

«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ФГБОУ ВО «Казанский
национальный исследовательский
технологический университет»

д.т.н., доцент

Ю.М. Казаков

2024 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» на диссертационную работу Гудковой Екатерины Александровны «Моделирование и численное исследование процесса опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Актуальность темы диссертации. С увеличением добычи и транспортировки высокопарафинистых нефтей возросла потребность в совершенствовании методов и приборов их учета, в т.ч. широко распространенных в нефтегазовой отрасли кориолисовых расходомеров. Опарафинивание трубки расходомера, связанное с отложением парафинов на ее внутренней поверхности, значительно влияет на геометрию проходного сечения, что, в свою очередь, ведет к искажению данных о расходе. Как следует из литературного обзора автора в настоящее время отсутствуют исследования, посвященные изучению неравномерности парафиновых отложений по сечению расходомерной трубки кориолисова расходомера. При этом достаточно много работ, посвященных опарафиниванию трубопроводов, имеются единичные работы по анализу влияния опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера на погрешность измерений, что свидетельствует о перспективности данного направления. Поэтому очевидна актуальность диссертационной работы Гудковой Е.А., направленной на исследование влияния характера опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера с учетом ее геометрии на точность измерения параметров массового расхода высокопарафинистых нефтей.

Общая характеристика работы.

Диссертация Гудковой Е.А. оформлена в соответствии с требованиями ВАК, построена традиционным образом и содержит: введение, 4 главы с обсуждением результатов работы, заключение, список литературы (140 ссылок), 4 приложения. Она представлена на 134 страницах основного текста, включает 47 иллюстраций и 5 таблиц.

Работа изложена грамотно и доступно для восприятия, материал хорошо структурирован, представленные таблицы информативны. Графические материалы высокого качества и исчерпывающе демонстрируют приведенные данные и обсуждаемые результаты.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат достаточно полно и верно отражает основное содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, приведены данные по апробации и внедрению результатов, личный вклад автора и сведения о публикациях по теме исследования. Сформулированные задачи исследования соответствуют поставленной цели и полученным результатам.

В первой главе проведено исследование факторов, влияющих на точность измерения параметров массового расхода жидкости в кориолисовом расходомере, подтверждающее целесообразность и актуальность проведения диссертационной работы. На основе выполненного анализа методов математического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» автором выбраны современные высокоточные методы и подходы к моделированию, а также сформировано математическое описание движения расходомерной трубки с протекающей по ней жидкостью с целью дальнейшей реализации в программном продукте для численного моделирования.

Во второй главе автором модифицирован метод математического моделирования опарафинивания трубопроводов путем его адаптации к области кориолисовых расходомеров и получены поперечные профили сечения парафиновых отложений от полностью круглого (равномерное распределение) до эллипсного (неравномерное). Далее разработаны алгоритм численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» сдвусторонним взаимодействием ее элементов и методика численного моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость» для исследования процесса опарафинивания. В результате

сформирована трехмерная модель вышеуказанной системы для проведения дальнейших численных экспериментов.

В третьей главе разработаны алгоритм, реализующий обработку массивов данных вычислительного эксперимента и интерполяцию недостающих значений, а также вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», необходимый для взаимодействия программ комплекса. Сформированные требования позволили провести успешную разработку и тестирование программного комплекса, состоящего из трех программ и решающего 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 может быть использован как для научных исследований, так и в промышленных и образовательных целях.

В четвертой главе обсуждаются результаты исследований геометрических форм расходомерной трубки, отличающихся радиусами кривизны трубок от 0° (прямотрубный расходомер) до 90° (U-образный расходомер), с целью анализа чувствительности измерения параметров массового расхода. Полученные результаты позволяют заметить, что модель с радиусом кривизны расходомерной трубки 30° демонстрирует форму при которой, положительные свойства прямотрубного расходомера частично сохраняются, но при этом увеличивается чувствительность. Далее исследуются модели с малыми радиусами кривизны расходомерной трубки как менее подверженные опарафиниванию. Проведенное исследование равномерного опарафинивания расходомерной трубки установило влияние толщины парафиновых отложений на определение временной задержки и собственной частоты системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость». Относительная погрешность измерений временной задержки при толщине парафиновых отложений, составляющих 12,5 % от внутреннего диаметра расходомерной трубки, достигает 26,5 %. При этом толщина отложений влияет на показатели собственной частоты, приводящие к ошибкам измерения плотности жидкости.

Принципиально новым исследованием выступает моделирование и оценка влияния неравномерного опарафинивания расходомерной трубки на точность измерения параметров массового расхода жидкости. Автором выявлены искажения вышеуказанных параметров при эллипсной форме парафиновых отложений по сравнению с кольцевой формой при их одинаковой массе. Установлено, что временная задержка изменится на

0,867% при массовом расходе в 2.5 кг/с и различии главных осей эллипсных отложений на 5%.

В заключении описаны основные выводы и результаты, полученные автором в рамках выполнения диссертационной работы.

Научная новизна. В диссертационной работе автором определены следующие понятия: система «расходомерная трубка – парафин – жидкость», эллипсность парафиновых отложений. Автором проведен подробный анализ особенностей течения жидкостей в кориолисовом расходомере и показано, что протекание высокопарафинистых нефтей в условиях низких температур связано с процессом отложения парафинов и в большинстве случаев имеет неравномерный характер, что обусловило проведение дополнительных исследований в этом направлении.

В работе впервые предложена модификация метода математического моделирования опарафинивания трубопроводов путем его адаптации к области кориолисовых расходомеров за счет учета влияния неравномерности гидравлического давления по сечению расходомерной трубки вследствие действия сил Кориолиса. Для исследования предложены поперечные профили сечения парафина, отличающиеся эллипсностью от 1 до 5%, характеризующие налипание парафиновых отложений в расходомерной трубке с течением времени.

Автором разработана методика численного моделирования, в которой впервые добавлен компонент, отвечающий за парафиновые отложения, и реализовано взаимодействие расходомерной трубки, парафина и жидкости, в то время как подобные исследования проводились с добавленной к расходомерной трубке массой, имитирующей отложения. Это позволило учесть двустороннее взаимодействие жидкости с опарафиненной расходомерной трубкой, что повысило точность моделирования, а также дало возможность промоделировать неравномерные парафиновые отложения и исследовать их влияние на точность измерения параметров массового расхода. Также в методике реализована изменяемая геометрия расходомерной трубки, от прямой до U-образной, что позволило исследовать влияние геометрии трубки на погрешность измерений кориолисова расходомера, без необходимости разработки и настройки новых моделей.

Предложен вычислительный алгоритм автоматизированного параметрического моделирования системы «расходомерная трубка – парафин – жидкость», который использован в программном комплексе 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.

На основе разработанных методики и алгоритма разработан и протестирован комплекс из трех программ, 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. Важно отметить, что все расчеты автора проводились с помощью одного и того же комплекса программ, что освобождает от сомнений в сопоставимости результатов при переходе от одной постановки задачи к другой. Полученные результаты показывают компетентность автора в решении поставленных задач.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечены корректным использованием методов математического моделирования, серией проведенных вычислительных экспериментов, верификацией полученной модели и сопоставлением теоретических утверждений с результатами численных расчетов, а также сравнением полученных данных модели без опарафинивания с результатами натурных экспериментов известных авторов.

Полученные результаты подробно отражены в тексте диссертации, представлены в виде иллюстраций, графиков и таблиц. Выводы и практические рекомендации логично вытекают из содержания работы, четко сформулированы.

Апробация и внедрение результатов диссертационной работы. Результаты, излагаемые в диссертации, докладывались на Международных и Всероссийских конференциях и форумах (2018-2024 гг.).

Разработанный комплекс программ внедрен в учебный процесс кафедры «Информационные технологии и системы» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет» по дисциплине «Имитационное моделирование информационных систем», что подтверждено актом о внедрении. Также результаты реализованы в алгоритмах программных продуктов, зарегистрированных в государственном реестре Российской Федерации. 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.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты исследования имеют как теоретическое, так и прикладное значение. Они могут быть использованы при моделировании и проектировании приборов учета массового расхода нефти, а также при создании или совершенствовании соответствующих программных продуктов. Также полученные результаты позволили сформулировать практические рекомендации для нефтегазовой отрасли по снижению погрешности измерения кориолисова расходомера при измерении массового расхода высокопарафинистых нефтей.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертационной работы в научной печати. По материалам исследования опубликована 21 научная работа: 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России по специальности 1.2.2; 1 статья в издании, индексируемом в SCOPUS; 1 статья в издании, рекомендованном ВАК при Минобрнауки России по смежным научным специальностям; 10 статей в сборниках трудов конференций; 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Все работы соответствуют теме диссертации и с достаточной полнотой отражают ее содержание, выводы и заключение.

Как и всякое научное исследование, диссертационная работа не лишена некоторых **недостатков**:

1. В диссертационной работе и в автореферате недостаточно полно обоснован выбор математического описания колебаний расходомерной трубки.

2. При моделировании взаимодействия расходомерной трубки с внутренним потоком жидкости аргументирован выбор этого взаимодействия как акустической системы, а не как взаимодействие жидкости и конструкции, при этом количественная оценка повышения точности не приводится. Было бы интересно выполнить оба моделирования и сравнить полученные результаты.

3. Пункт 3.1 в диссертации посвящен разработке алгоритма расчета средней временной задержки сигналов на основе метода линейной интерполяции. Выбор этого метода в работе никак не обоснован.

4. При описании работы программного комплекса в пункте 3.2 не приведены диапазоны варьирования вводимых параметров, а также не указаны форматы ввода данных.

5. В диссертационной работе не приводятся данные о временных затратах на вычисления и характеристики ЭВМ, на которой проводились вычислительные эксперименты.

6. Некоторые результаты требуют дополнительного исследования, например:

- нелинейность изменения относительной погрешности измерений временной задержки в системе «расходомерная трубка – парафин – жидкость» при наличии опарафинивания трубки, представленная на рис. 4.19.

- в работе исследованы различные геометрические формы расходомерных трубок от 0° (прямотрубный расходомер) до 90° (U -образный расходомер), при этом не моделировались различные диаметры трубок.

Заключение.

Отмеченные выше недостатки носят, скорее, рекомендательный характер и не умаляют значение диссертационной работы Гудковой Екатерины Александровны, как нового, научно обоснованного исследования, в котором установлено влияние неравномерности парафиновых отложений на измерение параметров массового расхода, что в натурном эксперименте выявить достаточно затруднительно.

Диссертационная работа Гудковой Екатерины Александровны «Моделирование и численное исследование процесса опарафинивания расходомерной трубки кориолисова расходомера» по содержанию и методам исследования соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) по следующим направлениям исследований: 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).

Диссертационная работа Гудковой Екатерины Александровны полностью отвечает требованиям пп. 9-14 действующего Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, обладающую актуальностью, новизной и внутренним единством, в которой изложены результаты самостоятельно выполненных автором исследований и численных экспериментов, имеющих существенное значение для нефтегазовой отрасли, а ее автор, Гудкова Екатерина Александровна,

заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки).

Диссертация, автореферат и данный отзыв обсуждены и одобрены на совместном заседании кафедр «Инженерная компьютерная графика и автоматизированное проектирование» и «Машины и аппараты химических производств» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» 17 октября 2024 года, протокол № 10. На заседании присутствовали 28 человек. Результаты голосования: «за» – 28 человек, «против» – нет, «воздержались» – нет.

Директор института химического
и нефтяного машиностроения,
д.т.н., профессор



Бурмистров Алексей Васильевич

Зав. кафедрой «Инженерная компьютерная
графика и автоматизированное проектирование»,
д.т.н., доцент Мухаметзянова Асия Габдулмазитовна



Зав. кафедрой «Машины и аппараты
химических производств»,
д.т.н., профессор Поникаров Сергей Иванович



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Казанский национальный исследовательский
технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68

Email: office@kstu.ru. Тел: +7 (843) 231-42-16

Подпись Бурмистрова А.В., Мухаметзяновой А.Г., Поникарова С.И.
удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский
технологический университет»,
к.т.н., доцент



Загидуллина И.А.

Дата: 18.10.2024г.