

УДК 621.039

## Исследование процессов смешения неизотермических потоков на модели судовой ядерной энергетической установки

А.А. Сатаев, А.В. Дунцев  
ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»,  
г. Нижний Новгород, Российская Федерация  
E-mail: sancho\_3685@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** На сегодняшний день исследование процессов смешения потоков водяного теплоносителя является актуальной задачей для ядерной энергетики. Ведущие научные группы на экспериментальных установках ROCOM (Германия), Vattenfall (США), Fortum PTS (Финляндия), ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Россия) занимаются исследованием этих процессов. Интерес к этим исследованиям связан с появлением новых расчетных кодов, которые позволяют моделировать эти процессы, однако они нуждаются в верификации. В связи с этим актуальными являются исследования процессов смешения применительно к модели (одной петле) реакторной установки, а также исследования воздействия на эти процессы внешних динамических сил.

**Методы и материалы.** Для исследования процессов смешения предложена однопетлевая экспериментальная модель, которая представляет собой имитацию одной замкнутой циркуляционной петли ядерной энергетической установки. Основное отличие от известных моделей заключается в способе измерения, который основан на прямом температурном зондировании области смешения, а также в возможности проведения исследования в динамических режимах, аналогов которых в открытых источниках не имеется.

**Результаты.** Построены распределения температур вдоль области смешения для неизотермических потоков с градиентом 10, 20, 30, 40 °С для статического и динамического режимов. Определены области расположения турбулентных вихрей, застойные зоны. Выявлено, что для динамического режима при воздействии на модель периодических колебаний с амплитудой 30 ° наблюдается увеличение времени наступления установившегося режима. Установлена корреляция температурных пульсаций и периодических колебаний.

**Выводы.** Однопетлевая модель исследования процессов смешения неизотермических потоков позволяет оценить неоднородности и застойные области, имеющие место при прохождении потоком имитации выемного блока как в статическом, так и в динамическом режимах. Накопленный большой объем экспериментальных данных возможно использовать при верификации CFD-программ, поиске путей интенсификации этих процессов в задачах проектирования и конструирования современных судовых реакторных установок.

**Ключевые слова:** смешение неизотермических потоков, внешние динамические силы, температурное зондирование, судовая ядерная энергетическая установка, турбулентные вихри, застойные зоны, циркуляционная петля

## Investigation into the processes of mixing of non-isothermal flows on a model of the ship nuclear power plant

A.A. Satayev, A.V. Duntsev  
Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russian Federation  
E-mail: sancho\_3685@mail.ru

### Abstract

**Background.** To date, studying of mixing processes of water coolant flows is an urgent problem of the nuclear power industry. Leading scientific groups are investigating these processes at the experimental facilities ROCOM (Germany), Vattenfall (USA), Fortum PTS (Finland), OKB GIDROPRESS (Russia). The interest in these studies is associated with the appearance of new calculation codes that allow modeling these processes but they need to be verified. That is why it is an urgent problem to study the mixing processes on a model (single loop) of the reactor installation, as well as to investigate the effect of external dynamic forces on these processes.

**Materials and methods.** A one-loop experimental model has been proposed for the study of mixing processes. The model is a simulation of one closed loop of a nuclear power plant. The main difference from the known models consists in the measurement method, which is based on direct temperature probing of the mixing region and the possibility to carry out the research in dynamic regimes, whose analogs are not available in open data sources.

**Results.** We have constructed temperature distribution curves along the mixing region for nonisothermal flows with a gradient of 10, 20, 30, 40 °C for static and dynamic regimes and determined the areas of location of turbulent vortices and stagnant zones. It has been found that for the dynamic regime, when periodic oscillations with the amplitude of 30° are applied to the model, the steady-state regime onset time increases. We have determined the correlation between the temperature pulsations and periodic oscillations.

**Conclusions.** The single-loop model for studying the processes of mixing of non-isothermal flows has allowed us to estimate the inhomogeneities and stagnant regions occurring when a flow of imitation passes through the output block both in the static and dynamic regimes. The large amount of experimental data that has been accumulated can be used to verify CFD programs, to find ways to intensify these processes in the problems of design and construction of modern ship reactor installations.

**Key words:** mixing of nonisothermal flows, external dynamic forces, temperature probing, ship nuclear power reactor installation, turbulent vortices, stagnant regions, loop

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2018.5.026-032

**Введение.** Исследование процессов смешения водяного теплоносителя (далее просто смешения) играет важную роль в ядерной энергетике [1]. Внутри ядерной энергетической установки (ЯЭУ) происходят различные сложные процессы, связанные с нейтронной физикой, а также тепломассопереносом и гидравликой, оказывая существенное влияние на прочность корпусных конструкций оборудования ЯЭУ и, соответственно, на безопасность.

Так, существуют две ключевые проблемы, влияющие на стабильность и ресурс существующих атомных электростанций, – это явления термической усталости и термические удары под давлением. Решение данных проблем, которые напрямую связаны с процессами смешения, позволит существующим электростанциям безопасно эксплуатироваться в течение более длительного периода (до 60 лет), а новые электростанции могли бы успешно работать до 80 лет и более.

Процессы смешения также играют особенно важную роль при борном регулировании реактивности реакторов типа ВВЭР.

**Состояние вопроса.** В настоящее время в нашей стране, а особенно за рубежом разрабатываются новые программные средства, позволяющие описывать процессы смешения неизотермических потоков. Имеющаяся на сегодняшний день экспериментальная база, основанная на традиционных средствах измерения, практически непригодна для адаптации и верификации программ трехмерного расчетного кода к описанию потоковых процессов для неизотермических потоков, которые преобладают в задачах теплофизики и теплообмена. Экспериментальные исследования потоковых процессов, пригодные для верификации CFD-программ (Computational Fluid Dynamics – Вычислительная гидродинамика) [2], стали возможными совсем недавно благодаря появлению современных измерительных систем, таких как тепловизионная съемка, лазерная съемка (PIV, PLIF), высокоскоростные видеокамеры, кондуктометрические [3] и температурные датчики с высоким пространственным и временным разрешением. Однако перечисленные способы не являются универсальными и нуждаются в проведении значительного объема работ по освоению и адаптации к условиям конкретных экспериментов.

Исследованием процессов смешения занимаются ведущие научные группы на экспериментальных установках ROCOM (Германия), Vattenfall (США), Fortum PTS (Финляндия), ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» (Россия) [4]. Так, на установке ROCOM, которая моделирует первый контур немецкого реактора типа KONVOI, моделировались процессы впрыска в основной поток теплоносителя перед впускным соплом реактора [5]. Все выше описанные модели описывали процессы смешения только в стационарных режимах. Однако применительно к судовым ЯЭУ при разработке технических заданий должно быть предусмотрено обязательное требование безотказной работы при воздействии на ЯЭУ внешних динамических сил (кратковременные периодические наклоны судна до 45° и длительные наклоны до 15° на любой борт).

Качка с большой амплитудой ограничивает применение реакторов с кипящим теплоносителем, так как она вызывает колебания мощности реактора из-за возникновения изменений плотности в локальных областях активной зоны. Так, например, в немецком атомном рудовозе «Отто Ган» при амплитуде качки всего лишь в 15° возникали периодические колебания мощностью  $\pm(3-5)$  %. Наибольшее влияние качка оказывает на реакторные установки с естественной циркуляцией. По этому вопросу имеется американский опыт исследования – изучение поведения реактора на стенде-прототипе S5G (рис. 1). Этот стенд состоит из реактора, закрепленного на специальных шарнирных опорах, с помощью которых стало возможным имитировать килевую и бортовую качку [6].

Эти исследования показали, что при воздействии качки возникает необходимость даже в некотором снижении мощности из-за перегрева отдельных узлов ЯЭУ. Кроме того, велись длительно интенсивные исследования на стендах-прототипах с реакторами типа S5G и S7G, а также нарабатывался опыт эксплуатации подводной лодки «Нарвал». Вероятнее всего (точно неизвестно), это были реакторы моноблочного исполнения со встроенными компенсаторами давления.

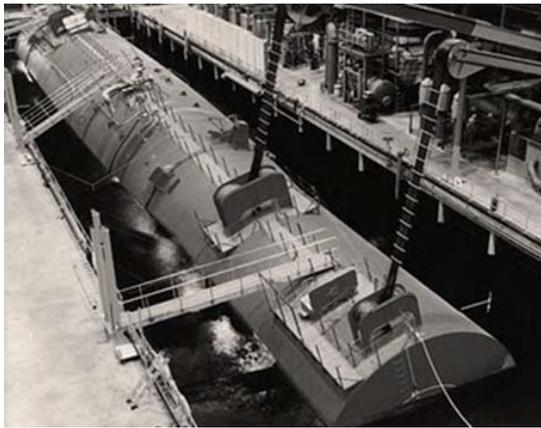


Рис. 1. Стенд S5G

**Методы исследования.** Для исследования процессов смешения неизотермических потоков была изготовлена уменьшенная модель реакторной установки, пред-

ставленная одной циркуляционной петлей (рис. 2, 3) [7]. Активная зона реактора моделируется дырчатым листом (геометрия дырчатого листа соблюдена в масштабе 1:5), являющимся частью выемного блока (прототип ЯЭУ КЛТ-40). Исследуемая модель изготовлена из пластика. Монтаж модели, ее доработка и модернизация, а также экспериментальные исследования проводились в помещении лаборатории НГТУ им. Р.Е. Алексеева «Лабораторный комплекс экспериментальных теплофизических стендов» кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки».

Для моделирования воздействия внешних динамических сил на процессы смешения применительно к нашей модели был предложен модернизированный стенд смешения неизотермических потоков (рис. 4).

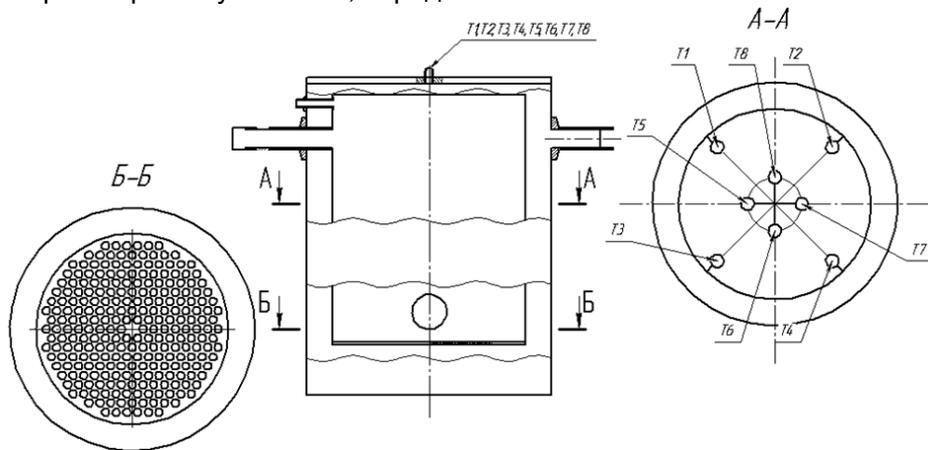


Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда

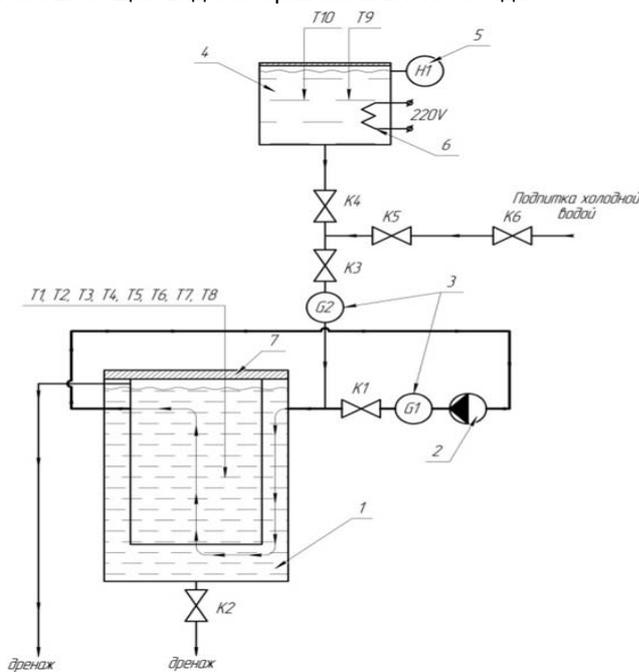


Рис. 3. Схема экспериментального стенда

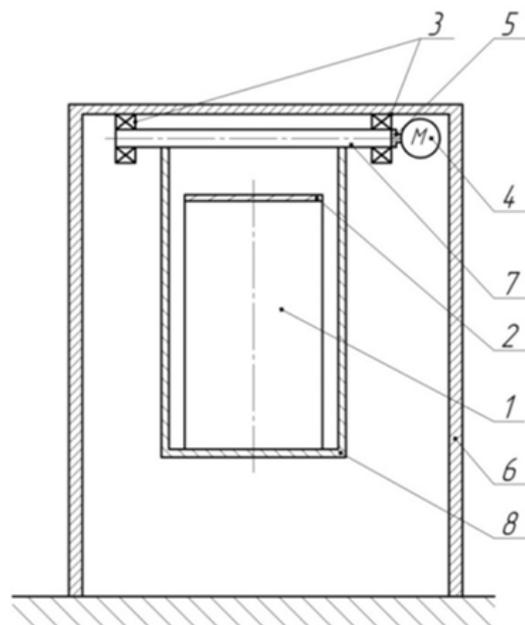


Рис. 4. Модернизированный стенд смешения неизотермических потоков

Стенд состоит из следующих частей: исследуемая модель 1, крышка модели 2, опорные подшипники 3, сервопривод 4, муфта переходная 5, рама 6, подвижная ось 7, качающаяся платформа 8. Исследуемая модель помещается и жестко фиксируется в качающейся платформе.

Качающаяся платформа жестко закреплена с подвижной осью, которая удерживается на опорных подшипниках, крепящихся к раме. Электродвигатель через переходную муфту передает вращающее усилие на подвижную ось, которая в свою очередь приводит в движение исследуемую модель. С помощью задания определенного закона движения можно заставить модель совершать периодические колебания относительно вертикального положения. Главным преимуществом данной конструкции является возможность установки на качающуюся платформу любой другой исследуемой модели (ограничением являются лишь габаритные размеры).

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

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

где  $\varphi_{\max}$  – амплитуда колебаний, радиан;  $T$  – период колебаний, с;  $t$  – текущее время, с.

Для нашего случая  $\varphi_{\max} = 0,611$  рад ( $35^\circ$ ),  $T = 3,25$  с.

Тогда закон движения примет вид

$$\varphi(t) = 0,611 \cdot \sin(1,933 \cdot t). \quad (2)$$

В качестве основной методики исследования процессов смешения применено температурное зондирование области смешения, которое осуществляется с помощью установки термодатчиков, расположенных на пути смешения потоков, на разной высоте. Затем по этим данным была построена послойная (поуровневая) картина распределения температуры.

На языке высокого уровня была создана быстродействующая программа по опросу сразу нескольких датчиков (первая модификация 8 измерительных зондов). На рис. 4 показана имитация основного тракта циркуляции, но возможно оснащение модели крышкой с возможностью подвода потока сверху, что имитирует аварийную проливку, а также парогенераторный режим. Заполнение модели осуществляется после открытия вентилей К3, К5, К6. Слив и расхолаживание модели между экспериментами производится открытием вентиля К2. Заполнение бака подготовки горячей воды осуществляется после открытия вентилей К4, К5, К6 при закрытом вентиле К3. О заполнении бака сиг-

нализирует звуковой сигнал поплавкового сигнализатора уровня. Нагрев воды осуществляется с помощью ТЭНов до определенной температуры, установленной на терморегуляторе (по температуре Т9). Для измерения расхода используются тахометрические расходомеры, предварительно градуированные на расход 0,5–15 л/мин. Для изучения поведения неизотермических потоков был использован метод температурного зондирования. В качестве зондов использовались терморезистивные датчики температуры производства компании Dallas Instruments. Диапазон измерения температуры лежит в интервале от  $-55$ – $125$  °С. Точность составляет  $\pm(0,25$ – $0,5)$  °С в интервале  $-10$ – $85$  °С.

Так как модель выполнена из пластика, использование температур более  $85$ – $90$  °С недопустимо. Температурные зонды расположены по определенной геометрии. Они могут менять свое положение относительно вертикальной оси (тем самым мы изменяем уровень измерения). Данные температурных показаний считываются в автоматическом режиме, передаются в блок коммутации датчиков (контактные группы датчиков + подтягивающие резисторы, питание схемы), а затем обрабатываются микроконтроллером и отправляются на компьютер для дальнейшей обработки [4].

При достижении заданной температуры (в работе выбирались  $T = 30, 40, 50, 60$  °С  $\pm 0,5$  °С) последовательно открываются вентили К4 и К3. Горячий поток с расходом G2 самотеком впрыскивается в модель, заполненную водой с меньшей температурой ( $15$ – $20$  °С). В рамках данных экспериментов описываются процессы, происходящие при смешении неизотермических потоков без использования принудительной циркуляции (центробежный насос отключен, вентиль К1 закрыт). При проведении экспериментов было исследовано распределение температур вдоль области смешения, образованной имитацией выемного блока (дырчатого листа).

Датчики были расставлены по определенной геометрии, показанной на рис. 5 (Т1–Т4 – периферийная зона, Т5–Т8 – центральная зона, причем температурные зонды, расположенные в центральной области, повернуты относительно зондов периферийной группы на угол  $45^\circ$  для большего охвата исследуемой области). Для исследования воздействия внешних сил (качки) исследуемая модель подвергалась воздействию периодических колебаний с амплитудой  $35^\circ$ .

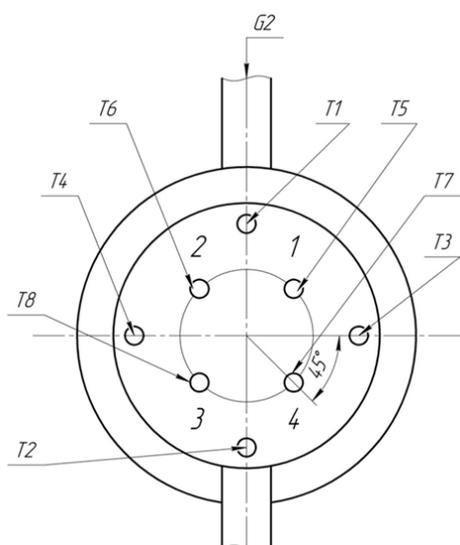


Рис. 5. Схема расположения датчиков (T1-T8) в экспериментальной модели

**Результаты исследования.** Для стационарного режима при анализе поля температур для первого уровня измерения (на входе в имитатор АЗ, далее уровни располагаются последовательно через 25 мм) максимальная температура наблюдается на датчиках T2 и T4, расположенных на периферии, по мере движения по вертикали, значение параметра T2 ослабевает, а T4 увеличивается (периферийная зона 3 четверти). Это говорит о наличии турбулентного вихря, проходящего через данную область. Установившееся значение по температуре наблюдается в среднем за 250–280 секунд после начала впрыска.

Также можно сделать вывод о неравномерности смешения и образования застойной зоны в области 1 четверти (рис. 5, датчики T1 и T3). Градиент по температуре составляет в среднем от 4–10 °С.

Анализ центральной области (датчики T5-T8) позволяет судить о равномерности смешения (градиенты не более 1–2 °С на 1–5 уровнях). Центральная область не претерпевает серьезных изменений.

При воздействии периодических колебаний на модель для поля температур первого уровня измерения максимальная температура наблюдается на датчиках T1 и T6. Заметим, что для статического режима максимальная температура наблюдалась на датчиках T2 и T4, расположенных на периферии. Следовательно, можно предположить, что инерционные силы разворачивают турбулентный вихрь и смещают зону интенсивного смешения в область 2 четверти у входного патрубка. Установившееся значение по температуре наблюдается в среднем

за 300–320 секунд, что больше, чем для статического режима.

Также можно судить о неравномерности смешения и образования застойной зоны в области 3 четверти (датчики T4 и T8). Градиент по температуре составляет в среднем от 2–3 °С.

Отдельно была проведена математическая обработка графиков на наличие влияния пульсаций температуры, связанных с законами колебательного движения. Для этого график для датчика T1 был разбит на участки. Для каждого участка с помощью линейной аппроксимации находилась линейная составляющая изменения температуры от времени смешения:

$$T_{\text{текущая}} = T_{\text{линейная}} + T_{\text{колебательная составляющая}}. \quad (3)$$

Соответственно, для нахождения колебательной составляющей из графика исходной функции вычитался график уравнения аппроксимирующей линейной прямой.

Однако кроме колебательной составляющей температуры (связанной с колебанием модели) существуют пульсации температуры, связанные с вихревыми образованиями в потоке (турбулентные пульсации). Но такого рода пульсации характеризуются небольшой амплитудой (не более 0,05–0,1 °С) и скоротечны по времени (1–2 секунды).

Исследуемые пульсации, которые происходят из-за колебаний модели, обладают значительно большим периодом и амплитудой.

На рис. 6 показан участок графика для периода 160–250 секунд. Если построить график для колебательной составляющей (рис. 7), то можно заметить периодические колебательные изменения с амплитудой 0,7–0,9 °С и периодом 32–38 секунд.

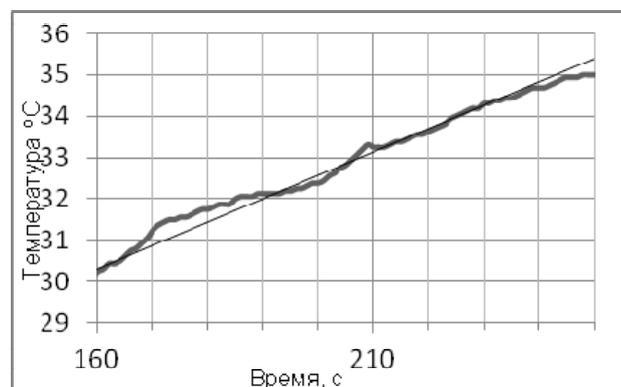


Рис. 6. График изменения температуры во времени для датчика T1, для участка 160–250 секунд (с проведенной линейной аппроксимирующей прямой)

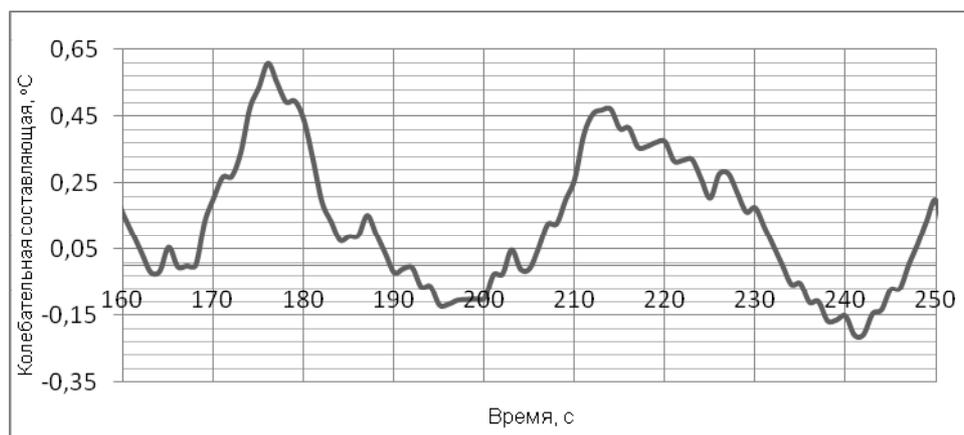


Рис. 7. График зависимости колебательной составляющей от времени

**Выводы.** Процессы смешения применительно к судовым ЯЭУ имеют свою специфику. Они связаны с воздействием на судно внешних динамических сил (качка). Качка – переменное периодическое движение судна под действием волнения или других внешних сил. Качка оказывает вредное воздействие на эксплуатационные и мореходные качества. Она ограничивает возможность применения кипящих ядерных реакторов и реакторов с ЕЦ, а также заставляет учитывать дополнительные коэффициенты запаса, при проектировании ЯЭУ.

Созданная однопетлевая модель смешения позволила оценить параметры областей неоднородности и условия, влияющие на эти процессы. Были найдены области неравномерного смешения, застойная зона.

Полученные на предложенном модернизированном стенде смешения неизотермических потоков экспериментальные данные и сравнение их с наработанной базой по стационарным условиям работы стенда показали корреляцию между воздействием этих колебаний на процессы смешения.

Исследование процессов смешения неоспоримо является актуальной задачей [8]. Ее решение дает возможность оптимизировать существующие проекты реакторных установок, обосновывать параметры безопасности. А создание верифицированных расчетных кодов дает колоссальное экономическое преимущество (из-за невозможности и высокой стоимости проведения натуральных экспериментов), а также является одним из шагов навстречу новому инновационному подходу к проектированию и конструированию.

#### Список литературы

1. **Основное** оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах /

С.М. Дмитриев, Д.Л. Зверев, О.А. Бых и др. – М.: Машиностроение, 2013.

2. **Методологические** основы CFD-расчетов для поддержки проектирования пневмогидравлических систем / О.В. Белова, В.Ю. Волков, А.П. Скибин и др. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – № 5. URL:<http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/763.html>

3. **Внедрение** метода матричной кондуктометрии в исследование гидродинамических процессов течения теплоносителя в оборудовании ЯЭУ / А.А. Баринов, В.Е. Бородина, С.М. Дмитриев и др. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. – 2015. – № 1. – С. 139–145.

4. **Исследование** перемешивания теплоносителя в опускной камере реактора / Е.А. Лисенков, Ю.А. Безруков, В.Н. Ульяновский и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2008. – № 23. – С. 3–17.

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. **Хлопкин Н.С.** Морская атомная энергетика: учеб. пособие. – М.: МИФИ, 2007.

7. **Сатаев А.А., Дунцев А.В.** Моделирование процессов смешения неизотермических потоков оборудования ядерных энергетических установок: сб. докл. XIII Междунар. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых ученых «Энергия 2018». – Иваново, 2018.

8. **Актуальные** вопросы развития экспериментальной базы данных для верификации CFD программ при их использовании в атомной энергетике / М.А. Большухин, А.В. Будников, В.И. Фомичев и др. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. – 2013. – № 2(99). – С. 117–125.

#### References

1. Dmitriev, S.M., Zverev, D.L., Bykh, O.A., Panov, Yu.K., Sorokin, N.M., Farafonov, V.A. *Osnovnoe oborudovanie AES s korpusnymi reaktorami na teplovykh neytronakh* [The main equipment of nuclear power plants with thermal neutron shell-type reactors]. Moscow: Mashinostroenie, 2013.

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 [Methodological foundations of CFD calculations for supporting the design of pneumohydraulic systems]. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 5. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/vacuum/763.html>

3. 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 matrix conductometry method in the study of hydrodynamic processes of coolant flow in nuclear power plant equipment]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Collected works of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev], 2015, no. 1, pp. 139–145.

4. Lisenkov, E.A., Bezrukov, Yu.A., Ul'yanovskiy, V.N., Saliy, L.A., Ul'yanovskiy, D.V., Zaytsev, D.V., Sergeev, S.G., Bykov, M.A., Zaytsev, S.I. Issledovanie peremeshivaniya teplonositelya v opusknoy kamere reaktora [A study of coolant mixing in the reactor downcomer]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya Obespechenie bezopasnosti AES*, 2008, no. 23, pp. 3–17.

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. Khlopkin, N.S. *Morskaya atomnaya energetika* [Marine nuclear power industry]. Moscow: MIFI, 2007.

7. Sataev, A.A., Duntsev, A.V. Modelirovanie protsessov smesheniya neizotermicheskikh potokov oborudovaniya yadernykh energeticheskikh ustanovok [Modeling of mixing processes of non-isothermal flows of nuclear power plant equipment]. *Sbornik dokladov XIII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh «Energiya 2018»* [Collected works of the 13<sup>th</sup> international scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists «Energy 2018»]. Ivanovo, 2018.

8. Bol'shukhin, M.A., Budnikov, A.V., Fomichev, V.I., Sveshnikov, D.N., Romanov, R.I. Aktual'nye voprosy razvitiya eksperimental'noy bazy dannykh dlya verifikatsii CFD programm pri ikh ispol'zovanii v atomnoy energetike [Pressing issues of experimental database development for verifying CFD codes used in nuclear power industry]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Collected works of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev], 2013, no. 2(99), pp. 117–125.

*Сатаев Александр Александрович,*

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», магистрант 2-го года обучения, инженер кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, телефон (831) 436-80-29, e-mail: [sancho\\_3685@mail.ru](mailto:sancho_3685@mail.ru)

*Sataev Aleksandr Aleksandrovich,*

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, 2-nd year Master course student, Engineer of the Department of Nuclear Reactors and Power Plants, tel. (831) 436-80-29, e-mail: [sancho\\_3685@mail.ru](mailto:sancho_3685@mail.ru)

*Дунцев Андрей Всеволодович,*

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