

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЧИСЛЕННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СИСТЕМЫ «РАСХОДОМЕРНАЯ ТРУБКА – ЖИДКОСТЬ» КОРИОЛИСОВА РАСХОДОМЕРА

Е. А. Гудкова

Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
gudkova-penza@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Цель заключается в реализации численных методов и алгоритмов в виде программного комплекса, позволяющего проводить параметрическое исследование системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера, и в анализе влияния формы расходомерной трубки на чувствительность измерений параметров массового расхода жидкости. Актуальность обусловлена необходимостью выявления геометрической конструкции расходомерной трубки с наиболее приемлемыми характеристиками при перекачивании высокопарафинистых нефтей. *Материалы и методы.* Для математической модели использованы метод конечных элементов и итеративный подход к решению систем уравнений на основе жесткосвязного сопряжения. Реализованы вычислительный алгоритм на основе линейной интерполяции и алгоритм, автоматизирующий обработку массивов данных и расчет средних временной и фазовой задержек. Приведена и описана структурно-логическая схема программного комплекса. *Результаты.* В ходе проведенных вычислительных экспериментов по исследованию влияния формы расходомерной трубки на чувствительность измерений параметров массового расхода жидкости как функции от средней временной задержки с помощью разработанного аппаратно-программного комплекса было выявлено, что модель кориолисова расходомера с радиусом кривизны расходомерной трубки 30° рекомендуется для применения в нефтегазовой отрасли в качестве геометрической формы трубки, менее подверженной опарафиниванию и обладающей при этом достаточной для измерения чувствительностью. *Выводы.* Разработан и протестирован программный комплекс. Выявлена взаимосвязь между геометрической формой расходомерной трубки кориолисова расходомера и чувствительностью измерений прибора, которая характеризуется тем, что при высоких значениях радиуса кривизны трубки чувствительность повышается по сравнению с прямотрубными конструкциями.

Ключевые слова: программный комплекс, кориолисов расходомер, система «расходомерная трубка – жидкость», математическая модель

Для цитирования: Гудкова Е. А. Разработка программного комплекса для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2024. № 2. С. 141–152. doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-10

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE PACKAGE FOR CONDUCTING COMPUTATIONAL EXPERIMENTS ON NUMERICAL MODELING OF THE "FLOW TUBE – LIQUID" SYSTEM OF A CORIOLIS FLOW METER

E.A. Gudkova

Penza State Technological University, Penza, Russia
gudkova-penza@yandex.ru

Abstract. *Background.* The aim of the work is to implement numerical methods and algorithms in the form of a software package that allows for a parametric study of the "flow tube – liquid" system of a Coriolis flow meter, and to analyze the influence of the shape of the flow tube on the sensitivity of measurements of liquid mass flow parameters. The relevance is due to the need to identify the geometric design of the flow tube with the most acceptable characteristics when pumping highly paraffinic oils. *Materials and methods.* For the mathematical model, the finite element method and an iterative approach to solving systems of equations based on rigidly coupled coupling were used. A computational algorithm based on linear interpolation and an algorithm that automates the processing of data arrays and the calculation of average time and phase delays have been implemented. The structural and logical diagram of the software complex is presented and described. *Results.* In the course of computational experiments carried out to study the influence of the flow tube shape on the sensitivity of measurements of the parameters of liquid mass flow as a function of the average time delay using the developed hardware and software complex, it was revealed that the model of a Coriolis flow meter with a radius of curvature of the flow tube of 30° is recommended for use in oil and gas industry as a tube geometry that is less susceptible to waxing and at the same time has sufficient sensitivity for measurement. *Conclusions.* A software package has been developed and tested. A relationship has been identified between the geometric shape of the flow tube of a Coriolis flow meter and the measurement sensitivity of the device, which is characterized by the fact that at high values of the radius of curvature of the tube, the sensitivity increases compared to straight-tube designs.

Keywords: software package, coriolis flow meter, flow tube-liquid system, mathematical model

For citation: Gudkova E.A. Development of a software package for conducting computational experiments on numerical modeling of the "flow tube – liquid" system of a coriolis flow meter. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve = Models, systems, networks in economics, technology, nature and society.* 2024;(2):141–152. (In Russ.). doi: 10.21685/2227-8486-2024-2-10

Введение

В настоящее время методология математического моделирования повсеместно применяется, позволяя исследовать не сам объект, а его модель, что дает возможность относительно быстро, без непредвиденных последствий и существенных затрат исследовать свойства и поведение объекта [1]. Математическое моделирование играет ключевую роль в процессах проектирования, оптимизации и анализа работы кориолисовых расходомеров [2], требующих учета большого количества факторов, описанных в работах [2, 3]. Натурный эксперимент с расходомерами данного типа дорог, требует отключения системы встроенных поправок со стороны фирмы-разработчика. Вычислительные эксперименты с моделью позволяют, опираясь на совре-

менные вычислительные методы и технические инструменты информатики, изучать объект в достаточной полноте, недоступной в случае применения чисто теоретических подходов [1].

Наиболее актуальной областью исследования кориолисовых расходов выступают анализ и коррекция их значений при работе с многофазными потоками в нефтегазовой отрасли. При этом исследованию учета парафиновых отложений и характера их налипания в расходомерной трубке посвящено малое количество работ. Существующие модели парафиноотложения в трубопроводах не учитывают особенности работы расходомеров данного типа, а именно дополнительный вклад инерционных сил Кориолиса. В работе [4] проведено определение влияния парафиноотложений на работу U -образного кориолисова расходомера. В то же время авторы не учитывали физические свойства расходомерной трубки и тип течения жидкости (ламинарный/турбулентный), парафин представлен в виде дополнительной массы. Несмотря на это, выявлена ошибка фазовой задержки, вызванная опарафиниванием расходомерной трубки. Патентный поиск показал, что проблема парафинообразования в расходомерной трубке кориолисова расходомера может решаться путем выявления дополнительной массы через вычисление отношения первых двух собственных частот [5, 6]. Данный метод позволяет обнаружить парафиновые отложения, но не оценивает их влияние на точность определения массового расхода.

Одной из поставленных автором задач при исследовании опарафинивания выступает анализ влияния формы расходомерной трубки на чувствительность измерения параметров массового расхода и выявление конструкции расходомерной трубки с наиболее приемлемыми характеристиками при перекачивании высокопарафинистых нефтей. Ее решение основано на создании триады, предложенной А. А. Самарским [1], для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера. Таким образом, цель данной работы заключается в реализации численных методов и алгоритмов в виде программного комплекса, позволяющего проводить параметрическое исследование системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера, и в анализе влияния формы расходомерной трубки на чувствительность измерений параметров массового расхода жидкости.

Материалы и методы

Математическая модель системы «расходомерная трубка – жидкость» основана на уравнениях, описывающих течение жидкости в трубке, и уравнениях, описывающих динамику твердого тела. Среднее установившееся поле скоростей потока жидкости описано осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье – Стокса:

$$\rho(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f},$$

где ρ – плотность жидкости; $\mathbf{v}$ – вектор скорости; p – давление; μ – динамическая вязкость; $\mathbf{f}$ – внешняя сила на единицу объема, и уравнением неразрывности для установившегося течения несжимаемого потока $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$.

Напряженно-деформированное состояние расходомерной трубки описано математической моделью линейной упругости, основанной на трех группах уравнений – уравнение равновесия, соотношения Коши, закон Гука:

$$\nabla \cdot \sigma + F = 0,$$

где σ – тензор напряжений второго ранга; F – вектор объемных сил; ∇ – оператор дивергенции,

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T),$$

где ε – тензор деформаций второго ранга; u – вектор перемещений; $(\nabla u)^T$ – транспонированная матрица градиента перемещений,

$$\sigma = \lambda \text{tr}(\varepsilon)I + 2\mu\varepsilon,$$

где $\text{tr}(\varepsilon)$ – след тензора деформаций; I – единичный тензор; λ и μ – параметры Ляме, которые связаны с модулем Юнга и коэффициентом Пуассона.

Исследование взаимодействия расходомерной трубки и жидкости рассматривалось как взаимодействие акустической конструкции, поскольку высокочастотные колебания трубки вызывают ее структурные деформации. Эти деформации создают перепады давления в жидкости, что приводит к излучению звука вибрирующими конструкциями. Математическое описание акустического поля основано на линеаризованных уравнениях Навье – Стокса, описывающих поведение малых возмущений давления и скорости в жидкости. Линеаризация проведена разложением физических величин на их средние и возмущенные компоненты: $v = v_0 + v'$, $p = p_0 + p'$, $\rho = \rho_0 + \rho'$, $T = T_0 + T'$, где v_0 , p_0 , ρ_0 , T_0 – средние (невозмущенные) компоненты скорости, давления, плотности, температуры соответственно, а v' , p' , ρ' , T' – их возмущенные (акустические) компоненты. Таким образом, получаем уравнение неразрывности $\nabla \cdot v' = 0$ и линеаризованные уравнения Навье – Стокса:

$$\rho_0 \frac{\partial v'}{\partial t} + \rho_0 (v_0 \cdot \nabla) v' + \rho_0 (v' \cdot \nabla) v_0 = -\nabla p' + \mu \nabla^2 v'.$$

Линеаризованное уравнение энергии для несжимаемой жидкости с учетом температуры:

$$\rho_0 c_p \frac{\partial T'}{\partial t} + \rho_0 c_p (v_0 \cdot \nabla) T' + \rho_0 c_p (v' \cdot \nabla) T_0 = k \nabla^2 T',$$

где c_p – удельная теплоемкость; k – теплопроводность.

При решении линеаризованных уравнений Навье – Стокса во временной области необходимо учитывать развитие линейных волн физической неустойчивости, известных как неустойчивость Кельвина – Гельмгольца из-за реактивных членов в основных уравнениях Навье – Стокса. Для их подавления применен стабилизированный метод наименьших квадратов Галеркина, направленный на подавление средних градиентов давления потока:

$v' \cdot \nabla p_0 = 0$, $v_0 \cdot \nabla p_0 = 0$; средних градиентов скорости: $\nabla \cdot v' = 0$, $v' \cdot \nabla v_0 = 0$, $v' \cdot \nabla v_0 = 0$, средних градиентов температуры: $v' \cdot \nabla T_0 = 0$, $v_0 \cdot \nabla T_0 = 0$.

Математическое условие на границе сопряжения, позволяющего учесть ускорение колеблющейся трубки, передаваемое жидкости, и нагрузку от жидкости, влияющей на расходомерную трубку, имеет вид

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho_{solid}} (\nabla p' - q_d) \right) = -n \cdot u_{tube}, \quad F_A = p' n,$$

где ρ_{solid} – плотность материала расходомерной трубки; q_d – термин однородного постоянного фонового потока, конвектирующего звуковое поле; n – нормаль к поверхности; u_{tube} – ускорение расходомерной трубки; F_A – сила на единицу площади, испытываемая стенками расходомерной трубки.

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

$$v_{fluid} = \frac{\partial u_{solid}}{\partial t}, \quad -n \cdot (k \nabla T') = 0,$$

где v_{fluid} – общая скорость жидкости, включая фоновую составляющую; u_{solid} – смещение расходомерной трубки.

С учетом поставленной задачи по исследованию различных геометрий расходомерной трубки аналитическое решение данных уравнений невозможно. Анализ эффективных численных методов, а также разработанные алгоритмы для реализации модели на компьютере изложены в опубликованных ранее работах автора [7, 8]. Использованы метод конечных элементов и итеративный подход к решению систем уравнений на основе жесткосвязного сопряжения [7]. Итеративные методы более эффективны при работе с большими разреженными матрицами. Прямые методы в данном случае не подходят из-за необходимости хранения и обработки большого количества ненулевых элементов. Итеративные методы не требуют полной факторизации матрицы, что освобождает память и вычислительные ресурсы компьютера, а их предобуславливание позволяет улучшить сходимость, тогда как в прямых методах нет аналогичного инструмента.

Реализованы следующие алгоритмы:

- 1) разработка модели;
- 2) реализация взаимодействия и сопряжения системы «расходомерная трубка – жидкость»;
- 3) вычислительный алгоритм для определения средней временной задержки;
- 4) алгоритм, автоматизирующий обработку массивов данных [8].

Для реализации математической модели представляется целесообразным использование существующего и зарекомендовавшего себя программного

обеспечения на основе метода конечных элементов. Использован пакет *COMSOL Multiphysics*, и синтезирована модель на основе 1 и 2 алгоритмов.

Обладая высокими вычислительными возможностями для получения точного численного решения, *COMSOL* мало ориентирован на обработку получаемых массивов данных. Для примера, нет возможности выполнить интерполяцию двух массивов, вычислить их разницу и осуществить усреднение полученных величин. При этом для интерполяции данных существует множество программных продуктов, как коммерческих: *MATLAB*, *Microsoft Excel*, *GNU Octave*, так и открытых: *SciLab* и *FreeMat*.

Для решения поставленной задачи необходимо провести достаточно большое количество вычислительных экспериментов с изменением формы расходомерной трубки, а процесс разработки отдельной модели на каждую исследуемую форму трубки трудоемок. Необходимо автоматизировать этот процесс программно и ввести переменную «радиус кривизны расходомерной трубки» – параметр изгиба, выраженный в градусах и позволяющий изменять геометрию трубки от прямотрубной до *U*-образных конструкций.

Далее требуется вычислить и визуализировать различия измерений между экспериментами, выявить разброс результатов, проанализировать их повторяемость. Для этого также можно использовать программы *MATLAB*, *Microsoft Excel* и др. Однако раздробленность данных по разным программам усложняет процесс их сопоставления и анализа, требует дополнительных усилий по преобразованию и экспорту/импорту информации. Вышеописанные проблемы затрудняют исследование и повышают вероятность ошибок. Исходя из этого предложен разработанный программный комплекс для параметрического исследования системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера. Его использование позволяет реализовывать собственные алгоритмы исследования, разработанные с учетом специфики предметной области; обеспечивает согласованность и совместимость данных на всех этапах исследования; предоставляет возможность интегрировать новые методы обработки данных и функции по мере их появления. Как показано на рис. 1, комплекс состоит из трех программ.

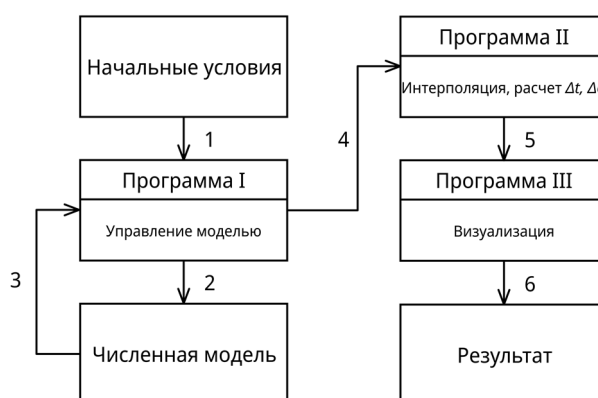


Рис. 1. Структурно-логическая схема программного комплекса

В программе I реализован интерфейс (рис. 2), управляющий численным моделированием. Изначально формируются начальные условия, поля ввода

данных (радиус кривизны расходомерной трубки, количество периодов), выбирается тип исследования (процесс 1).

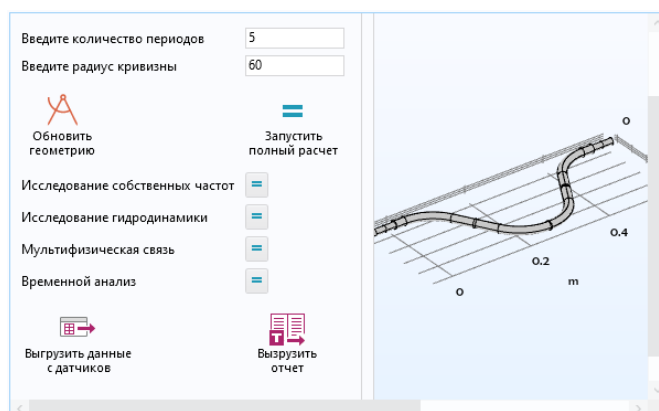


Рис. 2. Пример ввода параметров и обновления геометрии расходомерной трубки

На процессе 2 запускается вычислительный эксперимент, на 3 – его результаты передаются в программу I, и автоматически сформированные в нужном формате массивы передаются в программу II (рис. 3) для линейной интерполяции и вычисления средних временной и фазовой задержек (процесс 4).

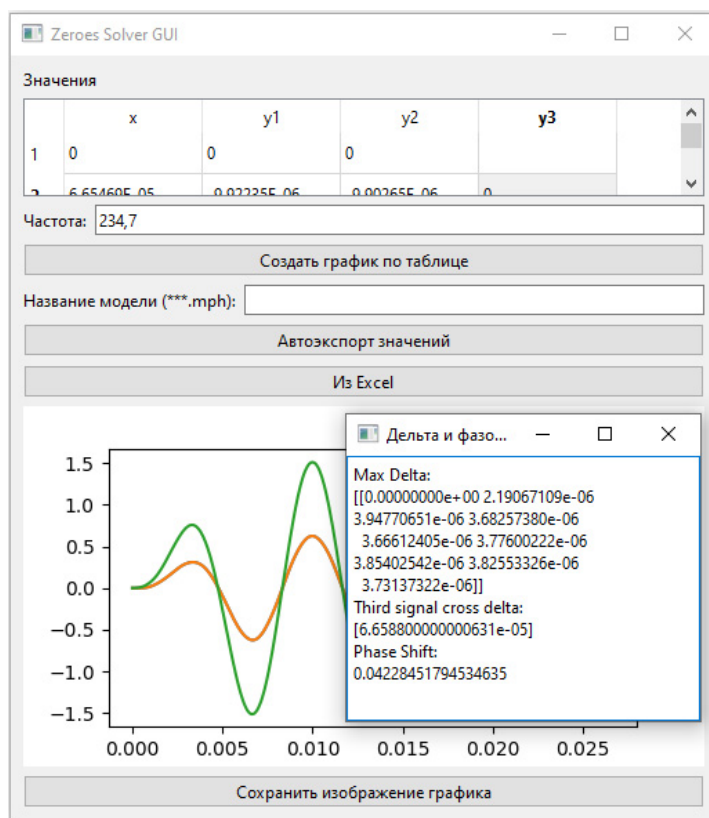


Рис. 3. Интерфейс программы II и пример расчета

Эти значения представляют основной результат вычислительного эксперимента. Значение средней временной задержки пропорционально массовому расходу и также характеризует чувствительность измерения расходомера.

В программу III поступают (процесс 5) обработанные результаты вычислительного эксперимента. Происходят вычисление и визуализация измерений (процесс 6) между экспериментами, анализ разброса.

Программный комплекс был протестирован для проверки корректности работы всех программ (I, II, III), правильности взаимодействия между ними и производительности. Все функции, включая ввод данных, вычисление и визуализацию результатов, проверены на соответствие требованиям. Пользовательское тестирование подтвердило удобство интерфейса и надежность работы системы при различных условиях и сценариях использования.

Результаты

Разработан программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера, и с его помощью проведено исследование влияния формы расходомерной трубки на чувствительность измерений параметров массового расхода жидкости как функции от средней временной задержки.

Сравнивались геометрические формы расходомерной трубки с параметром радиуса кривизны от 0 (прямотрубный расходомер) до 90° (U-образный расходомер) с шагом 30° (рис. 4). Эксперимент выполнялся на трубках с одинаковым диаметром.

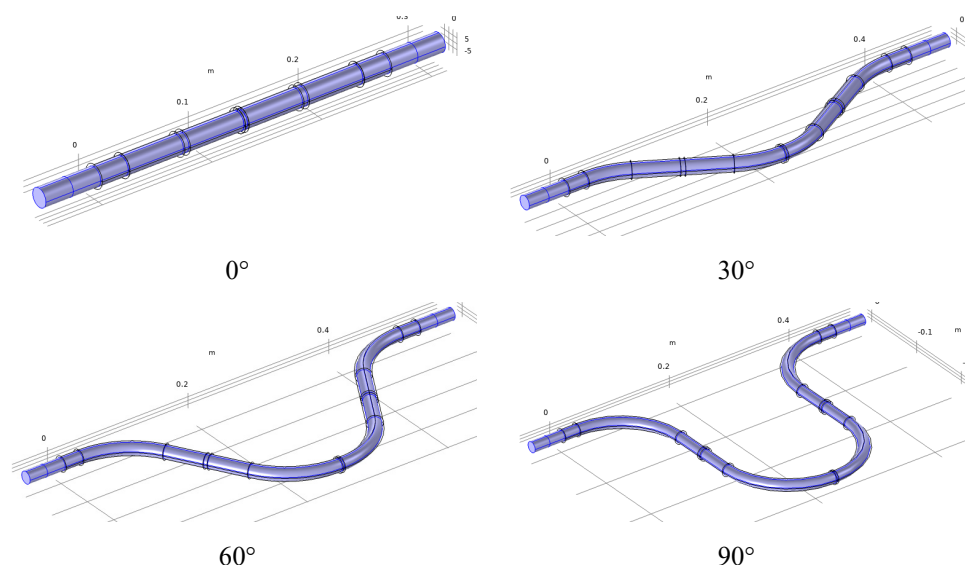


Рис. 4. Исследованные геометрические формы трубок

На рис. 5 представлена зависимость временной задержки от массового расхода и радиуса кривизны расходомерной трубки.

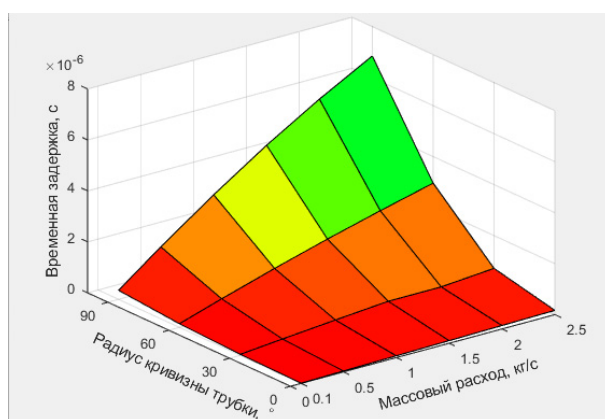


Рис. 5. Зависимость временной задержки от массового расхода и радиуса кривизны расходомерной трубки

По результатам проведенных вычислительных экспериментов было выявлено, что кориолисовы расходомеры с U -образными геометриями трубки и радиусом кривизны от 60 до 90° обладают высокой чувствительностью измерений по сравнению с другими формами. Однако такие конструкции сложны в эксплуатации в нефтегазовой отрасли, поскольку подвержены более сильному опарафиниванию, особенно в областях изгиба, при этом у прямотрубной конструкции этот недостаток менее выражен, но она показала низкую чувствительность измерений. Модель с радиусом кривизны расходомерной трубки 30° демонстрирует форму, при которой положительные свойства прямотрубного расходомера частично сохраняются, но при этом увеличивается чувствительность на высоких значениях массового расхода, свойственных нефтегазовой отрасли, до сопоставимых значений с моделями, обладающими радиусом кривизны трубки от 60 до 90° .

Для того чтобы в дальнейшем выполнить численное сравнение результатов моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» с опарафиниваем и без него, проведен вычислительный эксперимент с расходомерными трубками малого радиуса кривизны от 0 до 30° с шагом 5° и при скоростях потока от $0,1$ до $2,5$ кг/с без наличия парафиновых отложений (рис. 6).

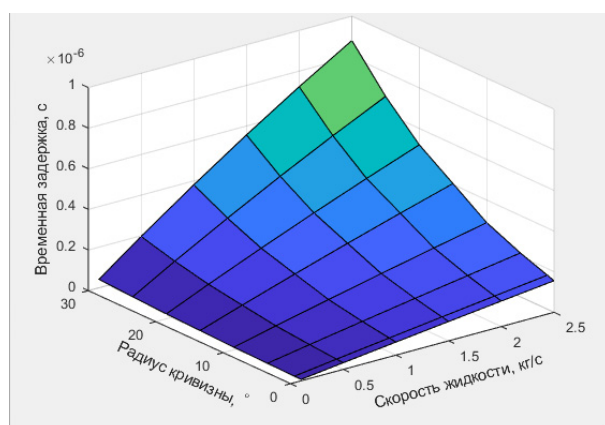


Рис. 6. Зависимость изменения временной задержки от радиуса кривизны трубки от 0 до 30° и скоростей потока от $0,1$ до $2,5$ кг/с

Как видно из рис. 6, чувствительность возрастает с увеличением угла изгиба трубки. Это также объясняется увеличивающейся длиной расходомерной трубки при сохранении жесткости системы, что подтверждается многочисленными исследованиями [9, 10].

Обсуждение

Использование разработанного программного комплекса позволило управлять моделью в процессе анализа и исследования динамики потоков жидкости в расходомерной трубке, а также автоматизировать разработанные алгоритмы обработки и визуализации данных. Применение программного комплекса при проведении серий вычислительных экспериментов снизило временные затраты на обработку и интерпретацию результатов за счет автоматизации типовых рутинных задач, таких как выгрузка данных эксперимента в заданном формате и форме, обмен данными между программами, а также с помощью реализации автоматического изменения формы расходомерной трубки при вводе пользователем параметра радиуса кривизны.

Разработанный программный комплекс предоставляет полезный инструмент для различных групп пользователей и организаций, связанных с анализом работы кориолисовых расходомеров и исследованием их параметров. Он может быть использован как для научных исследований, так и в промышленных и образовательных целях. Планируемое усовершенствование программного комплекса будет направлено на реализацию в программе II новых алгоритмов интерполяции данных с использованием полиномиальных функций, а также на добавление средств обработки данных для работы с зашумленными сигналами.

Заключение

Разработан и протестирован программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера. Реализована возможность автоматического перестроения геометрии расходомерной трубки при вводе параметра «радиус кривизны», что сокращает временные затраты на проведение вычислительного эксперимента до 90 % без учета времени выполнения расчета, так как отсутствует необходимость в создании и отладке моделей с новой геометрией.

По результатам проведенного исследования была выявлена взаимосвязь между геометрической формой расходомерной трубки кориолисова расходомера и чувствительностью измерений прибора, которая характеризуется тем, что при высоких значениях радиуса кривизны трубки чувствительность повышается по сравнению с прямотрубными конструкциями. При этом полученные с помощью разработанного программного комплекса данные позволяют сделать вывод о возможности применения модели кориолисова расходомера с радиусом кривизны расходомерной трубки 30° для применения в нефтегазовой отрасли в качестве геометрической формы трубки, менее подверженной опарафиниванию и обладающей при этом достаточной для измерения чувствительностью.

Список литературы

1. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование в информационную эпоху // Вестник Российской академии наук. 2004. Т. 74, № 9. С. 781.
2. Wang T., Baker R. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2014. Vol. 40. P. 99–123. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.015
3. Kazahaya M. A mathematical model and error analysis of Coriolis mass flowmeters // *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2011. Vol. 60. P. 1163–1174. doi: 10.1109/TIM.2010.2086691
4. Prakhova M. Y., Krasnov A. N. Coriolis flowmeter for commercial accounting of crude oil // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Т. 1582, №. 1. P. 012071.
5. Патент № 2773633 С1 РФ, МПК G01F 1/66, G01F 1/84, G01F 25/00. Способ оценки состояния измерительной системы кориолисового расходомера / С. Е. Лобашев, М. Д. Шилин, Е. А. Горюнов [и др.] ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ЭЛМЕТРО ГРУПП» : № 2020140022 : заявл. 07.12.2020 : опубл. 06.06.2022.
6. Патент № 2803043 С1 РФ, МПК G01F 1/84, G01F 25/00. Способ оценки состояния кориолисова расходомера для его поверки и/или диагностики / А. А. Яушев, В. А. Логиновский, А. В. Жестков ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ЭлМетро-Инжиниринг» : № 2023112486 : заявл. 11.05.2023 : опубл. 05.09.2023.
7. Гудкова Е. А., Таранцева К. Р., Михеев М. Ю. Сравнительный анализ численных и аналитических методов моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» в кориолисовых расходомерах // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11, № 3 (59). С. 57–63. doi: 10.46548/21vek-2022-1159-0009
8. Гудкова Е. А., Таранцева К. Р. Алгоритмы для проведения компьютерного моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера и обработки его результатов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2024. № 12 (2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1560> (дата обращения: 10.06.2024).
9. Ford C. L. A simple parametric design model for straight-tube Coriolis flow meters // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2021. Vol. 79. P. 101958. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101958
10. Zhou Z., Gao L., Chen Z. [et al.]. Numerical analysis and test of vibration and interference characteristics of dual U-tube Coriolis flowmeter // *Flow Measurement and Instrumentation*. 2023. Vol. 93. P. 102437.

References

1. Samarskiy A.A., Mikhaylov A.P. Mathematical modeling in the information age. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk = Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2004;74(9):781. (In Russ.)
2. Wang T., Baker R. Coriolis flowmeters: a review of developments over the past 20 years, and an assessment of the state of the art and likely future directions. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2014;40:99–123. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.015
3. Kazahaya M. A mathematical model and error analysis of Coriolis mass flowmeters. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*. 2011;60:1163–1174. doi: 10.1109/TIM.2010.2086691
4. Prakhova M.Y., Krasnov A.N. Coriolis flowmeter for commercial accounting of crude oil. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020;1582(1):012071.

5. Patent № 2773633 C1 Russian Federation, IPC G01F 1/66, G01F 1/84, G01F 25/00. *Sposob otsenki sostoyaniya izmeritel'noy sistemy koriolisovogo raskhodomera = A method for assessing the condition of the measuring system of a coriolis flowmeter.* S.E. Lobashev, M.D. Shilin, E.A. Goryunov et al.; applicant Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «ELMETRO GRUPP»: № 2020140022: appl. 07.12.2020: publ. 06.06.2022. (In Russ.)
6. Patent № 2803043 C1 Russian Federation, IPC G01F 1/84, G01F 25/00. *Sposob otsenki sostoyaniya koriolisova raskhodomera dlya ego poverki i/ili diagnostiki = A method for assessing the condition of a coriolis flowmeter for its verification and/or diagnostics.* A.A. Yaushev, V.A. Loginovskiy, A.V. Zhestkov; applicant Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu «ElMetro-Inzhiniring»: № 2023112486: appl. 11.05.2023: publ. 05.09.2023. (In Russ.)
7. Gudkova E.A., Tarantseva K.R., Mikheev M.Yu. Comparative analysis of numerical and analytical methods for modeling the "flow tube – liquid" system in coriolis flowmeters. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus = XXI century: results of the past and problems of the present plus.* 2022;11(3):57–63. (In Russ.). doi: 10.46548/21vek-2022-1159-0009
8. Gudkova E.A., Tarantseva K.R. Algorithms for conducting computer modeling of the "flow tube – liquid" system of a Coriolis flowmeter and processing its results. *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii = Modeling, optimization and information technologies.* 2024;(12). (In Russ.). Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1560> (accessed 10.06.2024).
9. Ford C.L. A simple parametric design model for straight-tube Coriolis flow meters. *Flow Measurement and Instrumentation.* 2021;79:101958. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.101958
10. Zhou Z., Gao L., Chen Z. et al. Numerical analysis and test of vibration and interference characteristics of dual U-tube Coriolis flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation.* 2023;93:102437.

Информация об авторах / Information about the authors

Екатерина Александровна Гудкова
аспирант,
старший преподаватель кафедры
информационных технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: gudkova-penza@yandex.ru

Ekaterina A. Gudkova
Postgraduate student,
senior lecturer of the sub-department
of information technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage/Gagarina street,
Penza, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 18.03.2024

Поступила после рецензирования/Revised 08.06.2024

Принята к публикации/Accepted 17.06.2024