

УДК 532.517

Оценка влияния кризисного течения закрученного потока на теплогидравлическую эффективность судовых ядерных энергетических установок*

О.В. Митрофанова^{1,2}, О.А. Ивлев¹, Д.С. Уртенев¹, А.В. Федоринов¹

¹ *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, 123182, Россия*

² *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, 115409, Россия*
e-mail: omitr@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.03.2019

После доработки 03.04.2019

Принята к публикации 5.05.2019

Рассмотрены специфические отличия судовых ядерных энергетических установок от наземных АЭС с водо-водяными реакторами (тип ВВЭР). Определены направления научных исследований, актуальных для обоснования оптимальных проектных решений, обеспечивающих повышение эффективности и надежности судовых ядерных энергетических установок нового поколения. Проведены расчетно-теоретические исследования по моделированию процессов гидродинамики и теплообмена в каналах теплогидравлического тракта судовой паропроизводящей установки. Показано, что сложная геометрия криволинейных каналов теплогидравлического тракта паропроизводящей системы оказывает существенное влияние на эффективность работы транспортной ядерной энергетической установки. Предпринятые исследования, направленные на разработку принципов физико-математического моделирования сложных вихревых течений, необходимы для оптимизации конструктивных параметров элементов теплоэнергетического оборудования судовых ядерно-энергетических установок нового поколения в целях обеспечения повышенной безопасности и надежности их работы.

Ключевые слова: вихревой поток, парогенерирующий блок, теплоэнергетическая эффективность, киральность, завихренность, спирально-винтовое течение.

Введение

Многолетний опыт создания и эксплуатации ядерных энергетических установок (ЯЭУ) существенно расширяет базовую информацию для принятия оптимальных конструкторских решений при разработке новых проектов транспортных ЯЭУ, включая решение проблем надежности и безопасности.

Главной специфической особенностью ядерных энергетических установок с реакторами водо-водяного типа, к которым относятся транспортные ЯЭУ и, в частности, судовые (ледокольные) ЯЭУ, является то, что теплоноси-

тель ядерного реактора (вода под давлением) является одновременно замедлителем нейтронов. В силу этого обстоятельства система регулирования мощности реактора, а также системы обеспечения безопасности ЯЭУ находятся в прямой зависимости от состояния теплоносителя и динамики изменения теплогидравлических параметров всей ядерной энергетической установки как сложной гидромеханической системы.

В отличие от наземных атомных электрических станций (АЭС) при создании транспортных энергетических установок учитываются жесткие ограничения по габариту и весу, ремонтнопригодности, близость к размещенному оборудованию обслуживающего персонала, ограниченная его численность, специфические воздействия внешних факторов.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 19-08-00223-а) и Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор No. 02.а03.21.0005).

Одним из перспективных направлений в совершенствовании транспортной ядерной энергетики является разработка ЯЭУ с интегральной компоновкой оборудования. Это значительно сокращает количество трубопроводных систем, так как при локализации всего объема теплоносителя реакторной установки в одном корпусе необходимое оборудование первого контура также размещается в этом корпусе. За счет этого исключаются неотсекаемые участки на случай разгерметизации, резко уменьшается число корпусных конструкций арматуры, снимается опасность достижения критического значения флюенса нейтронов на корпус реактора.

Вместе с тем следует отметить, что в последнее время, несмотря на изменение концепции проектирования ЯЭУ для ледокольного флота, при разработке новых проектов наблюдается отрыв конструкторской деятельности от научных исследований. В связи с этим в целях повышения эффективности и надежности судовых ядерных энергетических установок нового поколения становится актуальным тот факт, что для принятия обоснованных технических решений необходимо проведение новых целенаправленных научных исследований в области гидродинамики и теплообмена.

Характерные особенности судовых ЯЭУ

К характерным особенностям судовых ЯЭУ, которые необходимо учитывать при проектировании и создании нового поколения ледоколов относятся следующие.

1) Ограничение тепловых параметров теплоносителя первого контура по его фазовому состоянию, влиянию на реактивность и флюенс нейтронов при действии температурного, плотностного и мощностного эффектов реактивности.

2) Изменение фазового состояния и режимов течения во втором контуре. Диапазон этих изменений охватывает переход от «холодной» однофазной жидкости (питательной воды) к состоянию насыщения, испарению и перегреву пара.

3) Для третьего контура циркуляции характерны высокие требования к чистоте по общему солесодержанию, содержанию ионов хлора, водородному показателю и примесям, так как этот контур необходим на судовых ЯЭУ для охлаждения активного оборудования первого контура.

4) Четвертый контур циркуляции с морской водой предназначен для охлаждения третьего контура.

На стационарных наземных АЭС с реакторами типа ВВЭР применяются только двухконтурные схемы.

Помимо перечисленных специфических особенностей транспортная ядерная энергетическая установка требует обеспечения высокой маневренности судна, что связано с необходимостью высокоскоростных изменений уровня мощности ядерного реактора на энергетических режимах, а также обеспечения возможности работы в режиме реверсивного движения судна.

Для нового поколения судовых ЯЭУ важнейшими проблемами, требующими проведения теплофизических исследований, являются проблемы совершенствования системы компенсации давления, системы очистки и расхолаживания первого контура, проблемы проектирования опреснительных установок для приготовления из забортной воды питательной воды второго контура, а также воды, используемой для жизнеобеспечения команды.

Должны быть усовершенствованы и движительные системы, что требует улучшения конструкции винтов и, в частности, использования винтов с регулируемым шагом.

Можно выделить несколько направлений теплофизических исследований в области гидродинамики и теплообмена в целях повышения эффективности и надежности судовых ядерных энергетических установок. Среди них особую актуальность имеют:

- проблема снижения теплогидравлической эффективности ЯЭУ при повышении мощности ядерного реактора [1, 2];

- исследование механизмов генерации акустических колебаний в теплогидравлическом контуре ЯЭУ [3, 4];

- взаимосвязь теплогидравлических процессов в системе компенсации давления с мощностным регулированием ядерного реактора;

- влияние вихревой структуризации течений [5] в сложных каналах многоконтурной циркуляции рабочих сред на безопасность и надежность работы судовых ЯЭУ [6, 7].

Некоторые результаты расчетно-теоретического анализа

Рассмотрим результаты одного из проводимых исследований, о котором говорилось выше.

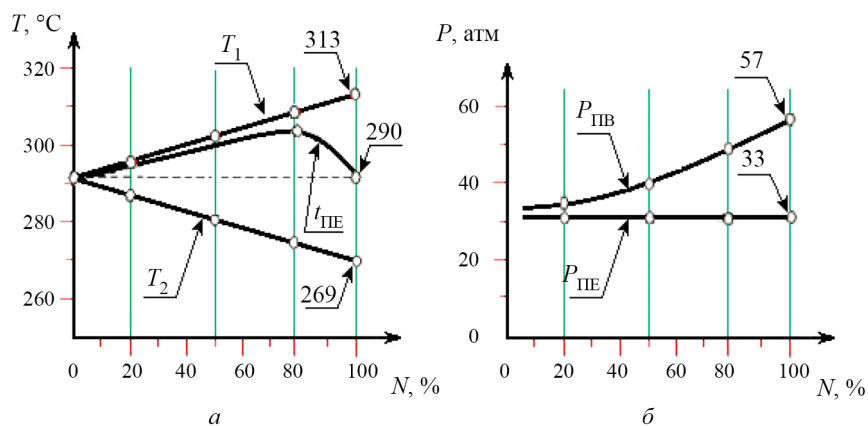


Рис. 1. Изменение теплогидравлических характеристик ППУ в режиме номинальной циркуляции при увеличении тепловой мощности N реактора: a – изменение температур теплоносителя на входе T_2 и выходе T_1 из реактора и перегретого пара $t_{\text{ПЕ}}$ в зависимости от уровня мощности ППУ; b – изменение давления питательной воды $P_{\text{ПВ}}$ и давления перегретого пара $P_{\text{ПЕ}}$ во втором контуре при изменении мощности N реактора

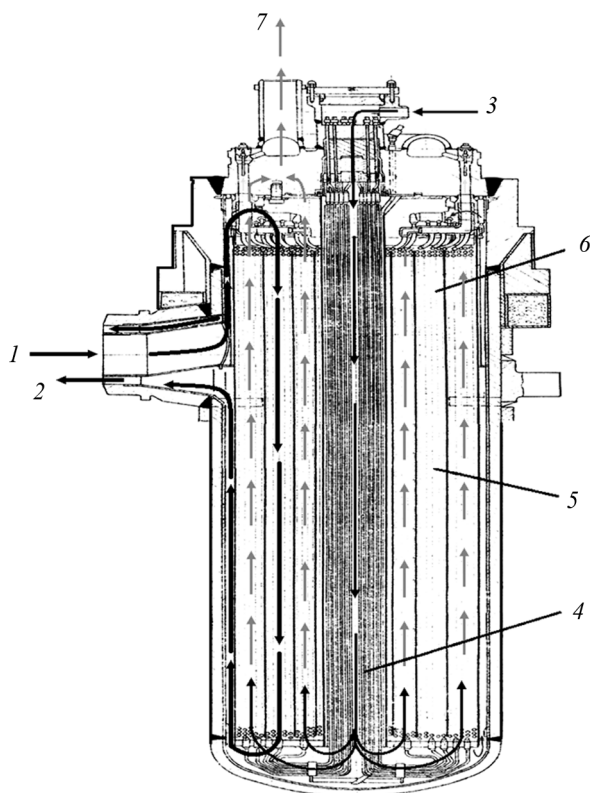


Рис. 2. Схема бухтового парогенератора: 1 – вход теплоносителя; 2 – выход теплоносителя; 3 – вход питательной воды; 4 – экономайзерный участок; 5 – испарительный участок; 6 – пароперегревательный участок; 7 – выход пара

На рис. 1, a представлены графики изменения температур теплоносителя первого контура на входе в парогенератор (ПГ) T_1 , выходе из ПГ T_2 и температуры перегретого пара $t_{\text{ПЕ}}$ в зависимости от уровня мощности паропроизводящей установки (ППУ), а на рис. 1, b – зависи-

мости давления на входе питательной воды $P_{\text{ПВ}}$ и давления перегретого пара $P_{\text{ПЕ}}$ во втором контуре. Приведенные на рис. 1 зависимости являются осредненными обобщающими зависимостями, полученными в результате обработки данных теплотехнических измерений в период эксплуатации ледокольных ППУ.

Зависимости, представленные на рис. 1, характеризуют упомянутый выше эффект снижения теплогидравлической эффективности судовой парогенерирующей установки при повышении мощности ядерного

реактора (ЯР). Если в интервале мощностей от 10 до 50% от номинальной ($N_{\text{ном}}$) температура перегретого пара растет линейно, следуя за повышением температуры теплоносителя первого контура на входе в ПГ, то при повышении мощности ядерного реактора от 50 до 100% $N_{\text{ном}}$ изменение температуры перегретого пара $t_{\text{ПЕ}}$ вначале приобретает нелинейный характер, а при дальнейшем увеличении мощности начинает снижаться (см. рис. 1, a). При этом разница между температурой греющего теплоносителя первого контура T_1 и температурой перегретого пара $t_{\text{ПЕ}}$ резко возрастает при приближении к 100% мощности. В то же время, как показывает рис. 1, b , увеличение мощности ядерного реактора выше 50% связано с постоянно увеличивающимся ростом давления питательной воды $P_{\text{ПВ}}$ на входе во второй контур при неизменном давлении перегретого пара $P_{\text{ПЕ}}$ на выходе из парогенератора, что приводит к росту гидравлических потерь.

Наблюдаемый негативный эффект снижения теплогидравлической эффективности судовой парогенерирующей установки, приводящей к уменьшению термического КПД ППУ и увеличению потерь давления при повышенной мощности реактора, как будет показано ниже, связан со сложной геометрией теплогидравлического тракта второго контура ЯЭУ. На рис. 2, 3 приведены схемы парогенератора бухтового типа, используемого в ледокольных ЯЭУ, и характерной геометрии одиночного канала парогенератора в области разворота потока от нисходящего к восходящему направлению движения.

Проведенные расчетно-аналитические исследования показали, что при столь сложной геометрии парогенерирующих каналов, имеющих не только трехмерную кривизну, т.е. изгибные участки с кривизной в различных плоскостях, змеевиковую геометрию, но и переменную площадь проходного сечения каналов, создаются условия, приводящие к крупномасштабному вихреобразованию и закрутке потока. При этом реализуется не только режим закрученного течения, но и эффект, который может быть назван кризисом закрученного потока.

Объяснение данного явления основано на представлениях, заложенных И.И. Новиковым [8] и связанных с открытием явления критического расхода при истечении закрученного потока [9]. В работах [10, 11] впервые было обосновано, что открытие [9] применимо и к замкнутым циркуляционным трактам.

В данной работе теоретические выводы подтверждаются непосредственными вычислительными экспериментами.

На рис. 4, 5 представлены результаты численных расчетов с использованием универсальной программной системы ANSYS и модели турбулентности $k-\omega$ -SST.

Рис. 4 иллюстрирует тот факт, что после прохождения двух вертикальных гибов при переходе из опускного к восходящему направлению движения питательной воды формиру-

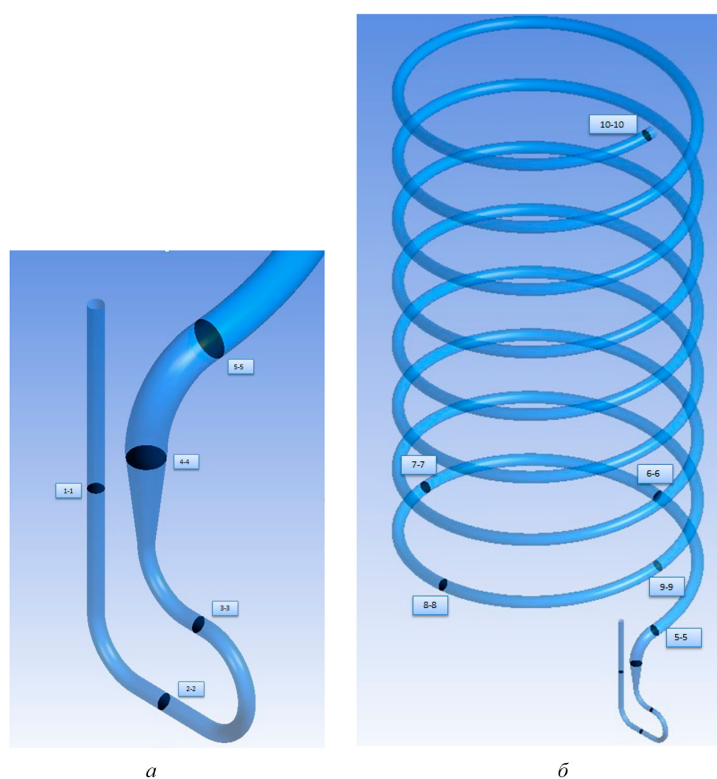


Рис. 3. Характерная геометрия парогенерирующего канала: *а* – увеличенное изображение входного участка; *б* – изображение полного участка

ется устойчивая вихревая структура потока, состоящая из двух спиральных вихрей равной интенсивности, но противоположной киральности (направления закрутки потока). Затем при переходе через расширяющуюся диффузорную часть канала, заканчивающуюся горизонтальным изгибом, течение приобретает одноподобную закрутку в масштабе всего канала.

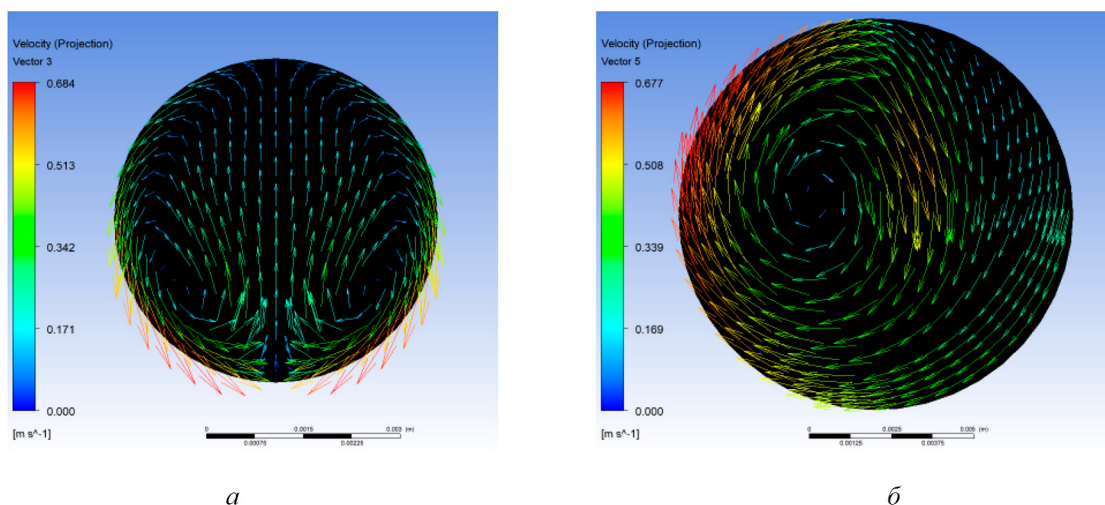


Рис. 4. Распределения тангенциальной проекции скорости потока на экономайзерном участке: *а* – в узком сечении после второго вертикальногогиба перед расширением; *б* – в широком сечении при переходе в змеевиковую часть (темное сечение на рис. 3)

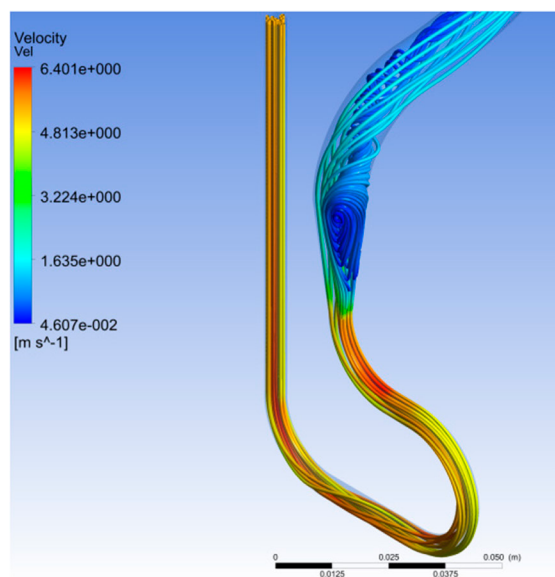
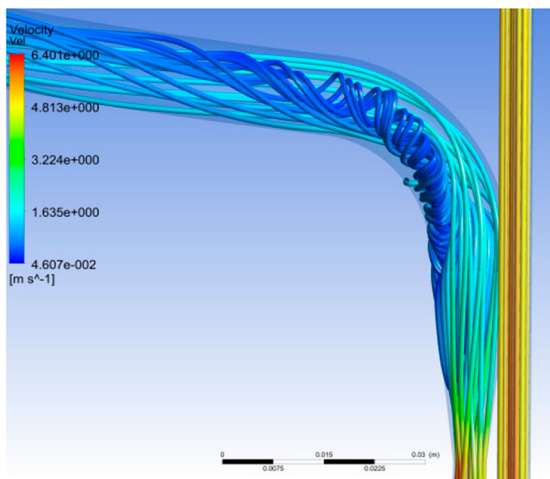
*a**б*

Рис. 5. Примеры расчета режима реверсивной циркуляции, приводящей к «запиранию» расхода рабочего тела: *a* – в зоне расширения канала; *б* – за горизонтальным гибом

Обоснованная в работе [10] модель трансформации вихря и полученные для ее замыкания аналитические соотношения, приведенные в [11], дают возможность определить условия, приводящие к «запиранию» расхода рабочего тела, связанного с наступлением кризиса закрученного течения [8, 9].

Физически явление кризиса закрученного потока выражается в образовании области реверсивного (возвратного) спирально-винтового течения, занимающего основную часть проходного сечения канала. Расчетные примеры, соответствующие рассматриваемому случаю течения в канале парогенератора бухтового типа, представлены на рис. 5.

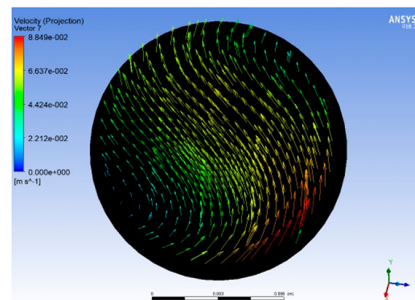
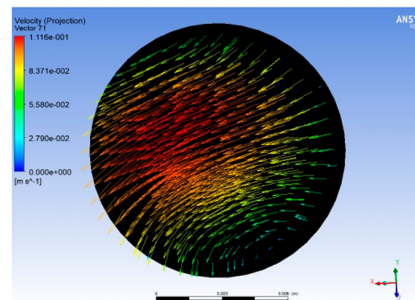
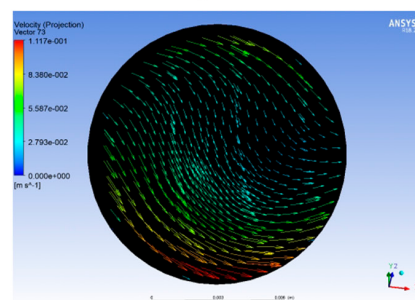
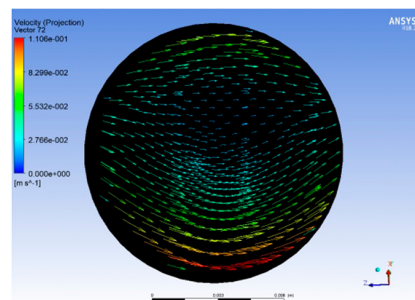
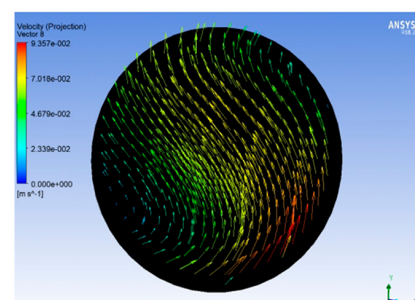
*a**б**в**г**д*

Рис. 6. Трансформация скоростного распределения на одном обороте змеевика в поперечных сечениях (рис. 5, б): *a* – 5-5 (0°); *б* – 6-6 (90°); *в* – 7-7 (180°); *г* – 8-8 (270°); *д* – 9-9 (360°)

Как было установлено при проведении вычислительных экспериментов, в зоне змеевикового участка парогенерирующего канала с постоянными шагом закрутки и радиусомгиба змеевика (см. рис. 5, б), начиная с сечения 5-5 и выше, формируются два устойчивых спиральных вихря с противоположной киральностью (правовинтовой и левовинтовой закруткой). Детальный анализ скоростного поля течения показал, что на одном витке змеевика эти вихри также делают полный поворот вокруг винтовой линии, соответствующей центру змеевикового канала.

На рис. 6 представлены иллюстрации изменения скоростного поля потока в поперечных сечениях 5-5 – 9-9 на одном обороте змеевика (см. рис. 5, б).

Ниже по течению на последующих оборотах змеевикового парогенерирующего канала картины распределения полей скорости, завихренности и температуры в поперечном сечении канала остаются подобными, о чем свидетельствует идентичность этих распределений в сечениях 9-9 и 10-10.

На рис. 7 представлены характерные распределения спиральности и температуры рабочего тела, взаимная конфигурация которых сохраняется на экономайзерном участке во всех сечениях змеевиковой части парогенерирующего канала.

Сделанные расчетные оценки показывают, что наличие в обогреваемом змеевиковом канале двух спиральных вихрей с различным направлением закрутки (различной киральностью) приводит к существенной стратификации температурного поля в поперечном сечении канала. Так, в рассмотренном случае при внутреннем диаметре змеевикового канала, равном 12 мм, разница температур в сечении составляла в среднем 20 °С.

Заключение

На основе рассмотрения конструктивных особенностей трубных систем парогенераторов судовых ЯЭУ выполнены расчетно-аналитические исследования по определению условий, приводящих к снижению теплогидравлической эффективности при повышении мощности ядерного реактора.

Проведенный расчетно-теоретический анализ и сравнение с данными мониторинга экс-

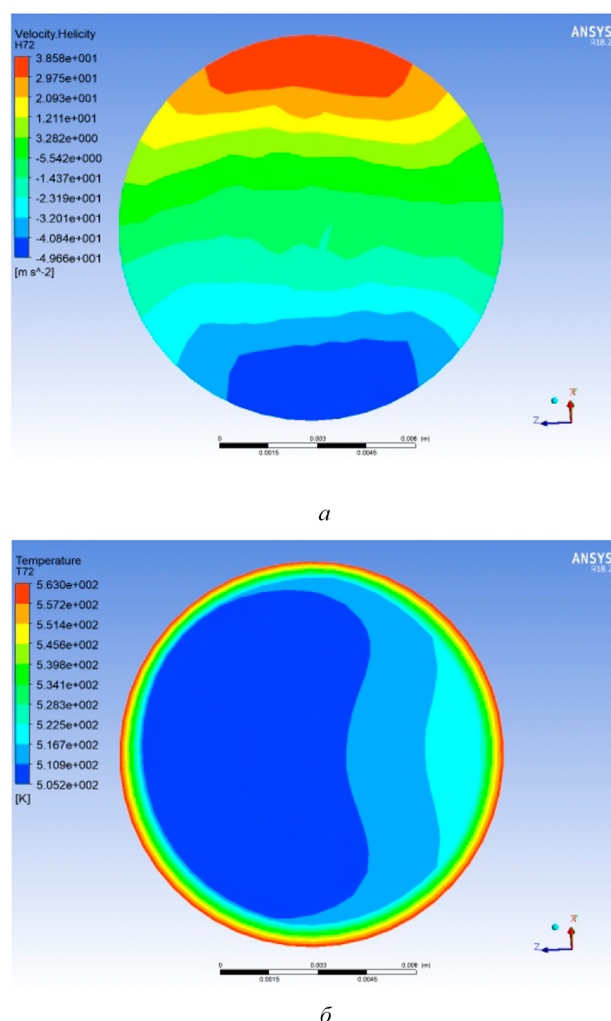


Рис. 7. Влияние спирально-винтовой вихревой структуры потока на распределение спиральности, характеризующее наличие спиральных вихрей противоположной киральности поля, (а) и на распределение поля температуры рабочего тела (б) в поперечном сечении змеевикового канала

плуатационных режимов судовых ЯЭУ показал, что эффект снижения теплогидравлической эффективности паропроизводящей установки при повышении тепловой мощности реактора напрямую связан с реализацией условий, соответствующих наступлению кризисного режима течения закрученного потока.

Выполненные исследования связаны с необходимостью обеспечения широкого диапазона оперативного изменения мощностных режимов эффективной и безопасной работы ледокольных ЯЭУ нового поколения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Федоринов А.В. О возможности применения сборок витых труб в парогенерирующих системах транспортных ядерных энерге-

- тических установок // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 5-6. С. 238–244.
2. **Mitrofanova O.V., Ivlev O.A., Urtenov D.S.** The effect of flow swirling on the safety and reliability of nuclear power installations of new generation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. V. 980. N1. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/980/1/012037
 3. **Митрофанова О.В., Поздеева И.Г.** Исследование механизма саморегулирования акустических колебаний в импактном закрученном течении // *Изв. РАН. МЖГ*. 2015. № 5. С. 54–63.
 4. **Поздеева И.Г., Митрофанова О.В.** К оценке энергетического баланса при переходе гидромеханической системы к режиму резонансной неустойчивости // *Тепловые процессы в технике*. 2017. Т. 9. № 6. С. 247–251.
 5. **Mitrofanova O.V.** On the structural similarity of stable forms of spiral-vortex motion // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. September 2017. V. 90. Iss. 5. P. 1119–1130.
 6. **Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш., Уртенов Д.С.** Исследование процессов вихреобразования в сложных каналах транспортных ядерных энергетических установок // *Тепловые процессы в технике*. 2018. Т. 10. № 7-8. С. 274–281.
 7. **Байрамуков А.Ш., Митрофанова О.В.** Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в переходных режимах работы судовых ядерно-энергетических установок // *Тепловые процессы в технике*. 2017. Т. 9. № 5. С. 211–216.
 8. **Новиков И.И.** Термодинамика. М.: Машиностроение, 1984. С. 316–366.
 9. **Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А.** Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке. Открытие № 389 внесено в Гос. реестр открытий 18.10.1990 г.
 10. **Митрофанова О.В.** Методы математического моделирования гидродинамики и теплообмена закрученных потоков в каналах с завихрителями. Дис... докт. техн. наук. Москва: МИФИ. 2002. 321 с.
 11. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерно-энергетических установок. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 288 с.

Assessment of the influence of the crisis flow of a swirling flow on the thermohydraulic efficiency of shipboard nuclear power installations

O.V. Mitrofanova^{1,2}, O.A. Ivlev¹, D.S. Urtenov¹, A.V. Fedorinov¹

¹ *National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, 123182, Russia*

² *National Research Nuclear University, Moscow, 115409, Russia*

e-mail: omitr@yandex.ru

The specific differences between ship nuclear power installations and ground-based nuclear power plants with water-water reactors (VVER type) are considered. The directions of scientific research relevant to the substantiation of optimal design solutions to improve the efficiency and reliability of the ship's nuclear power installations of the new generation are determined. Computational and theoretical studies on modeling of hydrodynamics and heat transfer processes in the channels of the thermal-hydraulic tract of the ship's steam-producing installation are carried out. It is shown that the complex geometry of the curvilinear channels of the thermal-hydraulic path of the steam generating system has a significant impact on the efficiency of the transport nuclear power installation.

The scientific and applied significance of the proposed research is associated with the need to provide a wide range of operational changes in the power modes of the effective and safe operation of icebreaking nuclear power installations. The present research aimed at developing the principles of physical and mathematical modeling of complex vortex flows is necessary to optimize the constructive parameters of the elements of thermal power equipment of ship nuclear power installations of the new generation in order to ensure increased safety and reliability of their operation.

Keywords: vortex flow, steam generating unit, heat and energy efficiency, chirality, vorticity, spiral-helix flow.

REFERENCES

1. **Mitrofanova O.V., Ivlev O.A., Fedorinov A.V.** O vozmozhnosti primeneniya sborok vitykh trub v parogeneriruyushhikh sistemakh transportnykh yadernykh energeticheskikh ustanovok [On the possibility of twisted tubes assemblies application in steam generating systems of transport nuclear power installations]. *Teploveye protsessy v tekhnike* – *Thermal Processes in Engineering*, 2018, vol. 10, no. 5-6, pp. 238–244. In Russ.
2. **Mitrofanova O.V., Ivlev O.A., Urtenov D.S.** The effect of flow swirling on the safety and reliability of nuclear power installations of new generation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, vol. 980, no. 1, p. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/980/1/012037
3. **Mitrofanova O.V., Pozdeeva I.G.** Investigation of the acoustic oscillation self-adjustment mechanism in imping-

- ing swirling flows. *Fluid Dynamics*, 2015, vol. 50, no. 5, pp. 646–654.
4. **Mitrofanova O.V., Pozdeeva I.G.** K otsenke energeticheskogo balansa pri perekhode gidromekhanicheskoy sistemy k rezhimu rezonansnoy neustojchivosti [Towards the assessment of energy balance in hydro-mechanical system under condition of transition to the mode of resonant instability]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2017, vol. 9, no. 6, pp. 247–251. In Russ.
 5. **Mitrofanova O.V.** On the structural similarity of stable forms of spiral-vortex motion. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 1119–1130.
 6. **Mitrofanova O.V., Bayramukov A.S., Urtenov D.S.** Issledovanie protsessov vikhreobrazovaniya v slozhnykh kanalakh transportnykh yadernykh energeticheskikh ustanovok [Studying eddy generation processes in complex circuits of transport nuclear power plants]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2018, vol. 10, no. 7-8, pp. 274–281. In Russ.
 7. **Bayramukov A.S., Mitrofanova O.V.** Modelirovanie protsessov gidrodinamiki i teploobmena v perekhodnykh rezhimakh raboty sudovykh yaderno-energeticheskikh ustanovok [Hydrodynamics and heat transfer simulations of marine nuclear power installations in transient modes]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2017, vol. 9, no. 5, pp. 211–216. In Russ.
 8. **Novikov I.I.** *Termodinamika* [Thermodynamics]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 593 p. In Russ.
 9. **Novikov I.I., Skobelkin V.I., Abramovich G.N., Klyachko L.A.** *Zakonomernost' raskhoda zhidkosti v zakruchennom potoke (ehffekt maksimal'nogo raskhoda zakruchennogo potoka zhidkosti)* [The pattern of flow rate in a swirling flow (the effect of the maximum flow rate of a swirling fluid flow)]. Opening No. 389 was entered in the State Register of Discoveries on October 18, 1990, at the request No. OT-11080 of February 27, 1985.
 10. **Mitrofanova O.V.** *Metody matematicheskogo modelirovaniya gidrodinamiki i teploobmena zakruchennykh potokov v kanalakh s zavikhritelyami* Diss. doct. fiz.-mat. nauk [Methods of mathematical modeling of hydrodynamics and heat exchange of swirling flows in channels with swirlers. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2002. 321 p. In Russ.
 11. **Mitrofanova O.V.** *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov v kanalakh yaderno-energeticheskikh ustanovok* [Hydrodynamics and heat exchange of the vortex fluid flow in the nuclear power plant circuits]. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 288 p. In Russ.