

УДК 681.51, 621.039

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.40.1.004](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.004)

Моделирование и визуализация теплогидравлических процессов при воздействии внешних динамических сил

А.А. Сатаев✉, В.В. Андреев

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Нижний Новгород, Российская Федерация
sancho_3685@mail.ru*

Резюме. В статье рассматривается актуальная проблема учета воздействия внешних динамических сил на теплогидравлические процессы. К ним относятся процессы естественной циркуляции, перемешивания теплоносителя в оборудовании ядерных энергетических установок, процессы сепарации пара, режимы работы систем подогрева высоковязких сред, работа абсорбционных холодильных приборов, установленных на малых и больших морских судах. Ведущим подходом к исследованию данной проблемы является экспериментальный метод, позволяющий комплексно рассмотреть данные процессы на мелкомасштабных моделях. Для этого был разработан экспериментальный стенд оригинальной конструкции. Параметры, полученные в ходе работы, были визуализированы и преобразованы в графические изображения, которые анализировались с помощью библиотеки компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV. Предложен новый метод визуализации процессов смешения неизотермических течений, результатом применения которого явились интегральные и локальные характеристики данного процесса. Из полученных результатов заметно, что режимы периодической качки и статического крена оказывают существенное влияние на процессы смешения неизотермических потоков теплоносителя. Проанализировав полученные графические изображения, были выявлены области неравномерного перемешивания, находящиеся в прямой корреляции с условиями внешних динамических воздействий. Апробированные в процессе исследования процессы смешения неизотермических потоков методики могут быть использованы и в других приложениях для решения схожих задач.

Ключевые слова: визуализация, теплогидравлические процессы, внешние динамические силы, качка, экспериментальное моделирование, ядерная энергетическая установка, OpenCV, смешение.

Для цитирования: Сатаев А.А., Андреев В.В. Моделирование и визуализация теплогидравлических процессов при воздействии внешних динамических сил. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1275> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.004

Modeling and visualization of thermohydraulic processes under the influence of external dynamic forces

A.A. Sataev✉, V.V. Andreev

*Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev,
Nizhny Novgorod, Russian Federation
sancho_3685@mail.ru*

Abstract. The article deals with the relevant issue related to accounting for the impact of external dynamic forces on thermal-hydraulic processes. These include processes of natural circulation, mixing of the coolant in the equipment of nuclear power plants, steam separation processes, operating modes of heating systems for high-viscosity media, operation of absorption refrigeration devices installed on small and large sea vessels. The principal approach to researching this problem is the experimental

method which makes it possible to comprehensively consider these processes on small-scale models. For this, an experimental stand of an original design was developed. The parameters obtained during the operation were visualized and converted into graphic images, which were analyzed using the open-source computer vision library OpenCV. A new method for visualization of mixing processes of non-isothermal flows is proposed, the implementation of which resulted in the integral and local characteristics of this process. It is evident from the findings that the modes of periodic rolling and static roll have a significant effect on the mixing processes of non-isothermal coolant flows. After analyzing the obtained graphic images, areas of uneven mixing were identified, which are in direct correlation with the conditions of external dynamic influences. The techniques tested in the study of mixing processes of non-isothermal flows can be used in other applications to solve similar problems.

Keywords: visualization, thermohydraulic processes, external dynamic forces, rolling, experimental modeling, nuclear power plant, OpenCV, mixing.

For citation: Sataev A.A., Andreev V.V. Modeling and visualization of thermohydraulic processes under the influence of external dynamic forces. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1275> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.004 (In Russ.).

Введение

Проектирование и изготовление сложных теплогидравлических систем, используемых в атомной энергетике и морской технике, нельзя представить без анализа всех существенных факторов, а также комплексных исследований и испытаний готовых образцов на наземных стендах-прототипах, разномасштабных принципиальных моделях ни в процессе принятия решения о внедрении, ни при их эксплуатации в составе объектов стационарного и транспортного назначения.

Учет внешних динамических воздействий, таких как качка, тряска, крен, вибрации и т. д. крайне необходим при рассмотрении сложных теплогидравлических систем (при анализе литературы к таким процессам стоит отнести: процессы перемешивания теплоносителя [1-2], естественную циркуляцию (ЕЦ) [3], процессы сепарации пара с использованием сепараторов циклонного типа [4], режимы работы систем подогрева высоковязких сред при перевозке морским транспортом [5], работа абсорбционных холодильных машин, установленных на больших и малых морских и речных судах [6]). Исходя из перечисленного, очень важно рассматривать данные процессы комплексно, в том числе с применением методов системного подхода, с обязательным учетом таких воздействий, причем для атомной энергетике учет данных воздействий важен критически, из-за необходимости строгого соблюдения принципов глубокоэшелонированной защиты и вероятностного анализа для безопасности и надежности установок такого типа [7].

Параметры морского волнения имеют стохастический и нерегулярный характер с различной интенсивностью и зависят от множества факторов природного и техногенного характера, поэтому могут задаваться с помощью нескольких типов моделей [8].

В литературе описаны несколько способов для характеристики и задания качки корабля на морском волнении. В классическом подходе к описанию морского волнения академик А. Н. Крылов [9] понимает, что профиль морского волнения периодичен по времени. Соответственно, взволнованная поверхность имеет вид синусоиды, и реакция судна на такое воздействие также может описываться функцией синуса. Данная модель с достаточной степенью точности может описывать мертвую зыбь и используется для моделирования ветрового волнения при малых значениях скорости ветра.

Для повышения точности оценки параметров морского волнения необходимо его рассмотрение с помощью функций в виде случайного процесса. Реализация таких условий осуществляется с помощью проведения физических экспериментов (на

волновом бассейне) или с помощью вычислительных компьютерных экспериментов (численный волновой бассейн), применяя нелинейные численные и имитационные модели.

Однако, несмотря на повсеместное применение и развитие специального программного обеспечения и современных методов вычислительной гидродинамики (CFD), общепризнанным и традиционным для инженерных расчетов является использование аналитических моделей на основе линейной теории волн и качки.

Выбор линейной теории качки также обоснован тем, что в основном ядерные силовые установки применяются на высоко тоннажных судах (это десятки и сотни тысяч тонн) и для таких объектов современные метеоусловия не дают режимов, когда качка может быть нелинейной. Она почти линейная. Кроме того, формально морским регистром предусмотрены определенные требования по испытаниям на качку – отдельно по разным единицам оборудования.

Исходя из этого, актуальным видится подход к анализу данных систем в виде представления новой системы («теплогидравлика+качка»), которая находится на стыке системы теплогидравлических процессов судовой ядерной энергетической установки и системы процессов влияния режимов наклонов и качки. Такая система является физически реализованной моделью реальной системы теплогидравлики ядерной энергетической установки (ЯЭУ), с помощью которой и с применением методов пересчета с модели на реальную ЯЭУ можно добиться повышения эффективности и надежности данной технической системы.

При решении такого рода задач необходимо применять синтезированные алгоритмы. Для этого используются такие методы, которые объединяют знания теории исследуемых устройств (теория судов) и методики базовой дисциплины (теплогидравлика).

Однако простого получения данных часто бывает недостаточно, необходим их комплексный анализ с помощью средств визуализации, корреляционного анализа, а также их последующая интерпретация. Только такой комплексный подход с применением прикладного программного обеспечения, а также собственных разработок, в том числе с применением технологий компьютерного зрения, позволяет получить наглядную информацию о теплогидравлических процессах и определить новые типы связей между элементами.

Исходя из выше изложенного, целью работы является разработка экспериментальных моделей, а также методов обработки и визуализации получаемых данных, для решения задач оценки нестационарных теплогидравлических процессов с учетом влияния внешних динамических сил (качка, крен), присущих судовой ЯЭУ. Основная задача исследования – создание методики (алгоритма) визуализации и анализа, ее верификация и применение к оценке теплогидравлических процессов.

Материалы и методы

В рамках синтезированной новой системы («теплогидравлика+качка») не представляется возможным учет волнения в виде стохастической функции, исходя из того, что доподлинно не известны связи между теплогидравлическими параметрами модели и колебательным процессом. Поэтому колебательный процесс необходимо задавать известной и хорошо прогнозируемой зависимостью. Исходя из этого была применена линейная теория волн и качки (гармонический закон колебаний).

Для исследования процессов теплогидравлики в первую очередь используется экспериментальный подход. Для моделирования процессов неизотермического перемешивания был спроектирован и изготовлен экспериментальный стенд,

представляющий собой модель проточной части судовой ядерной энергетической установки с 4 радиально расположенными патрубками. Основным объектом для исследования был выбран опускной кольцевой участок циркуляционного тракта. Именно на этом участке происходит основное распределение теплоносителя, а также его перемешивание. В качестве основного метода исследования был применен метод температурного зондирования. Его реализация осуществлялась с помощью установки сетки из терморезисторов непосредственно на стенке модели вдоль исследуемого участка. Каждый из терморезисторов был непосредственно герметично заделан в стенку модели вдоль ее окружности. Таким образом, в совокупности они составляют сетку из 5 поясов, в каждом из которых установлено по 8 датчиков (шаг 50 мм.). Для моделирования активной зоны реактора применяется гидравлический имитатор сопротивления, представленный в виде мелкомасштабной единичной элементарной кассеты.

Методика проведения эксперимента состояла в следующем: предварительно подготовленный теплоноситель с использованием насосного блока впрыскивался в одну из гидравлических петель циркуляции, в другую петлю циркуляции подавался теплоноситель с другими параметрами (более холодный или более горячий), также с помощью насосного блока. В данной статье описываются процессы неизотермического смешения при впрыске потоков в расположенные друг напротив друга циркуляционные петли. Температуры впрыскиваемых сред составляют соответственно 60 °С и 20 °С, с одинаковыми расходами $G = 0,6 \text{ м}^3/\text{час}$.

Впрыск в модель может осуществляться в любой из 4 радиально расположенных патрубков, отвод потока в дренаж осуществляется по патрубку, расположенному аксиально на верхней крышке.

Для исследования воздействия колебаний в одной или двух плоскостях гидравлическая модель помещалась на колебательную платформу, представляющую из себя рамную конструкцию, выполненную в виде крестообразного подвеса.

Осуществить механически моделирование колебательного движения можно несколькими способами, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Исходя из этого были предложены несколько способов создания колебательного движения: с помощью понижения числа оборотов исходного двигателя и передачи усилия с двигателя на шкивы с помощью ременной передачи (недостатком является большое количество узлов передачи вращательного движения, а также инерционных показателей); с помощью подвешивания модели на гибких связях (тросах или цепях) (таким образом возможно получить нерегулярную модель качки, однако учет ее в каких-либо математических моделях сложен). В виду вышеописанных недостатков была применена конструкция стенда [10], изображенная на Рисунке 1.

Узел качания состоит из двух червячных мотор-редукторов (установлены по одному для каждой из плоскостей колебаний), фланцевых корпусных подшипниковых опор, рамных конструкций, кривошипно-шатунных узлов, тяг-направляющих с шарнирными наконечниками (шток). Мотор-редуктор, передавая свое вращающее усилие через кривошипно-шатунный механизм, осуществляет движение штока, который в свою очередь приводит в движение установленную модель на качающейся платформе. Управляя параметрами кривошипно-шатунного механизма (за счет изменения радиуса кривошипа), а также путем изменения частоты оборотов асинхронных электродвигателей в составе червячных мотор-редукторов (за счет частотного преобразователя) возможно изменение периода и амплитуды колебаний модели.

Также стоит отметить, что данный способ моделирования колебательного процесса позволяет осуществлять режимы статического крена модели без применения каких-либо дополнительных устройств (из-за свойств самоторможения червячной пары).

Таким образом, модель может осуществлять колебания в заданной плоскости с выбранными пользователем параметрами, подобно математическому маятнику.



Рисунок 1 – Общий вид экспериментального стенда и качающейся платформы (слева), местный вид на контактные группы термозондов (справа)

Figure 1 – General view of the experimental stand and the swinging platform (left), local view of the contact groups of thermosondes (right)

Результаты

Подготовка исходных данных для анализа внешних воздействий на судовую ЯЭУ включает определение совокупности параметров исходных событий, которые в той или иной степени определяют условия развития ситуации в направлении конечных состояний.

Под понятием внешних воздействий имеется в виду соотношение факторов по отношению к связям в математической модели. Они могут быть по своей физической природе как внутренними, относительно исследуемого объекта, например, гидродинамические «шумы», так и внешними, обусловленными воздействием на систему некоторых сил извне [11].

Архив с экспериментальными данными был получен с помощью «Программы для сбора, обработки и анализа данных экспериментального стенда для моделирования теплогидравлических процессов при воздействии внешних динамических сил» в формате .xlsx, созданном с использованием среды разработки LabView. Затем была проведена процедура подготовки исполняемого файла с исходными данными (.dat), в котором полученным экспериментальным значениям температур по режимам ставится в соответствие координатная сетка, представляющая собой развертку цилиндрической стенки и заданная в полярной системе координат (r , φ). После этого для получения графической визуализации данный файл исполнялся в программе 3DFieldPro, где координатам модели и данным температуры (контрольным точкам) поставили в соответствие цветовую шкалу. Значения температур, не найденные непосредственно экспериментально (не контрольные точки) были определены с помощью суррогатной модели, в качестве которой выступала функция кригинга (Kriging) – метод интерполяции, основанный на регрессии гауссовским процессом.

Полученные таким образом графические изображения (.jpg) были обработаны с помощью библиотеки компьютерного зрения – OpenCV [12], которая поддерживает алгоритмы компьютерного зрения и обработки изображений, реализованные на языке C++. В результате применения данных алгоритмов стало возможным получение

геометрических параметров областей температурных фронтов, а также локальных и интегральных характеристик процесса смешения неизотермических потоков.

На Рисунке 2 показан алгоритм обработки кадра смешения в одном из режимов (качка с большим периодом в одной плоскости). Также показан пример визуализации границы холодных и горячих областей с применением библиотеки алгоритмов компьютерного зрения и обработки изображений – OpenCV. После предварительной обработки изображения, для выделения границы области горячего / холодного фронта был использован оператор Canny, а также cvFindContours. Затем после идентификации границ характерных областей смешения могут быть найдены их площади и геометрические размеры.

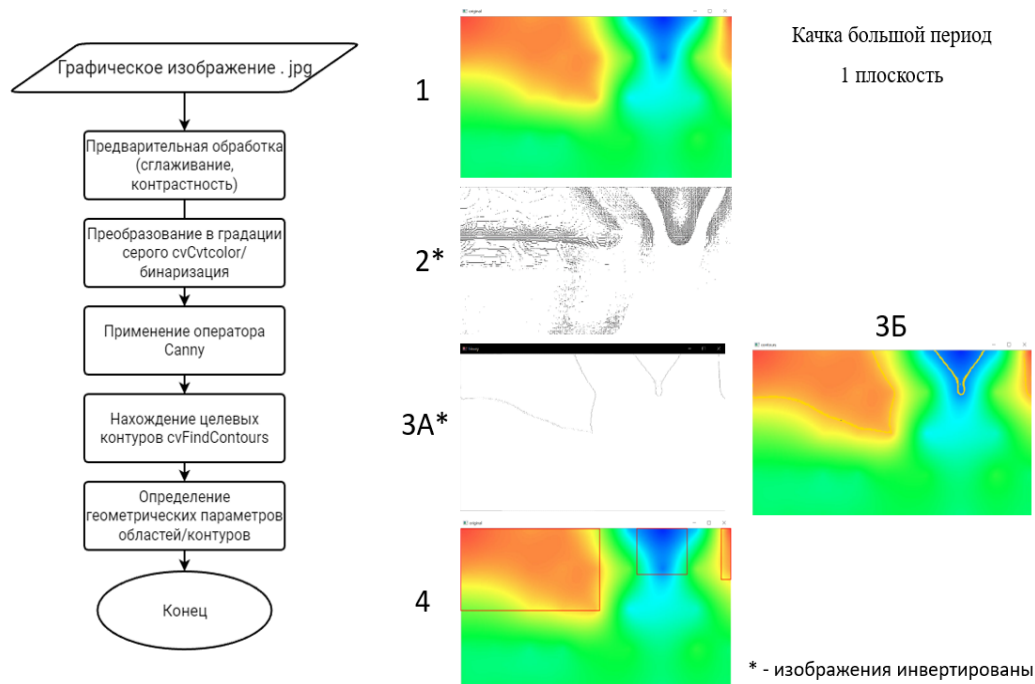


Рисунок 2 – Алгоритм обработки кадра смешения (слева), результат применения данного алгоритма для анализа одного из режимов (справа)

Figure 2 – Algorithm for processing the mixing frame (left), the result of using this algorithm to analyze one of the modes (right)

При проведении моделирования была разработана классификация задач для экспериментального исследования теплогидравлических процессов при воздействии внешних динамических сил. Исходя из опыта полученных ранее результатов были определены ключевые параметры и процессы, на которые оказывают влияние внешние динамические силы. Классификация включает в себя следующие категории: по режиму циркуляции (естественная (происходящая за счет разности плотностей) и принудительная (осуществляется за счет давления насоса)); по характеру задачи (динамика и статика). Кроме того, статический режим можно классифицировать отдельно по наличию крена, а динамику – по количеству используемых плоскостей качения (одна или две плоскости) и разности фаз между ними [13].

Полученные результаты экспериментальной работы для некоторых классов задач и параметры испытаний касаются колебательного движения (получены при использовании акселерометра-гироскопа Witmotion WT901C с точностью по углу поворота до $0,05^{\circ}$ и динамикой до 200 Гц) показаны в Таблице 1. Представленными

характеристиками колебательного движения являются проекции угловых скоростей (ω_x , ω_y , ω_z) и ускорений (a_x , a_y , a_z) на соответствующие оси.

Таблица 1 – Результаты экспериментальной работы для некоторых классов задач и параметры испытаний

Table 1 – Results of the experimentation for some classes of problems and test parameters

Тип задачи	Характеристики колебательного движения (согласно данным акселерометра-гироскопа)						Период колебаний, сек.	Амплитуда колебаний, град	Средняя температура вдоль оси смещения	Площадь «горячего» сектора по отношению к площади «холодного» сектора – S1/S2
	ω_z	ω_x	ω_y	a_z	a_x	a_y				
Статика	0	0	0	1g	0	0	-	-	41,76	2,467
Крен	0	0	0	1g	0	0	-	-	29,76	3,258
Качка большой период	\pm 9,7	0,6	\pm 1	1g	0	\pm 0,2	7 сек	15 ⁰	44,42	4,832
Качка малый период	\pm 19,2	1,8	\pm 1,9	1g	0	\pm 0,2	3,4 сек	15 ⁰	46,26	1,87
Качка 2 плоскости	\pm 9,7	0,6	\pm 1	1g	0	\pm 0,2	7 сек	15 ⁰	40,04	3,1
	-	-	-	1g	\pm 0,2	0	3.4 сек	10 ⁰		

Обсуждение

Из полученных результатов заметно, что режимы периодической качки, а также статического крена оказывают существенное влияние на процессы смещения неизотермических потоков теплоносителя. При рассмотрении системы уравнений движения жидкости в системе координат, связанной с кораблем, возникают возмущающие периодические внешние силы. Они возникают при влиянии на систему центробежной силы инерции, а также с учетом того, что, кроме центробежной силы при движении единицы жидкости относительно вращающейся системы отсчета, будут действовать силы инерции, связанные с переносным и кориолисовым ускорением. Все это в совокупности и объясняет то, что существует сильная концентрация горячего / холодного температурного фронта относительно одной из стенок модели, вызывающая локальные минимум / максимум в этой области.

Из Таблицы 1 можно заметить, что средняя температура вдоль оси смещения имеет наибольшее значение в случае воздействия на модель качки с малым периодом и наименьшее значение в режиме статического крена.

Амплитуды пульсаций температуры, имеющие наибольшее значение по модулю, были получены для температурных датчиков, которые имеют расположение на сторонах модели, совпадающих с направлением колебательного движения платформы. Было получено, что период колебаний модели находится в корреляции с периодом колебаний температуры. Данный процесс с хорошей точностью может быть описан

экспоненциальной функцией: $T = A \cdot e^{k\tau}$ (где τ (секунд) – период колебаний модели, T (секунд) – период колебаний температуры).

При сравнении площадей области «горячего» сектора и «холодного» сектора было получено, что наибольшими являются области горячего потока при режиме с качкой большого периода, а наименьшими – при режиме с качкой малого периода. Исходя из этого, период колебаний имеет ключевое значение и влияет на процессы неизоэнтальпического смешения.

Воздействие колебательного движения в двух плоскостях вызывает существенное изменение картины смешения по сравнению с колебаниями в одной плоскости. Происходит «размытие» температурного фронта, кроме того, сложно прослеживается корреляция между областью нахождения параметров с низкой / высокой температурой при изменении пространственного положения модели (эксперименты были проведены для колебаний с низкой амплитудой (до $10-15^0$). Средняя температура вдоль оси смешения близка к режимам в статике (без воздействия колебаний).

Заключение

В результате работы было проведено экспериментальное моделирование теплогидравлических процессов в динамических режимах, а также предложен новый метод визуализации данных применительно к оценке процессов смешения неизоэнтальпических течений, результатом которого явились интегральные и локальные характеристики данного процесса. Для этого были применены современные программные комплексы 3DFieldPro для создания графических изображений характерных режимов смешения, а также элементы библиотеки OpenCV с реализацией на языке высокого уровня C++. Из полученных результатов заметно, что режимы периодической качки, а также статического крена на одну из сторон модели оказывают существенное влияние на процессы смешения неизоэнтальпических потоков теплоносителя.

Также стоит отметить, что апробированные на исследовании процессы смешения неизоэнтальпических потоков методики могут быть использованы и в других приложениях для решения схожих задач (например, исследование теплогидравлических процессов при перевозке высоковязких застывающих жидкостей морским транспортом и других процессов, где требуется учет внешних динамических воздействий).

В дальнейшем, для уточнения расположения областей неравномерности, необходимо применение оптических методик исследования потоковых процессов (PIV методы) с целью нахождения векторного поля скорости и завихренности и влияния на них внешних динамических сил, вызванных колебательным процессом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rajashekhar Pendyala, Sreenivas Jayanti, Balakrishnan A.R. Flow and pressure drop fluctuations in a vertical tube subject to low frequency oscillations. *Nuclear Engineering and Design*. 2008;238(1);78–187. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2007.06.010](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.06.010).
2. Zhixian Lai, Wenxi Tian, Chong Chen, Mingjun Wang, Kui Zhang, Suizheng Qiu, Guanghui Su. Experimental study on thermal hydraulic characteristics of natural circulation loop under motion condition. *Applied Thermal Engineering*. 2022;207;118–122. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2022.118122](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118122).
3. Кузоро В.Б., Перевезенцев В.В. Структурные характеристики двухфазных газожидкостных потоков в условиях действия периодических поперечных сил. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы*. 2016;3;132–142.

4. Терентьев В.Д. Синева Н.М. *Основы тепловых и гидравлических расчетов судовых ядерных реакторов и парогенераторов*. Ленинград: Судостроение; 1967. 208 с.
5. Селиванов Н.В. Кузьмин С.И., Андриис К.Б., Евдашкин В.И. Теплообмен и гидродинамика у ограждающих поверхностей танков морских нефтеналивных судов в условиях качки. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*. 2009;2;92–98.
6. Титлов А.С., Очеретяный Ю.А. Разработка транспортных абсорбционных холодильных приборов. *Холодильная техника*. 2007;52(5). DOI: 10.15673/ret.v52i5.283.
7. Кудинович И.В. Обоснование ядерной и радиационной безопасности атомного судна при внешних воздействиях. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2019;1(387);131–142.
8. Ремез Ю.В. *Качка корабля*. Судостроение, Ленинград; 1983. 328 с.
9. Смирнов В.И., Шиманский Ю.А. *Собрание трудов академика А.Н. Крылова. Качка корабля, Т. II*. Москва: Акад. наук СССР; 1951. 469 с.
10. Андреев В.В., Сатаев А.А. Патент на полезную модель № 202079 U1 Российская Федерация, МПК G01M7/06. Двухплоскостной стенд для испытаний на качку и способ его применения для испытания теплогидравлических моделей: № 2020136082, заявитель ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ).
11. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. *Механизмы неустойчивых процессов в тепловой и ядерной энергетике*. М.: Энергоиздат; 1981.
12. OpenCV Tutorial C++. Доступно по: <https://www.opencv-srf.com/p/introduction.html>.
13. Сатаев А.А., Самойлов А.М., Блохин А.А., Андреев В.В. Системное исследование процессов теплообмена в условиях принудительной и естественной циркуляции при внешнем динамическом воздействии. *Морские интеллектуальные технологии*. 2022;2–1(56);155–161.

REFERENCES

1. Rajashekhar Pendyala, Sreenivas Jayanti, Balakrishnan A.R. Flow and pressure drop fluctuations in a vertical tube subject to low frequency oscillations. *Nuclear Engineering and Design*. 2008;238(1);178–187. DOI: [10.1016/j.nucengdes.2007.06.010](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2007.06.010).
2. Zhixian Lai, Wenxi Tian, Chong Chen, Mingjun Wang, Kui Zhang, Suizheng Qiu, Guanghui Su. Experimental study on thermal hydraulic characteristics of natural circulation loop under motion condition. *Applied Thermal Engineering*. 2022;207;118–122. DOI: [10.1016/j.applthermaleng.2022.118122](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118122).
3. Kuzero V.B., Perevezentsev V.V. Structural characteristics of two-phase gas-liquid flows under the action of periodic transverse forces. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. seriya: yaderno-reaktornye konstanty*. 2016;3;132–142. (In Russ.).
4. Terent'ev V.D. Sinev N.M. *Fundamentals of thermal and hydraulic calculations of ship nuclear reactors and steam generators*. Leningrad: Sudostroenie; 1967. 208 p. (In Russ.).
5. Selivanov N.V. Kuz'min S.I., Andris K.B., Evdashkin V.I. Heat transfer and hydrodynamics near the enclosing surfaces of tanks of offshore oil tankers in conditions of rolling. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2009;2;92–98. (In Russ.).
6. Titlov A. S., Ocheretyanyi Yu. A. Development of transport absorption refrigeration devices. *Kholodil'naya tekhnika = Refrigeration Engineering and Technology*. 2007; 52(5). DOI:10.15673/ret.v52i5.283. (In Russ.).

7. Kudinovich I.V. Substantiation of nuclear and radiation safety of a nuclear vessel under external influences. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*. 2019:1(387);131–142. (In Russ.).
8. Remez Yu.V. *The pitching of the ship*. Sudostroenie, Leningrad; 1983. (In Russ.).
9. Smirnov V.I., Shimanskii Yu.A. *Collection of works of Academician A. N. Krylov. The pitching of the ship, T. 11*. Moskva: Akad. nauk SSSR; 1951. (In Russ.).
10. Andreev V.V., Sataev A.A. Patent na poleznuyu model' № 202079 U1 Rossiiskaya Federatsiya, MPK G01M7/06. Dvukhploskostnoi stend dlya ispytaniy na kachku i sposob ego primeneniya dlya ispytaniya teplogidravlicheskih modelei: № 2020136082, zayavitel' FGBOU VO «Nizhegorodskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet im. R.E. Alekseeva» (NGTU). (In Russ.).
11. Mitenkov F.M., Motorov B.I. *Mechanisms of unstable processes in thermal and nuclear power engineering*. M.: Energoizdat; 1981. (In Russ.).
12. OpenCV Tutorial C++. Available by: <https://www.opencv-srf.com/p/introduction.html>.
13. Sataev A.A., Samoilov A.M., Blokhin A.A., Andreev V.V. System study of heat transfer processes under conditions of forced and natural circulation under external dynamic influence. *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. 2022:2–1(56);155–161. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сатаев Александр Александрович, кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки», Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: sancho_3685@mail.ru

ORCID: [0000-0003-2294-9877](https://orcid.org/0000-0003-2294-9877)

Андреев Вячеслав Викторович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Ядерные реакторы и энергетические установки», Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева, Нижний Новгород, Российская Федерация.

e-mail: vyach.andreev@mail.ru

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

Aleksandr A. Sataev, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Vyacheslav V. Andreev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 24.11.2022; одобрена после рецензирования 19.12.2022; принята к публикации 20.01.2023.

The article was submitted 24.11.2022; approved after reviewing 19.12.2022; accepted for publication 20.01.2023.