

УДК 519.6, 621.039

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.28.1.018](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.28.1.018)

## Моделирование и анализ процессов смешения неизотермических потоков в энергетических установках

А.А. Сатаев<sup>1</sup>, М.А. Игонин<sup>2</sup>, К.В. Шарафетдинова<sup>3</sup>, С.А. Чесноков<sup>4</sup>,  
В.В. Андреев<sup>5</sup>

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.  
Алексеева»,*

*Нижний Новгород, Российская Федерация*

**Резюме:** Использование современных программ вычислительной гидродинамики (CFD) для задач анализа и обоснования отдельных элементов оборудования и режимов эксплуатации реакторных установок является чрезвычайно перспективным. С помощью данных вычислительных комплексов можно вести анализ условий эксплуатации элементов оборудования реакторных установок, работающих в условиях значительных термоциклических колебаний, анализ показаний элементов комплексной системы управления техническими средствами с целью оптимизации алгоритмов и режимов работы. Также не менее важной задачей является анализ температурного поля на входе в активную зону при несимметричных режимах работы реакторной установки. Для внедрения этих комплексов в практическое использование необходимо создание экспериментальной базы для верификации этих программ. В связи с тем, что проведение экспериментов близких по параметрам к реальным реакторным установкам, работающим при колоссальных давлениях связано со значительными экономическими затратами, большинство явлений, происходящих в рассматриваемых системах, с достаточной степенью представительности могут быть исследованы на мелкомасштабных моделях, работающих на воде, при давлениях близких к атмосферному или давлениях до 1 МПа. В рамках данной работы было проведено расчетное исследование процессов смешения неизотермических потоков в одной петле модели судовой ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с использованием программных комплексов COMSOL Multyphysics и Solid Works Flow simulation, а также проведена верификация результатов на исследовательском стенде «Однопетлевая модель ЯЭУ». В результате проделанной работы было получено распределение температур в характерных областях однопетлевой модели смешения (кольцевой зазор, нижняя камера, дырчатый лист, имитатор активной зоны), а также эмпирическая зависимость с достаточной степенью точности описывающая процессы смешения. В дальнейшем эмпирическая модель будет дальше уточняться, с целью создания универсальной зависимости высокой точности для прогнозирования процессов смешения.

**Ключевые слова:** смешение неизотермических потоков, CFD моделирование, температурное поле, верификация, однопетлевая модель.

**Для цитирования:** Сатаев А.А., Игонин М.А., Шарафетдинова К.В., Чесноков С.А., Андреев В.В. Моделирование и анализ процессов смешения неизотермических потоков в энергетических установках. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2020;8(1). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SataevSoavtori\\_1\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SataevSoavtori_1_20_1.pdf)  
DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.018

## Modeling and analysis of mixing processes of nonisothermal flows in power plants

A.A. Sataev, M.A. Igonin, K.V. Sharafetdinova, S.A. Chesnokov,  
V.V. Andreev

*Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod,  
Russian Federation*

**Abstract:** The use of modern computational fluid dynamics (CFD) programs for the analysis and justification of individual elements of equipment and operating modes of reactor plants is extremely promising. With the help of these computer systems, it is possible to analyze the operating conditions of elements of the equipment of reactor plants operating under significant thermocycler fluctuations, and to analyze the readings of elements of the complex control system for technical means in order to optimize algorithms and operating modes. Also, an equally important task is to analyze the temperature field at the entrance to the core under asymmetric operating conditions of the reactor plant. To implement these systems in practical use, it is necessary to create an experimental base for verification of these programs. Due to the fact that conducting experiments close in parameters to real reactor plants operating at enormous pressures is associated with significant economic costs, most of the phenomena occurring in the systems under consideration can be studied with a sufficient degree of representativeness on small-scale models operating on water at pressures close to atmospheric or pressures up to 1 MPa. As part of this work, a computational study of mixing processes of non-isothermal flows in a single loop of the ship's nuclear power plant model (NPP) was carried out using COMSOL Multiphysics and Solid Works Flow simulation software systems, and the results were verified at the research stand "Single-Loop NPP model". As a result of this work, the temperature distribution was obtained in the characteristic regions of the single-loop mixing model (ring gap, lower chamber, hole sheet, core simulator), as well as an empirical dependence describing the mixing processes with a sufficient degree of accuracy. In the future, the empirical model will be further refined in order to create universal high-accuracy dependence for predicting mixing processes.

**Keywords:** non-isothermal flow mixing, CFD modeling, temperature field, verification, single-loop model.

**For citation:** Sataev A.A., Igonin M.A., Sharafetdinova K.V., Chesnokov S.A., Andreev V.V. Modeling and analysis of mixing processes of nonisothermal flows in power plants. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(1). Available from: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SataevSoavtori\\_1\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/02/SataevSoavtori_1_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.28.1.018 (In Russ).

### Введение

Прогресс в развитии компьютерных, а особенно суперкомпьютерных вычислений позволил вести исследования процессов тепло- и массообмена с использованием современных расчетных кодов. Эти технологии поднимают инженерное проектирование на новый уровень. Если раньше на заключительном этапе проектирования получали лишь рабочую документацию, то теперь помимо ее, возможно, получение цифрового двойника сложного инженерного объекта, к которому, без сомнения, относится реакторная установка [1].

Использование современных программ вычислительной гидродинамики (CFD) [2] для задач анализа и обоснования отдельных элементов оборудования и режимов эксплуатации реакторных установок является чрезвычайно перспективным. Основными направлениями использования CFD программ являются:

1. анализ условий эксплуатации элементов оборудования, функционирующих в условиях термоциклических нагрузок, больших температурных градиентов, обусловленных режимами течения неизоэтермических потоков (таких как естественная конвекция, стратификация, смешение);
2. анализ показаний датчиков комплексной системы управления техническими средствами с целью оптимизации алгоритмов работы;
3. анализ и прогнозирование поведения температурного поля на входе в активную зону при режимах работы РУ с отключением циркуляции по одной или нескольким петлям (несимметричный режим работы).

В Европе внедрение CFD программ для указанных выше задач координируется CSNI (Committee on the Safety of Nuclear Installations) и OECD/NEA (Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency). С этой целью создано 3 рабочие группы подготовили предложения по наиболее перспективным направлениям использования CFD программ в атомной энергетике и направлениям необходимой адаптации этих программ. Эксперты рабочих групп отметили, что использование CFD в атомной энергетике актуально для описания перечисленных выше процессов в неизоэтермических потоках, особенно в условиях пульсаций температур [3].

Для повсеместного внедрения CFD программ в расчетную практику необходимо создание экспериментальной базы. На сегодняшний день имеется обширная экспериментальная база для расчета изотермических течений в авиационной, автомобильной и аэрокосмической промышленности. Формирование такой представительной базы данных стало возможным благодаря современным измерительным системам, способным измерять целые поля параметров (тепловизионная, а также высокоскоростная съемка, лазерные методы (PIV, LDV, PLIF), прецизионные датчики температур и концентраций).

Актуальность численного моделирования потоковых процессов с использованием CFD программ является особенностью атомной энергетике. Процессы смешения неизоэтермических потоков существенно определяют параметры теплоносителя на входе в активную зону в режимах с неполным составом работающего оборудования и, как следствие, - теплотехническое состояние активной зоны. Кроме того, чрезвычайно актуальной является задача исследования температурных пульсаций, сопровождающих практически все режимы течений неизоэтермических потоков, так как эти пульсации приводят к дополнительным термоциклическим нагрузкам на элементы оборудования и во многих случаях определяют его ресурс.

В связи с тем, что проведение экспериментов близких по параметрам к реальным РУ, работающим при больших давлениях связано со значительными экономическими затратами, большинство явлений, происходящих в рассматриваемых системах, с достаточной степенью представительности могут быть исследованы на мелкомасштабных моделях (что отмечено в работе [4]), работающих на воде, при давлениях близких к атмосферному или давлениях до 1 МПа.

Однако, одним из основных вопросов, возникающих при проведении таких экспериментальных исследований на уменьшенных моделях с водой является возможность переноса результатов [5] с модели на реальную РУ.

### **Материалы и методы**

В рамках данной работы было проведено расчетное, а также экспериментальное исследование процессов смешения неизоэтермических потоков в одной петле модели судовой ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с использованием программных

комплексов COMSOL Multyphysics и Solid Works Flowsimulation, а также проведена верификация результатов на исследовательском стенде «Однопетлевая модель ЯЭУ».

Выбор данных программных комплексов обоснован наличием хорошего пользовательского интерфейса, 3D редактора, пробной версии/академической лицензии, распространенностью на многих предприятиях России и за рубежом. COMSOL Multyphysics и Solid Works Flowsimulation используют для инженерного анализа метод конечных элементов, в основе которого лежит дискретизация объекта и дальнейшее решение системы уравнений механики сплошных сред (уравнения движения, уравнения сохранения энергии, уравнения неразрывности, уравнения состояния, начальных и граничных условий) в пределах каждой из элементарных областей.

SolidWorks Flow Simulation — это специализированный модуль для моделирования потоков жидкости и газа, теплообмена, интегрированный в пакет SolidWorks 3D CAD [6]. Он поддерживает моделирование сверхзвуковых и низкоскоростных потоков, обеспечивая параллельное проектирование.

Прежде чем приступить к инженерному анализу была построена 3D модель одной петли судовой ЯЭУ. Затем в дереве проекта задаются параметры расчета: подобласти течения (вся внутренняя геометрия, где происходит смешение потоков, задаются ее начальные условия), а также граничные условия (в данной работе приводятся результаты (Рисунок 2,3): при скорости на входе в модель – 0.15 м/с и температурных параметрах потока – 60 °С). Эти результаты являются наиболее интересными с точки зрения интерпретации, так как скорость потока близка к скорости естественной циркуляций (ЕЦ). Исследования проводились при температурах впрыскиваемых сред от 15-80 °С и давлении 1 атм.

Программный комплекс Comsol Multyphysics представляет собой универсальную и высокопроизводительную среду, предназначенную для моделирования физических процессов. Работа в данной программе осуществляется использованием шаблонов, настраиваемых пользователем, с помощью которых, возможно, смоделировать любую комбинацию взаимосвязанных полей физических величин [7].

В рамках данной работы в Comsol Multyphysics, используя модуль «Вычислительная гидродинамика», был выполнен расчет однопетлевой модели реакторной установки. Comsol Multyphysics отличается от SolidWorks Flow Simulation введением специального модуля для расчета неизотермических потоков.

В данный модуль включены специальные физические интерфейсы для моделирования сопряженной теплопередачи в жидкости и твердых телах. Система уравнений для поля течения задаются и решаются в области, занимаемой средой (жидкость/газ), а уравнение энергии — сквозным счетом по всей расчетной области.

Для низкорейнольдсовых моделей турбулентности (в данном случае имеется в виду пристенная область, где присутствует вязкий подслой) и ламинарных течений используется условие непрерывности температуры на границе раздела «твердое тело» - «жидкость».

Для моделирования турбулентной сопряженной теплопередачи на основе моделей турбулентности с пристеночными функциями Nonisothermal Flow (Неизотермический поток) пристеночные функции для температуры задаются автоматически. Благодаря использованию низкорейнольдсовых моделей в сочетании с пристеночными функциями уменьшается трудоемкость постановки и решения задачи сопряженного теплообмена при турбулентном течении жидкости.

В обоих пакетах было выбрано примерно одинаковое разбиение модели на элементарные ячейки (у Comsol- 310847 конечных элементов, у SolidWorks-280648 конечных элементов)

Для верификации полученных расчетных полей была изготовлена мелкомасштабная экспериментальная модель. Она представляет из себя одну из четырех циркуляционных петель. В качестве прототипа, выбранного для моделирования была принята ЯЭУ КЛТ-40 [8] (судовая ЯЭУ, установленная на плавучую АЭС (ПАТЭС «Академик Ломоносов»), а также ледоколы «Таймыр» и «Вайгач», лихтеровоз «Севморпуть»).

Под циркуляционной петлей в данной работе понимается гидравлический тракт от входа в модель (входной патрубков), опускной участок, кольцевой зазор, напорный коллектор, имитатор активной зоны (выполнен в виде гидравлического сопротивления – дырчатый лист (масштаб 1:5)), выходной патрубков.

Экспериментальная часть работы, а также монтаж модели были проведены в лаборатории «Лабораторный комплекс экспериментальных теплофизических стендов» кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки».

В качестве основного метода исследования было применено изучение полей распределения температуры в характерных областях смешения. Это достигается путем построения послойной картины распределения температуры, что осуществляется за счет изменения вертикальной координаты датчиков, расположенных на пути смешения потоков [9], [10].

Для получения 3D-поля распределения температуры чувствительные температурные элементы (термодатчики) устанавливались определенным образом и составляют матрицу датчиков. Для приема данных и их дальнейшей обработки на ПЭВМ была скомпилирована быстродействующая программа по опросу термодатчиков. Микроконтроллером обрабатывается за 1 секунду 8 датчиков. Схема работы показана на Рисунке 1.

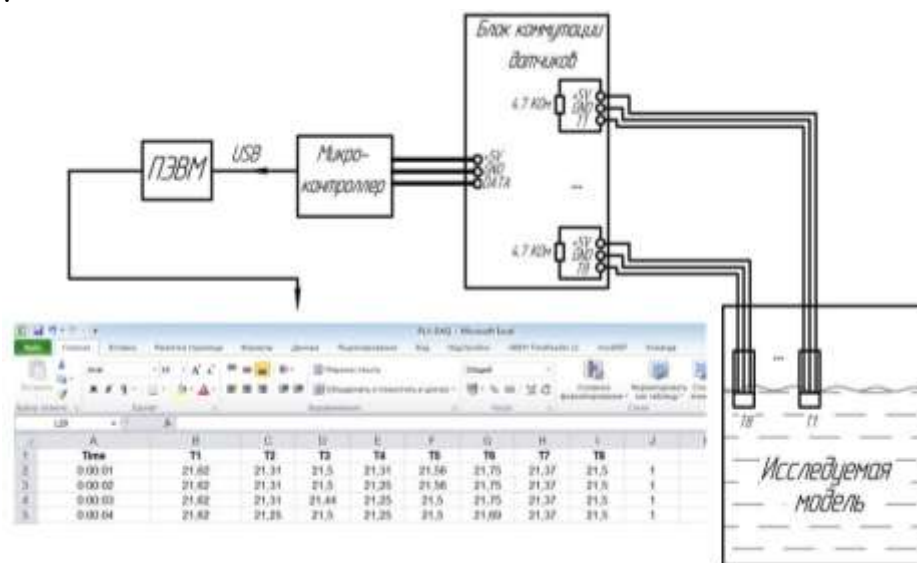


Рисунок 1 – Схема работы модуля обработки экспериментальных данных  
 Figure 1 - The operation scheme of the experimental data processing module

### Результаты

На Рисунках 2, 3 показана графическая визуализация течений при смешении неизотермических потоков, выполненное в программных комплексах COMSOL Multyphysics и Solid Works Flowsimulation. Справа показано соответствие температурной шкалы цветовому градиенту.

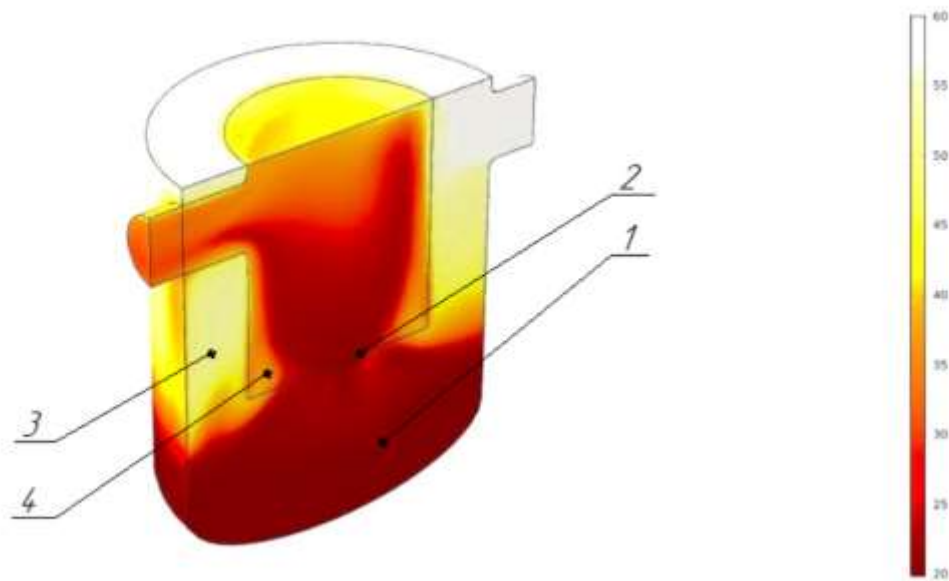


Рисунок 2 – Температурное поле в сечении модели, выполненной в программном комплексе COMSOL Multiphysics (1- нижняя камера, 2- дырчатый лист, 3- кольцевой зазор, 4- имитатор активной зоны)

Figure 2 – Temperature field in the cross section of the model made in the COMSOL Multiphysics software package (1-lower chamber, 2 - hole sheet, 3-ring gap, 4- core simulator)

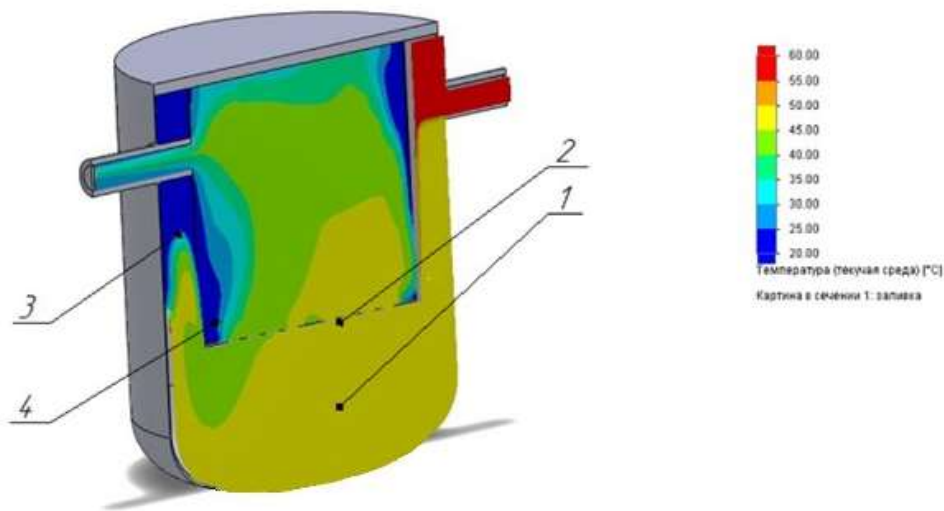


Рисунок 3 – Температурное поле в сечении модели, выполненной в программном комплексе Solid Works Flowsimulation (1- нижняя камера, 2- дырчатый лист, 3- кольцевой зазор, 4- имитатор активной зоны)

Figure 3 – Temperature field in the cross section of the model made in the SolidWorks Flow simulation software package (1-lower chamber, 2 - hole sheet, 3-ring gap, 4- core simulator)

На Рисунке 4 показан сравнительный график изменения температуры датчика (Т1- центральный канал) от абсолютного времени эксперимента (проливки). Времени 0-5 секунд соответствует транспорту потока до дырчатого листа; 5-16 секунд время переходного процесса (смешение) (Рисунок 5), происходящее уже внутри имитатора активной зоны.

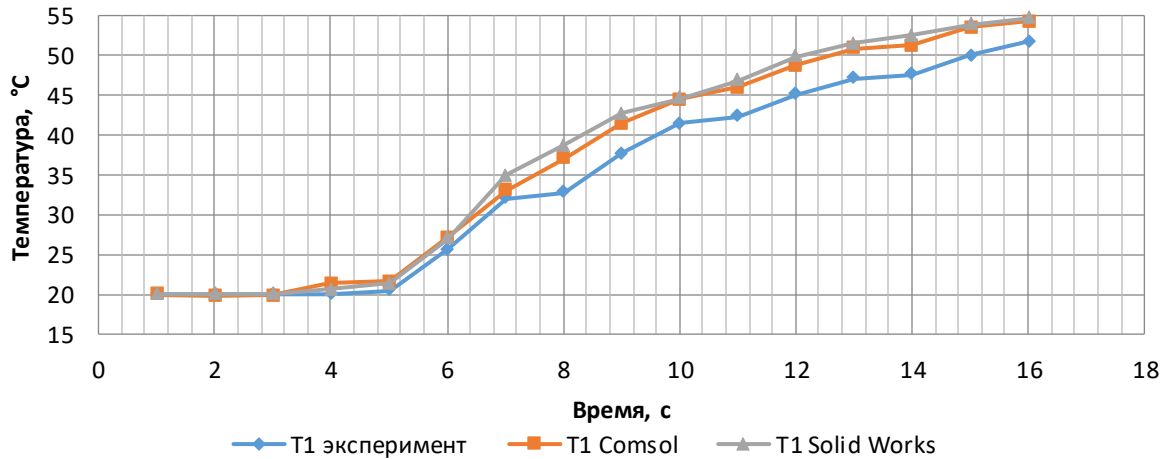


Рисунок 4 – График зависимости температуры от времени для центрального канала (T1)  
Figure 4 - Graph of temperature versus time for the central channel (T1)

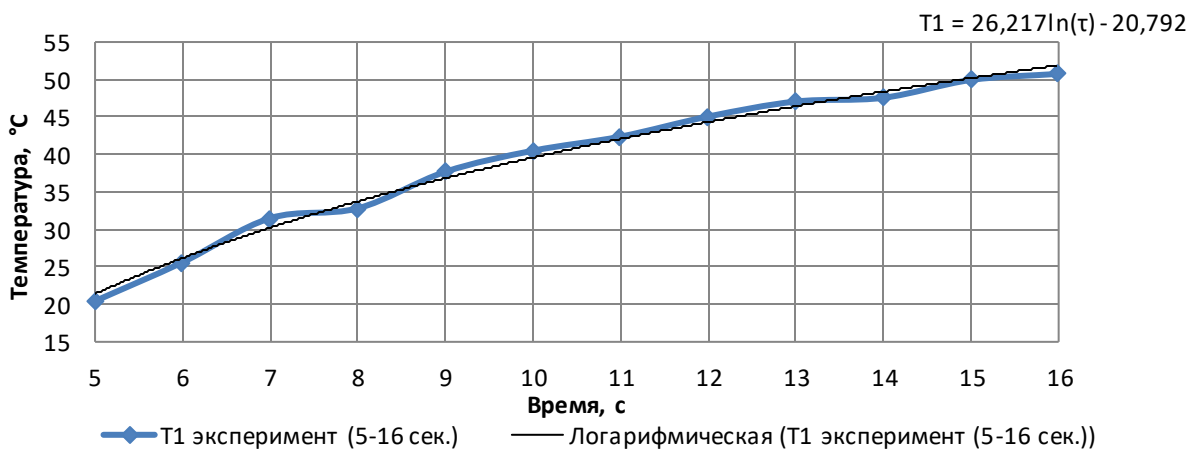


Рисунок 5 – График зависимости температуры от времени для центрального канала (T1) с графиком аппроксимирующей кривой  
Figure 5 - Graph of temperature versus time for the central channel (T1) with a graph of the approximating curve

### Обсуждение

Если интерпретировать результаты, полученные в программном комплексе COMSOL Multyphysics то можно заметить характерную неизотермичность течения. Поток, попадая через патрубок, опускается вниз, затем проходя дырчатый лист, большей частью концентрируясь на периферии (градиент температуры достигает  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В программном комплексе Solid Works Flowsimulation наблюдается иная картина – в периферийной области образуется область застоя. Однако градиент температур меньше (порядка  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Переходный процесс (смещения) в эксперименте хорошо аппроксимируется логарифмической функцией вида:

$$T1 = a \ln(\tau) - b \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические коэффициенты, вычисляемые из эксперимента.

## Заключение

В результате проделанной работы было получено распределение температур в характерных областях однопетлевой модели смешения (кольцевой зазор, нижняя камера, дырчатый лист, имитатор активной зоны). Для этого были использованы программные комплексы COMSOL Multyphysics и Solid Works Flowsimulation, а также проведена верификация этих результатов на стенде. Максимальное отклонение, полученное в программных комплексах COMSOL Multyphysics и Solid Works Flowsimulation от экспериментальных значений, составляет порядка 11 %. Максимальное отклонение значений, вычисленных с помощью аппроксимирующей логарифмической функции от экспериментальных значений, составляет порядка 4,7 %.

Анализируя полученные результаты, можно сказать, что они хорошо согласуются в рамках данной простой геометрии. В дальнейшем эмпирическая модель будет уточняться, с целью создания универсальной зависимости высокой точности для прогнозирования процессов смешения для различных режимов и более сложных геометрий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рябов А.А., Скибин А.П., Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В. Создание цифрового двойника АЭС на основе вычислительной теплогидравлики. *CAD/cam/cae Observer*. 2018;7(123):41-45.
2. Белова, О.В., Волков В.Ю., Скибин А.П., Николаева А.В., Крутиков А.А., Чернышев А.В. Методологические основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем. *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013;(5):1-13.
3. Большухин М.А., Будников А.В., Фомичев В.И., Свешников Д.Н., Романов Р.И. Актуальные вопросы развития экспериментальной базы данных для верификации CFD программ при их использовании в атомной энергетике. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. 2013;2(99):117-125.
4. Krapivtsev V.G., Solonin V.I. Model Studies of Interloop Coolant Mixing in VVER-1000 in-Reactor Pressure Channel. *Atomic Energy*. 2019;5(125):307-313.
5. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа; 1973.
6. Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб.: БХВ-Петербург; 2005.
7. Коваленко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2. СПб.: Лань; 2017.
8. Advances in small modular reactor technology developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). Austria: IAEA; 2018.
9. Сатаев А.А., Дунцев А.В., Воробьев Д.А., Красавин Н.А. Исследование процессов смешения неизотермических потоков на однопетлевой модели реакторной установки. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;(3):96-101. Доступно по: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36943> (дата обращения: 09.03.2020).
10. Сатаев А.А., Дунцев А.В. Исследование процессов смешения неизотермических потоков на модели судовой ядерной энергетической установки. *Вестник ИГЭУ*. 2018;(5):26-32. Доступно по: <http://vestnik.ispu.ru/ru/node/729> (дата обращения: 09.03.2020).



## REFERENCES

1. Ryabov A.A., Skibin A.P., Volkov V.Yu., Golibrodo L.A., Krutikov A.A., Kudryavtsev O.V. Sozdanie tsifrovogo dvoynika AEHS na osnove vychislitel'noi teplogidravliki. *CAD/cam/cae Observer*. 2018;7(123):41-45.
2. Belova, O.V., Volkov V.Yu., Skibin A.P., Nikolaeva A.V., Krutikov A.A., Chernyshev A.V. Metodologicheskie osnovy CFD-raschetov dlya podderzhki proektirovaniya pnevmogidravlicheskih sistem. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2013;(5):1-13.
3. Bol'shukhin M.A., Budnikov A.V., Fomichev V.I., Sveshnikov D.N., Romanov R.I. Aktual'nye voprosy razvitiya ehksperimental'noi bazy dannykh dlya verifikatsii CFD programm pri ikh ispol'zovanii v atomnoi ehnergetike. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*. 2013;2(99):117-125.
4. Krapivtsev V.G., Solonin V.I. Model Studies of Interloop Coolant Mixing in VVER-1000 in-Reactor Pressure Channel. *Atomic Energy*. 2019;5(125):307-313.
5. Gukhman A.A. Vvedenie v teoriyu podobiya. M.: Vysshaya shkola; 1973.
6. Alyamovskii A.A. i dr. SolidWorks. Komp'yuternoe modelirovanie v inzhenernoi praktike. SPb.: BKHV-Peterburg; 2005.
7. Kovalenko A.V. Matematicheskoe modelirovanie fiziko-khimicheskikh protsessov v srede Comsol Multiphysics 5.2. SPb.: Lan'; 2017.
8. Advances in small modular reactor technology developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). Austria: IAEA; 2018.
9. Sataev A.A., Duntsev A.V., Vorob'ev D.A., Krasavin N.A. Issledovanie protsessov smesheniya neizotermicheskikh potokov na odnopetlevoi modeli reaktornoj ustanovki. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2018;(3):96-101. Available at: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=36943> (accessed 09.03.2020).
10. Sataev A.A., Duntsev A.V. Issledovanie protsessov smesheniya neizotermicheskikh potokov na modeli sudovoi yadernoi ehnergeticheskoi ustanovki. *Vestnik IGEHU*. 2018;(5):26-32. Available at: <http://vestnik.ispu.ru/ru/node/729> (accessed 09.03.2020).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATIONS ABOUT AUTHORS

**Сатаев Александр Александрович**, аспирант, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация  
*e-mail*: [sancho\\_3685@mail.ru](mailto:sancho_3685@mail.ru)  
ORCID: [0000-0003-2294-9877](https://orcid.org/0000-0003-2294-9877)

**Aleksandr A. Sataev**, PhD Student, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Игонин Михаил Александрович**, магистрант, выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.  
*e-mail*: [igonin.mihail.97@gmail.com](mailto:igonin.mihail.97@gmail.com)  
ORCID: [0000-0002-6706-061X](https://orcid.org/0000-0002-6706-061X)

**Mikhail A. Igonin**, Master's Degree student, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation

**Шарафетдинова Ксения Владимировна**, магистрант, выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.

*e-mail:* [ksen.sharafetdinova@gmail.com](mailto:ksen.sharafetdinova@gmail.com)

ORCID: [0000-0003-3873-5611](https://orcid.org/0000-0003-3873-5611)

**Kseniya V. Sharafetdinova**, Master's Degree student, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Чесноков Сергей Андреевич**, студент, выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.

*e-mail:* [sergeychesand@gmail.com](mailto:sergeychesand@gmail.com)

ORCID: [0000-0003-0688-0291](https://orcid.org/0000-0003-0688-0291)

**Sergei A. Chesnokov**, Student, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

**Андреев Вячеслав Викторович**, д-р. техн. наук, доцент, зав. каф. «Ядерные реакторы и энергетические установки», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», Нижний Новгород, Российская Федерация.

*e-mail:* [vyach.andreev@mail.ru](mailto:vyach.andreev@mail.ru)

ORCID: [0000-0002-7557-352X](https://orcid.org/0000-0002-7557-352X)

**Vyacheslav V. Andreev**, Dr. Sci. (in Engineering), Associate Professor, head of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.