

УДК 621.039

**Александр Максимович Самойлов**

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», студент кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, Россия, Нижний Новгород, e-mail: samoilov15.03.1999@mail.ru

**Александр Александрович Сатаев**

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

**Алексей Алексеевич Блохин**

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», студент кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, Россия, Нижний Новгород, телефон (831) 436-80-29, e-mail: blokhin-2016@list.ru

**Вадим Владимирович Иванов**

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кандидат технических наук, доцент кафедры ядерных реакторов и энергетических установок, Россия, Нижний Новгород, e-mail: ivanovvntu@mail.ru

## **Разработка модели контура с естественной циркуляцией теплоносителя в условиях качки**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Основным требованием, предъявляемым к любой ядерной энергетической установке, является безопасность. На нее в процессе эксплуатации воздействуют различные факторы, исследование которых на реальных установках затруднительно ввиду больших экономических затрат. Эту проблему можно решить путем создания моделей-прототипов, на которых можно проводить исследования многих сложных процессов. Одним из таких процессов является динамическое воздействие на судовую установку. Наиболее остро такого рода воздействия влияют на естественную циркуляцию теплоносителя, которая служит одной из основных аварийных систем безопасности, а также является перспективным способом обеспечения движения в основном циркуляционном тракте. Цель данной работы – оценка влияния внешних динамических сил на процессы естественной циркуляции.

**Материалы и методы.** Для исследования был изготовлен стенд, моделирующий одну из петель циркуляции реакторной установки. Основной метод получения экспериментальных данных – температурное зондирование характерных участков трассы циркуляции. Построенная математическая модель, описывающая данный процесс, основана на уравнениях сохранения количества движения и теплового баланса.

**Результаты.** В соответствии с экспериментальными данными произведен расчет естественной циркуляции для статического и динамического режимов и построена математическая модель, описывающая данный процесс. Произведен сравнительный анализ результатов расчета статического и динамического режимов. Установлено, что снижение массового расхода в динамическом режиме составило около 10 % от статического режима, что подтверждает качественное влияние качки на естественную циркуляцию.

**Выводы.** Практическая значимость заключается в создании модели с учетом качки, а также ее верификации на исследовательском стенде. Установленное значительное влияние качки на массовый расход теплоносителя в случае естественной циркуляции, дополнительно подтвержденное косвенными признаками, говорит о необходимости проведения исследований естественной циркуляции в соответствии с разработанной моделью в условиях максимально возможной качки для действующих и проектируемых реакторных установок в целях обеспечения требуемой безопасности судовых установок.

**Ключевые слова:** естественная циркуляция теплоносителя, уравнения сохранения количества движения и теплового баланса, качка, математическая модель, судовая ядерная энергетическая установка

**Aleksandr Maksimovich Samoilo**

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Student of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Russia, Nizhniy Novgorod, e-mail: samoilov15.03.1999@mail.ru

**Aleksandr Aleksandrovich Sataev**

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Postgraduate Student of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Russia, Nizhniy Novgorod, telephone (831) 436-80-29, e-mail: sancho\_3685@mail.ru

**Aleksey Alexievich Blokhin**

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Student of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Russia, Nizhniy Novgorod, telephone (831) 436-80-29, e-mail: blokhin-2016@list.ru

**Vadim Vladimirovich Ivanov**

Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Nuclear Reactors and Power Plants Department, Russia, Nizhniy Novgorod, e-mail: ivanovvvnntu@mail.ru

## Development of circuit model with natural circulation of coolant under conditions of ship motion

### Abstract

**Background.** Safety is the key requirement to any nuclear power installation. Various factors affect safety during operation of the nuclear power installation. These factors are difficult to study due to the high economic costs. This problem can be solved by developing prototype models to conduct the research of many complex processes. Dynamic impact on the ship installation is one of these processes. The most significant impact is the impact on the natural circulation of the coolant, that is one of the basic emergency safety systems. Also, it is a promising way to ensure movement in the main circulation circuit. The purpose of this paper is to assess the influence of external dynamic forces on the processes of natural circulation.

**Materials and methods.** For the study a testing bench has been developed that simulates one of the circulation loops of the reactor unit. The basic method to obtain experimental data is temperature sounding of the specific sections of the circulation route. A mathematical model has been developed that describes this process. The model is based on the equations of momentum conservation and heat balance.

**Results.** In accordance with the experimental data, the calculation of natural circulation for static and dynamic modes has been carried out. A mathematical model to describe this process has been developed. A comparative analysis of the results of calculating the static and dynamic modes has been carried out. It is founded out that the decrease of mass flow rate is about 10 % as compared with the static regime. It confirms the qualitative effect of ship motion on natural circulation.

**Conclusions.** The practical significance of the research is the development of a model under conditions of ship motion, as well as verification of the model at the testing bench. The results show a significant effect of ship motion on the mass flow rate of the coolant in the case of natural circulation. Thus, to ensure the required safety of ship installations, it is recommended to conduct a study of natural circulation in accordance with the developed model under conditions of maximum possible ship motion

**Key words:** natural coolant circulation, equations of momentum conservation and heat balance, ship motion, mathematical model, ship nuclear power installation

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2021.6.019-026

**Введение.** Судовые ядерные энергетические установки (ЯЭУ) приобретают все большее значение с каждым годом. Тенденции к увеличению состава флота и модернизации действующих судов и кораблей усиливаются, а значит, и требования к безопасности и экономичности таких установок становятся выше<sup>1</sup>.

В настоящее время все больше внимания уделяется внедрению в состав атомных установок пассивных систем безопасности [1], которые не требуют вмешательства автоматики или оператора. Среди таких пассивных систем безопасности наиболее перспективной является естественная циркуляция [2].

Естественная циркуляция (ЕЦ) – это естественный физический процесс возникновения движения среды в замкнутом контуре за счет разности плотностей теплоно-

<sup>1</sup> ГОСТ 30630.1.7-2013 НД. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений.

сителя в опускной и подъемной ветвях контура циркуляции. Основными условиями существования установившегося режима ЕЦ являются: уменьшение плотности теплоносителя при его подогреве (либо за счет термического расширения, либо за счет кипения); расположение источника подвода тепла ниже теплообменника, охлаждающего теплоноситель. Для ЯЭУ это ядерный реактор и парогенератор соответственно. На действующих корабельных ЯЭУ ЕЦ используется для аварийного отвода тепла, но в перспективе ЕЦ можно использовать в качестве системы основного циркуляционного тракта [3], что позволит исключить из состава реакторной установки циркуляционные насосы.

Такое решение позволит уменьшить стоимость ЯЭУ, а учитывая специфику судовой энергетики, еще и позволит сильно снизить массогабаритные характеристики судна, что положительно скажется на маневровых свойствах.

Однако основным отличием корабельной установки от стационарной является специфика ее эксплуатации, а именно воздействие окружающей среды (качка) [4–5]. Сущность качки заключается в переменном периодическом движении судна под действием внешней силы, оказываемой со стороны воды. Особенно сильное негативное влияние при естественной циркуляции это оказывает на узлы ЯЭУ, в которых постоянно находятся большие запасы теплоносителя (реакторная установка, парогенератор и т.д.) [6]. Наиболее значимыми проблемами ЕЦ в случае качки являются: снижение массового расхода, неустойчивый режим работы и срыв циркуляции [7]. В связи с этим исследование влияния динамического воздействия на процессы естественной циркуляции является актуальным.

Наиболее известной установкой, которая использовалась для исследования влияния внешних динамических сил, является испытательный стенд американских ученых S5G (рис. 1).

Этот стенд состоит 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 [8].

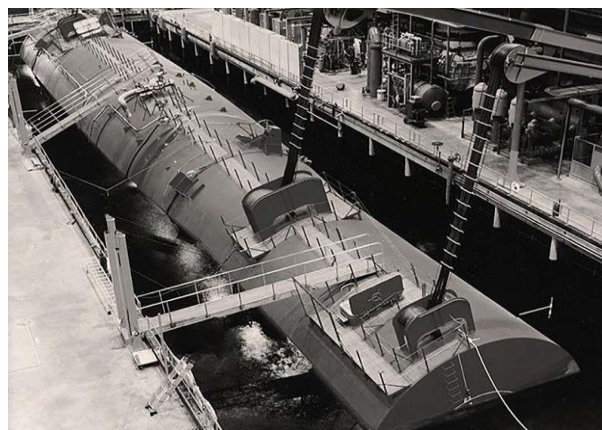


Рис. 1. Экспериментальный стенд S5G

Одной из самых известных корабельных установок с естественной циркуляцией является немецкое судно «Отто Ган». При динамических воздействиях амплитудой порядка  $15^\circ$  менялась мощность реакторной установки на величину  $\pm 3-5\%$  [9].

**Материалы и методы.** Для исследования воздействия качки на процессы естественной циркуляции была разработана и изготовлена качающаяся петлевая трасса циркуляции (рис. 2) [10].

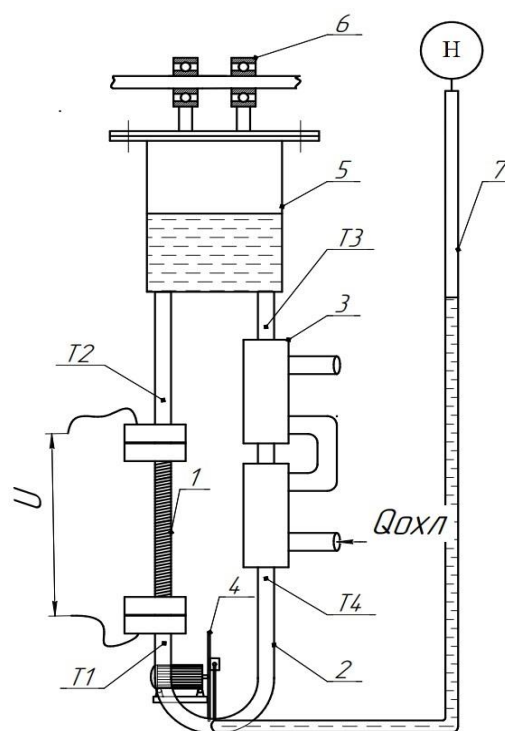


Рис. 2. Схема действующего стенда

Установка включает: подъемный (обогреваемый) участок 1; опускной участок 2; холодильники типа «труба в трубе» 3; механизм качания 4; накопительную ем-

кость 5. Стенд закреплен на подшипниковых опорах 6 на неподвижной оси для возможности осуществления гармонических колебаний в плоскости, перпендикулярной этой оси, по гармоническому закону

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

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

Эксперимент происходил следующим образом. Емкость и холодильники предварительно заполнялись водопроводной водой, затем подавалась мощность на нагреватель. После подачи мощности, спустя небольшое время, начинается процесс естественной циркуляции. По мере дальнейшего прогрева будет изменяться скоростной напор жидкости, что приводит к падению напора в нижней точке контура. Для осуществления колебательных движений стенд приводился в осцилляцию двигателем с кривошипно-шатунным механизмом.

Для получения данных использовались температурные датчики Т1–Т4, расположенные на входе и выходе подъемного и опускного каналов, а также пьезометрический столб 7 с возможностью подключения датчика давления (тензометр). Все данные выводятся автоматически с большой дискретизацией.

**Математическая модель.** В качестве основного параметра для определения влияния внешней динамической силы выбран массовый расход теплоносителя, так как он является одним из главных параметров естественной циркуляции и его изменение может быть косвенно оценено через температуры в соответствующих точках стенда. В качестве основы описания математической модели используется уравнение Бернулли:

$$\frac{\rho w^2}{2} + \rho gh + P = const, \quad (2)$$

где  $w$  – скорость среды, м/с;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $h$  – пьезометрическая высота, м;  $P$  – гидростатическое давление, Па.

В случае статического режима гидростатическое давление  $\rho gh$  будет постоянным, а в случае динамического –  $h$  будет изменяться по гармоническому закону:

$$h(t) = h_{\max} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right), \quad (3)$$

где  $h$  – высота, м;  $h_{\max}$  – амплитуда, м;  $T$  – период колебаний, с;  $t$  – текущее время, с.

В случае, когда период колебаний большой и амплитуда так же велика,  $h(t) = H_{\text{нив}}$  будет являться нивелирным напором.

Математическая модель дополняется рядом уравнений. Среди них закон сохранения количества движения, выраженный через напоры:

$$\frac{d}{d\tau}(L_{\text{общ}} M) = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} (H_{\text{ец}} - H_{\text{пот}}), \quad (4)$$

где  $H_{\text{пот}}$  – потеря напора в контуре [11];  $L_{\text{общ}}$  – полная длина трассы циркуляции, м;  $M$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $H_{\text{ец}}$  – движущий напор ЕЦ:

$$H_{\text{ец}} = \oint g\rho(x) dh(x) = -\beta g \oint t dh(x), \quad (5)$$

где  $h(x)$  – проекция контура на направление вектора силы тяжести, м.

При предварительной оценке потери напора в контуре можно оценить с помощью формулы Пуазейля, что обуславливается ламинарным режимом течения среды при ЕЦ:

$$H_{\text{пот}} = \frac{128 \cdot \nu M L_{\text{общ}}}{\pi d_{\text{вн}}^2}, \quad (6)$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $L_{\text{общ}}$  – полная длина трассы циркуляции, м;  $M$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубопровода, м.

Так как на стенде установлены термодатчики, появляется возможность оценить изменение температуры по длине трассы циркуляции. Такое распределение температуры теплоносителя по длине контура определяется процессами подвода и отвода тепла, а также величиной расхода теплоносителя в контуре.

Допуская, что потери тепла, связанные с теплоемкостью материалов, отсутствуют и что весь процесс может быть описан одной точкой для зоны, развитой ЕЦ, – ядром потока, можем получить дополнительные дифференциальные уравнения на основе уравнения теплового баланса:

$$\frac{di(\tau)}{d\tau} = N_{\text{вх}}(\tau) - N_{\text{вых}}(\tau), \quad (7)$$

где  $N_{\text{вх}}(\tau)$  и  $N_{\text{вых}}(\tau)$  – суммарная мощность тепловой энергии, подводимая и отводи-

мая от участка;  $\frac{di(\tau)}{d\tau}$  – скорость изменения

энтальпии элементарного звена в момент времени  $\tau$ .

Тогда дифференциальные уравнения для обогреваемого и охлаждаемого участков трассы примут вид:

$$l_1 \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} C_p \rho \frac{d\bar{t}_1}{d\tau} = N + MC_p t_1 - MC_p t_2; \quad (8)$$

$$l_3 \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4} C_p \rho \frac{d\bar{t}_3}{d\tau} = MC_p t_3 - MC_p t_4 - kF(\bar{t}_3 - t_{\text{охл}}), \quad (9)$$

где  $C_p$  – удельная изобарическая теплоемкость, Дж/кг·К;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $M$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $N$  – подводимая мощность к нагревательному участку, Вт;  $\bar{t}_1, \bar{t}_3$  – средние по участкам температуры воды, °С;  $t_1, t_2, t_3, t_4$  – температуры, соответствующие показаниям термомпар  $T_1, T_2, T_3, T_4$ , °С;  $l_1, l_3$  – длина нагревательного и охлаждающего участков, м;  $t_{\text{охл}}$  – температура охлаждаемой воды, °С;  $k$  – коэффициент теплопередачи через разделяющую стенку, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $F$  – площадь теплопередающей поверхности, м<sup>2</sup>.

Таким образом, подставив в уравнение сохранения количества движения (4) соответствующие напоры (5) и (6), получаем уравнения для изменения массового расхода, дополняя данное уравнение тепловым балансом для каждого участка трассы (8) и (9):

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2}{4L_{\text{общ}}} \left( -\frac{128 \cdot \nu M L_{\text{общ}}}{\pi d_{\text{вн}}^2} + \beta g \bar{t}_1 l_1 - \beta g \bar{t}_3 l_3 + \beta g t_1 h_1 - \beta g t_4 h_4 \right), \quad (10)$$

где  $M$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  $L_{\text{общ}}$  – общая длина участков трассы, м;  $l_1, l_3$  – длины нагревательного и охлаждающего участков, м;  $h_1, h_4$  – длины вертикальных участков за пределами обогреваемого и охлаждающего, м;  $\bar{t}_1, \bar{t}_3$  – средние температуры нагревательного и охлаждающего участков, °С;  $t_1, t_4$  – температуры, соответствующие показаниям термомпар  $T_1$  и  $T_2$ , °С.

### Область применения и начальные условия.

1. Очевидным является начальное условие

$$M(0) = 0. \quad (11)$$

2. Наиболее точное решение приведенных выше дифференциальных уравнений имеет место лишь спустя некоторое время с момента начала развития процесса естественной циркуляции, это связано с конвективным теплообменом от пристенных слоев к ядру потока в начале процесса. Причины описанного выше явления – затруднительность получения значений температуры в пристенном слое и невозможность определения потерь тепла в контуре. Таким образом, для начального участка косвенный расчет приводит к сильно завышенным значениям расхода среды («конвективный пик») (рис. 3).

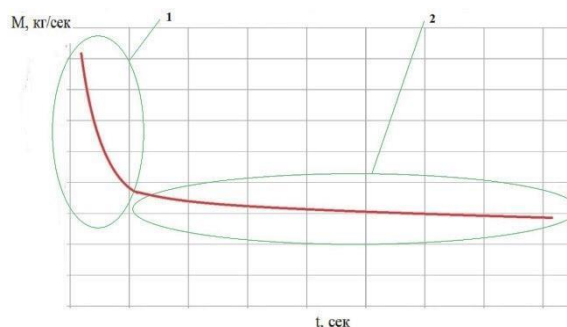


Рис. 3. Общий вид зависимости массового расхода ЕЦ от времени: 1 – зона конвективного теплообмена; 2 – зона ЕЦ

**Результаты.** Экспериментально удалось получить следующие температурные зависимости для статического (рис. 4) и динамического (рис. 5) режимов. С учетом полной аналогии начальных параметров для динамического режима прослеживается более высокая температура теплоносителя на выходе из нагревательного участка, что подтверждает описанные процессы, происходящие в реакторной установке, а также является косвенным признаком снижения массового расхода теплоносителя.

На основании анализа экспериментальных данных и результатов, полученных на математической модели, были построены графики зависимости массового расхода ЕЦ от времени для статического и динамического режимов (рис. 6).

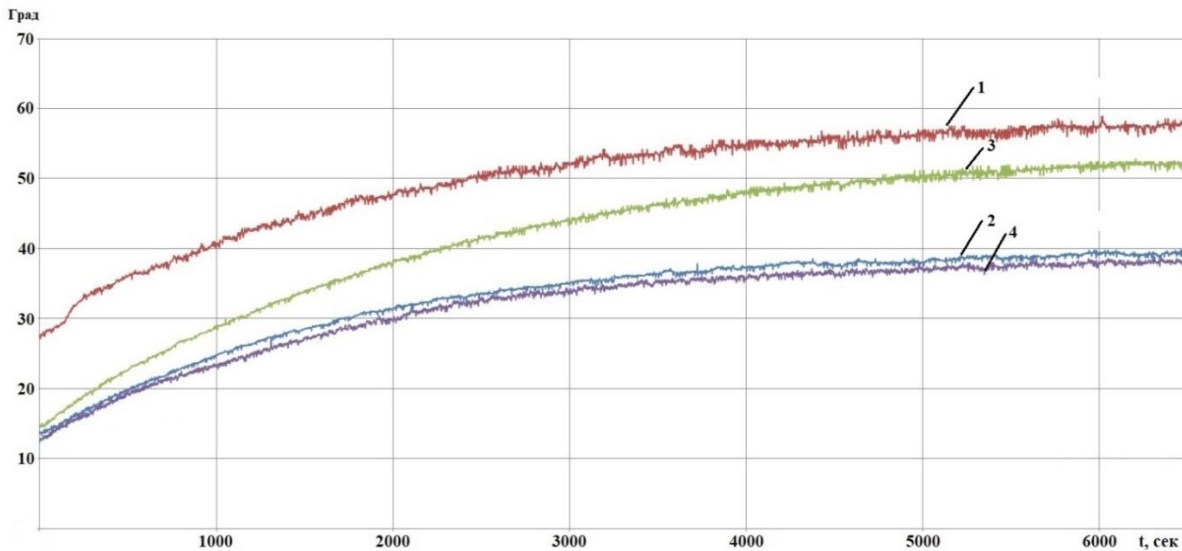


Рис. 4. Температурные характеристики соответствующих участков трассы циркуляции в статическом режиме: 1 – выход из нагревательного участка; 2 – вход в нагревательный участок; 3 – вход в опускной участок; 4 – выход из опускного участка

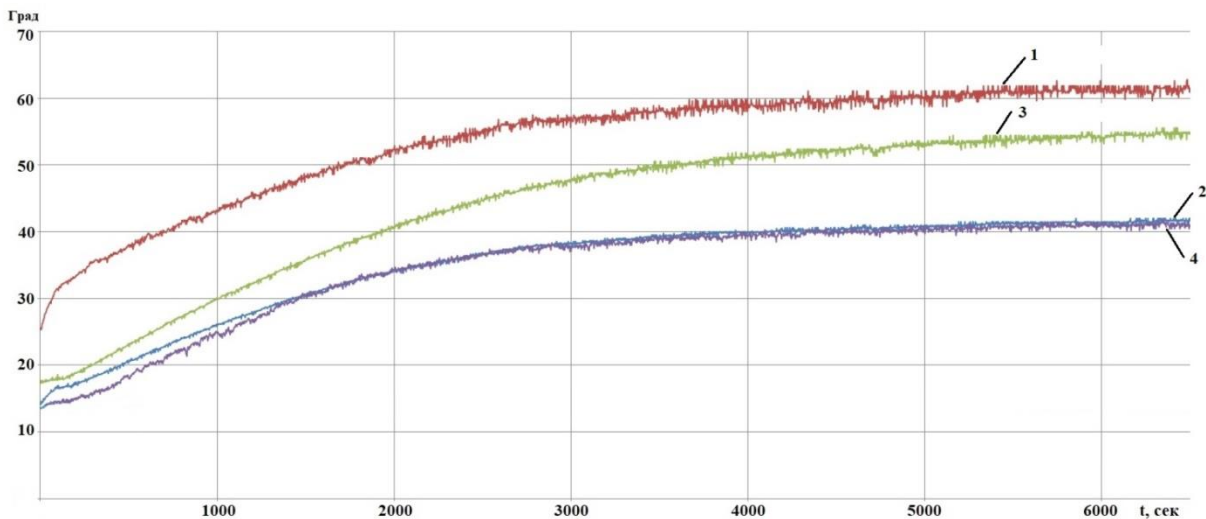


Рис. 5. Температурные характеристики соответствующих участков трассы циркуляции в динамическом режиме: 1 – выход из нагревательного участка; 2 – вход в нагревательный участок; 3 – вход в опускной участок; 4 – выход из опускного участка

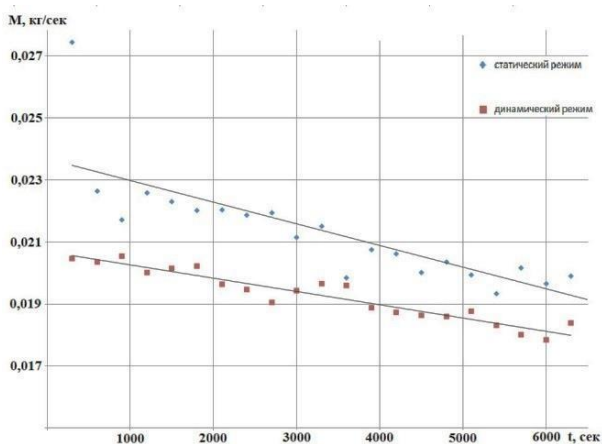


Рис. 6. Зависимости массового расхода ЕЦ от времени

Анализ полученных зависимостей показывает, что массовый расход среды в случае динамического воздействия в среднем оказался ниже, чем в случае статического режима, на величину порядка 10 %, что согласуется с описанными явлениями, полученными на экспериментальном стенде S5G. Изменение расхода среды обусловлено изменением гидравлического сопротивления контура циркуляции при качке.

Чтобы оценить амплитуду и период изменения массового расхода среды производилось усреднение по многим группам измерений (рис. 7).

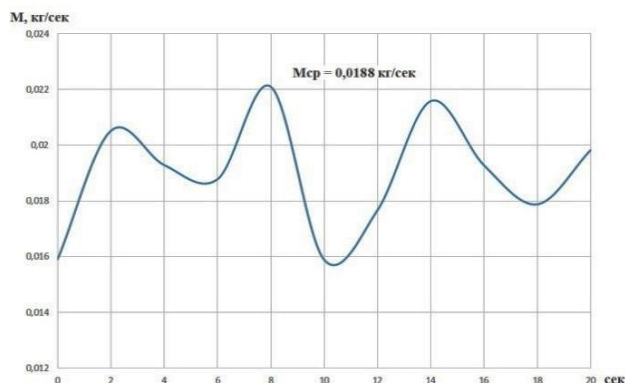


Рис. 7. Локальная группа измерений массового расхода

Для множества таких групп отклонение расхода от среднего значения составило приблизительно 10 % с периодом в 6 с, что соответствует периоду изменения температуры (рис. 8).

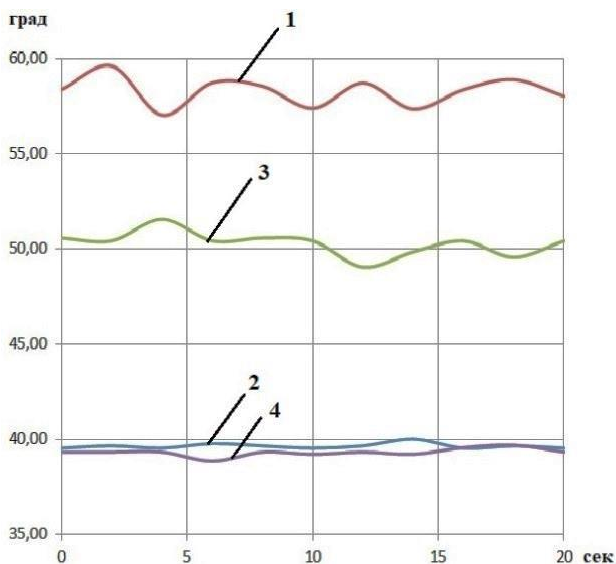


Рис. 8. Локальная группа измерений температур: 1 – выход из нагревательного участка; 2 – вход в нагревательный участок; 3 – вход в опускной участок; 4 – выход из опускного участка

**Выводы.** Исследование влияния динамического воздействия на процесс естественной циркуляции теплоносителя показало, что данное воздействие существенно. Снижение массового расхода, по сравнению со стационарным режимом, при переносе на реальную ЯЭУ может существенно сказаться на температуре тепловыделяющих элементов, что потенциально может создать опасную ситуацию. Это дает основание для дальнейшего, более детального изучения данного процесса –

уточнения математической модели для ее использования при проектировании реальной реакторной установки.

Полученные результаты (модели и методы для описания сложных процессов естественной циркуляции) позволят оценивать безопасность судовых ЯЭУ.

### Список литературы

1. **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.
2. **Митенков Ф.М., Моторов Б.И., Моторова Э.А.** Устойчивость естественного теплопереноса. – М.: Атомиздат, 1976. – 96 с.
3. **Дядик А.Н., Сурин С.Н.** Энергетика атомных судов. – СПб.: Судостроение, 2014. – 477 с.
4. **Митенков Ф.М., Моторов Б.И.** Механизмы неустойчивых процессов в тепловой и ядерной энергетике. – М.: Атомиздат, 1981. – 88 с.
5. **Кудинович И.В.** Обоснование ядерной и радиационной безопасности атомного судна при внешних воздействиях // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – Т. 1, № 387. – С. 131–142.
6. **Kral P.** Non-Standard Natural Circulation in Primary Circuit of VVER-440. Behavior of Horizontal Steam Generator in this Regime // Fifth International Seminar on Horizontal Steam Generators 20–22 March 2001. – Lappeenranta: Nuclear Research Institute Rez, 2001.
7. **Крамеров А.Я., Шевелев Я.В.** Инженерные расчеты ядерных реакторов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 740 с.
8. **Оценка** влияния внешней динамической силы на смешение неизотермических потоков в реакторной установке / А.А. Березин, А.А. Сатаев, О.В. Хвойнов, А.В. Дунцев // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 5. – С. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.005-011.
9. **Хлопник Н.С.** Морская атомная энергетика. – М.: Тривант, 2007. – 244 с.
10. **Логинова С.С.** Исследование устойчивости контура естественной циркуляции теплоносителя // Вестник науки и образования. – 2017. – № 7(31). – С. 5–7.
11. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа. – 7-е изд. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

### References

1. Blagoveshchenskiy, A.Ya., Bor, S.M., Mityukov, V.N. Korabel'nye yadernye energeticheskie

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

2. Mitenkov, F.M., Motorov, B.I., Motorova, E.A. *Ustoychivost' estestvennogo teplomassoperenosa* [Stability of natural heat and mass transfer]. Moscow: Atomizdat, 1976. 96 p.

3. Dyadik, A.N., Surin, S.N. *Energetika atomnykh sudov* [Power engineering of nuclear ships]. Saint-Petersburg: Sudostroenie, 2014. 477 p.

4. Mitenkov, F.M., Motorov, B.I. *Mekhanizmy neustoychivykh protsessov v teplovoy i yadernoy energetike* [Mechanisms of Unstable Processes in Thermal and Nuclear Power Engineering]. Moscow: Atomizdat, 1981. 88 p.

5. Kudinovich, I.V. *Obosnovanie yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti atomnogo sudna pri vneshnikh vozdeystviyakh* [Justification of nuclear and radiation safety of nuclear ship under external influences]. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo tsentra*, 2019, vol. 1, no. 387, pp. 131–142.

6. Kral, P. Non-Standard Natural Circulation in Primary Circuit of VVER-440. Behavior of Horizontal Steam Generator in this Regime. Fifth International Seminar on Horizontal Steam Generators 20–22 March 2001. Lappeenranta: Nuclear Research Institute Rez, 2001.

7. Kramerov, A.Ya., Shevelev, Ya.V. *Inzhenernye raschety yadernykh reaktorov* [Engineering calculations of nuclear reactors]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 740 p.

8. Berezin, A.A., Sataev, A.A., Khvoynov, O.V., Duntsev, A.V. Otsenka vliyaniya vneshney dinamicheskoy sily na smeshenie neizotermicheskikh potokov v reaktornoy ustanovke [Assessment of the influence of an external dynamic force on the mixing of non-isothermal flows in the reactor plant]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 5, pp. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.5.005-011.

9. Khlopnik, N.S. *Morskaya atomnaya energetika* [Marine nuclear power]. Moscow: Trovant, 2007. 244 p.

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

11. Loytsyanskiy, L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Mechanics of liquid and gas]. Moscow: Drofa, 2003. 840 p.