

◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆ КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ ◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

УДК 004.42

Анализ и документирование требований для программного комплекса по проведению вычислительных экспериментов и численному исследованию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера

Гудкова Е.А.*

Пензенский государственный технологический университет

(ФГБОУ ВО ПензГТУ), г. Пенза, Российская Федерация

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2197-6419>

e-mail: gudkova-penza@yandex.ru

Предмет. Работа описывает этапы разработки программного комплекса, предназначенного для проведения серий вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера и автоматизации алгоритмов последующей обработки и визуализации данных. *Методы.* Структура требований для программного комплекса разработана на основе шаблона *Software Requirements Specification*, принятого в методологии разработки программного обеспечения *Rational Unified Process*, в соответствии с классификацией требований к программным системам *FURPS+*. Для разработки подпрограмм комплекса использованы язык *Python 3* и интерпретируемый язык программирования среды *MATLAB*. *Результаты.* Разработана структура требований для программного комплекса, включая функциональные и нефункциональные требования. Разработан программный комплекс, состоящий из трех подпрограмм, описаны его структура, основные компоненты и возможности, продемонстрированы примеры использования. *Выводы.* Программный комплекс решает задачи автоматизации алгоритмов моделирования, обработки и визуализации данных, полученных в результате экспериментов. Он может быть использован в инженерных и научных исследованиях, связанных с анализом работы кориолисовых расходомеров.

Ключевые слова: программный комплекс, система «расходомерная трубка – жидкость», кориолисов расходомер, численное моделирование.

Для цитаты:

Гудкова Е.А. Разработка программного комплекса для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка –



жидкость» кориолисова расходомера // Моделирование и анализ данных. 2024. Том 14.
№ 2. С. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2024140209>

**Гудкова Екатерина Александровна*, аспирант, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и системы», Пензенский государственный технологический университет (ФГБОУ ВО ПензГТУ), г. Пенза, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2197-6419>, e-mail: gudkova-penza@yandex.ru

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные технологические процессы требуют высокой точности и эффективности в измерениях физических параметров, таких как расход жидкости. В этом контексте, кориолисовы расходомеры представляют собой приборы, обеспечивающие точные измерения массового расхода жидкости [1,2]. Однако проектирование и оптимизация параметров кориолисовых расходомеров представляют собой сложные задачи, требующие учета множества факторов, подробно рассмотренных в работах [2–4]. В работе [5] обосновано применение эффективных численных методов при моделировании элементов кориолисовых расходомеров. В этой связи разработка программного комплекса, предназначенного для проведения серий вычислительных экспериментов по численному моделированию системы «расходомерная трубка – жидкость» кориолисова расходомера [5] и автоматизации алгоритмов последующей обработки и визуализации данных, представляет собой актуальное прикладное направление. Цель данной статьи заключается в формировании и документировании требований к программному комплексу, и его проектированию на основе современных подходов к разработке программных продуктов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эволюция теории разработки программного обеспечения (ПО) привела к возникновению трех основных моделей, описывающих структуру этого процесса – каскадная, итерационная и спиральная. Эти модели по-разному рассматривают процесс разработки, но так или иначе они опираются на следующий базис: формирование требований, проектирование, конструирование, тестирование, внедрение, сопровождение [6]. Разработка требований является ключевым процессом в жизненном цикле разработки программного обеспечения [7–9]. С точки зрения работы ПО требования можно разделить на функциональные и нефункциональные. Функциональные требования [7–9] определяют конкретные операции, действия, которые должен выполнять программный продукт. Нефункциональные требования [7–9] определяют его характеристики, такие как безопасность, производительность или надежность. Таким образом, функциональные требования отвечают на вопрос – «что программный продукт должен делать», а нефункциональные требования – «насколько хорошо». Для разрабатываемого программного комплекса были сформированы требования в соответствии с классификацией требований к программным системам – FURPS+ [10],



отвечающей за функциональность, удобство использования, надежность, производительность и возможность поддержки. Знак «+» в аббревиатуре FURPS+ позволяет указывать ограничения, включая дизайн, реализацию, интерфейс, атрибуты качества.

Одним из широко применяемых стандартов спецификации требований является документ SRS (Software Requirements Specification), принятый в методологии разработки ПО Rational Unified Process (RUP) [7–9]. Структура требований в SRS адаптирована из Международного стандарта IEEE STD 830 и является его упрощенной версией, описывающей функциональные требования в виде списка вариантов использования и их интерпретации [5, 9].

3. ДОКУМЕНТИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ

Была разработана структура требований для программного комплекса на основе шаблона SRS, включающая следующие пункты:

1) Определения, акронимы и сокращения.

Кориолисов расходомер – это массовый расходомер, предназначенный для прямого и непрерывного измерения массы жидкости [1,2].

Система «расходомерная трубка – жидкость» состоит из вибрирующей трубки кориолисова расходомера, зажатой с обоих концов, и протекающей по ней измеряемой жидкости [4].

Датчики кориолисова расходомера расположены равноудалено от центра в левой и правой половинах расходомерной трубки. Они измеряют амплитуду колебаний трубки с течением времени. Под действием силы Кориолиса, возникающей из-за движения жидкости в вибрирующей трубке, возникает временная (фазовая) задержка сигналов [1–5].

COMSOL Multiphysics – это пакет программного обеспечения для анализа методом конечных элементов, моделирования физических и мультифизических явлений [11].

Расчетная модель – это информация о моделируемой системе «расходомерная трубка – жидкость» (геометрия, свойства, состояние, внешние воздействия), о способе моделирования (математическая модель, параметры математической модели, используемые методы решения задачи, расчетная сетка), представленная в определенном формате (текстовом или бинарном) и передаваемая решателю в качестве входных данных [12].

Радиус кривизны расходомерной трубки – параметр изгиба, выраженный в градусах и позволяющий изменять геометрию трубки от прямотрубной до U-образных конструкций.

MATLAB – пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений [13].

2) Описание требований.

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

а) Выполнение вычислительных экспериментов:

- Реализовать управление расчетной моделью, разработанной в среде COMSOL для численного моделирования «системы расходомерная трубка – жидкость».



- Разработать пользовательский интерфейс управления расчетной моделью.
 - Обеспечить варьирование параметров моделирования: радиуса кривизны расходомерной трубки, количества периодов ее колебаний.
 - Формировать таблицы данных о расходе жидкости, частоте колебаний расходомерной трубки, временных 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 алгоритмы обработки данных вычислительного эксперимента.
 - Обеспечить возможность фильтрации, интерполяции данных временных сигналов датчиков для возможности расчета временной задержки.
 - Вычислять 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:
- Интерфейс пользователя должен быть интуитивно понятным и удобным для использования.
 - Поддержка различных числовых форматов данных для ввода и вывода.
- б) Масштабируемость и гибкость:
- Возможно внесения изменений в текст подпрограмм 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.

4. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА.

Подпрограмма 1 создана на базе расчетной модели в пакете мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics [11] в среде разработки приложений Application Builder. Данная среда позволила создать интерфейс, управляющий моделью COMSOL и представляющий результаты пользователю. При запуске модели

на расчет отсутствует необходимость контролировать процесс вычислений и вручную запускать последовательность исследований. Реализованы возможности автоматического сохранения результатов после завершения расчетов и генерации отчетов.

Перечисленные выше функции реализованы путем создания набора форм, которые связывают входные данные пользователя с входными данными в имитационной модели. Также самое относится и к отображению результатов (как в виде таблиц модели, так и в виде диаграмм и графиков), составлению отчетов и генерации данных. В интерфейс приложения (рис. 1) добавлены необходимые параметры из расчетной модели, задана последовательность вычислений, что позволило быстрее и удобнее управлять расчетной моделью.

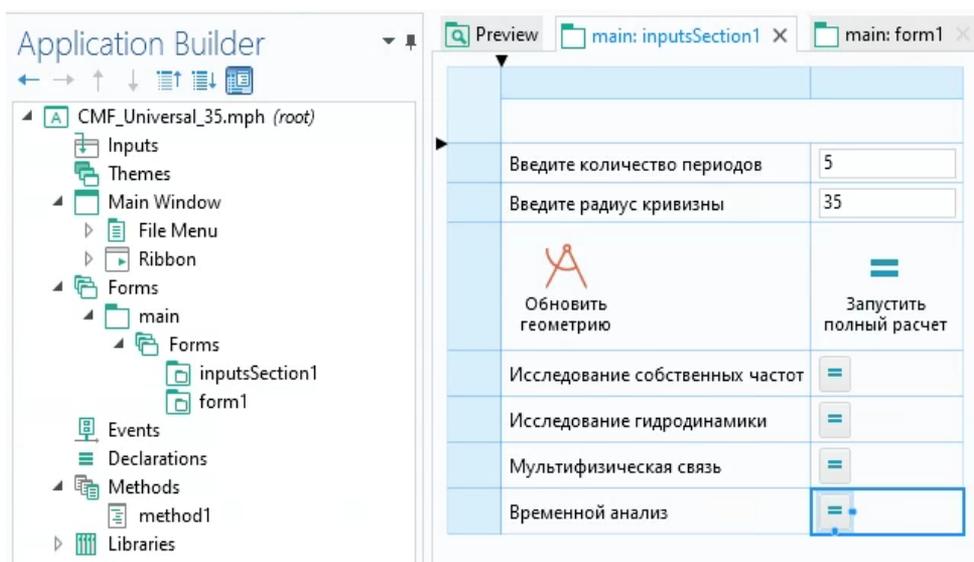


Рис. 1. Разработка интерфейса и функционала подпрограммы 1

Как показано на рис. 1 и 2 разработанный интерфейс подпрограммы 1 содержит поля ввода данных (радиус кривизны расходомерной трубки, количество периодов ее колебаний), и кнопки, при нажатии на которые выполняется соответствующее действие. Подпрограмма 1 использует расчетную модель кориолисова расходомера с универсальной геометрией, в поле можно вводить радиус кривизны расходомерной трубки и при нажатии кнопки «обновить геометрию» выполняется визуализация полученной формы расходомерной трубки (рис. 2).

Реализованы возможности запуска полного расчета заданной последовательности исследований или расчета конкретного исследования. Из подпрограммы 1 временные сигналы датчиков в виде табличных значений передаются в подпрограмму 2 (разработанную на языке Python 3) для их интерполяции и вычисления временной и фазовой задержек (рис. 3). Подпрограмма 1 автоматизирует процесс формирования

и выгрузки необходимых данных в заданном формате. Дополнительно подпрограмма 2 генерирует отчеты для документации результатов в Microsoft Excel.

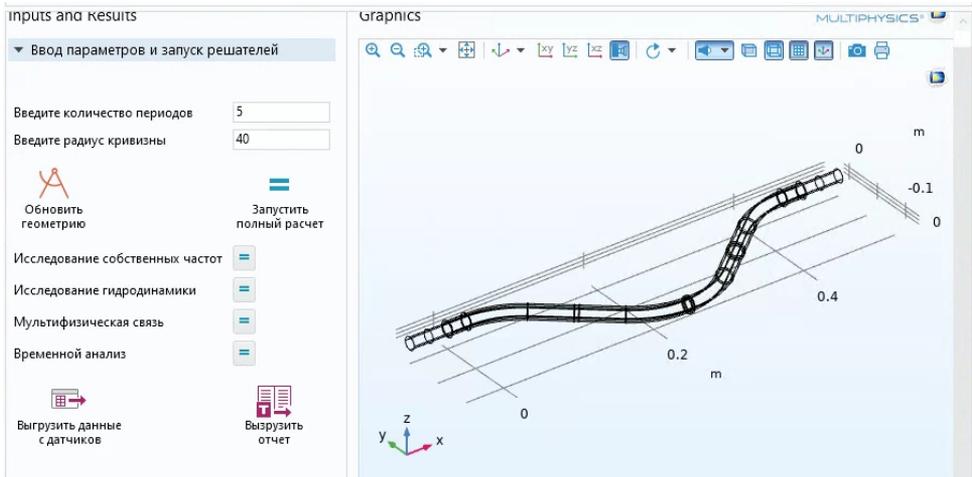


Рис. 2. Пример ввода параметров и обновления геометрии расходомерной трубки

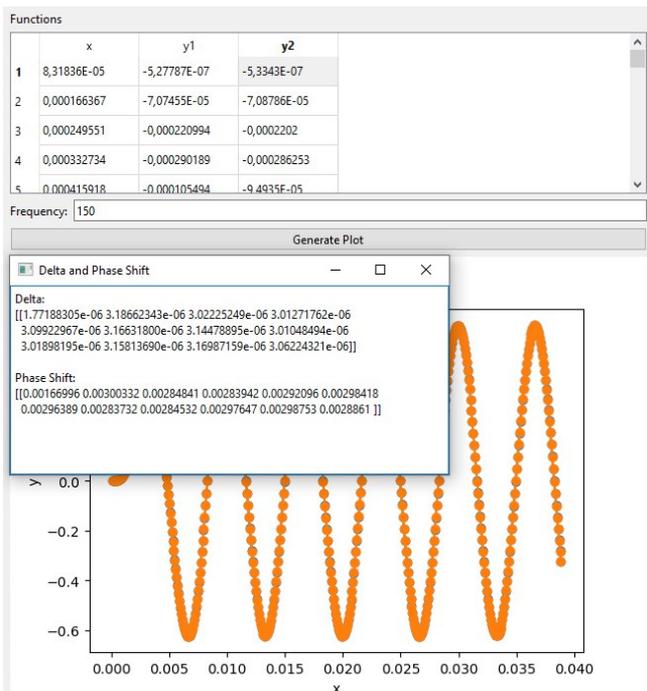
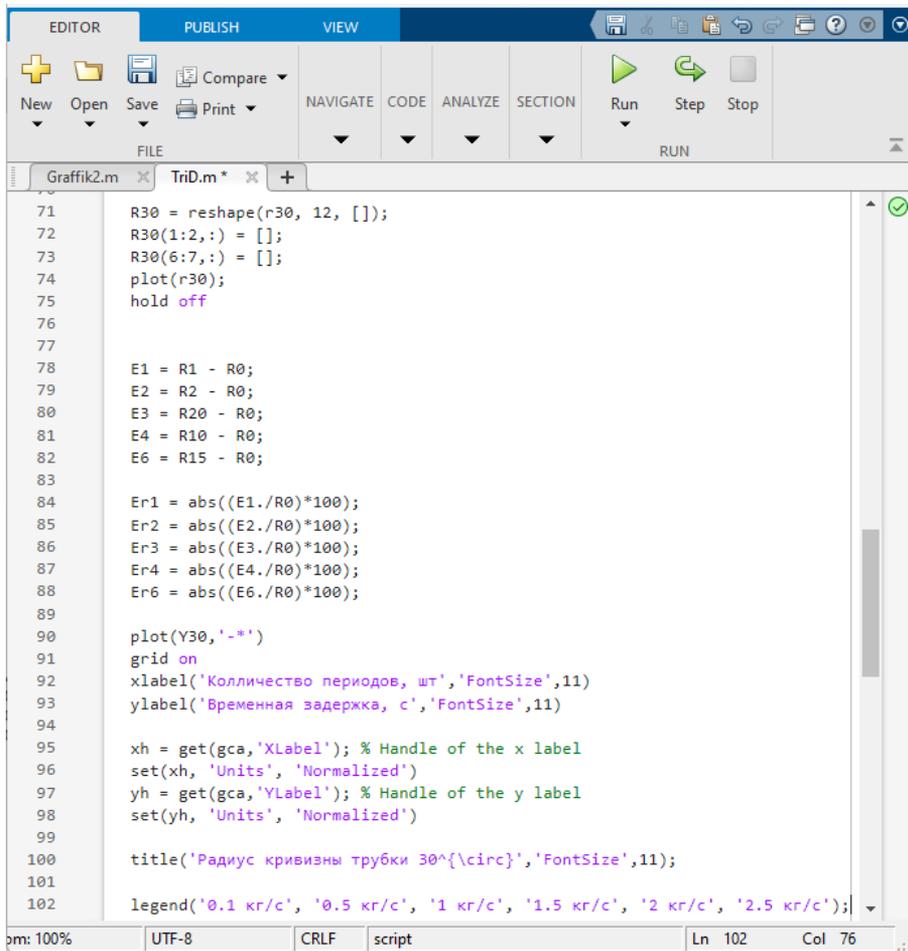


Рис. 3. Пример расчета фазовой и временной задержек сигналов

Подпрограмма 2 выполняет построение первоначального графика колебаний системы «расходомерная трубка – жидкость» для проверки результативности и адекватности вычислений. Программа обладает графическим интерфейсом пользователя, который позволяет удобно осуществлять ввод результатов моделирования как вручную, так и из файла, и выгрузку расчетных данных. Подпрограмма 3 разработана на языке MATLAB, пример кода программы представлен на рис. 4.



```
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');
```

Рис. 4. Код программы в среде MATLAB

Подпрограмма 3 на основе данных расхода 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 (примеры показаны на рис. 5).

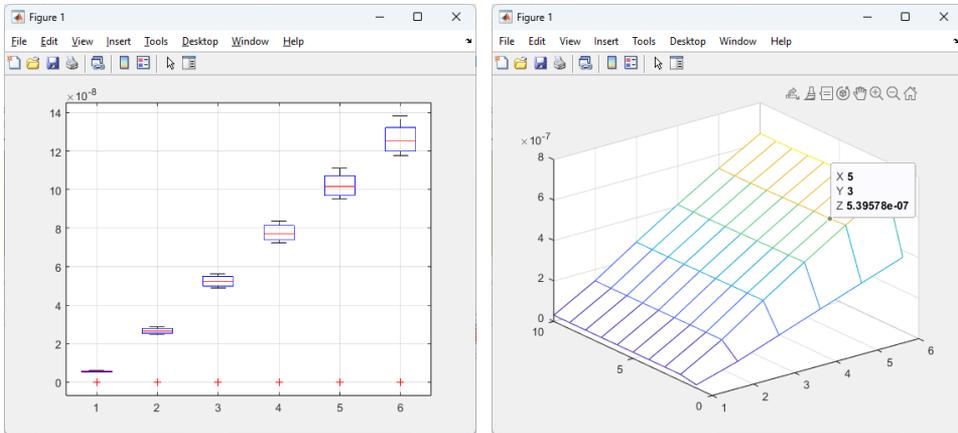


Рис. 5. Примеры визуализации результатов моделирования системы «расходомерная трубка – жидкость» для 6-ти массовых расходов

Результаты работы программного комплекса позволяют численно оценить внешние изменения в расчетную модель при проведении вычислительного эксперимента, рассчитать отклонения от данных базовой модели. Также программный комплекс предоставляет пользователю возможности вычислить и визуализировать различия измерений между экспериментами, выявить разброс результатов, проанализировать их повторяемость.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках проведенного исследования были получены следующие результаты:

- Разработана структура требований для программного комплекса на основе шаблона SRS, принятого в методологии разработки ПО RUP. Анализ и документирование требований позволили создать четкий план разработки, определить базовые параметры, функциональные и нефункциональные возможности комплекса, что в свою очередь повысило эффективность его дальнейшей реализации.
- На основе разработанных требований определена оптимальная структура комплекса, состоящая из трех подпрограмм. Подпрограмма 1 управляет расчетной моделью COMSOL, позволяет изменять выбранные параметры моделирования и запускать модель на расчет. По окончании расчетов подпрограмма формирует файл-отчет с графиками, таблицами, выгружает данные о временных сигналах датчиков кориолисова расходомера для их интерполяции в подпрограмме 2. Подпрограмма 2 вычисляет временную и фазовую задержки сигналов для каждого массового расхода. Подпрограмма 3 на основе расчетных данных вычисляет параметры ошибок, погрешностей и формирует пользовательские графики.
- Использование разработанного программного комплекса позволило упростить взаимодействие с расчетной моделью в процессе анализа и исследования динамики



потоков жидкости в расходомерной трубке, а также автоматизировать алгоритмы обработки и визуализации данных. Применение программного комплекса при проведении серий вычислительных экспериментов снижает временные затраты на обработку полученных результатов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан программный комплекс, позволяющий проводить вычислительные эксперименты в области численного моделирования системы «расходомерная трубка-жидкость» кориолисова расходомера. Программный комплекс обеспечил автоматизацию алгоритмов обработки и визуализации данных, что значительно упростило процесс анализа результатов численного моделирования и позволило сосредоточиться на интерпретации данных и выявлении закономерностей.

Согласно разработанной структуре требований были реализованы основные функциональные требования в виде подпрограмм комплекса. Программный комплекс обладает простым и понятным интерфейсом, что относится к нефункциональному требованию «удобство использования». Разработанная архитектура программного комплекса позволяет вносить быстрые изменения в его компоненты для улучшения работы и добавления новых функций и дальнейшего развития, что соответствует требованиям масштабируемости и гибкости. Требование «Надежность и производительность» реализовано на основе эффективных численных методов и алгоритмов проведения вычислительных экспериментов.

Разработанный программный 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. Планируемое усовершенствование программного комплекса будет направлено на реализацию новых алгоритмов интерполяции данных с использованием полиномиальных функций, а также на добавление средств обработки данных для работы с зашумленными сигналами.

Литература

1. 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
2. ISO 10790:2015. Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements).
3. Юрманов В.А., Гудков К.В. Анализ некоторых погрешностей кориолисовых расходомеров // Современные информационные технологии. 2006. № 4. С. 48–50.
4. Гудкова Е.А. Таранцева К.Р., Михеев М.Ю. Анализ критериев, влияющих на точность измерения массового расхода жидкости // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 2(58). С. 49–54. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0008
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. Т. 11. № 3(59). С. 57–63. DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0009
6. *Брежнев Р.В.* Методы и средства проектирования информационных систем и технологий: учебное пособие, 2021. 216 с. – Текст: непосредственный: электронный.
 7. *Бубнов А.А., Бубнов С.А., Майков К.А.* Разработка и анализ требований к программному обеспечению: учебник / Бубнов А.А., Бубнов С.А., Майков К.А. – М: КУРС, 2022. – 176 с.
 8. *Коберн А.* Современные методы описания функциональных требований. – М.: Изд-во «Лори», 2002. – 264 с.
 9. *Patton J., Economy P.* User story mapping: discover the whole story, build the right product. – O'Reilly Media, Inc., 2014. – 200 с.
 10. Documenting non-functional requirements using FURPS+ [Электронный ресурс] // URL: https://www.marcinziemek.com/blog/content/articles/8/article_en.html (дата обращения 10.11.2023).
 11. COMSOL – Software for Multiphysics Simulation [Электронный ресурс] // URL: <https://www.comsol.com> (дата обращения 10.11.2023).
 12. *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. – ISBN 978-5-97060-425-0. URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/364374/reading> (дата обращения: 10.11.2023).
 13. MATLAB [Электронный ресурс]. URL: <https://ww2.mathworks.cn/en/products/matlab.html> (дата обращения 10.11.2023).



Analysis and Documentation of Requirements for the Software Package for Conducting Computational Experiments and Numerical Investigation “Flow Tube – Liquid” System of a Coriolis Flow Meter

Ekaterina A. Gudkova *

Penza State Technological University (PSTU), Penza, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2197-6419>

e-mail: gudkova-penza@yandex.ru

Item. This article describes the stages of development of a software package designed to conduct a series of computational experiments on numerical modeling of the “flow tube – liquid” system of a Coriolis flow meter and automation of algorithms for subsequent data processing and visualization. Methods. The structure of requirements for the software package was developed based on the Software Requirements Specification template adopted in the Rational Unified Process software development methodology, in accordance with the classification of requirements for FURPS+ software systems. Python 3 and the interpreted programming language of the MATLAB environment were used to develop the complex routines. Results. A structure of requirements for the software package has been developed, including functional and non-functional requirements. A software package consisting of three subprograms has been developed, its structure, main components and capabilities are described, and examples of use are demonstrated. Conclusions. The software package solves the problems of automating modeling algorithms, processing and visualizing data obtained as a result of experiments. It can be used in engineering and scientific research related to the analysis of the performance of Coriolis flow meters.

Keywords: software package, flow tube-liquid system, Coriolis flow meter, numerical modeling.

For citation:

Gudkova E.A. Analysis and Documentation of Requirements for the Software Package for Conducting Computational Experiments and Numerical Investigation “Flow Tube – Liquid” System of a Coriolis Flow Meter. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2024. Vol. 14, no. 2, pp. 140–151. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2024140209> (In Russ., abstr. in Engl.).

***Ekaterina A. Gudkova**, postgraduate student, Senior lecturer of the Department of Information Technologies and Systems, Penza State Technological University (PSTU), Penza, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2197-6419>, e-mail: gudkova-penza@yandex.ru

References

1. 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
2. ISO 10790:2015. Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters (mass flow, density and volume flow measurements).
3. Yurmanov V. A., Gudkov K.V. Analysis of some errors of Coriolis flow meters // *Modern information technologies*, 2006, no. 4, pp. 48–50. (In Russ.).
4. Gudkova E.A. Tarantseva K.R., Mikheev M.Yu. Analysis of criteria affecting the accuracy of measuring liquid mass flow // *XXI century: results of the past and problems of the present plus*, 2022. Vol. 11, no. 2(58), pp. 49–54. DOI: 10.46548/21vek-2022-1158-0008. (In Russ.).
5. 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 flow meters // *XXI century: results of the past and problems of the present plus*, 2022. Vol. 11, no. 3(59), pp. 57–63. DOI: 10.46548/21vek-2022-1159-0009. (In Russ.).
6. Brezhnev R.V. Methods and means of designing information systems and technologies: textbook, 2021. 216 p. – Text: direct: electronic. (In Russ.).
7. Bubnov A.A., Bubnov S.A., Maikov K.A. Development and analysis of software requirements: textbook / Bubnov A.A., Bubnov S.A., Maykov K.A. – M: KURS, 2022. – 176 p. (In Russ.).
8. Coburn A. Modern methods for describing functional requirements. – M.: Publishing house “Lori”, 2002. – 264 p. (In Russ.).
9. Patton J., Economy P. User story mapping: discover the whole story, build the right product. – O’Reilly Media, Inc., 2014. – 200 p.
10. Documenting non-functional requirements using FURPS+ // Available at: https://www.marcinziemek.com/blog/content/articles/8/article_en.html (Accessed 10.11.2023).
11. COMSOL – Software for Multiphysics Simulation // Available at: <https://www.comsol.com> (Accessed 10.11.2023).
12. Fedorova N.N. Osnovy raboty v ANSYS 17 [Basics of work in ANSYS 17]/N.N. Fedorova, S.A. Valger, M.N. Danilov, Yu.V. Zakharova. – Moscow: DMK Press, 2017. – 210 p. – ISBN 978-5-97060-425-0. Available at: <https://ibooks.ru/bookshelf/364374/reading> (Accessed 10.11.2023). (In Russ.).
13. MATLAB. Available at: <https://ww2.mathworks.cn/en/products/matlab.html> (Accessed 10.11.2023).

Получена 14.03.2024

Принята в печать 29.03.2024

Received 14.03.2024

Accepted 29.03.2024