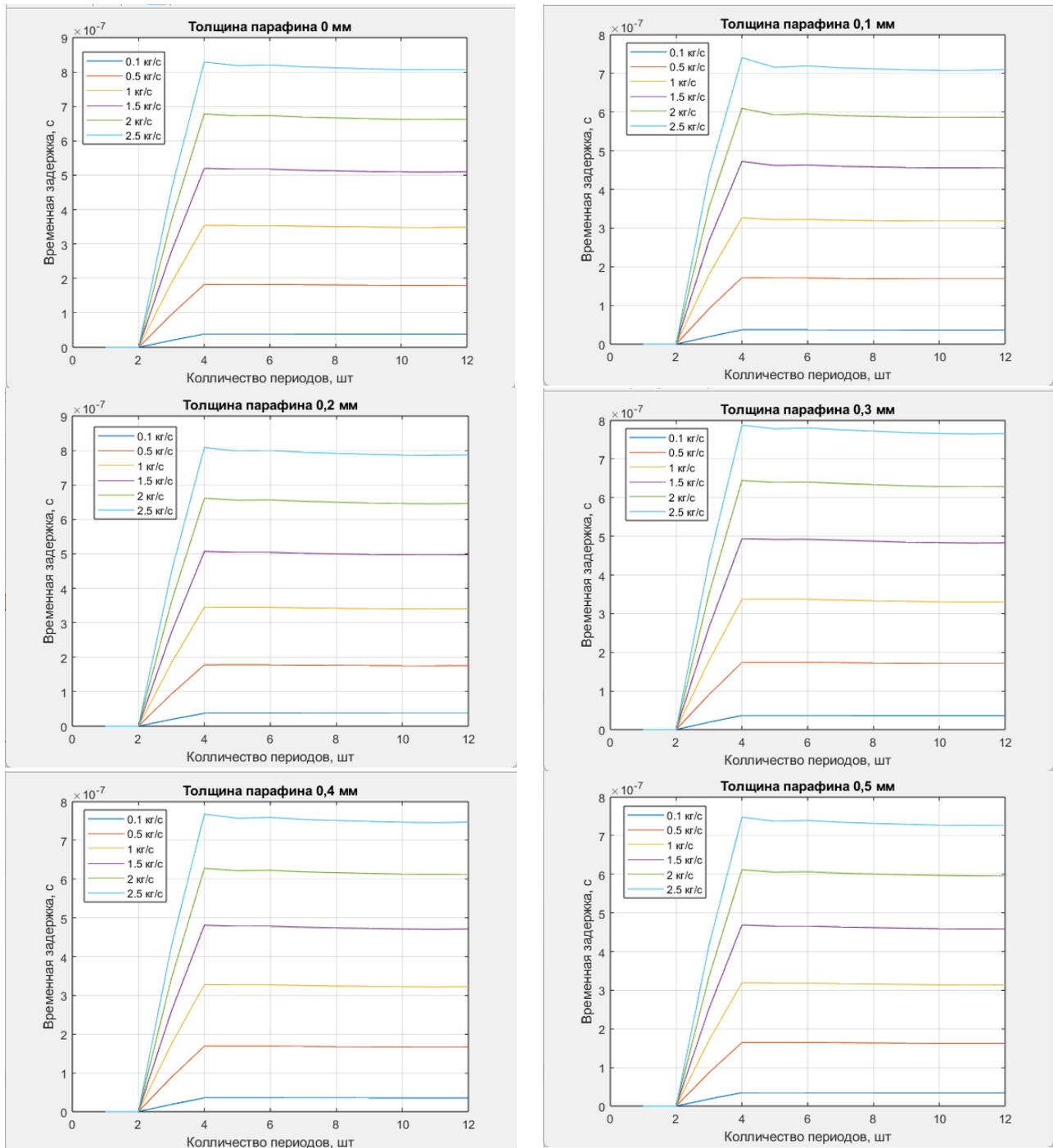


Рисунок А.1 – Влияние толщины парафинового слоя до 0,5 мм
на временную задержку

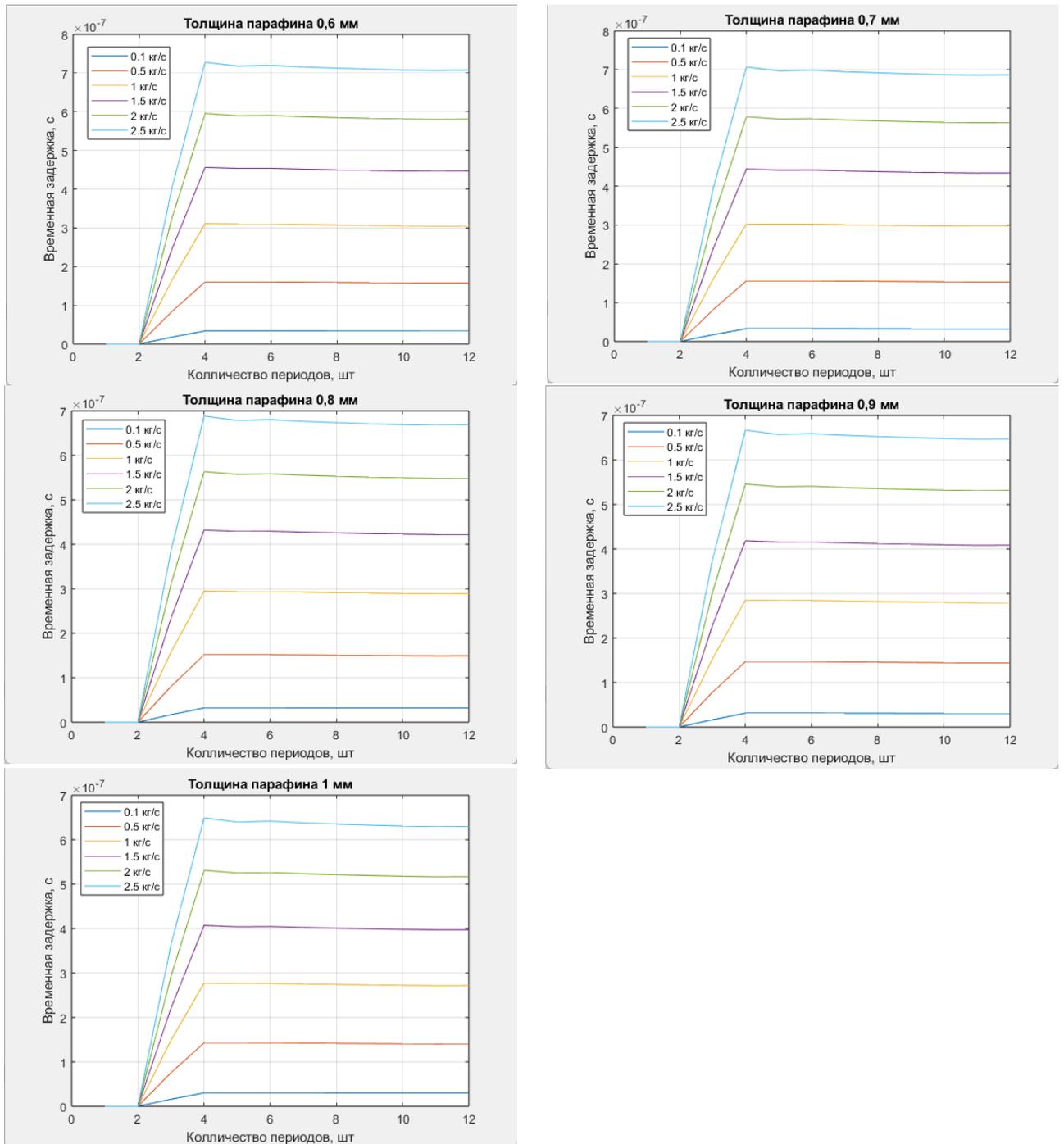


Рисунок А.2 – Влияние толщины парафинового слоя от 0,6 до 1 мм на временную задержку

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПАРАФИНОВОГО СЛОЯ

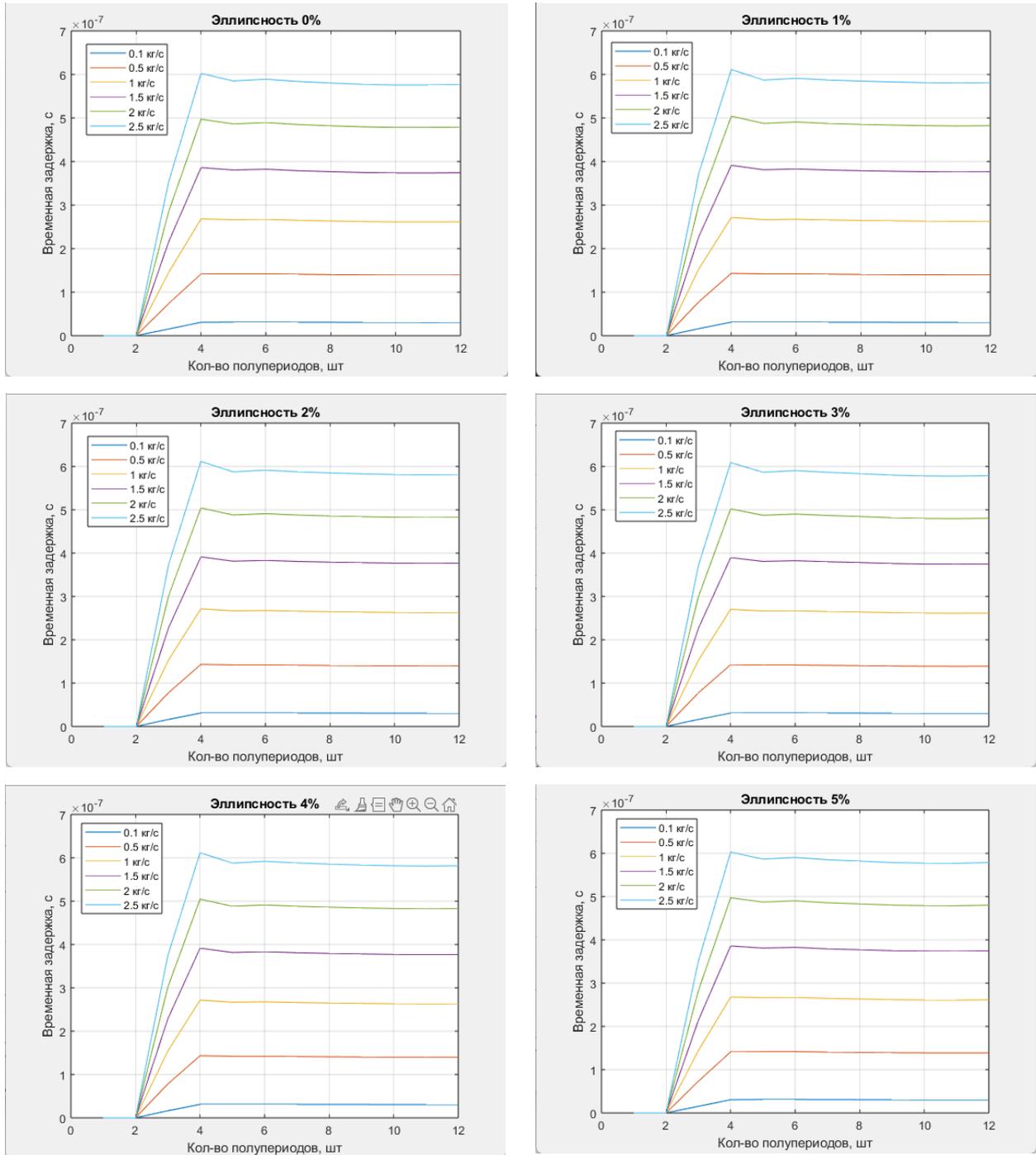


Рисунок Б.1 – Зависимость временной задержки
от формы парафиновых отложений

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

УТВЕРЖДАЮ

Начальник отдела моделирования процессов
сбора и подготовки углеводородного сырья
Службы мониторинга технологических
процессов добычи, сбора и подготовки газа,
газового конденсата и нефти

Инженерно-технического центра
ООО «Газпром добыча Уренгой»

Е.С. Григорьев

03 2024 г



СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования

Гудковой Екатерины Александровны

на тему: «Математическое моделирование и численное исследование напряженно-деформированного состояния расходомерной трубки кориолисова расходомера в процессе ее опарафинивания», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Настоящим подтверждаем, что результаты, полученные в ходе диссертационных исследований Гудковой Е.А., позволяют учесть влияние опарафинивания на точность определения величины массового расхода жидкостей, измеряемой кориолисовыми расходомерами в зависимости от степени отложения парафинов на расходомерных трубках.

Разработанный программный комплекс позволяет проводить численное моделирование системы «расходомерная трубка-жидкость» и рассчитывать погрешность измерений, вызванных отложениями парафинов на колеблющейся расходомерной трубке, в процессе перекачивания вязких нефтей и высокопарафинистого газового конденсата.

Предложенное Гудковой Е.А. численное исследование неравномерного отложения парафинов на трубке кориолисова расходомера позволяет спрогнозировать изменения в точности измерения параметров массового расхода для различных форм расходомерных трубок.

Сформированные в диссертационном исследовании рекомендации представляют практический интерес и могут применяться в работе при понижении температуры потока газового конденсата на коммерческих узлах замера установок комплексной подготовки газа ачимовских добывающих объектов ООО «Газпром добыча Уренгой».

Ведущий инженер-технолог ПТО УАВР
ООО «Газпром добыча Уренгой»

А.В. Тразанов

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный технологический
университет»

Д.В. Пашенко
« 3 » июля 2024 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
Гудковой Екатерины Александровны

Комиссия в составе:

председатель комиссии – к.т.н., доцент Сёмочкина И.Ю. – начальник учебно-методического управления ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»;

члены комиссии:

к.т.н., доцент Ремонтов А.П. – декан факультета автоматизированных информационных технологий ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»;

д.т.н., профессор Михеев М.Ю. – заведующий кафедрой «Информационные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»;

к.т.н., профессор Мартышкин А.И. – заведующий кафедрой «Программирование» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»;

составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Гудковой Е.А. на тему «Моделирование и численное исследование процесса опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, внедрены в учебный процесс кафедры «Информационные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет».

Автором получены новые научные результаты:

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 реализацией 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.

Указанные результаты внедрены в учебный процесс кафедры «Информационные технологии и системы» по направлению подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии» (профили подготовки «Информационные системы в технике и технологиях», «Безопасность информационных систем и технологий») при проведении лекционных и лабораторных работ по дисциплине: «Имитационное моделирование информационных систем».

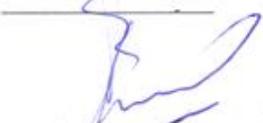
Внедрение полученных автором научных результатов позволило повысить качество учебного процесса.

Председатель комиссии


И.Ю. Сёмочкина

Члены комиссии


А.П. Ремонтов


М.Ю. Михеев


А.И. Мартышкин

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015613114

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ КОРИОЛИСОВЫХ
РАСХОДОМЕРОВ

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Пензенский государственный технологический университет» (RU)*

Авторы: *Гудков Кирилл Владимирович (RU),
Гудкова Екатерина Александровна (RU)*

Заявка № 2015610166

Дата поступления 12 января 2015 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 05 марта 2015 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023662407

**«Расчет временной задержки сигналов датчиков,
получаемых в результате численного моделирования
системы «расходомерная трубка – жидкость»
кориолисова расходомера»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный технологический
университет» (RU)*

Авторы: *Гудкова Екатерина Александровна (RU), Таранцева
Клара Рустемовна (RU), Никифоров Артем Алексеевич (RU)*

Заявка № 2023661525

Дата поступления 05 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 07 июня 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024619073

Программный комплекс по параметрическому моделированию системы «расходомерная трубка-жидкость» кориолисова расходомера для исследования процесса ее опарафинивания

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет» (RU)*

Авторы: *Гудкова Екатерина Александровна (RU), Таранцева Клара Рустемовна (RU)*

Заявка № 2024616688

Дата поступления 02 апреля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 18 апреля 2024 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b640fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



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**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный технологический
университет» (RU)*

Авторы: *Гудкова Екатерина Александровна (RU), Таранцева
Клара Рустемовна (RU)*

Заявка № 2024661226

Дата поступления 21 мая 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 29 мая 2024 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

документ подписан электронной подписью
Сертификат 429b6a067083364ba969683b73b4aa7
Владимир Зубов Юридическая
действителен с 18.08.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов