

УДК 004.942

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.45.2.028](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.45.2.028)

Алгоритмы для проведения компьютерного моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера и обработки его результатов

Е.А. Гудкова[✉], К.Р. Таранцева

*Пензенский государственный технологический университет,
Пенза, Российская Федерация*

Резюме. Математическое моделирование системы «расходомерная трубка – жидкость» представляет собой актуальное направление в инженерной и научной практике, поскольку позволяет оптимизировать конструкцию расходомерных трубок, оценить влияние различных факторов, таких как давление, температура, вязкость и состав жидкости на работу системы без необходимости проведения сложных и дорогостоящих натурных экспериментов. В связи с этим данная статья направлена на разработку алгоритмов для реализации математической модели системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера. В работе синтезирован алгоритм разработки численной модели в пакете мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics, позволивший повысить достоверность моделирования, снизить трудоемкость создания и отладки за счет использования модульного принципа. Разработан вычислительный алгоритм и выполнено математическое описание расчета средней временной задержки сигналов датчиков кориолисова расходомера. Алгоритм использует метод линейной интерполяции на основе известных точек массивов данных, полученных в результате вычислительного эксперимента. Предложен алгоритм работы программы на языке Python с использованием Comsol API, автоматизирующий обработку массивов данных и расчет средних временной и фазовой задержек. Алгоритмы реализованы с использованием языка UML в программном продукте Enterprise Architect. Материалы статьи представляют практическую ценность для специалистов в области численного моделирования и оптимизации параметров кориолисова расходомера.

Ключевые слова: система «расходомерная трубка – жидкость», кориолисов расходомер, компьютерное моделирование, численная модель, вычислительных эксперимент.

Для цитирования: 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://moitvivr.ru/journal/pdf?id=1560> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.028

Algorithms for computer modeling of the «flow tube – liquid» system of a Coriolis flow meter and processing its results

Е.А. Gudkova[✉], K.R. Taranceva

Penza State Technological University, Penza, the Russian Federation

Abstract. Mathematical modeling of the «flow tube – liquid» system represents a current direction in engineering and scientific practice, since it allows optimizing the design of flow tubes, assessing the influence of various factors, such as pressure, temperature, viscosity and liquid composition on the operation of the system without the need for complex and expensive full-scale experiments. In this regard, this article is aimed at developing algorithms for implementing a mathematical model of the «flow tube – liquid» system of a Coriolis flow meter. The work synthesized an algorithm for developing

a numerical model in the multiphysics modeling package COMSOL Multiphysics, which made it possible to increase the reliability of the simulation and reduce the complexity of creation and debugging through the use of the modular principle. A computational algorithm has been developed and a mathematical description of the calculation of the average time delay of signals from Coriolis flow meter sensors has been performed. The algorithm uses a linear interpolation method based on known data points obtained as a result of a computational experiment. An algorithm for running a program in Python using the Comsol API is proposed, which automates the processing of data arrays and the calculation of average time and phase delays. The algorithms are implemented using the UML language in the Enterprise Architect software product. The materials of the article are of practical value for specialists in the field of numerical modeling and optimization of Coriolis flow meter parameters.

Keywords: «flow tube – liquid» system, Coriolis flow meter, computer modeling, numerical model, computational experiment.

For citation: Gudkova E.A., Tarantseva K.R. Algorithms for computer modeling of the «flow tube – liquid» system of a Coriolis flow meter and processing its results. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2024;12(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1560> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.45.2.028 (In Russ.).

Введение

Математическое моделирование [1] позволяет исследовать влияние различных параметров на сложные системы и оценивать их значимость без необходимости проведения дорогостоящих или длительных экспериментов. Такой подход обеспечивает возможность разработки новых и улучшения существующих технологий. В свою очередь численные методы применяются, когда аналитическое решение недоступно или чрезвычайно сложно. Математическое моделирование системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера [2–4] на основе численных методов [3–8] применяют для оптимизации процессов измерения параметров расхода потоков, анализа влияния различных параметров на точность измерений, разработки новых конструкций расходомерных трубок и предсказания производительности прибора в различных условиях эксплуатации [2–3, 6–8].

Численная модель представляет собой совокупность информации о моделируемой системе «расходомерная трубка – жидкость» (геометрия, свойства, состояние, внешние воздействия), о способе моделирования (математическая модель, параметры, используемые методы решения задачи, конечно-элементная сетка), представленной в определенном формате (текстовом или бинарном) и передаваемой решателю в качестве входных данных [9].

Постановка задачи математического моделирования, согласно [1], сводится к трем этапам: модель, алгоритм, программа. Целью данной работы является разработка алгоритмов, которые в совокупности с численными методами будут реализованы в виде программного комплекса для дальнейшего проведения вычислительных экспериментов и последующей обработки их результатов.

Материалы и методы

Принцип работы кориолисова расходомера [2–3, 10] заключается в следующем: когда измеряемый поток проходит через вибрирующую трубку расходомера, возникают силы инерции, вызванные изменением направления движения потока. Эти силы приводят к кориолисовому эффекту – разнонаправленной деформации трубки. Она приводит к разнице во времени Δt (как показано на Рисунке 1) или фазе $\Delta \varphi$ между ответными сигналами от двух датчиков, расположенных на трубке.

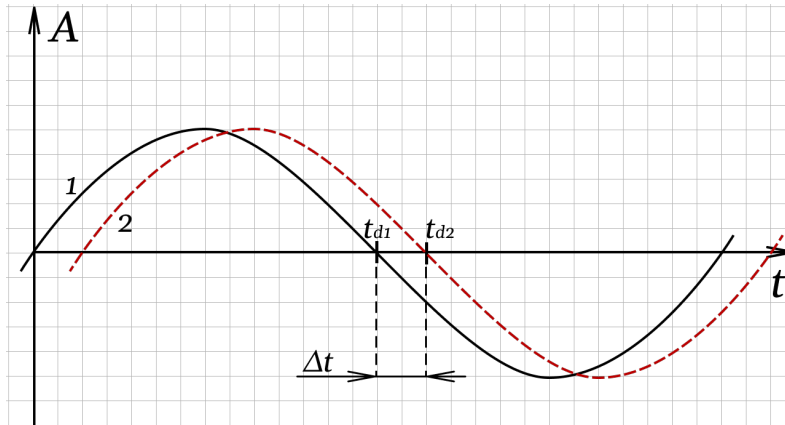


Рисунок 1 – Временные сигналы с датчиков кориолисова расходомера
Figure 1 – Time signals from Coriolis flow meter sensors

При этом массовый расход определяют [10] уравнением:

$$q_m = K \times (\Delta t - \Delta t_0), \quad (1)$$

где K – коэффициент калибровки расхода, связанный с чувствительностью измерения расхода кориолисовыми расходомерами, Δt_0 – временная задержка калибровки нулевого расхода [10], $\Delta t = t_{d1} - t_{d2}$ – временная задержка сигналов 1 и 2 датчиков.

Основные результаты вычислительного эксперимента представляют собой временные сигналы колебаний расходомерной трубки в двух точках (Рисунок 1). Временная задержка Δt рассчитывается при амплитуде $A = 0$ для каждого i полупериода временных сигналов 1 и 2 и усредняется при условии постоянных параметров потока. Поскольку значение времени t_{idj} неизвестно, где j – номер датчика, его можно вычислить за счет использования метода линейных интерполяций по известным точкам по обе стороны пересечения временного сигнала с осью времени. На Рисунке 2 представлена разработанная схема вычисления t_{idj} и предложено его математическое описание в виде уравнений (2)–(4).

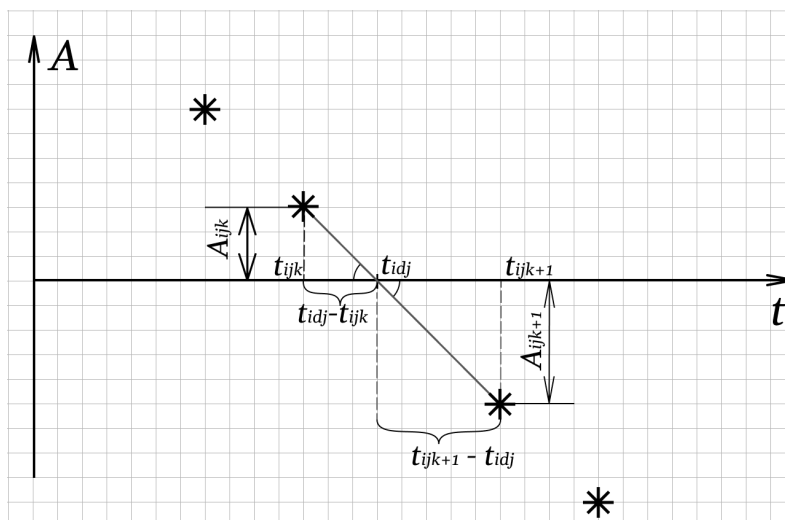


Рисунок 2 – Метод линейной интерполяции, где * – это известные точки временного сигнала
Figure 2 – Linear interpolation method, where * are known points of the time signal

Таким образом, средняя временная задержка определяется уравнением:

$$\Delta \bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^m (t_{id2} - t_{id1})}{m}, \quad (2)$$

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

$$t_{id1} = \frac{A_{i1k} \cdot t_{i1k+1} + A_{i1k+1} \cdot t_{i1k}}{A_{i1k+1} + A_{i1k}}, \quad (3)$$

$$t_{id2} = \frac{A_{i2k} \cdot t_{i2k+1} + A_{i2k+1} \cdot t_{i2k}}{A_{i2k+1} + A_{i2k}}, \quad (4)$$

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

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

$$\Delta \bar{\varphi} = 2\pi \cdot f \cdot \Delta \bar{t}, \quad (5)$$

где f – собственная частота колебаний расходомерной трубки.

В работе предложены алгоритмы для проведения численного моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера в пакете COMSOL Multiphysics (далее COMSOL) с использованием метода конечных элементов. Алгоритмы реализованы в нотации языка UML в программном продукте Enterprise Architect.

Результаты и обсуждения

Для повышения достоверности компьютерного моделирования, снижения трудоемкости создания и отладки был сформирован алгоритм разработки численной модели (Рисунок 3), основанный на модульном принципе. Он подразумевает разбиение процесса моделирования на отдельные компоненты, каждый из которых отвечает за выполнение конкретной задачи. Этот подход обеспечивает более структурированный и гибкий процесс разработки, а также упрощает поддержку и модификацию модели.

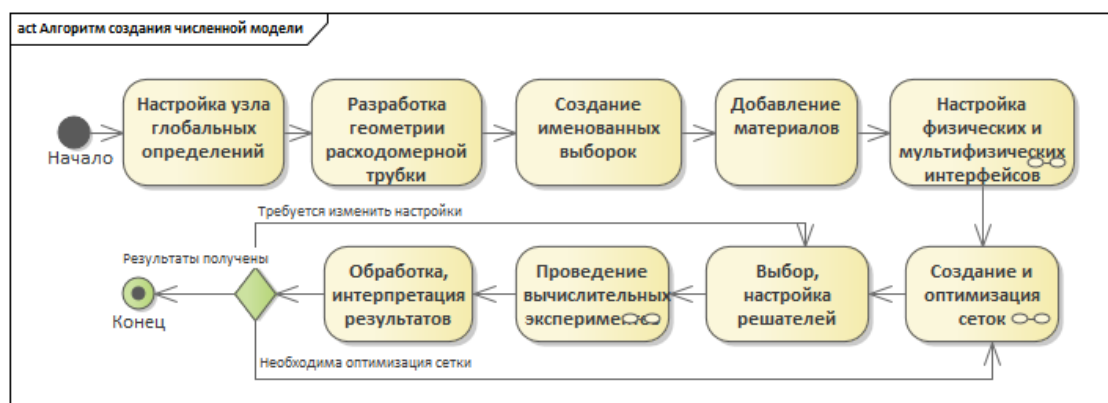


Рисунок 3 – Алгоритм разработки численной модели

Figure 3 – Algorithm for developing a numerical model

Далее опишем предложенный алгоритм:

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

2) Разработка геометрии расходомерной трубки, построение геометрических примитивов, соответствующих размерности модели, непосредственно в COMSOL, либо с использованием внешних программ 3D моделирования.

3) Настройка узла Component, создание именованных выборок Selections в геометрической последовательности. Созданные выборки (жидкость, трубка, стенки, входные и выходные границы для потока) необходимы при назначении свойств материала, граничных условий и других параметров модели. Эта часть анализа включает в себя выбор геометрических областей, границ, ребер и точек и присвоение этим геометрическим объектам уравнений, нагрузок или ограничений.

4) Добавление материалов в численную модель. Назначение материалов для жидкой и структурной составляющих модели.

5) Выбор подходящих физических и мультифизических интерфейсов, в которых заданы системы дифференциальных уравнений, геометрическая выборка для интерфейсов, добавление условий и ограничений.

6) Создание и оптимизация сетки. Этот процесс является ключевым шагом при создании модели конечных элементов, непосредственно влияющим на достоверность результатов.

7) Выбор, настройка решателей и получение решения уравнений (которые составляют численную модель) за оптимальное время вычислений, проверка адекватности модели.

8) Проведение серии вычислений по интересующим параметрам.

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

Поскольку модуль 5 данного алгоритма представляет собой наиболее специфичный этап для проводимого исследования, далее для численной модели разработан отдельный алгоритм взаимодействия системы «расходомерная трубка – жидкость» (Рисунок 4).

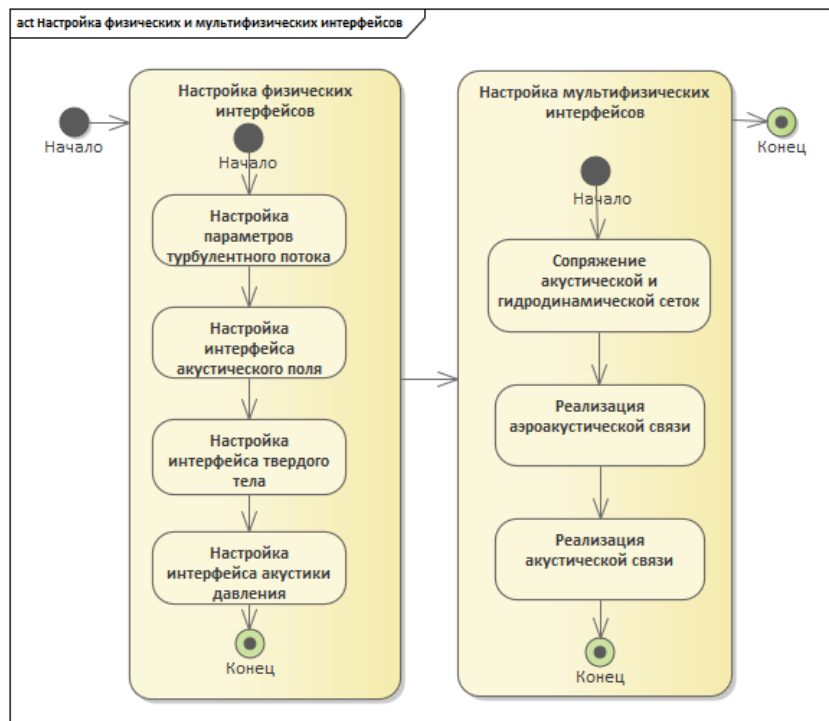


Рисунок 4 – Алгоритм взаимодействия системы «расходомерная трубка – жидкость»

Figure 4 – Algorithm for interaction of the «flow tube – liquid» system.

На основе предложенных алгоритмов для проведения компьютерного моделирования была сформирована численная модель системы «расходомерная трубка

– жидкость» в COMSOL. Одним из основных результатов ее расчета являются массивы данных, представляющие собой временные сигналы колебаний расходомерной трубки в двух точках, как представлено на Рисунке 1. Для вычисления значений t_{d1} , t_{d2} и расчета средней временной задержки сигналов $\Delta\bar{t}$ был разработан вычислительный алгоритм, на основе метода линейных интерполяций, представленный на Рисунке 5.

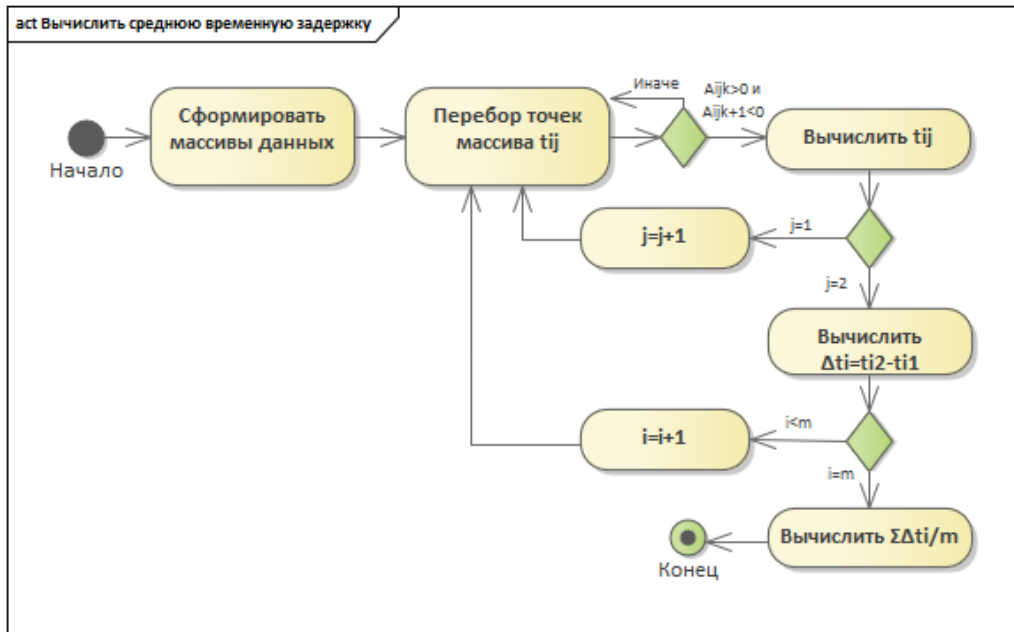


Рисунок 5 – Вычислительный алгоритм для определения средней временной задержки
 Figure 5 – Computational algorithm for determining the average time delay

Как видно из рисунка, для начала необходимо сформировать массивы данных, получаемые в результате расчета численной 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 1 и 2 датчика, далее рассчитывается разность Δt для каждого полупериода, в конце это значение усредняется и получается среднее значение временной задержки $\Delta\bar{t}$, при условии постоянных параметров потока.

На основе предложенных уравнений (2)–(5) и разработанного вычислительного алгоритма (Рисунок 5) в дальнейшем целесообразно разработать программу для вычисления временной и фазовой задержек сигналов для нескольких массовых расходов с целью автоматизации обработки результатов вычислительного эксперимента. Подготовлен алгоритм для реализации программы на языке Python (Рисунок 6) с использованием библиотеки Mrp для экспорта результатов расчета численной модели из COMSOL. Как видно из рисунка, алгоритм разделен на две дорожки, поскольку одни действия, выполняются пользователем, другие – программой.

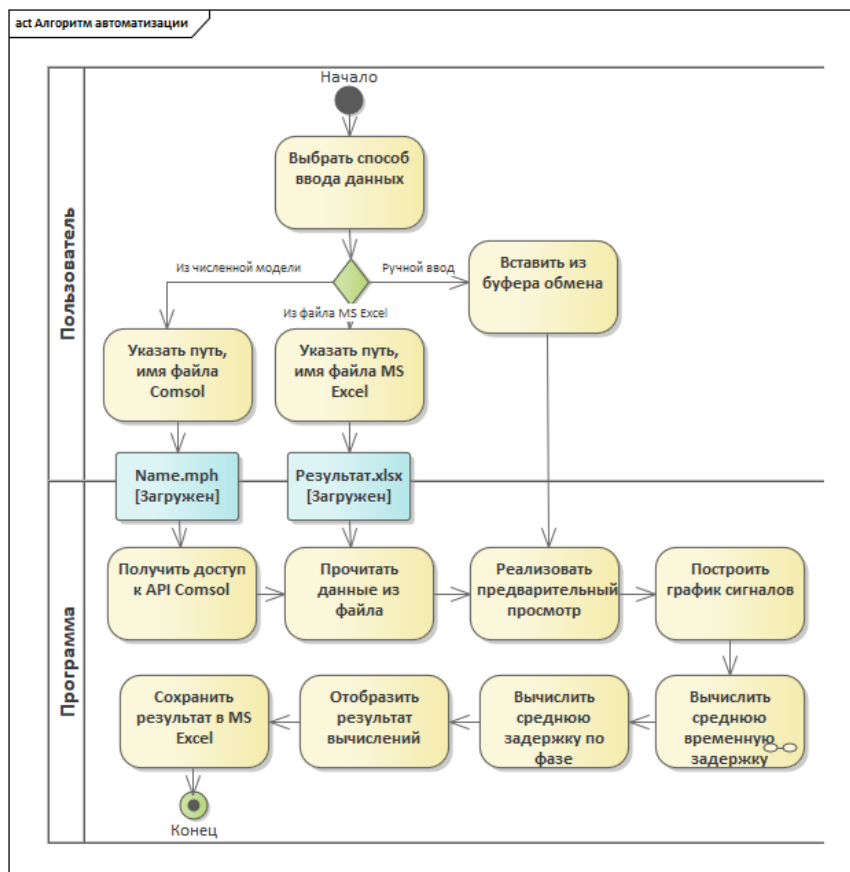


Рисунок 6 – Алгоритм, автоматизирующий обработку массивов данных и расчет средних временной и фазовой задержек

Figure 6 – Algorithm that automates the processing of data arrays and the calculation of average time and phase delays

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. 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 ∞ представляет собой вложенную деятельность, алгоритм для которой приведен на Рисунке 5.

Заключение

Математическое моделирование системы «расходомерная трубка – жидкость» в кориолисовом расходомере на основе численных методов, алгоритмов и современных программных средств позволяет моделировать и анализировать динамику течения жидкости внутри трубки при различных условиях. Это позволяет провести оптимизацию параметров расходомера для улучшения производительности, а также выявить потенциальные проблемы или ограничения, которые могут возникнуть в ходе эксплуатации.

Разработан алгоритм проектирования численной модели в среде COMSOL, позволяющий повысить достоверность компьютерного моделирования, снизить трудоемкость создания и отладки за счет использования модульного принципа. Разработан вычислительный алгоритм и проведено математическое описание расчета средней временной задержки с использованием метода линейных интерполяций по известным точкам по обе стороны пересечения временного сигнала с осью времени. Предложено реализовать вычислительный алгоритм в программе для обработки результатов экспериментов. Разработан алгоритм, автоматизирующий обработку массивов данных и расчет средних временной и фазовой задержек.

Предложенные алгоритмы компьютерного моделирования направлены на улучшение эффективности численных методов, используемых для моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость». Их использование позволило уменьшить время исследования, улучшить точность результатов, а также адаптировать численную модель к доступным вычислительным ресурсам компьютера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Самарский А.А., Михайлов А.П. *Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры*. Москва: Физматлит; 2001. 320 с.
Samarskii A.A., Mikhailov A.P. *Matematicheskoe modelirovanie: Idei. Metody. Primery*. Moscow: Fizmatlit; 2001. 320 p. (In Russ.).
2. Bobovnik G., Kutin J., Bajsić I. Estimation of velocity profile effects in the shell-type Coriolis flowmeter using CFD simulations. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2005;16(6):365–373. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.04.007>.
3. Yaushev A.A., Taranenko P.A., Loginovskiy V.A. Study of the Oscillation Modes of a Coriolis Flowmeter Using a Parametric Finite Element Model, Verified by the Results of Modal Testing. *Procedia Engineering*. 2016;150:336–340. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.027>.
4. Hou G., Wang J., Layton A. Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction – A Review. *Communications in Computational Physics*. 2012;12(2):337–377. <https://doi.org/10.4208/cicp.291210.290411s>.
5. 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;11(3):57–63. <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1159-0009>.
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: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*. 2022;11(3):57–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.46548/21vek-2022-1159-0009>.
6. Ibryaeva O., Semenov A., Henry M. Measurement validation for ICPS: Matrix pencil method for coriolis metering with liquid/gas flow. In: *1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems, ICPS 2018: Proceedings – 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems, ICPS 2018, 15-18 May 2018, Saint Petersburg, Russia*. IEEE; 2018. P. 440–445. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2018.8390745>.
7. Costa F.O., Pope J.G., Gillis K.A. Modeling Temperature Effects on a Coriolis Mass Flowmeter. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2020;76. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101811>.

8. Shavrina E., Nguyen V.-T., Yan Z., Khoo B.C. Fluid-Solid Interaction Simulation Methodology for Coriolis Flowmeter Operation Analysis. *Sensors*. 2021;21(23). <https://doi.org/10.3390/s21238105>.
9. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. *Основы работы в ANSYS 17*. Москва: ДМК Пресс; 2017. 210 с.
Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. *Osnovy raboty v ANSYS 17*. Moscow: DMK Press; 2017. 210 p. (In Russ.).
10. 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. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.08.015>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Гудкова Екатерина Александровна, аспирант, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и системы», Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Российская Федерация.
Ekaterina A. Gudkova, postgraduate student, Senior lecturer of the Department of Information Technologies and Systems, Penza State Technological University, Penza, the Russian Federation.
e-mail: gudkova-penza@yandex.ru
ORCID: [0000-0003-2197-6419](https://orcid.org/0000-0003-2197-6419)

Таранцева Клара Рустемовна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биотехнология и техносферная безопасность», Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Российская Федерация.
Klara R. Tarantseva, doctor of technical sciences, professor, head of the department «Biotechnology and technosphere safety», Penza State Technological University, Penza, the Russian Federation.
e-mail: krtar2018@bk.ru
ORCID: [0000-0002-1313-6826](https://orcid.org/0000-0002-1313-6826)

Статья поступила в редакцию 19.04.2024; одобрена после рецензирования 03.05.2024; принята к публикации 07.05.2024.

The article was submitted 19.04.2024; approved after reviewing 03.05.2024; accepted for publication 07.05.2024.