

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 7. С. 334–343
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 7, pp. 334–343

Научная статья
УДК 532.5:534.6:621.039:629.561.5

Исследование акустических и резонансных явлений в паропроизводящих системах судовых ЯЭУ

О.В. Митрофанова¹, Н.А. Старовойтов¹✉

¹Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия
omitr@yandex.ru, ✉starovoitovnik@yandex.ru

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния переходных режимов течения в трубных системах судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на возбуждение акустических колебаний, приводящих к резонансным эффектам, сопровождаемым явлением ограничения расхода, соответствующим кризису закрученного потока. Рассмотрены конструкции современных ЯЭУ с блочной и интегральной компоновкой. На примерах численного моделирования показано, что на некоторых участках теплогидравлического тракта судовых ЯЭУ могут возникать условия для формирования масштабных вихреобразований. Выполненные экспериментальные исследования позволили выявить условия развития резонансных эффектов при вихревой генерации акустических колебаний в диапазоне частот акустических стоячих волн (АСВ). Показано, что предельный расход среды соответствует условию реализации режима кризиса закрученного потока и является главным параметром, определяющим развитие резонансных явлений.

Ключевые слова: Судовые ядерные энергетические установки, гидродинамика, вихревые структуры, кризис закрученного потока, физико-математическое моделирование, экспериментальные исследования, акустические колебания, акустические стоячие волны, резонансные эффекты

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант №23-29-00373.

Для цитирования. Митрофанова О.В., Старовойтов Н.А. Исследование акустических и резонансных явлений в паропроизводящих системах судовых ЯЭУ // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 7. С. 334–343. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182789>

Original article

Study of acoustic and resonant phenomena in steam-generating systems of marine nuclear power plant

O.V. Mitrofanova¹✉, N.A. Starovoitov¹✉

¹National Research Nuclear University MEPHI, Moscow, Russia
✉omitr@yandex.ru, ✉starovoitovnik@yandex.ru

Abstract. The work is devoted to the study of the influence of transient flow regimes in pipe systems of marine nuclear power plants (NPP) on the excitation of acoustic oscillations leading to reso-

nance effects accompanied by the phenomenon of flow limitation corresponding to the swirling flow crisis. The designs of modern NPPs with block and integral layouts are considered. Numerical modeling examples show that conditions for the formation of large-scale vortex formations may arise in some sections of the thermal-hydraulic tract of marine NPPs. The experimental studies performed allowed us to identify the conditions for the development of resonance effects during vortex generation of acoustic oscillations in the frequency range of acoustic standing waves (ASW). It is shown that the maximum flow rate of the medium corresponds to the condition for the implementation of the swirling flow crisis mode and is the main parameter determining the development of resonance phenomena.

Keywords: Marine nuclear power plants, hydrodynamics, vortex structures, swirling flow crisis, physical and mathematical modeling, experimental studies, acoustic oscillations, acoustic standing waves, resonance effects

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-29-00373.

For citation. O.V. Mitrofanova, N.A. Starovoitov. Study of acoustic and resonant phenomena in steam-generating systems of marine nuclear power plant. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 7, pp. 334–343. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=182789>

Введение

Северный морской путь (СМП) является не только важным транспортным коридором между Азией и Европой, но и основой хозяйственного освоения арктического региона, который уже многие десятилетия притягивает внимание своими богатыми месторождениями углеводородных и минеральных ископаемых.

В работе [1] выделены основные тенденции развития арктического транспортного флота, связанные с использованием крупнотоннажных арктических транспортных судов и обеспечением судоходства во всей акватории СМП. Круглогодичное плавание в настоящее время реализуется только в юго-западной части Карского моря, тогда как судоходство по всему СМП возможно только в период с июля по ноябрь. Для обеспечения круглогодичного плавания в более тяжелых условиях по всей трассе СМП в работе [1] выдвигается ряд требований к проектированию новых судов: повышение ледового класса и ледопроеходимости, увеличение потребности в ледокольном обеспечении, оптимизация совместной работы ледокольного и транспортного флота. В связи с данными потребностями, а также увеличением ширины судов, участвующих в проводке ледокольным судном, особую важность приобретают вводимые в строй новые серийные судна типа «Арктика» с мощностью ядерной энергетической установки (ЯЭУ) 60 МВт.

Несмотря на смягчение ледовых условий в последние годы, климатические изменения приводят к новым трудностям в арктическом судоходстве. Так, в работе [2] раскрывается проблема формирования в новых условиях более тонких и непрочных льдов, склонных к наслоениям, формированию торосов и активной миграции под действием ветров и течений. Фиксировались неоднократные случаи, когда в летние месяцы льды перекрывают важные участки СМП, такие, как Карские Ворота, Югорский Шар, подходы к проливу Вилькицкого и в самом проливе, в проливе Лонга. Как следствие, потребность в использовании атомных ледоколов для навигации по СМП только возрастает. Проводка судном с ядерной энергетической установкой также может потребоваться в различных участках юго-западной части СМП, в устьях сибирских рек или даже в Финском заливе.

Современные судовые ЯЭУ с блочной и интегральной компоновкой

Современные судовые ядерные паропроизводящие установки (ЯППУ), такие, как КЛТ-40С и РИТМ-200, несмотря на существенные конструкционные различия, наследуют от своих более ранних предшественников многие хорошо отработанные технические решения. Одним из таких решений является термодинамический цикл с перегревом пара и промежуточной сепарацией между ступенями турбины, который использует большинство судовых ЯЭУ с водо-водя-

ными реакторами под давлением (ВВРД). В качестве важной особенности таких установок стоит отметить, что в судовых ЯЭУ не применяются регенеративные схемы отбора пара из турбины [3]. Они не эффективны на долевых режимах работы установки и только излишне усложняют конструкцию. Вместо этого применяется хорошо зарекомендовавшая себя простая тепловая схема подогрева питательной воды только в деаэраторе, где смешиваются конденсат, перегретый пар, отобранный из главного турбоагрегата, и влага из межкорпусного сепаратора турбины.

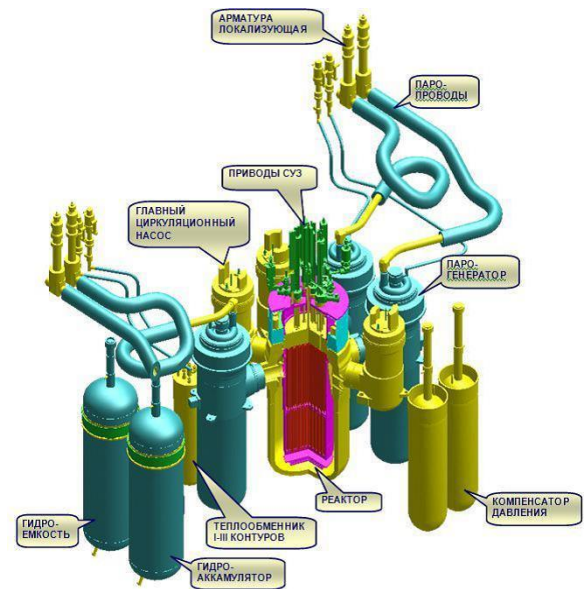
Блочная установка КЛТ-40С использует модификацию змеевикового парогенератора ПГ-28. Как и его предшествующие версии, парогенератор выполнен из лёгкого деформируемого титанового сплава ПТ 7М [4]. В целях обеспечения ремонтпригодности змеевик разделён на секции. В этом случае каждую секцию можно отключить от подачи питательной воды и забора перегретого пара независимо от остальных секций и изолировать повреждённый участок. Парогенераторы, также как и главные циркуляционные насосы первого контура, соединяются с корпусом реактора специальными короткими патрубками, выполненными по принципу труба в трубе [5].

Для моноблочной установки РИТМ-200 была разработана новая конструкция парогенератора [4, 6]. Аналогом одного парогенератора в блочной компоновке выступает парогенерирующая секция. Секция состоит из кассет, каждая кассета – из парогенерирующих модулей, которые уже являются сборками теплообменных трубок.

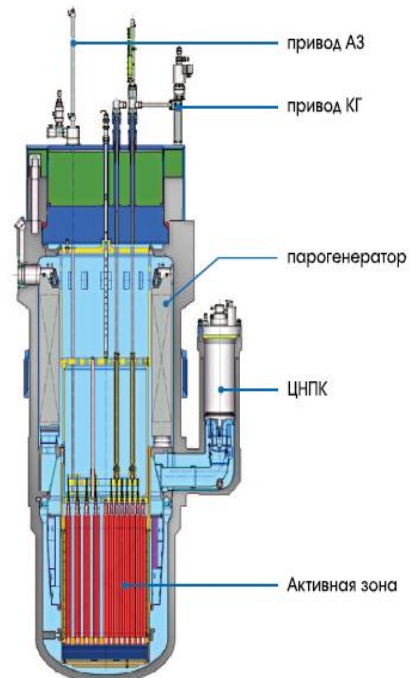
Несмотря на маленькое проходное сечение одного теплообменного канала, суммарная площадь проходного сечения в интегральной компоновочной схеме установки РИТМ-200 выросла в сравнении с ПГ-28 при почти такой же площади теплообменной поверхности и паропроизводительности, в результате чего скорость рабочего тела в канале уменьшилась на порядок. Как следствие сильного снижения скорости рабочего тела предполагаемое значение гидравлического сопротивления кассеты должно значительно уменьшиться в сравнении с сопротивлением змеевиковых каналов.

На рис. 1 представлены схемы ЯППУ блочной и интегральной компоновки. Можно отме-

тить существенное отличие в габаритах установок за счет изменения схемы компоновки: 12х15,8х12 м у блочной против 6х13,2х15,5 м у интегральной [5], что приводит к уменьшению занимаемого объёма в 2 раза.



а



б

Рис. 1. Различие ЯППУ с блочной и интегральной компоновкой: а – схема ЯЭУ с блочной компоновкой (КЛТ-40), б – схема интегральной компоновки ЯЭУ нового поколения РИТМ-200

Моделирование процессов сложной гидродинамики в трубопроводах систем судовых ЯЭУ

Процессы, протекающие в каналах сложной геометрии высокоэнергетических устройств, часто являются следствием кризисных явлений, возникающих при течении жидкости. Среди таких явлений особенную важность представляет собой кризис закрученного потока, открытие которого принадлежит академику РАН И.И. Новикову [7].

В монографии [8] И.И. Новиковым было приведено описание длинных центробежных волн на поверхности закрученного потока жидкости. Эти волны представляют собой малые возмущения, которые распространяются от источника по всей жидкости и аналогичны звуковым и гравитационным волнам, имеющим конечную скорость распространения. При достижении потоком скорости, равной значению скорости распространения длинных центробежных волн, возникает ситуация аналогичная достижению скорости звука потока, истекающего через сопло, когда дальнейшее уменьшение давления за соплом не будет передаваться внутрь канала и вызывать увеличение скорости вследствие того, что такое внешнее возмущение распространяется с той же скоростью, с какой движется текущая жидкость. В общем случае описанное явление «запирания» потока от внешнего воздействия называется кризисом течения, а скорость течения жидкости в момент кризиса – критической скоростью, равной скорости распространения малых возмущений в жидкости.

Ввиду функциональных и конструктивных особенностей судовых ЯЭУ, таких, как маневрирование мощности ядерных реакторов и жёстких ограничений на габариты, для них характерны широкий диапазон рабочих параметров и сложная геометрия каналов теплогидравлического тракта. Это может приводить к повышенной вероятности возникновения кризиса закрученного потока.

В работах [9] и [10] представлены результаты многолетних исследований формирования устойчивых вихревых структур в трубных системах блочных и интегральных судовых ЯЭУ. Согласно проведённым расчётам, для установки РИТМ-200 появления дисбаланса расхода воды

на 12,5 % в петлевых трубопроводах уже достаточно для формирования мощного вихря под активной зоной, способного затруднить поступление теплоносителя в самую энергонапряжённую область активной зоны.

Иллюстрации, представленные на рис. 2, показывают, что в зонах диффузорного расширения каналов формируются вихреобразования с реверсивным движением закрученного потока, блокирующие большую часть проходного сечения каналов – так называемые «вихревые пробки» [10].

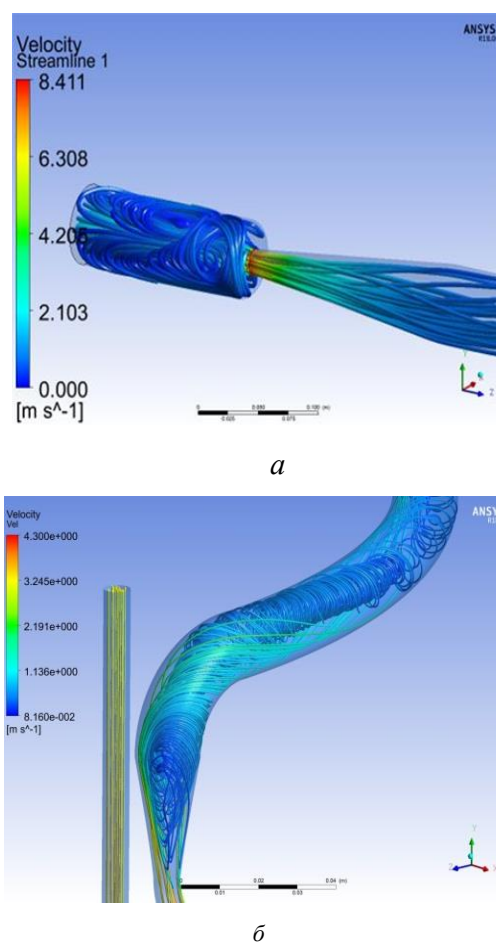


Рис. 2. Виды вихревых пробок при реализации условий, приводящих к кризису закрученного потока в зонах диффузорного расширения проходного сечения каналов: *a* – в трубной системе компенсатора давления, *б* – в змеевиковом парогенерирующем канале

Как показали результаты расчётов, представленные в работе [11], аналогичное явление возникновения реверсивного закрученного течения наблюдается и в парогенерирующем канале установки РИТМ-200. Численное моделирова-

ние позволило выявить зоны течения во внутреннем пространстве канала, где могут выполняться условия реализации кризиса закрученного потока и формирования устойчивых вихреобразований. В качестве примера на рис. 3 представлена структура течения на входе в парогенерирующий канал РИТМ-200.

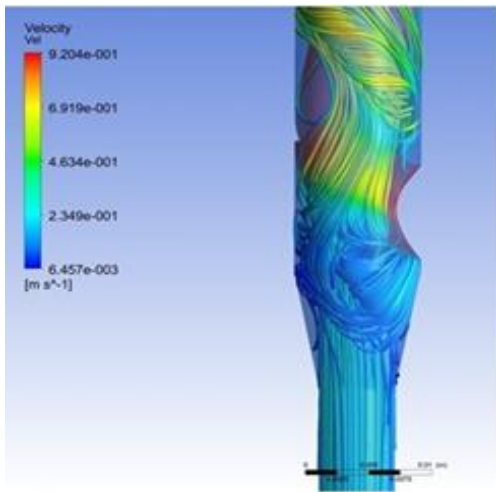


Рис. 3. Объёмное распределение линий тока скорости в теплообменном канале с внутренней спирально навитой трубой [11]

Проводилось обоснование корректности результатов численного моделирования с использованием расчётного пакета ANSYS CFX и модели турбулентности Shear Stress Transport (k- ω SST). Был произведён расчёт перемещения по активной зоне «горячего пятна» в распределении температуры при отключении одного парогенератора. Сравнение с экспериментом, описанным в работе [12], продемонстрировало хорошее соответствие между расчётными и экспериментальными данными.

Формирование устойчивых вихревых структур в результате кризиса течения приводит к сильным пульсациям давления и возникновению акустических колебаний. Дополнительную опасность с точки зрения виброрезонансной устойчивости представляет генерация акустических колебаний с частотным спектром, совпадающим с частотами собственных колебаний конструкций – акустическими стоячими волнами (АСВ). Таким образом, возникновение резонансных колебаний, обусловленных сложной гидродинамикой потока, может приводить к росту вибраций, механическим повреждениям и, в конечном итоге, к разрушению конструкций.

Методы оценки частот собственных колебаний и акустических стоячих волн

В работах К.Н. Проскурякова с соавторами [13 – 17] обоснована возможность применения метода электроакустической аналогии для расчёта частот собственных колебаний каналов сложной геометрии, заполненных жидкостью. Согласно разработанному методу, принимается, что полное давление в канале представляет из себя сумму среднестатистического давления и добавочного давления, возникающего вследствие прохождения акустических волн по каналу. Пульсации описываются объёмным расходом среды и добавочным давлением. Система расчётных уравнений, получаемая из условий непрерывности и сохранения количества движения среды, в таком рассмотрении будет аналогична системе телеграфных уравнений, описывающих распространение электрического тока вдоль кабеля. Ввиду единства дифференциальных уравнений, описывающих акустические и электрические системы, уместно применение аналогии между параметрами этих систем и единство подходов к расчёту их характеристик.

В случае сложных систем, таких, как трубные системы ЯППУ, для расчёта акустических характеристик требуется произвести разбиение на простые в расчётном плане участки, не имеющие на своем протяжении существенных акустических неоднородностей и переменных теплофизических свойств колеблющейся среды. Акустические неоднородности, ограничивающие элементарные участки, соответствуют местным гидравлическим сопротивлениям, и чем выше потери давления на этом местном сопротивлении, тем более выражено отражение, которое испытывает волна, падающая на такие неоднородности.

Помимо деления конструкции по характерным геометрическим особенностям, в теплообменниках возможно разделение тракта на зоны, отличающиеся по теплофизическим свойствам колеблющейся среды. В парогенераторе ПГ-28 участок тракта от питательных коллекторов до трубок подвода теплоизолирован, в результате чего параметры среды в этой зоне практически постоянны и соответствуют параметрам питательной воды. Участки для расчёта частот АСВ в этой зоне разделяются локальными гидравлическими сопротивлениями, такими, как гибы

и резкие изменения площади проходного сечения канала. В паровом коллекторе также практически не изменяются параметры среды, и он рассчитывается аналогичным образом.

На рис. 4 *а* представлено разделение ПГ-28 на зоны с постоянными и переменными теплофизическими параметрами, а на рис. 4 *б* – частичное разбиение опускной зоны подвода рабочего тела на участки для расчёта частот акустических стоячих волн. Участки разделены по принципу больших локальных гидравлических сопротивлений, таких, как переход из питательного коллектора (1-1) в дроссельные ставки малого диаметра (1-2) или переход из дроссельных вставок в трубки опускного участка (1-3), которые тоже отличаются площадью проходного сечения. В то же время выделенные на рис. 4 *б* участки также могут быть разделены на еще более элементарные по местам гибов.

Основной перепад температуры, а значит плотности и скорости звука среды, приходится на змеевик, который отмечен цифрой 2 на рис. 4 *а*. В змеевике нет локальных гидравлических сопротивлений, обусловленных геометрией, но его можно условно разделить на расчётные участки по изменению температуры и плотности среды: экономайзерный, испарительный и пароперегревательный участки, которые в свою очередь могут быть поделены на участки, достаточно малые, чтобы изменением теплофизических свойств внутри этих участков можно было пренебречь

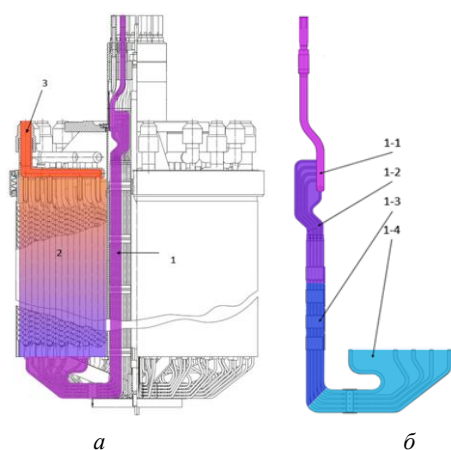


Рис. 4. Разбиение конструкции парогенератора для расчёта частот АСВ: *а* – схема ПГ-28 с выделенными зонами разбиения: 1 – опускная зона подвода питательной воды, 2 – трубки змеевика, 3 – паровой коллектор; *б* – разбиение на подзоны опускного участка подвода: 1-1 – питательный коллектор, 1-2 – дроссельные вставки, 1-3 – прямой опускной участок, 1-4 – трубки подвода

Ввиду большой длины трубок змеевика в конструкции ПГ-28 (2 на рис. 4 *а*) в них могут формироваться АСВ с низкими частотами. Так, расчёт, выполненный для модификации установки КЛТ-40С, применяющейся на плавучей атомной теплоэлектростанции (ПАТЭС) «Академик Ломоносов», показывает возможность формирования АСВ с частотами 3-5 Гц в зависимости от режима работы установки. Следует отметить, что четвёртая гармоника этой АСВ достаточно близка к главной частоте циркуляционного насоса, что может приводить к виброрезонансной неустойчивости.

В работе [17] было доказано, что акустическое поле системы компенсации давления (КД) АЭС с ВВЭР-1000, образованное стоячими волнами, демпфирует акустическое поле остального оборудования первого контура АЭС. Это показывает, что метод электроакустической аналогии можно применять не только для оценок собственных частот колебаний, но и для расчёта технических решений по гашению или отстройке резонансных частот. Использование электроакустической аналогии для расчёта гасителей колебаний в гидравлических системах также подробно рассмотрено в монографии [18].

Объяснение физического механизма влияния сложной геометрии каналов на генерацию акустических колебаний определённого частотного диапазона получено на основе исследований, описанных в работах [9 – 11, 19 – 21]. Результаты проведённых экспериментально-теоретических исследований говорят о том, что формирование устойчивых вихреобразований обусловлено пространственной кривизной и переменностью проходного сечения сложных каналов. Взаимодействие акустических стоячих волн и устойчивых вихревых структур при вынужденной циркуляции жидкости может приобретать автоколебательный характер, что должно приводить к резонансным явлениям.

Экспериментальные исследования процессов развития резонансных явлений

Взаимосвязь вихреобразований, возникающих в результате установления кризиса закрученного потока с резонансным эффектом от возбуждения АСВ была исследована на примере импактного закрученного течения [20].

В результате предпринятых в настоящей работе экспериментов на установке, описанной в ра-

боте [21], было обнаружено, что вихревая камера работает в нескольких виброакустических режимах. Эти режимы проявлялись при разных уровнях нагнетаемого давления на входе в вихревую камеру и отличались интенсивностью акустических колебаний и характерными особенностями акустических спектров.

График изменения расхода осушенного воздуха в процессе кризисного истечения закрученного потока показан на рис. 5. На приведённой кривой отмечены характерные моменты времени: I – в начале развития кризиса закрученного потока и II – при наблюдении резонансного эффекта. Соответствующие спектры акустических колебаний представлены на рис. 6 а и 6 б.

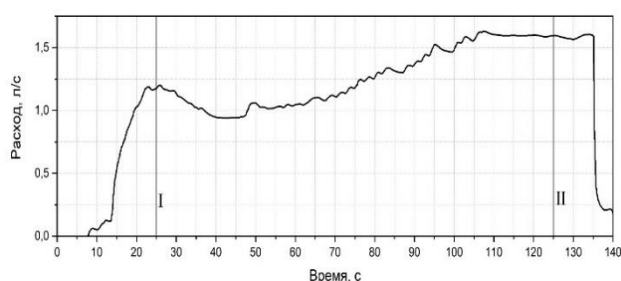
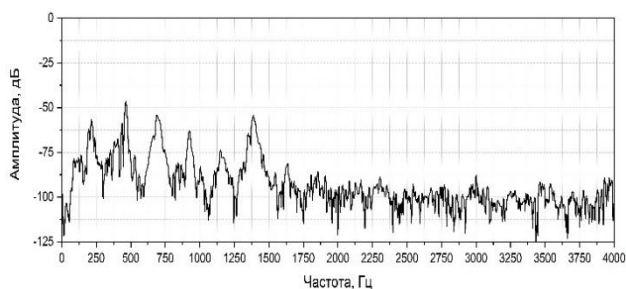
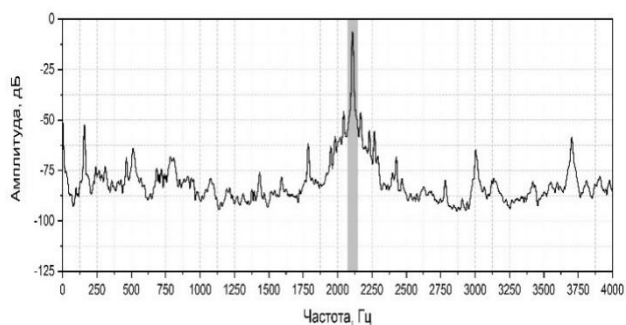


Рис. 5. График изменения расхода через вихревую камеру в процессе развития кризиса закрученного потока



а



б

Рис. 6. Акустические спектры а и б, соответствующие отмеченным на рис. 5 моментам времени I-II

Как показывает рис. 5, при повышении давления на входе в вихревую камеру на протяжении первых 25 с расход сжатого воздуха резко увеличивался до значения 1,2 л/с. После временной отметки 25 с, несмотря на дальнейшее повышение давления на входе в вихревую камеру, было зафиксировано падение расхода, продолжавшееся вплоть до момента 50 с. Затем, как можно наблюдать на рис. 5, до момента времени 110 с расход вновь увеличивался. Как показали эксперименты с применением методики визуализации вихревого следа, временное падение расхода связано с формированием устойчивой вихревой структуры потока.

На спектре, показанном на рис. 6 а, выделяются преимущественно низкочастотные пики амплитуды акустических колебаний в области от 0 до 1500 Гц, обладающие малой интенсивностью. В работе [21] ранее было показано, что появление таких пиков при истечении импульсного закрученного потока соответствует зарегистрированным в экспериментах фактам формирования устойчивых спирально-вихревых структур.

Дальнейшее повышение разницы давлений привело к наступлению резонансного режима в момент 125 с, отмеченный как II на рис. 5. На соответствующем спектре рис. 6 б отчётливо наблюдается резонансный пик на частоте 2109 Гц. Для использованной в настоящих экспериментах вихревой камеры диаметром 10 см при скорости звука в воздухе 345,8 м/с (при температуре 25 °С) расчётное значение частоты поперечных колебаний составило $f_{cob} = 2250$ Гц, что очень близко к полученному экспериментальному значению резонансного пика.

Важным результатом проведённого исследования является подтверждение теоретически полученного вывода о формировании крупномасштабного тороидального вихря с двойным вращением [19]. Иллюстрация, представленная на рис. 6 б, демонстрирует пик амплитуды акустических колебаний на частоте 160 Гц, соответствующий частоте меридионального вращения тороидального вихря. Слабо выраженный пик амплитуды на частоте 160 Гц можно различить и на спектре рис. 6 а при начальном формировании структуры крупномасштабного вихревого движения.

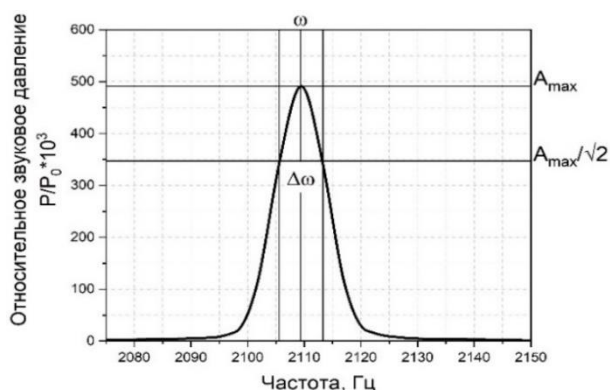


Рис. 7. Увеличенный фрагмент резонансного пика на спектре акустических колебаний (рис. 6 б) с амплитудой, пересчитанной в единицах относительного звукового давления, P – звуковое давление, P_0 – опорное звуковое давление, A_{max} – пиковая амплитуда, ω – пиковая частота, $\Delta\omega$ – ширина резонансного пика

На приведённом на рис. 7 увеличенном фрагменте акустического спектра, выделенном цветом на рис. 6 б, отмечены пиковая частота $\omega = 2109$ Гц и ширина резонанса $\Delta\omega = 7,7$ Гц. На основе этих параметров была выполнена оценка диссипативных характеристик системы: добротность составила $Q = 274$ и коэффициент затухания $\gamma = 3,85$ Гц. Добротность, которая оценивается как $Q = \omega / \Delta\omega$, показывает во сколько раз накопленная колеблющейся системой энергия превосходит диссипативные потери за один период колебаний. Колеблющаяся система в данном исследовании состоит из устойчивого вихреобразования и объёма вихревой камеры. Высокое значение добротности в рассматриваемом случае свидетельствует о значительном акустическом эффекте, к которому приводит формирование устойчивых вихревых структур с частотами вращения, близкими к частотам собственных колебаний механических систем. Совпадение частот приводит к резонансу в гидромеханической системе.

В начале процесса вихревой структуризации потока при приближении к предельной расходной скорости закрученного потока генерируемые в потоке акустические колебания имеют небольшую амплитуду. Так, пики амплитудно-частотного спектра на рис. 6 а, указывающие на начало формирования крупномасштабной вихревой структуры потока, несильно превосходят уровень шума и, не обладая достаточной энергией, не приводят к звуковому эффекту. Однако при повышении давления на входе в вихревую

камеру по достижении определенного уровня энергия, вносимая потоком воздуха в рабочий участок, становится достаточной, чтобы возбудить АСВ в объёме вихревой камеры. Последующее взаимодействие вихревой структуры и АСВ имеет характер автоколебательного процесса. В результате амплитуда колебаний на частоте, близкой к собственной частоте АСВ, резко возрастает на несколько порядков, как это продемонстрировано на спектре, представленном на рис. 6 б.

Таким образом, важным диагностическим фактором с точки зрения предотвращения опасных виброшумовых режимов является изменение зависимости расхода воздуха, пропускаемого через рабочий участок, от нагнетаемого перепада давления. По достижении предельного расхода дальнейшее увеличение давления на входе в рабочий участок не приводит к изменению расхода, а избыточная энергия расходуется не на прокачку среды, а на структуризацию течения, генерацию звуковых колебаний и, по достижении резонансного режима, возбуждение собственных колебаний конструкции. А значит, достижение предельного расхода уже само по себе является диагностическим критерием, указывающим на дальнейшее развитие резонансных эффектов при продолжающемся увеличении давления на входе.

Заключение

Судовые ЯЭУ имеют ряд особенностей по сравнению с наземными АЭС. Жёсткие ограничения на габариты и необходимость работы на переменной мощности приводят к сложной геометрии трубных систем и энергооборудования и широким диапазонам изменения рабочих параметров. Проведённые исследования показали, что эти факторы могут являться причиной повышения вероятности реализации кризиса закрученного потока и формирования устойчивых вихревых структур.

Расчётный анализ с применением метода электроакустической аналогии показал, что элементы конструкции парогенераторов, геометрия которых в определённых переходных режимах работы ЯЭУ способствует формированию устойчивых вихревых структур, могут приводить к возбуждению собственных колебаний – акустических стоячих волн в низкочастотном диапазоне,

гармоники которых перекрываются с частотами работы питательных насосов.

На примере исследования импактного закрученного течения рассмотрено взаимодействие устойчивых вихревых структур и собственных колебаний гидромеханической системы. Показано, что развитие кризиса закрученного потока приводит к вихревой структуризации течения, а впоследствии и возбуждению резонансных колебаний высокой интенсивности.

Установлено, что изменение зависимости расхода прокачиваемой среды от нагнетаемого давления является важным диагностическим фактором. Отсутствие изменения расхода в ответ на увеличение нагнетаемого давления говорит о наступлении кризиса закрученного потока и опасности развития резонансных эффектов.

Список источников

1. Штрек А.А. Современные тенденции и вызовы при проектировании арктических транспортных судов // Российская Арктика. 2019. №5. С. 30–35. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10054
2. Фильчук К.В., Коробов В.Б., Юлин А.В., Шевелева Т.В. Влияние наблюдаемых изменений климатических условий на хозяйственную деятельность в морях Российской Арктики // Российская Арктика. 2022. № 17. С. 21-33. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-21-33
3. Беляев В.М., Вешняков К.Б., Вешняков В.Г., Кудинич И.В., Пахомов А.Н., Рязанцева О.В., Сутеева А.Ж., Чесноков Ю.Н., Шкляров Н.В. Атомные энергетические установки для перспективных ледоколов на базе унифицированного оборудования // Труды Центрального научно-исследовательского института им. академика А.Н. Крылова. 2015. № 89(373). С. 7–20.
4. Королёв В.И. Анализ теплогидравлических характеристик каскад парогенераторов реакторных установок «РИТМ-200» универсальных атомных ледоколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2022. Т. 14. № 5. С. 759–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-759-774
5. Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н., Галицких В.Ю., Полуничев В.И., Вешняков К.Б., Кабин С.В., Турусов А.Ю. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние. // Атомная энергия. 2020. т. 129. вып. 1. с. 29–37.
6. Королёв В.И. Анализ новых технических решений по реакторной установке «РИТМ-200» в пр. 22220 универсальных атомных ледоколов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2022. Т. 14. № 6. С. 945–960. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-945-960
7. Новиков И.И., Скобелкин В.И., Абрамович Г.Н., Клячко Л.А. Закономерность расхода жидкости в закрученном потоке (эффект максимального расхода закрученного потока жидкости). Открытие №389. 18.10.1990 г.
8. Новиков И.И. Термодинамика: Учебное пособие для студентов энергомашиностроительных и теплотехнических специальностей вузов. М.: Машиностроение. 1984. 592 с.
9. Митрофанова О.В., Ивлев О.А. Актуальные теплофизические исследования в целях совершенствования судовых ядерных энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4-1. С. 85-94. DOI: 10.37220/МИТ.2023.62.4.011
10. Митрофанова О.В., Ивлев О.А., Федоринов А.В. Влияние эффектов вихреобразования на работоспособность трубных систем парогенераторов судовых ядерных энергетических установок // Морские интеллектуальные технологии. 2023. № 4-1. С. 95–102. DOI: 10.37220/МИТ.2023.62.4.012
11. Митрофанова О.В., Федоринов А.В. Моделирование гидродинамики и теплообмена в каналах парогенерирующих систем судовых ядерных энергетических установок интегрального типа // Теплофизика высоких температур. 2023. Т. 61, № 4. С. 625-631. DOI: 10.31857/S0040364423040117
12. Баринов А.А. Расчетно-экспериментальное моделирование нестационарных процессов смешения потоков теплоносителя в перспективных ЯЭУ для АЭС малой мощности // А.А. Баринов: дис. ... канд. тех. наук. Н.Н.. 2020. 192 с.
13. Проскураков К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В., Дятловский А.А., Гусейнов В.А. Методы и алгоритмы идентификации источников возникновения акустических стоячих волн в первых контурах АЭС с ВВЭР-440 // Глобальная ядерная безопасность. 2015. №3(16). С. 77–84.
14. Проскураков К. Н. Цифровая акустическая модель водо-водяного энергетического реактора // Теплоэнергетика. 2021. № 9. С. 14–20. DOI: 10.1134/S004036362109006X
15. Проскураков К.Н., Анисеев А.В., Афшар И. Верификация цифровой акустической модели реактора в пусковом и номинальном режимах АЭС с ВВЭР // Теплоэнергетика. 2021. № 11. С. 35–42. DOI: 10.1134/S0040363621100040
16. Проскураков К.Н., Хвостова М.С., Исмаил Р.М., Яковлев К.А. Цифровая акустическая модель компенсатора давления АЭС с ВВЭР // Глобальная Ядерная Безопасность. 2023. 48(3). С. 51–61. DOI: 10.26583/gns-2023-03-05
17. Проскураков К.Н., Исмаил Р.М., Яковлев К.А., Пирогов И.Н., Сиваков Н.И. Разработка методики расчета акустических характеристик компенсатора давления ВВЭР // Безопасность ядерной энергетики: тезисы докладов XIX Международной научно-практической конференции, Волгоград, 06–07 июня 2023 года. 2023. С. 128–131.

18. Головин А.Н., Шорин В.П. Гасители колебаний для гидравлических систем. // Самара: Изд-во Самарского научного Центра РАН. 2005. 168 с.
19. Митрофанова О.В. О структурном подобии устойчивых форм спирально-вихревого движения // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 5, С. 1179 – 1192.
20. Поздеева И.Г. Исследование гидродинамики и механизмов генерации акустических колебаний в сложных вихревых течениях. // И.Г. Поздеева: дис. ... канд. техн. наук. Москва: НИЯУ МИФИ. 2019. 117 с.
21. Митрофанова О.В., Поздеева И.Г. Исследование механизма саморегулирования акустических колебаний в импактном закрученном течении // Механика жидкости и газа. 2015. № 5. С. 54–63.
9. Mitrofanova O.V., Ivlev O.A. Current thermophysical research in order to improve shipboard nuclear power installations // Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 85–94. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.011
10. Mitrofanova O.V., Ivlev O.A., Fedorin A.V. The effect of vortex formation on the operability of pipe systems of steam generators of marine nuclear power installations, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 95–102. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.012
11. Mitrofanova O.V., Fedorin A.V. Modeling of hydrodynamics and heat transfer in channels of steam generating systems of ship nuclear power installations of an integral type // Teplofizika vysokih temperatur. 2023. Vol. 61. N. 4. P. 625–631. DOI: 10.31857/S0040364423040117
12. Barinov A.A. Raschetno-eksperimental'noe modelirovanie nestacionarnykh processov smesheniya potokov teplonosatelya v perspektivnykh YaEU dlya AES maloj moshchnosti // A.A. Barinov: dis. ... kand. tekhn. nauk. N.N. 2020. 192 p.
13. Proskuryakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V., Dyatlovsky A.A., Huseynov V.A. Methods and algorithms identification of sources acoustic standing wave in the primary circuit of NPP with WWER-440 // Global Nuclear Safety. 2015. №3(16). P. 77–84.
14. Proskuryakov, K. N. The digital acoustic model of a pressurized water reactor // Thermal engineering. 2021. Vol. 68, No. 9. P. 673-678. DOI 10.1134/S0040601521090068
15. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar E. Verification of a reactor's digital acoustic model in the startup and nominal operation modes of NPPs equipped with VVER reactors // Thermal engineering. 2021. № 11. P. 35–42. DOI: 10.1134/S0040601521100049
16. Proskuryakov K.N., Khvostova M.S., Ismail R.M., Yakovlev K.A. Digital acoustic model of an NPP pressurizer with WWER. // Global Nuclear Safety. 2023.48(3). P. 51–61. DOI: 10.26583/gns-2023-03-05
17. Proskuryakov K.N., Ismail R.M., Yakovlev K.A., Pirogov I.N., Sivakov N.I. Development of a digital acoustic model of the NPP pressurizer // Bezopasnost' yadernoi energetiki: tezisy dokladov XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Volgondsk, 06–07 iyunya 2023 goda. 2023. P. 128–131.

References

1. Shtrek A.A. Current trends and challenges for the designing of arctic cargo vessels // Russian Arctic. 2019. №5. P. 30–35. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10054.
2. Filchuk K.V., Korobov V.B., Yulin A.V., Sheveleva T.V. Influence of climate changes on navigation and development of the continental shelf in the Russian Arctic seas // Russian Arctic. 2022. № 17. P. 21–33. DOI: 10.24412/2658-4255-2022-2-21-33
3. Belyaev V.M., Veshnyakov K.B., Zhukovsky V.G., Kudinov I.V., Pakhomov A.N., Ryazantseva O.V., Suteeva A.Zh., Chesnokov Yu.N., Shklyarov N.V. Nuclear powerplants for advanced icebreakers based on standardized equipment // Transactions of the Krylov shipbuilding research institute. 2015. № 89(373). P. 7–20.
4. Korolev V.I. Analysis of thermohydraulic characteristics of steam generator cassettes of the RITM 200 reactor plants of the universal nuclear icebreakers. // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 14.5 (2022): 759–774. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-5-759-774
5. Zverev D.L., Fadeev Y.P., Pakhomov A.N., Galitskikh V.Y., Polunichev V.I., Veshnyakov K.B., Kabin S.V., Turusov A.Y. Reactor Installations for Nuclear Icebreakers: Origination Experience and Current Status // Atomic Energy. 2020. Vol. 129, No. 1. P. 18–26. DOI 10.1007/s10512-021-00706-x
6. Korolev V.I. Analysis of new technical solutions for the RITM-200 reactor plant in the project 22220 of universal nuclear icebreakers. // Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova 14.6 (2022): 945–960. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-945-960
7. Novikov I.I., Skobelkin V.I., Abramovich G.N., Klyachko L.A. Zakonomernost' raskhoda zhidkosti v zakruchennom potoke (effekt maksimal'nogo raskhoda zakruchennogo potoka zhidkosti). Otkrytie №389. 18.10.1990 g.
8. Novikov I.I. Termodinamika: Uchebnoe posobie dlya studentov energomashinostroitel'nykh i teplotekhnicheskikh special'nostej vuzov. M.: Mashinostroenie. 1984. 592 p.
9. Mitrofanova O.V., Ivlev O.A. Current thermophysical research in order to improve shipboard nuclear power installations // Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 85–94. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.011
10. Mitrofanova O.V., Ivlev O.A., Fedorin A.V. The effect of vortex formation on the operability of pipe systems of steam generators of marine nuclear power installations, Marine intellectual technologies. 2023. № 4 part 1, P. 95–102. DOI: 10.37220/MIT.2023.62.4.012
11. Mitrofanova O.V., Fedorin A.V. Modeling of hydrodynamics and heat transfer in channels of steam generating systems of ship nuclear power installations of an integral type // Teplofizika vysokih temperatur. 2023. Vol. 61. N. 4. P. 625–631. DOI: 10.31857/S0040364423040117
12. Barinov A.A. Raschetno-eksperimental'noe modelirovanie nestacionarnykh processov smesheniya potokov teplonosatelya v perspektivnykh YaEU dlya AES maloj moshchnosti // A.A. Barinov: dis. ... kand. tekhn. nauk. N.N. 2020. 192 p.
13. Proskuryakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V., Dyatlovsky A.A., Huseynov V.A. Methods and algorithms identification of sources acoustic standing wave in the primary circuit of NPP with WWER-440 // Global Nuclear Safety. 2015. №3(16). P. 77–84.
14. Proskuryakov, K. N. The digital acoustic model of a pressurized water reactor // Thermal engineering. 2021. Vol. 68, No. 9. P. 673-678. DOI 10.1134/S0040601521090068
15. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar E. Verification of a reactor's digital acoustic model in the startup and nominal operation modes of NPPs equipped with VVER reactors // Thermal engineering. 2021. № 11. P. 35–42. DOI: 10.1134/S0040601521100049
16. Proskuryakov K.N., Khvostova M.S., Ismail R.M., Yakovlev K.A. Digital acoustic model of an NPP pressurizer with WWER. // Global Nuclear Safety. 2023.48(3). P. 51–61. DOI: 10.26583/gns-2023-03-05
17. Proskuryakov K.N., Ismail R.M., Yakovlev K.A., Pirogov I.N., Sivakov N.I. Development of a digital acoustic model of the NPP pressurizer // Bezopasnost' yadernoi energetiki: tezisy dokladov XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Volgondsk, 06–07 iyunya 2023 goda. 2023. P. 128–131.
18. Golovin A.N., Shorin V.P. Gасители колебаний для гидравлических систем. // Самара: Изд-во Самарского научного Центра РАН. 2005. 168 p.
19. 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. P. 1119–1130. DOI 10.1007/s10891-017-1666-y
20. Pozdeeva I.G. Issledovanie gidrodinamiki i mekhanizmov generatsii akusticheskikh kolebaniy v slozhnykh vikhrevykh techeniyakh. // I.G. Pozdeeva: dis. ... kand. tekhn. nauk. Moskva: NIYaU MIFI. 2019. 117 p.
21. Mitrofanova O.V., Pozdeeva I.G. Investigation of the acoustic oscillation self-adjustment mechanism in impinging swirling flows // Fluid Dynamics. 2015. Vol. 50, No. 5. P. 646-654. DOI 10.1134/S0015462815050063.