

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

---

---

УДК 621.039

### ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНЕЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИЛЫ НА СМЕШЕНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ

А.А. БЕРЕЗИН, А.А. САТАЕВ, О.В. ХВОЙНОВ, А.В. ДУНЦЕВ  
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: berezin.q@yandex.ru

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** На сегодняшний день одной из основных задач является повышение безопасности ядерных энергетических установок. Выявить возможные недостатки реакторной установки можно созданием моделей-прототипов, натуральных, либо масштабных, для проведения на них испытаний. Возникает острая потребность в создании моделей для более детального исследования некоторых сложных процессов (смешение потоков, тепломассообмен, смешения потоков под действием динамических сил). Так, например, негативное влияние этих процессов на реакторную установку приводит к сложности создания естественной циркуляции теплоносителя во всех режимах работы, что значительно повышает безопасность реакторной установки. На современных ядерных энергетических установках это не достигнуто и нивелируется большими коэффициентами запаса. Цель данной работы – оценка влияния внешних динамических сил на процессы смешения неизотермических потоков в имитаторе активной зоны применительно к исследовательскому стенду «Однопетлевая модель РУ».

**Материалы и методы.** Для исследовательского стенда была сконструирована качающаяся платформа, имитирующая внешние динамические силы. Основным методом получения экспериментальных данных – прямое послойное температурное зондирование. Построена простейшая одномерная математическая модель, описывающая данные процессы, основанная на втором законе Ньютона. Адекватность выбора модели подтверждается верификацией с экспериментом.

**Результаты.** Построены графики температурных фронтов для экспериментальной модели, а также графическая визуализация температурного поля теплоносителя на входе/выходе в модель для динамического режима. Получено математическое уравнение, описывающее влияние внешних динамических сил на длину пути смешения по Прандтлю для одномерного приближения.

**Выводы.** На основании анализа полученных результатов сделан вывод о том, что внешняя динамическая сила оказывает отрицательное влияние на смешение неизотермических потоков. Происходит изменение длины пути смешения в сравнении со стационарным режимом в среднем на 5–10 %, что при переносе на реальную ядерную энергетическую установку может существенно сказаться на естественной циркуляции теплоносителя и потребует учета при проектировании в виде поправочных коэффициентов.

**Ключевые слова:** реакторная установка, неизотермический поток, внешние динамические силы, математическая модель, путь смешения по Прандтлю

## ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL DYNAMIC FORCE ON THE MIXING OF NON-ISOTHERMAL FLOWS IN THE REACTOR PLANT

A.A. BEREZIN, A.A. SATAEV, O.V. KHVOYNOV, A.V. DUNCEV  
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,  
Nizhny Novgorod, Russian Federation  
E-mail: berezin.q@yandex.ru

### Abstract

**Background.** Today one of the main problems to be solved is increasing the safety of nuclear power plants (NPP). Possible shortcomings of the reactor plant (RP) can be identified by creating full-scale or large-scale prototype models for testing. There is an urgent need to create models for a more detailed study of some complex processes (flow mixing, heat and mass transfer and flow mixing under the action of dynamic forces). For example, the negative impact of these processes on the switchgear makes it difficult to ensure the natural circulation of the coolant (NCC) in all modes of operation, which could significantly increase the switchgear safety. At modern NPP this condition is not achieved either and the problem is solved by large safety factors. The purpose of this work is to evaluate the influence of external dynamic forces (EDF) on the processes of mixing of non-isothermal flows in the simulator of the core, applied to the research stand «Single-loop RP model».

**Materials and methods.** For the research stand we have designed a swinging platform simulating EDF. The main method for obtaining experimental data is direct layer-by-layer temperature sensing. We have also constructed a simple one-dimensional mathematical model describing these processes, based on Newton's Second Law. The adequacy of model selection has been confirmed experimentally.

**Results.** We have plotted graphs of temperature fronts for the experimental model and made a graphic representation of the coolant temperature field at the model entrance / exit for the dynamic mode. A mathematical equation has been obtained for describing the effect of EDF on the length of the Prandtl mixing path for the one-dimensional approximation.

**Conclusions.** Based on the analysis of the results obtained, we can conclude that the external dynamic force has a negative effect on the mixing of non-isothermal flows. They change the length of the mixing path in comparison with the stationary mode by an average of 5–10 %, which, when transferred to a real NPP, can significantly affect the NCC and will need to be taken into account in the form of correction factors at the design stage.

**Key words:** reactor plant, non-isothermal flow, mixing, external dynamic forces, mathematical model, Prandtl mixing path

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.5.005-011

**Введение.** Развитие атомного подводного и надводного флота, прогресс в области стационарной ядерной энергетики, создание перспективных объектов с ядерными энергоустановками невозможны без всестороннего анализа, комплексных испытаний и исследований готовых образцов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на наземных стендах-прототипах как при принятии решений о внедрении, так и в процессе их эксплуатации в составе объектов транспортной и стационарной энергетики.

Применительно к корабельным ЯЭУ предварительная стендовая обработка способствует повышению надежности и безопасности, увеличивая время эксплуатации корабля по прямому назначению. Также она может помочь в нахождении и устранении проблем на уже действующих

ЯЭУ, повышая их живучесть и безопасность.

На корабельную установку во время эксплуатации действуют внешние динамические силы (качка – переменное периодическое движение судна под действием волнения или других внешних сил), влияющие на все ее элементы, в том числе и ядерную энергетическую установку. Основное влияние качка в ЯЭУ оказывает на реактор и парогенератор, а также теплообменники смесительного типа, где происходит неизотермическое смешение потоков, что может негативно сказываться на режимах работы ЯЭУ. Современные тенденции безопасности ЯЭУ ведут к развитию автономных способов расхолаживания, естественной циркуляции (ЕЦ). Из-за сложности реализации данного процесса, зависящего от многочисленных факторов,

качка также оказывает на нее негативное влияние. В связи с этим необходимо оценить влияние внешней динамической силы на смешение неизотермических потоков.

Наиболее известной установкой, которая использовалась для исследования влияния внешних динамических сил, был испытательный стенд американских ученых S5G (рис. 1). Этот стенд состоял из реактора, закрепленного на специальных шарнирных опорах, которые могут имитировать килевую и бортовую качку. Обработка данных, полученных в экспериментах, показала, что при качке может возникнуть необходимость снижения мощности установки из-за перегрева отдельных узлов реактора.

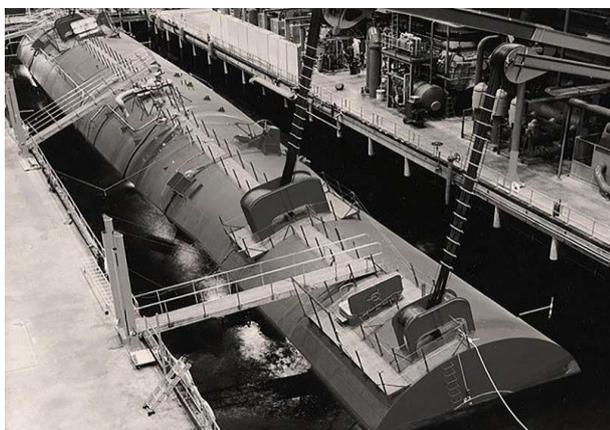


Рис. 1. Экспериментальный стенд S5G

Еще одним из стендов, изучающих поведение всей ЯЭУ при изменении положения в пространстве (крен), является российский стенд КВ-2, расположенный в НИТИ им. А.П. Александрова Сосновый Бор.

Одним из наиболее наглядных примеров влияния внешних динамических сил является немецкий атомный рудовоз «Отто Ган». На установленной на нем реакторной установке под влиянием качки амплитудой в 15° возникали периодические колебания мощности ± (3–5) %.

**Материалы и методы.** Для изучения воздействия качки на смешение неизотермических потоков в экспериментальной модели [3] была разработана и изготовлена качающаяся платформа (рис. 2). Она состоит из рамы, жестко закрепленной на силовой плите. Качающаяся платформа через вал и подшипники соединена с рамой. Электродвигатель через переходную муфту передает вращающее усилие на вал, который в свою очередь приводит в движение исследуемую модель на платформе.

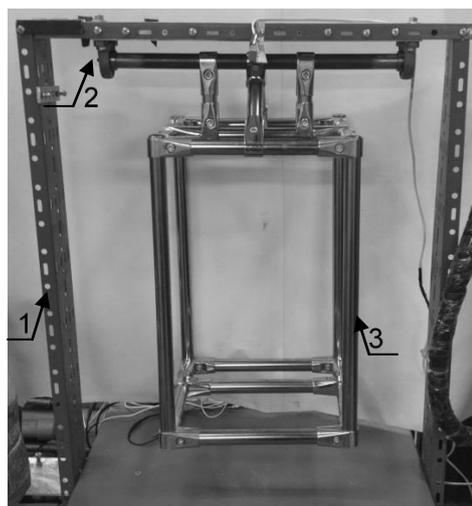


Рис. 2. Качающаяся платформа: 1 – несущая рама; 2 – подшипники; 3 – качающаяся рама

Модель может осуществлять колебания в заданной плоскости, подобно математическому маятнику, по закону

$$\varphi = \varphi_{\max} \sin\left(\frac{2\pi\tau}{T}\right), \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол;  $\varphi_{\max}$  – амплитуда колебаний, рад;  $T$  – период колебаний, с;  $\tau$  – текущее время, с.

Эксперимент происходил следующим образом: в экспериментальную модель, предварительно установленную на качающуюся платформу, заполненную «холодной водой» температурой 20 °С, подавалась «горячая вода» температурой 60 °С, одновременно с этим модель совершала гармонические колебания с амплитудой 35° и периодом 4 с.

Для снятия данных использовались температурные датчики (матрица датчиков), расположенные в горизонтальном сечении модели в количестве 17 шт. (рис. 3).

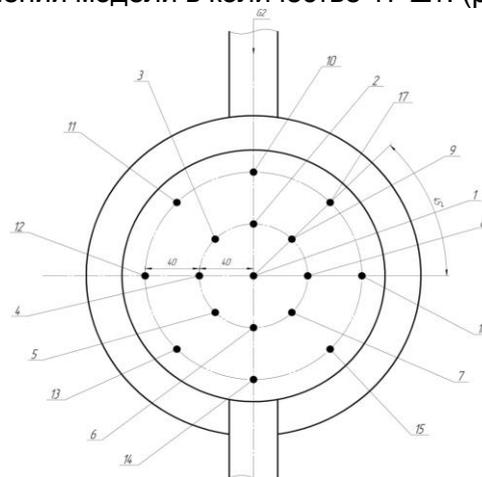


Рис. 3. Схема расположения датчиков (1–17) по сечению модели

Матрица датчиков имеет возможность совершать вертикальное перемещение с необходимым шагом. Таким образом находилось распределение температурного поля во всем исследуемом объеме модели.

**Математическая модель.** В качестве основного параметра для определения влияния внешней динамической силы был выбран путь смещения по Прандтлю.

Путь смещения по Прандтлю представляет собой расстояние, на которое турбулентный моль может переместиться в поперечном направлении, сохраняя свое избыточное (положительное и отрицательное) количество движения [4]:

$$\omega' = \varepsilon \frac{d\bar{\omega}}{dy}, \quad (2)$$

где  $\omega'$  – пульсация скорости;  $d\bar{\omega}$  – усредненная скорость, м/с;  $\varepsilon$  – путь смещения;  $y$  – координата, м.

За путь смещения по Прандтлю в нашем эксперименте принимаем расстояние, на котором впрыснутый моль станет неотличимым от среды, то есть когда его температура и температура объема жидкости уравниваются.

Для оценки и описания внешней динамической силы сделаем некоторые упрощения.

В общем случае судно имеет 6 степеней свободы, мы рассматриваем влияние одной из двух, либо бортовой, либо килевой качки в вертикальной плоскости.

Еще одним из упрощений нашей математической модели является отсутствие теплообмена моля жидкости и окружающей его среды, вызванного кондукцией (она в данной модели пренебрежимо мала). Теплопередача осуществляется только за счет конвекции, что значительно упрощает составление модели.

В общем случае на один моль элементарной жидкости действуют 4 силы:

- сила Архимеда

$$\partial F_{\text{д}} = -\frac{\partial P}{\partial y} \partial v; \quad (3)$$

- сила тяжести

$$\partial F_{\text{т}} = \rho g \partial v; \quad (4)$$

- сила движущегося напора

$$\partial F_{\text{движ}}; \quad (5)$$

- центробежная сила

$$\partial F_{\text{ц}} = \rho R \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \right)^2 \partial v, \quad (6)$$

где  $\partial P$  – изменение давления, Па;  $\partial v$  – изменение объема, м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $R$  – радиус, м;  $\partial \varphi$  – элемент угла, рад;  $\partial \tau$  – элементарное приращение времени, с.

Для этих сил записываем уравнение второго закона Ньютона и добавляем уравнение скорости. Получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \omega_y}{\partial \tau} \partial v = \rho g \partial v - \frac{\partial P}{\partial y} \partial v + \\ + \rho R \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} \right)^2 \partial v - \partial F_{\text{движ}}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\omega_y = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}. \quad (8)$$

Из нее мы находим длину пути смещения:

$$\varepsilon = A \tau^2 - B \cos\left(\frac{4\pi\tau}{T}\right) + \omega_0 \tau, \quad (9)$$

где

$$A = \frac{\partial F_{\text{движ}}}{2\rho \partial v} - \frac{g}{2} - \frac{R\pi^4}{72T^2} + \frac{\partial P}{2\rho \partial y}; \quad (10)$$

$$B = \frac{R\pi^2}{1152}. \quad (11)$$

Так как коэффициенты  $A$  и  $B$  находятся только для определенной модели, то определяем их из экспериментальных данных.

**Результаты.** На основании анализа экспериментальных данных и данных, полученных из математической модели, были построены графики зависимости длины смещения от времени вдоль вертикальной плоскости (рис. 4).

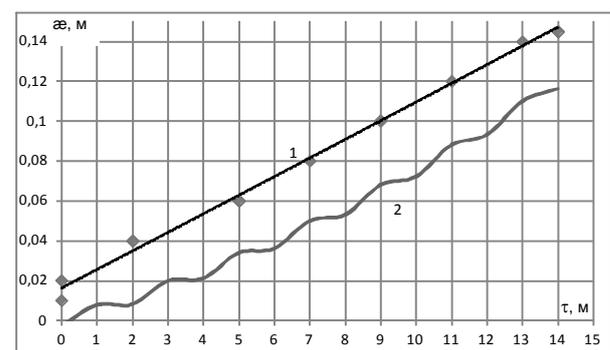


Рис. 4. Графики температурного фронта по оси потока (длины смещения от времени): 1 – экспериментальная модель; 2 – математическая модель

Анализ полученных графиков (рис. 4) показывает корреляцию эксперимента и математической модели. График 2 четко

показывает колебательную составляющую, влияющую на путь смещения.

Были проведены сравнения экспериментальных данных, полученных в стационарном и динамическом режимах (рис. 5).

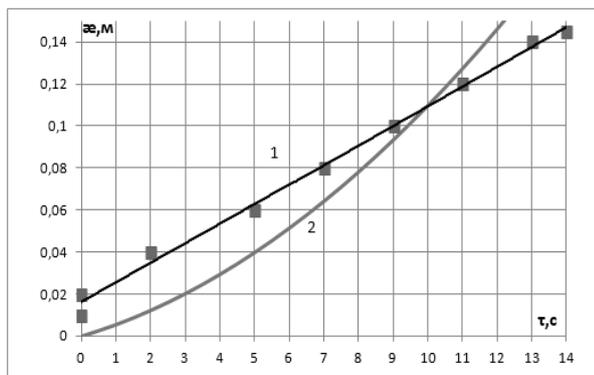


Рис. 5. Графики температурного фронта по оси потока (длины смещения от времени): 1 – экспериментальная модель с учетом внешней динамической силы; 2 – экспериментальная модель в стационарном режиме

Анализ графиков (рис. 5) показывает, что в начальный момент времени длина смещения в динамическом режиме возрастает быстрее, чем в стационарном режиме, это связано с наличием дополнительной силы (качки), сказывающейся на смешении потоков. К концу времени длина смещения в динамическом режиме выходит на уровень стационарного из-за уменьшения действия внешней динамической силы, так как

радиус колебания, а следовательно, и величина силы уменьшаются.

Была построена графическая визуализация потока по сечению модели в области входа в имитатор активной зоны и на его выходе и произведено сравнение с графической визуализацией в стационарном режиме для экспериментальной модели (рис. 6, 7). При сравнении визуализаций видно, как под действием внешней динамической силы центральное ядро потока (зоны застоя потока 2) изменяет свое положение от центра к периферии (зона застоя потока 1). Сравнивая визуализации потоков на выходе из активной зоны, можно заметить, что под влиянием качки поток все так же распространяется от центра к периферии (зона застоя потока 3), но уже эта граница становится менее заметна, так как влияние внешней динамической силы уменьшается с уменьшением радиуса.

**Выводы.** Основной целью нашего исследования являлось нахождение различий в процессах смешения неизотермических потоков в стационарном и динамическом режимах и их оценка. Эксперименты показали, что данное воздействие существенно влияет на смешение потоков. Происходит изменение длины пути смешения в сравнении со стационарным режимом в среднем на 5–10 %, что при переносе на реальную ЯЭУ может существенно отразиться на ее работе и требует учета при проектировании в виде поправочных коэффициентов.

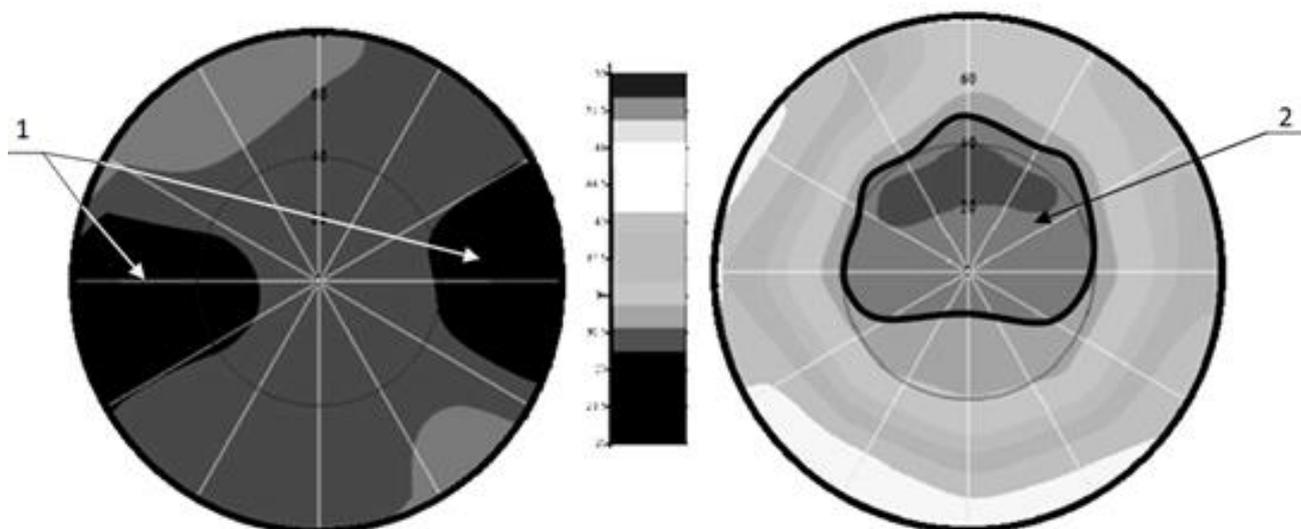


Рис. 6. Визуализация распределения температурного поля в области входа в имитатор активной зоны: слева – экспериментальная модель с учетом внешней динамической силы; справа – экспериментальная модель в стационарном режиме; 1, 2 – зоны застоя потока

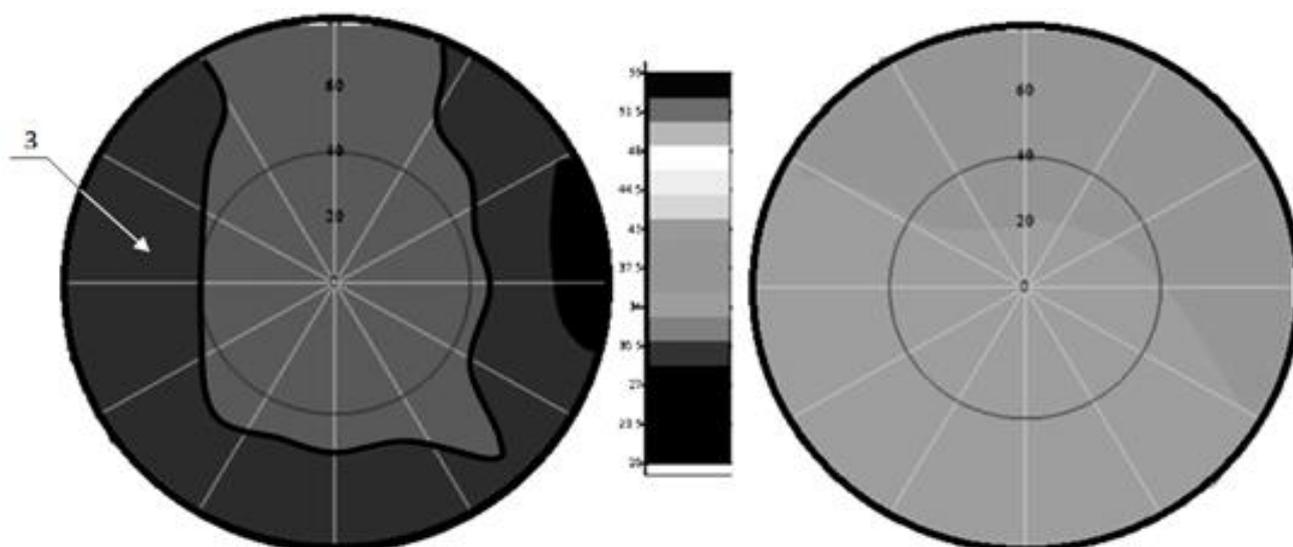


Рис. 7. Визуализация распределения температурного поля в области выхода из имитатора активной зоны: слева – экспериментальная модель с учетом внешней динамической силы; справа – экспериментальная модель в стационарном режиме; 3 – зона застоя потока

Это дает основание для дальнейшего, более детального изучения данного процесса – нахождения дополнительных математических коэффициентов для их использования при проектировании реальной реакторной установки.

Полученные результаты (модели, методы, расчетные алгоритмы для описания сложных процессов смешения неизотермических потоков) позволяют оптимизировать существующие проекты реакторных установок, обосновывать параметры безопасности.

#### Список литературы

1. **Кудинович И.В.** Обоснование ядерной и радиационной безопасности атомного судна при внешних воздействиях // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – 1(387). – С. 131–142.

2. **Результаты** исследований при эксплуатации наземных стендов-прототипов по обоснованию и повышению радиационной безопасности транспортных ЯЭУ / Н.Г. Андреев, В.Н. Вавилкин, С.П. Довбуш и др. // Технологии обеспечения жизненного цикла. – 2018. – № 4(14). – С. 20–29.

3. **Исследование** процессов смешения неизотермических потоков на однопетлевой модели реакторной установки / А.А. Сатаев, А.В. Дунцев, Д.А. Воробьев, Н.А. Красавин // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 3. – С. 96–101 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36943>

4. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. – 7-е изд. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

5. **Hohne T., Kliem S.** Coolant mixing studies of natural circulation flows at the ROCOM test facility using ANSYS ANSYS-CFX // CFD4NRS, Garching, Germany, Proceedings. – 2006. – P. 23.

6. **Благовещенский А.Я., Бор С.М., Митюков В.Н.** Корабельные ядерные энергетические технологии в решении проблем надежности, безопасности и живучести АЭС России // Научно-технический сборник «Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ». – Сосновый Бор: НИТИ им. А.П. Александрова, 2015. – С. 24–37.

7. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Гидродинамика. – 6-е изд. – М.: Физматлит, 2015. – 728 с.

8. **Внедрение** метода матричной кондуктометрии в исследование гидродинамических процессов течения теплоносителя в оборудовании ЯЭУ / А.А. Баринев, В.Е. Бородин, С.М. Дмитриев и др. // Труды НГТУ. – 2015. – № 1. – С. 139–145.

9. **Логинова С.С.** Исследование устойчивости контура естественной циркуляции теплоносителя // Вестник науки и образования. – 2017. – № 7(31). – С. 5–7.

#### References

1. Kudinovich, I. Obosnovanie yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti atomnogo sudna pri vneshnikh vozdeystviyakh [Nuclear and radiation safety justification for a nuclear-powered vessel under external effects]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2019, no. 1(387), pp. 131–142 (in Russian).

2. Andreev, N.G., Vavilkin, V.N., Dovbush, S.P., Baev, M.N., Il'in, V.G., Orlenkov, I.S., Sarancha, O.N., Chervyakov, R.V., Mitenkov, A.L. Rezul'taty issledovaniy pri ekspluatatsii nazemnykh stendov-prototipov po obosnovaniyu i povysheniyu radiatsionnoy bezopasnosti transportnykh YaEU [Results of the research into the operation of ground-based prototype stands for substantiating and improving the radiation safety of transport NPP]. *Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla*, 2018, no. 4(14), pp. 20–29.

3. Sataev, A.A., Duntsev, A.V., Vorob'ev, D.A., Krasavin, N.A. Issledovanie protsessov smesheniya neizotermicheskikh potokov na odnopetlevooy modeli reaktornoy ustanovki [A study of mixing processes of non-isothermal flows on a single-loop reactor plant model]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2018, no. 3, pp. 96–101. Available at: <http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=36943>

4. Loytsyanskiy, L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Drofa, 2003. 840 p.

5. Hohne, T., Kliem, S. Cooling mixing facility at the ROCOM test facility using ANSYS ANSYS-CFX. CFD4NRS, Garching, Germany, Proceedings, 2006, p. 23.

6. Blagoveshchenskiy, A.Ya., Bor, S.M., Mityukov, V.N. Korabel'nye yadernye energetich-

eskie tekhnologii v reshenii problem nadezhnosti, bezopasnosti i zhivuchesti AES Rossii [Shipborne nuclear energy technologies in solving problems of reliability, safety and survivability of nuclear power plants in Russia]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik «Tekhnologii obespecheniya zhiznennogo tsikla YaEU»* [Scientific and technical collection «Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants»]. Sosnovyy Bor: NITI im. A.P. Aleksandrova, 2015, pp. 24–37.

7. Landau, L.D., Lifshits, E.M. *Gidrodinamika* [Hydrodynamics]. Moscow: Fizmatlit, 2015. 728 p.

8. Barinov, A.A., Borodina, V.E., Dmitriev, S.M., Ignatov, E.D., Tabekin, A.A., Khrobostov, A.E. Vnedrenie metoda matrichnoy konduktometrii v issledovanie gidrodinamicheskikh protsessov techeniya teplonositelya v oborudovanii YaEU [Implementation of the method of matrix conductometry in the study of coolant flow hydrodynamic processes in the nuclear power plant equipment]. *Trudy NGTU*, 2015, no. 1, pp. 139–145.

9. Loginova, S.S. Issledovanie ustoychivosti kontura estestvennoy tsirkulyatsii teplonositelya [Investigation of the stability of the coolant natural circulation circuit]. *Vestnik nauki i obrazovaniya*, 2017, no. 7(31), pp. 5–7.

---

*Сатаев Александр Александрович,*

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», аспирант, инженер кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, телефон (831) 436-80-29, e-mail: [sancho\\_3685@mail.ru](mailto:sancho_3685@mail.ru)

*SatayevAleksandrAleksandrovich,*

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Post-graduate student, Engineer of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants, telephone (831) 436-80-29, e-mail: [sancho\\_3685@mail.ru](mailto:sancho_3685@mail.ru)

*Березин Артем Андреевич,*

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», студент кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, телефон (831) 436-80-29, e-mail: [berezin.q@yandex.ru](mailto:berezin.q@yandex.ru)

*BerezinArtemAndreyevich,*

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Student of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants, telephone (831) 436-80-29, e-mail: [berezin.q@yandex.ru](mailto:berezin.q@yandex.ru)

*Хвойнов Олег Васильевич,*

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», студент кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, телефон (831) 436-80-29, e-mail: [okhvoinov@bk.ru](mailto:okhvoinov@bk.ru)

*Khvoinov Oleg Vasilyevich,*

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Student of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants, telephone (831) 436-80-29, e-mail: [okhvoinov@bk.ru](mailto:okhvoinov@bk.ru)

*Дунцев Андрей Всеволодович,*

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», кандидат технических наук, доцент кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, телефон (831) 436-80-29, e-mail: [udav@ntu.ru](mailto:udav@ntu.ru)

*Duntsev Andrei Vsevolodovich,*

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants, telephone (831) 436-80-29, e-mail: [udav@ntu.ru](mailto:udav@ntu.ru)