

ЦИФРОВАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОДО-ВОДЯНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

© 2021 г. К. Н. Проскуряков*

*Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия*

**e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru*

Поступила в редакцию 18.11.2020 г.

После доработки 31.12.2020 г.

Принята к публикации 20.01.2021 г.

Цифровая акустическая модель ядерного реактора (ЦАМЯР) представлена как автоколебательная система, принадлежащая к особому классу нелинейных диссипативных систем, способных генерировать незатухающие колебания с параметрами, не зависящими от начальных условий и определяемыми только свойствами самой системы. Установлено, что водо-водяной энергетический реактор при турбулентном течении теплоносителя является открытой системой высокой сложности с большим количеством элементов, связи между которыми носят не предопределенный, а вероятностный характер. Выявлены элементы контура теплоносителя с отрицательной диссипацией (отрицательным трением). Показано, что в них происходит самоорганизация хаотических турбулентных пульсаций и вихрей в упорядоченные волновые колебания, частота которых определяется по формуле Томсона (Кельвина). В радиотехнических целях аналогичными свойствами обладает электронный генератор автоколебаний с трансформаторной обратной связью. Акустическим аналогом трансформатора является сопло. Наличие отрицательного сопротивления в нелинейных динамических системах типа сопла или контура с естественной циркуляцией приводит к самоорганизации хаотических турбулентных возмущений и генерации автоколебаний в виде акустических стоячих волн (АСВ). На основе теоретических и экспериментальных данных подтверждена достоверность неизвестного ранее свойства реактора с присоединенными трубопроводами – способность генерировать одновременно несколько АСВ. Использование ЦАМЯР при проектировании и эксплуатации атомных электростанций позволяет выявить источники возникающих в теплоносителе АСВ, условия их возникновения и частоту. Применение ЦАМЯР также необходимо для определения влияния геометрических параметров оборудования и компоновки контура теплоносителя на взаимодействие нейтронно-физических, теплогидравлических и виброакустических процессов. Применение ЦАМЯР позволяет оптимизировать проектные и конструкторские решения при разработке нового поколения АЭС путем предотвращения условий возникновения нежелательных автоколебаний теплоносителя и виброакустических резонансов, вызванных совпадением частот АСВ с частотами колебаний ядерного топлива и оборудования в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при ударных и сейсмических воздействиях.

Ключевые слова: автоколебания, электроакустические аналоги, реактор, виброакустический резонанс, безопасность, оптимизация компоновки оборудования, нейтронно-физические, теплогидравлические и акустические процессы

DOI: 10.1134/S004036362109006X

Эксплуатация АЭС в маневренных режимах, а также повышение ее эффективности и срока службы основного оборудования являются одними из приоритетных задач. Важнейшее значение решение этой задачи имеет для разработки ядерных энергетических установок (ЯЭУ) небольшой мощности, предназначенных для перемещающихся объектов и для компенсации пиковых нагрузок в системах с возобновляемыми источниками энергии. Длительная эксплуатация АЭС в маневренных режимах может быть обеспечена при мини-

мизации динамических нагрузок на оборудование и строительные конструкции реакторных установок. В этих условиях первостепенное значение приобретают проблемы предотвращения гидродинамической неустойчивости, вызывающей повышение вибрации оборудования и возникновение наиболее опасного роста динамических нагрузок при резонансном взаимодействии колебаний конструкций с акустическими колебаниями теплоносителя. Актуальной остается задача предотвращать возникновение виброакустических

резонансов (ВАР) в маневренных и стационарных эксплуатационных режимах или уменьшать их длительность в пусковых и аварийных режимах.

Одна из актуальных и наукоемких задач – совершенствование программ нейтронно-физического и теплофизического расчетов полномасштабных активных зон водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР). Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР зависят от тепловой мощности реактора, обусловленной обратными связями между плотностью и температурой теплоносителя. В качестве примера учета обратных связей можно привести программы БИПР-8, которые используются для нейтронно-физического расчета полномасштабных активных зон ВВЭР [1]. Однако в этом подходе не учтены обратные связи, вызванные автоколебаниями теплоносителя. Колебания теплофизических параметров теплоносителя с частотами, кратными частоте вращения валов главных циркуляционных насосов (ГЦН), акустических стоячих волн и их комбинаций, приводят к периодическому изменению замедляющих и поглощающих свойств теплоносителя, амплитуды колебаний которых резко возрастают при возникновении ВАР в реакторном оборудовании.

В настоящее время актуальной задачей является создание цифровой акустической модели реактора для совершенствования программ нейтронно-физического и теплофизического расчетов полномасштабных активных зон ВВЭР с учетом обратных связей и акустических характеристик реактора. Создание в Московском энергетическом институте такой модели стало возможным благодаря объединению трех фундаментальных научных результатов, полученных за период более ста лет: формулы Томсона (Кельвина) для разряда конденсатора, полученной в 1853 г. [2]; открытия свойства акустического резонатора, сформулированного Гельмгольцем в 1869 г. [3]; доказательства автором в 1984 г. обоснованности применимости метода электроакустических аналогий для исследования пульсирующих течений однофазной и двухфазной сред при наличии отрицательного трения [4]. В работе [4] показано, что условия возникновения ВАР зависят от конструктивных характеристик и эксплуатационных режимов конкретной ядерной энергетической установки. В [5] показано, что ЦАМЯР не имеет аналогов в акустике и атомной энергетике и предназначена для создания цифрового двойника АЭС, работающей в эксплуатационных режимах и/или находящейся под воздействием ударных и сейсмических нагрузок и/или в аварийных условиях.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ ДЛЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ДИССИПАЦИЕЙ

Анализ акустических систем с однофазными текучими средами базируется на теории распространения упругих волн в жидкостях и газах [6]. В основу анализа положены уравнения состояния, неразрывности и сохранения количества движения (импульса) для одномерного потока жидкой среды.

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя в АЭС явилась разработка метода электроакустических аналогий для термодинамических систем с отрицательной диссипацией, в том числе для одномерного пульсирующего потока двухфазной среды как с однозначной, так и с многозначной гидродинамическими характеристиками [4]. Уравнения состояния, неразрывности и сохранения количества движения (импульса) для одномерного пульсирующего потока двухфазной среды в трубе получены в виде системы линейных дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial x_T} + C_c \frac{\partial \Delta p}{\partial t} + G_c \Delta p = 0; \\ \frac{\partial \Delta p}{\partial x_T} + m \frac{\partial W}{\partial t} + R_c W = 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где W – объемный расход теплоносителя в трубе; x_T – расстояние вдоль оси трубы; Δp – давление, дополнительно возникающее при прохождении звуковой волны в среде (в жидкости, паре или пароводяной среде); t – время; m – акустическая масса среды; R_c – активное акустическое сопротивление; C_c – акустическая податливость среды; G_c – волновая проводимость среды.

Выражения для акустической массы, акустической податливости и волновой проводимости выглядят следующим образом:

$$m = \frac{\rho l_T}{S}; \quad C_c = \frac{lS}{kp} \approx \frac{lS}{\rho a^2}; \quad G_c = \frac{Wl}{kp},$$

где l_T – длина трубы; S – площадь поперечного сечения трубы; k – показатель адиабаты; p – среднее статическое давление; ρ – плотность двухфазной среды; a – скорость звука в двухфазной среде.

Уравнения (1) известны в литературе под названием телеграфных уравнений [6], решение которых дает функциональные зависимости звукового давления и объемного расхода сжимаемой среды в трубопроводе от переменных x_T и t .

Распространение электрического тока вдоль кабеля может быть описано следующей системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i}{\partial x_k} + C \frac{\partial u}{\partial t} + Gu = 0; \\ \frac{\partial u}{\partial x_k} + L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где i – сила тока; x_k – расстояние вдоль кабеля; C – емкость; u – напряжение; G – проводимость; L – индуктивность; R – сопротивление.

Благодаря единству дифференциальных уравнений акустической (1) и электрической (2) систем исследование распространения сжимаемой однофазной или двухфазной жидкости в акустической системе может быть заменено исследованием распространения электрического тока вдоль кабеля. Из совместного рассмотрения систем (1), (2) следует ряд соответствий между акустическими и электрическими показателями, которые приведены в [4].

Подобные аналогии справедливы в отношении, на первый взгляд, не имеющих ничего общего физических систем: пружинный маятник без трения, резонатор Гельмгольца, груз на пружине, парогенерирующий канал, компенсатор давления на АЭС [5, 6]. В этих системах, представляющих собой колебательные контуры без сопротивления (идеальные контуры), круговая частота определяется по формуле Томсона, полученной в 1863 г. для расчета частоты разряда конденсатора в цепи с индуктивностью [2].

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Основы понятия автоколебательных систем как особого класса нелинейных диссипативных систем, способных генерировать незатухающие колебания с параметрами, не зависящими от начальных условий и определяемыми только свойствами самой системы, были сформулированы академиком А.А. Андроновым в первой трети XX в. [7]. С тех пор эти системы получили широкое применение во многих отраслях науки и техники. Наиболее подробно теория автоколебаний была сформулирована в радиофизике, в которой автоколебательные системы являются одним из центральных объектов исследования.

В процессе развития радиофизики были созданы и внедрены в радиотехническую практику автогенераторы на основе активных элементов различных типов, обеспечивающих взаимодействие колебательной генераторной системы с источником энергии, что стимулировало развитие теории нелинейных колебаний. Автором одной из первых математических моделей автоколебательной системы с одной степенью свободы (осциллято-

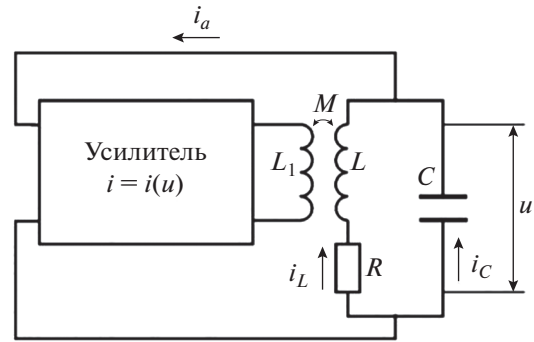


Рис. 1. Схема радиотехнического генератора автоколебаний в виде LC-контура с трансформаторной положительной обратной связью.

L_1, L_2 – индуктивность первичной и вторичной обмотки; i – ток в контуре; M – взаимная индуктивность

ра) был Ван дер Поль, который также предложил приближенный аналитический метод решения нелинейного дифференциального уравнения, описывающего колебания в автогенераторе. Этот метод дает адекватное описание динамики добротности факторных и слабонелинейных автоколебательных систем [7].

Схема радиотехнического генератора автоколебаний показана на рис. 1. Колебательной системой в схеме служит RLC-контур, напряжение с которого подается на вход активного элемента (усилителя). Первичная обмотка (выход усилителя) индуктивно связана с обмоткой контура, что обеспечивает наличие обратной связи. Нелинейную характеристику усилителя, т.е. зависимость тока на выходе i от напряжения на входе u , можно аппроксимировать кубическим полиномом

$$i(u) = g_0 u - g_2 u^3 + \dots, \quad (3)$$

где g_0, g_2 – положительные коэффициенты.

Механизм возбуждения автоколебаний в генераторе можно качественно описать следующим образом. Даже при отсутствии напряжения на выходе усилителя напряжение в контуре испытывает случайные флуктуации, которые после усилителя вновь поступают в контур через цепь обратной связи. При этом из шумового спектра флуктуаций выделяется составляющая на собственной частоте высокодобротного контура. Если энергия, вносимая в контур, превосходит энергию потерь, амплитуда колебаний нарастает, что возможно при довольно большом значении коэффициента усиления. Однако, поскольку зависимость i от u (3) нелинейная, с ростом u коэффициент усиления падает, что приводит к установлению стационарных автоколебаний с постоянной амплитудой, в чем и состоит механизм нелинейного ограничения неустойчивости. Таким образом, нелинейность в автоколебательных системах играет принципиаль-

ную роль, регулируя поступление энергии из источника. В линейной системе (например, осциллятор с отрицательным трением) амплитуда колебаний может нарастать до бесконечности.

Система уравнений Кирхгофа для RL -контура имеет вид

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_L + i_C; \\ L \frac{di_L}{dt} + Ri_L &= \frac{1}{C} \int i_C dt. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из уравнений (4) с учетом выражения для нелинейной характеристики (3) можно получить уравнение

$$\frac{d^2 u}{dt^2} - \omega_0^2 (Mg_0 - RC - 3Mg_2 u^2) \frac{du}{dt} + \omega_0^2 u = 0, \quad (5)$$

где ω_0 – собственная угловая частота колебательного контура.

Уравнение (5) носит название уравнения Ван дер Поля и является основной моделью при анализе периодических автоколебаний. После линеаризации уравнение (5) приводится к виду

$$\frac{d^2 u}{dt^2} - \frac{Mg_0(0) - RC}{LC} \frac{du}{dt} + \frac{u}{LC} = 0. \quad (6)$$

При $RC > Mg_0$ уравнение (6) является обычным уравнением линейного осциллятора с затуханием и устойчивым состоянием равновесия. При $Mg_0 > RC$ уравнение (6) превращается в уравнение осциллятора с отрицательным трением и, следовательно, малые возмущения будут нарастать с течением времени. При этом коэффициент взаимной индукции должен быть положительным и колебания, поступившие с выхода усилителя, должны быть синфазны с колебаниями в контуре и способствовать их усилению. Такая обратная связь называется положительной. При $M < 0$ колебания противофазны и взаимно подавляют друг друга, обратная связь стабилизирует положение равновесия и называется отрицательной.

ЦИФРОВАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРА

Информация о разработке акустической модели (не имеющей аналогов) ядерного реактора появилась после аварии на АЭС “Фукусима-1” [8]. Для разработки модели ядерного реактора было предложено использовать формулу Томсона на том основании, что при автоколебаниях теплоносителя потеря энергии, обусловленная трением вследствие генерации турбулентности при расщеплении струи и вязкостью теплоносителя, компенсируется работой насосов и/или подводом к теплоносителю тепловой энергии, вызывающей естественную циркуляцию. Первый контур ВВЭР представляет собой разветвленную гидравлическую трубопроводную систему, содержащую эле-

менты сложной геометрической формы. В некоторых элементах могут возникать флуктуации потока теплоносителя, вызванные его вихрями, и акустические волны, которые наряду с циклическими механическими нагрузками приводят к колебаниям оборудования и сокращают срок его службы [9, 10].

В работе [10] отмечается, что проблема вибраций на АЭС возникла из-за того, что на стадии проектирования первых реакторов динамическое воздействие потока теплоносителя, являющегося источником энергии и способного вызывать механические колебания элементов конструкции, не учитывали. Обеспечение виброустойчивости оборудования и трубопроводов реакторной установки продолжает оставаться актуальной задачей в настоящее время. Существует несколько причин, затрудняющих решение данной задачи, основная из которых – невозможность прогнозирования возбуждающих вибрационных воздействий с приемлемой точностью на стадии проектирования [5].

Электрическим аналогом системы ядерного реактора с присоединенными трубопроводами является резонатор Гельмгольца, т.е. LC -контур с трансформаторной положительной обратной связью, в котором, удовлетворяя условию (4), система превращается в генератор с отрицательной диссипацией (отрицательным трением). При работе ГЦН в соплах (локальных сопротивлениях), которые можно рассматривать как акустические трансформаторы, возникает отрицательное трение, приводящее к самоорганизации хаотичного турбулентного процесса.

Задача разработки акустических моделей движения теплоносителя в основном оборудовании АЭС, его отдельных компонентах и совокупности конструктивных элементов впервые была решена в [4]. Разработанные методы моделирования АСВ в теплоносителе АЭС позволили создать цифровую акустическую модель ядерного реактора и организовать ее испытания и проверку на АЭС с легководным реактором [11].

Количество одновременно генерируемых акустических стоячих волн в модели соответствует числу составляющих ее акустических участков. Согласно методу электроакустических аналогий [4] расчет частот собственных колебаний давления теплоносителя f (СЧКДТ) проводится по формуле Томсона [2]

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC_p}},$$

где m – акустическая масса системы (зависит от количества учитываемых в расчете акустических участков присоединенных трубопроводов); C_p – акустическая податливость объема реактора.

Формирование сложного резонатора Гельмгольца для ВВЭР-440, имеющего шесть холодных и шесть горячих ниток, было выполнено по методу электроакустических аналогий, согласно которому при параллельном подключении входящих в реактор и выходящих из него трубопроводов справедлива следующая зависимость:

$$\frac{1}{m} = 6 \left(\frac{1}{m_x} + \frac{1}{m_r} \right),$$

где $m_x = \frac{\rho_x l_x}{S}$, $m_r = \frac{\rho_r l_r}{S}$ – акустическая масса холодных и горячих трубопроводов (здесь ρ_x , ρ_r – плотность воды в холодных и горячих трубопроводах; l_x , l_r – длина холодных и горячих трубопроводов).

Акустическую податливость объема реактора вычисляют по формуле

$$C_p = \frac{V_p}{\rho_{cp} a_c^2},$$

где V_p – объем среды в реакторе; ρ_{cp} – средняя по объему реактора плотность воды; a_c – скорость звука в среде.

Скорость звука в среде с учетом деформации труб и сжимаемости воды рассчитывают по выражению [12]

$$a_c = \frac{1}{\sqrt{\rho_{cp} \left(\frac{D_p}{E_M \delta} + \frac{1}{\rho_{cp} c_{cp}^2} \right)}},$$

где D_p – диаметр реактора; c_{cp} – средняя по объему реактора скорость звука в воде; δ – толщина стенки реактора; E_M – объемный модуль упругости материала трубы.

По приведенной выше методике рассматриваются комбинации трубопроводов горячей и холодной ниток в различных режимах пуска энергоблока.

Разработанная и не имеющая аналогов ЦАМЯР открыла неизвестные ранее свойства реактора с присоединенными трубопроводами – способность генерировать одновременно несколько АСВ [8]. Эта модель обеспечивает учет в проектной и конструкторской документации влияния геометрических параметров оборудования и компоновки контура теплоносителя на нейтронно-физические, теплогидравлические и колебательные процессы. Диагностический признак (многократное уменьшение генерируемой в активной зоне частоты АСВ) возникновения кипения в ВВЭР и их зарубежных аналогах был опубликован незадолго до аварии в США в 1979 г. на АЭС Three Mile Island [13]. Знание этого признака при наличии и использовании датчиков пульсаций давления

помогло бы предотвратить ошибочные действия персонала, приведшие к тяжелой аварии. Результаты прогнозирования частоты АСВ в кипящем реакторе [4] в различных режимах работы были подтверждены данными измерений, проведенных на РБМК-1000 Игналинской АЭС [14]. Эти результаты позволили автору в его экспертном заключении, представленном Правительственной комиссии, указать на вероятные причины аварии и разрушения реактора на Чернобыльской АЭС, которые впоследствии были включены в доклад, подготовленный для МАГАТЭ [15].

Результаты расчета частоты АСВ по разработанным методикам и определения источников их генерации подтверждаются данными измерений, полученными на экспериментальных установках и действующих АЭС [9, 10, 14, 16]. Эти методики в настоящее время – единственное средство прогнозирования частот АСВ и выявления источников и условий их возникновения и резонансного взаимодействия с вибрациями оборудования, колебаниями теплоносителя, вызванными работой ГЦН, образованием вихрей и воздействием внешних волновых и ударных нагрузок. Однако широкому применению этих результатов на сегодняшний день препятствует заблуждение, которое состоит в том, что частоту АСВ определяет частота образования вихрей, в то время как, наоборот, АСВ, возникающие в оборудовании, влияют на формирование вихрей и на определенной стадии вихреобразования частота образования вихрей сравнивается с частотой АСВ. В связи с этим заблуждением и актуальностью необходимости повышать сейсмостойкость ядерных объектов после аварии на АЭС “Фукусима-1” возникла потребность охарактеризовать дополнительные ранее не опубликованные и потому неизвестные акустические свойства реактора путем описания его акустической модели.

В результате сопоставления частот, генерируемых крупными вихревыми структурами в элементах трубопроводов [17], с собственными частотами акустических элементов, рассчитанными по методике [11], было обнаружено, что в зависимости от режима работы реактора генерируются опасные частоты, способные привести к резонансным явлениям. В работе [18] показано, что сложная геометрическая форма трубопроводов может приводить не только к увеличению гидравлических потерь и ухудшению теплообменных процессов вследствие генерации крупномасштабных вихревых структур, но и к возбуждению акустических колебаний и опасности возникновения резонансных явлений, снижающих виброустойчивость оборудования.

Акустическая система, состоящая из ядерного реактора с присоединенными трубопроводами, образующими горячую и холодную нитки, обла-

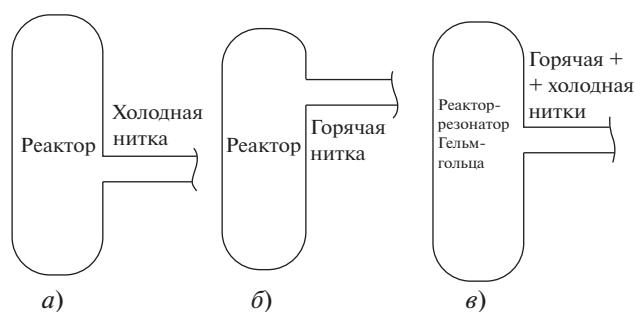


Рис. 2. Этапы формирования сложного резонатора Гельмгольца.

а – объединение холодных патрубков; б – объединение горячих патрубков; в – резонатор Гельмгольца с одним горлом

ВЫВОДЫ

1. Флуктуации давления одномерного пульсирующего потока сжимаемой однофазной или двухфазной жидкости, используемой в качестве теплоносителя ядерного реактора, аналогичны флуктуациям напряжения в линиях электропередачи.

2. Установлено неизвестное ранее свойство реактора с присоединенными трубопроводами – способность генерировать одновременно несколько акустических стоячих волн.

3. Разработанные математические модели, методики и алгоритмы расчета частот автоколебаний универсальны, достаточно просты и, как свидетельствуют результаты измерений на АЭС, эффективны для определения акустических свойств теплоэнергетического оборудования атомных и тепловых электростанций с точностью, достаточной для решения ряда важных практических задач.

4. Впервые разработаны научные основы количественной оценки влияния конструкции реактора и трассировки трубопровода на вибрацию, эксплуатационную эффективность, срок службы, безопасность, сейсмостойкость оборудования.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает глубокую благодарность руководителям Нововоронежской АЭС: директору В.П. Поварову, заместителю главного инженера А.И. Федорову, заместителю директора В.А. Шварову и начальнику отдела диагностики М.Т. Слепову – за организацию и проведение специально разработанной расширенной программы экспериментов, необходимых для верификации цифровых акустических моделей АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krysl V. Руководство пользователя MOBY-DICK. Отчет SCODA JS. Пльзень: a.s. Ae 10068 / Dok. REV. 3. 2005.
2. Люци М. История физики. М.: Наука, 1970.
3. Helmholtz H. Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen // J. für die reine und angewandte Mathematik. 1860. Bd 57. Heft 1. S. 1–57.
4. Проскуряков К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ. М.: МЭИ, 1984.
5. Проскуряков К.Н. Создание и верификация акустической модели ядерного реактора // Научные технологии. 2019. № 4. С. 62–69.
6. Горелик Г.С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику физики. М.: Физматлит, 2007.
7. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959.
8. Proskuryakov K.N. Scientific basis for modeling and calculation of acoustic vibrations in the nuclear power plant coolant // J. Phys. Conf. 2017. Series 891. P. 012182. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012182>

дает свойствами, которые не могут быть получены простой суперпозицией акустических свойств составляющих ее элементов. Эта система представляет собой сложный резонатор Гельмгольца, способный генерировать одновременно несколько АСВ. Для его формирования необходимо объединить несколько входных и выходных патрубков в одно эквивалентное входное горло по методу электроакустических аналогий. Этапы формирования сложного резонатора Гельмгольца представлены на рис. 2. Количество возбужденных волн в такой модели соответствует количеству акустических неоднородностей в контуре, состоящем из ядерного реактора с присоединенными трубопроводами [8]. Расчет собственных частот колебаний теплоносителя в акустической модели ядерного реактора проводится по формуле Томсона [2]. Сложный резонатор Гельмгольца является результатом преобразования модели, объединяющей холодные (входящие) трубопроводы, и модели, объединяющей горячие (выходящие) трубопроводы, в модель с одним горлом.

На Нововоронежской АЭС была проведена верификация цифровой акустической модели ядерного реактора. Установлено, что количество одновременно генерируемых акустических волн соответствует числу акустических неоднородностей в соединенных с реактором трубопроводах и практически совпадает с результатами прогнозируемой расчетной оценки, проведенной при использовании ЦАМЯР. Применение этой модели позволит оптимизировать проектные и конструкторские решения в целях повышения эффективности эксплуатации, срока службы, безопасности АЭС и защищенности ее от ударных и сейсмических воздействий. Данная модель может быть адаптирована и применена к ВВЭР независимо от их геометрических размеров, а также к однофазному и двухфазному состояниям теплоносителя в условиях принудительной или естественной циркуляции.

9. Самарин А.А. Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. М.: Энергия, 1979.
10. Шарый Н.В. Методы расчетного обоснования прочности и динамика конструкций реакторных установок для АЭС с ВВЭР: дис. ... докт. техн. наук. Подольск, 2008.
11. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Afshar E. Computer modeling of acoustic standing waves in the coolant of nuclear power plants // J. Phys. Conf. 2019. Series 1421. P. 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1421/1/012041>
12. Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.; Л.: Гостехиздат, 1949.
13. Проскуряков К.Н., Нидбалла Г., Стоянов С. Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в I контуре АЭС // Труды МЭИ. 1979. Вып. № 407. С. 87–93.
14. Фомичев М.С. Экспериментальная гидродинамика. М.: Энергоатомиздат, 1989.
15. Информация о Чернобыльской аварии и ее последствиях // Атомная энергия. 1986. Т. 61. Вып. 5. С. 301–320.
16. Проскуряков К.Н., Федоров А.И., Запорожец М.В. Прогнозирование условий возникновения в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов с внешними периодическими нагрузками // Теплоэнергетика. 2015. № 8. С. 17–23. <https://doi.org/10.1134/S0040363615080068>
17. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерных энергетических установок. М.: Ленанд, 2020.
18. Митрофанова О.В., Байрамуков А.Ш., Ургенов Д.С. Исследование процессов вихреобразования в сложных каналах транспортных ядерных энергетических установок // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 7–8. С. 274–281.

The Digital Acoustic Model of a Pressurized Water Reactor

K. N. Proskuryakov*

National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

**e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru*

Abstract—The digital acoustic model of a nuclear reactor (NRDAM) is represented as a self-oscillatory system belonging to a special class of nonlinear dissipative systems that can generate sustained oscillations whose parameters do not depend on the initial conditions and are only governed by the properties of the system itself. It has been found that a pressurized water reactor with coolant flowing in a turbulent mode is an open system of high complexity with a large number of components with links between them being probabilistic rather than predetermined in nature. The coolant loop components featuring negative dissipation (negative friction) are revealed. It is shown that chaotic turbulent pulsations and vortices are self-organized in these components into ordered wave oscillations, the frequency of which is determined according to the Thomson (Kelvin) formula. An electronic generator of self-oscillations with a transformer feedback used in radio engineering circuits has similar properties. A nozzle is an acoustic analog of a transformer. A negative resistance contained in nonlinear dynamic systems like a nozzle or a natural circulation loop results in that chaotic turbulent disturbances become self-organized, and self-oscillations are generated in the form of acoustic standing waves (ASW). Based on theoretical and experimental data, the certainty of the ability of a reactor together with the pipelines connected to it to simultaneously generate several ASWs—a property that has not been known previously—is confirmed. By using the NRDAM in designing and operation of nuclear power plants (NPPs), it becomes possible to reveal the sources of ASWs arising in the coolant, their occurrence conditions, and frequency. The use of the NRDAM is also necessary for determining the effect that the coolant circuit equipment geometrical parameters and layout have on the interaction of neutronic, thermal-hydraulic, and vibroacoustic processes. By applying the NRDAM, it becomes possible to optimize the engineering and design solutions in developing new-generation NPPs by eliminating the conditions causing the occurrence of undesirable self-oscillations of coolant and vibroacoustic resonances resulting from the coincidence of the ASW frequencies with the vibration frequencies of nuclear fuel and equipment in normal and emergency operation modes and also under the conditions of shock impacts and seismic loads.

Keywords: self-oscillations, electroacoustic analogs, reactor, vibroacoustic resonance, safety, equipment layout optimization, neutronic, thermal-hydraulic, and acoustic processes