

ВЕРИФИКАЦИЯ ЦИФРОВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РЕАКТОРА В ПУСКОВОМ И НОМИНАЛЬНОМ РЕЖИМАХ АЭС С ВВЭР

© 2021 г. К. Н. Проскуряков^a, *, А. В. Аникеев^a, И. Афшар^a

^aНациональный 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 12.01.2021 г.

Принята к публикации 17.02.2021 г.

В настоящее время в нормативной технической документации, созданной в конце XX в. и обосновывающей проектные решения и регламент эксплуатации атомных электростанций, не предусмотрены прогнозирование и предотвращение виброакустических резонансов конструкций с акустическими стоячими волнами (АСВ) в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при воздействии сейсмических волн. Следствием этого является недооценка существующих обратных связей между нейтронно-физическими и теплофизическими процессами при колебаниях плотности теплоносителя, вызванных АСВ. На кафедре АЭС НИУ МЭИ создана цифровая акустическая модель ядерного реактора (ЦАМЯР), позволяющая идентифицировать источники самовозбуждающихся АСВ и прогнозировать их частоту. В статье приведен новый метод идентификации частот АСВ в акустической системе, состоящей из водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) и присоединенных к нему трубопроводов холодной и горячей ниток. Верификация моделей и методов расчета проведена на энергоблоке № 3 Нововоронежской АЭС с ВВЭР-440. Для измерения автоспектральных плотностей мощности (АСПМ) пульсаций давления использована система виброконтроля основного оборудования SÜS компании Siemens. Расчетные значения частот АСВ согласуются с результатами измерений сигналов от датчиков пульсаций давления. Показано, что частоты АСВ зависят от условий эксплуатации и могут совпадать с частотами колебаний давления, обусловленными работой главных циркуляционных насосов (ГЦН), с колебаниями тепловыделяющих сборок (ТВС) и оборудования I контура АЭС. Доказано, что акустические свойства ядерного реактора, независимо от количества контуров циркуляции теплоносителя, аналогичны свойствам группы одновременно используемых резонаторов Гельмгольца. Использование верифицированной методики позволяет оптимизировать конструкторские и компоновочные решения путем создания оборудования, способного минимизировать нежелательные циклические нагрузки. Эта возможность является наиболее важной для обеспечения длительной работы в маневренных режимах небольших модульных реакторов. Малые АЭС должны быть высокоманевренными, чтобы дополнять возобновляемые источники энергии. Большинство небольших модульных реакторов являются мало обслуживаемыми с длительными интервалами между перегрузками топлива (2–10 лет против 12–24 мес в больших энергоблоках) либо с закладкой топлива на весь жизненный цикл. Требования многолетней эксплуатации в маневренных режимах могут быть обеспечены при минимизации динамических нагрузок на конструкции реакторной установки путем предотвращения гидродинамической неустойчивости и резонансов вибраций конструкций с акустическими колебаниями теплоносителя.

Ключевые слова: вибрации, тепловыделяющие сборки, резонатор Гельмгольца, циклические нагрузки, динамические нагрузки, теплоноситель, оптимизация конструкций и компоновок, верификация методов расчета

DOI: 10.1134/S0040363621100040

Повышение эффективности эксплуатации и срока службы основного оборудования, а также работа в маневренных режимах являются одними из приоритетных требований к атомным электростанциям нового поколения. Одна из главных задач – предотвращение возникновения виброакустических резонансов (ВАР) в гидроупругих колебательных системах, состоящих из двух вза-

имодействующих подсистем – механической и гидродинамической. Предотвращение ВАР является эффективным средством уменьшения высокочастотных вибрационных нагрузок в оборудовании и внутрикорпусных устройствах. Другая не менее важная задача – совершенствование программ нейтронно-физического и теплофизического расчетов полномасштабных активных зон

ВВЭР путем учета обратных связей между изменениями плотности теплоносителя и нейтронно-физическими параметрами. Существующие подходы не учитывают обратные связи, вызванные колебаниями давления и температуры теплоносителя, которые обусловлены АСВ. Отсутствие в настоящее время верифицированных методов идентификации источников генерации и прогнозирования частот АСВ является причиной того, что перед разработчиками конструкций оборудования I контура и его компоновки при проектировании АЭС с ВВЭР не ставится задача предотвращения возникновения ВАР.

В качестве примера включения обратных связей в натурные расчеты активной зоны ВВЭР можно привести широко используемые нейтронно-физические расчетные программы БИПР-8 [1] и Moby Dick [2]. Однако эти и другие современные подходы не учитывают обратные связи между плотностью и температурой теплоносителя, которые обусловлены работой насосов, АСВ и теплогидравлической неустойчивостью, приводящей к периодическим изменениям замедляющих и поглощающих свойств теплоносителя. Известно, что амплитуды колебаний резко возрастают при двухфазном состоянии теплоносителя и возникновении ВАР. В работе [3] показано, что условия возникновения ВАР определяются совокупностью конструктивных характеристик и условий эксплуатации конкретной АЭС. В связи с необходимостью учета обратных связей в программных пакетах нейтронно-физических, тепловых и акустических расчетов актуальна задача верификации созданной в НИУ МЭИ цифровой акустической модели ядерного реактора.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ТЕЧЕНИЯ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Анализ акустических систем с однофазными текучими средами базируется на теории распространения упругих волн в жидкостях и газах. В основе анализа лежат уравнения сохранения количества движения (импульса), неразрывности и для сжимаемой жидкости к ним добавляются еще уравнения состояния и сохранения энергии. Разработаны и успешно применяются методы электроакустических аналогий [4]. Первый контур ВВЭР представляет собой разветвленную гидравлическую систему трубопроводов, содержащую элемент сложной геометрической формы. Существуют элементы, в соединении которых могут возникать колебания потока теплоносителя, вызванные образованием вихрей, и акустические волны, которые наряду с циклическими нагрузками

приводят к колебаниям оборудования и снижают срок его службы [5, 6].

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя на АЭС явилось обоснование применимости метода электроакустических аналогий для исследования одномерного пульсирующего течения двухфазной среды как с однозначными, так и с многозначными гидродинамическими характеристиками [7]. Как и любой конструктивный элемент, обладающий массой и упругостью, теплоноситель в I контуре имеет собственные частоты колебаний, которые могут резонировать с другими источниками гидродинамических возмущений и вибрациями конструкций. Прогнозирование условий возникновения ВАР в оборудовании АЭС и во внутрикорпусных устройствах ВВЭР является актуальной задачей, так как их предотвращение или ограничение их продолжительности позволяет повысить качество проектирования, эксплуатации, безопасности и конкурентоспособности АЭС с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. По методике, изложенной в [8], были определены частоты АСВ в акустических системах, образованных реактором и подключенными к нему трубопроводами горячей и холодной ниток различной длины и на разных этапах пуска энергоблока № 3 АЭС с ВВЭР-440. Разработанная акустическая схема I контура показана на рис. 1.

ВЕРИФИКАЦИЯ ЦИФРОВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Верификация ЦАМЯР была проведена с использованием внедренной на Нововоронежской АЭС компанией Siemens системы SÜS, которая используется при эксплуатации АЭС в номинальном режиме. С помощью этой системы обеспечивается вибродиагностика основного оборудования и трубопроводов АЭС в целях раннего выявления их аномальных вибрационных режимов, вызванных изменением условий фиксации опор или увеличением гидродинамических нагрузок от теплоносителя I контура. Система предназначена для периодических измерений. В виде программного комплекса реализованы и используются программы автоматического отбраковывания спектров и автоматического выбора пиков в спектрах колебаний [9]. Достоверность результатов экспериментальных исследований достигалась многократным повторением экспериментов, применением аттестованных и проверенных средств измерений, сравнением результатов измерений с данными численных экспериментов, достоверность результатов расчетов — верификацией математических моделей и разработанных методик, применением апробированных численных методов и алгоритмов [9–11]. В табл. 1 приведены результаты расчета

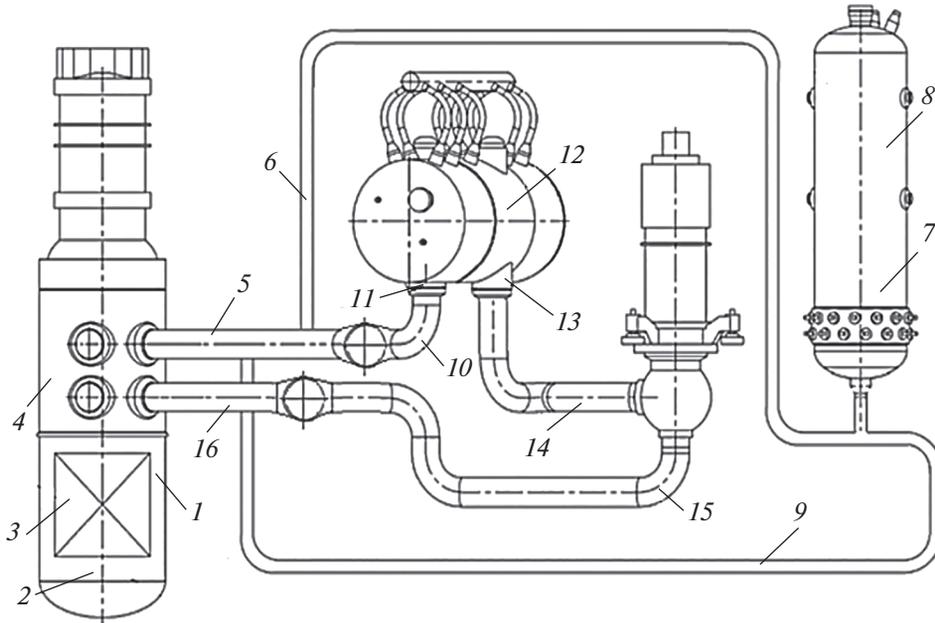


Рис. 1. Акустическая схема энергоблока № 3 с ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС.

1 – опускной участок реактора; 2, 4 – пространство под активной и над активной зоной; 3 – активная зона; 5 – участок главного циркуляционного контура (ГЦК) от реактора до главной запорной задвижки (ГЗЗ); 6 – дыхательный трубопровод от горячей нитки (ГН) до компенсатора давления; 7, 8 – компенсатор давления по воде и пару; 9 – дыхательный трубопровод от компенсатора давления до горячей нитки; 10 – участок горячей нитки ГЦК от ГЗЗ до горячего коллектора (ГК); 11 – горячий коллектор парогенератора (ПГ); 12 – теплообменная поверхность ПГ; 13 – холодный коллектор (ХК) ПГ; 14 – участок от холодного коллектора ПГ до главного циркуляционного насоса (ГЦН); 15 – участок холодной нитки (ХН) ГЦК от ГЦН до ГЗЗ; 16 – участок холодной нитки ГЦК от ГЗЗ до входа в опускной участок реактора

частот АСВ для трех моделей акустической массы, соответствующих четырем вариантам количества учитываемых в расчетной модели акустических элементов в номинальном режиме работы энергоблока ВВЭР-440 при температуре 280.5°C и давлении 12.278 МПа.

ВЕРИФИКАЦИЯ ЦИФРОВОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС С ВВЭР-440

Цифровая акустическая модель парогенератора (ЦАМПГ) АЭС с ВВЭР-440 состоит из трех ре-

Таблица 1. Результаты расчета частот АСВ f в ЦАМЯР ВВЭР-440

Участок расчета	f , Гц			
	ГН (1.645 м), ХН (1.645 м)	ГН (0.975 м) от реактора до поворота на 30°, ХН (1.645 м)	ГН (12.145 м) от реактора до поворота на 90°, ХН от реактора (4.595 м) до ГЗЗ	ГН (17.095 м) от реактора до ГК ПГ, ХН (7.992 м) от ГЦН до реактора
Номинальный режим				
Р + бвх + бвых	19.51	23.11	9.58	7.66
Р + бвх	13.90	13.90	8.25	6.56
Р + бвых	14.17	19.54	5.25	3.93
Режим нулевой мощности реактора				
Р + бвх + бвых	26.54	31.44	13.38	10.47
Р + бвх	19.55	19.48	11.04	8.64
Р + бвых	19.54	24.71	6.89	5.41

Примечание. Р – реактор; бвх – шесть трубопроводов, входящих в реактор; бвых – шесть трубопроводов, выходящих из реактора.

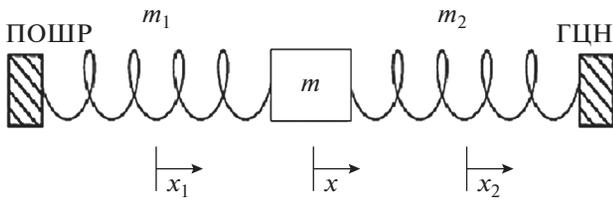


Рис. 2. Модель парогенератора в виде пружин 1, 2

зонаторов (рис. 2). Резонатор 1 образован объемом горячей нитки между перфорированной обечайкой шахты реактора (ПОШР) и крышкой горячего коллектора ПГ акустической массой m_1 и системой присоединенных к ней параллельных труб поверхности теплообмена ПГ акустической массой m . Прогнозируемая (рассчитанная) частота АСВ в этой ЦАМПП в номинальном режиме работы реактора равна 25.05 Гц.

Резонатор 2 образован объемом холодной нитки между крышкой холодного коллектора и ГЦН массой m_2 и системой присоединенных к ней параллельных труб поверхности теплообмена ПГ акустической массой m . Прогнозируемая (рассчитанная) частота АСВ в этой ЦАМПП в номинальном режиме работы реактора составляет 23.59 Гц.

Электрическим аналогом этих резонаторов являются последовательно соединенные емкость и индуктивность, а механическим аналогом — груз массой m на пружине 1 массой m_1 (резонатор 1) и пружине 2 массой m_2 (резонатор 2).

Резонатор 3 объединяет эти резонаторы в колебательную систему, механическим аналогом которой является груз массой m с пружинами на его обоих концах, каждая из которых прикреплена к жесткой границе. Смещение груза на расстояние x приводит к тому, что пружина 1 удлиняется на расстояние x_1 и тянет за собой ПОШР, в то время как пружина 2 сжимается на расстояние x_2 и толкает ГЦН. Прогнозируемая (рассчитанная) частота АСВ в этой ЦАМПП в номинальном режиме работы реактора равна 25.48 Гц.

На рис. 3 приведены АСПМ сигналов от датчиков пульсаций давления системы SÜS. При сопоставлении результатов измерения АСПМ видно многократное увеличение мощности пульсаций давления (25 Гц) на оборотной частоте ГЦН в режиме работы реактора с номинальной мощностью. Такое anomальное увеличение свидетельствует о возникновении акустических резонансов в полосе пропускания оборотной частоты и является подтверждением достоверности результатов прогнозирования частот АСВ, генерируемых в I контуре АЭС с ВВЭР, которое проведено с использованием новой, не имеющей аналогов ЦАМПП.

Методика расчета частот АСВ в ЦАМПП аналогична приведенной для ЦАМЯР. В ней используются соотношения, представленные в [8], в которых акустической массой являются трубы поверхности теплообмена ПГ, а акустической податливостью — участки главного циркуляционного контура (см. рис. 1). В табл. 2 приведены результаты расчета акустических характеристик элементов I контура, входящих в акустическую модель парогенератора, при работе в номинальном режиме с температурой в горячей нитке 297°C и давлением 12.5 МПа.

Далее приведены данные расчета АСВ, Гц, в трех ЦАМПП ВВЭР-440 модели парогенератора (см. рис. 2):

Вариант 1:

ГН от крышки ГК
до поворота на 90° (4.95 м),
ХН от крышки ХК
до ГЦН (12.939 м)24.58

Вариант 2:

ГН от крышки ГК
до выхода из реактора (17.09 м),
ХН от крышки ХК
до поворота на 90° (6.470 м)25.05

Вариант 3:

ГН от крышки ГК
до выхода из реактора (17.09 м),
ХН от крышки ХК
до ГЦН (12.94 м)25.48

Сравнивая результаты расчета частот АСВ с данными измерений, можно видеть, что частоты АСВ, генерируемые в ПГ при работе АЭС в номинальном режиме реактора, равные 24.58, 25.05, 25.48 и 23.59 Гц, существенно увеличивают вибрации ГЦН, так как попадают в полосу пропускания оборотной частоты 25 Гц. Результаты сопоставления частот АСВ, генерируемых в акустических системах, соответствующих ЦАМЯР и ЦАМПП, указывают на то, что в указанных далее элементах оборудования АЭС в номинальном режиме и в исследованных этапах пусковых режимов могут возникать резонансы АСВ с вибрациями оборудования. В табл. 3 приведены температура t и давление p теплоносителя на выходе из реактора, а также перечень контуров, в которых наблюдаются вибрации и колебания.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют верифицированные методы расчета частот АСВ в реакторных установках и, соответственно, международные нормативные документы не предусматривают предотвращения возникновения виброакустических резонансов в эксплуатационных и аварийных режимах. Подавляющее большинство

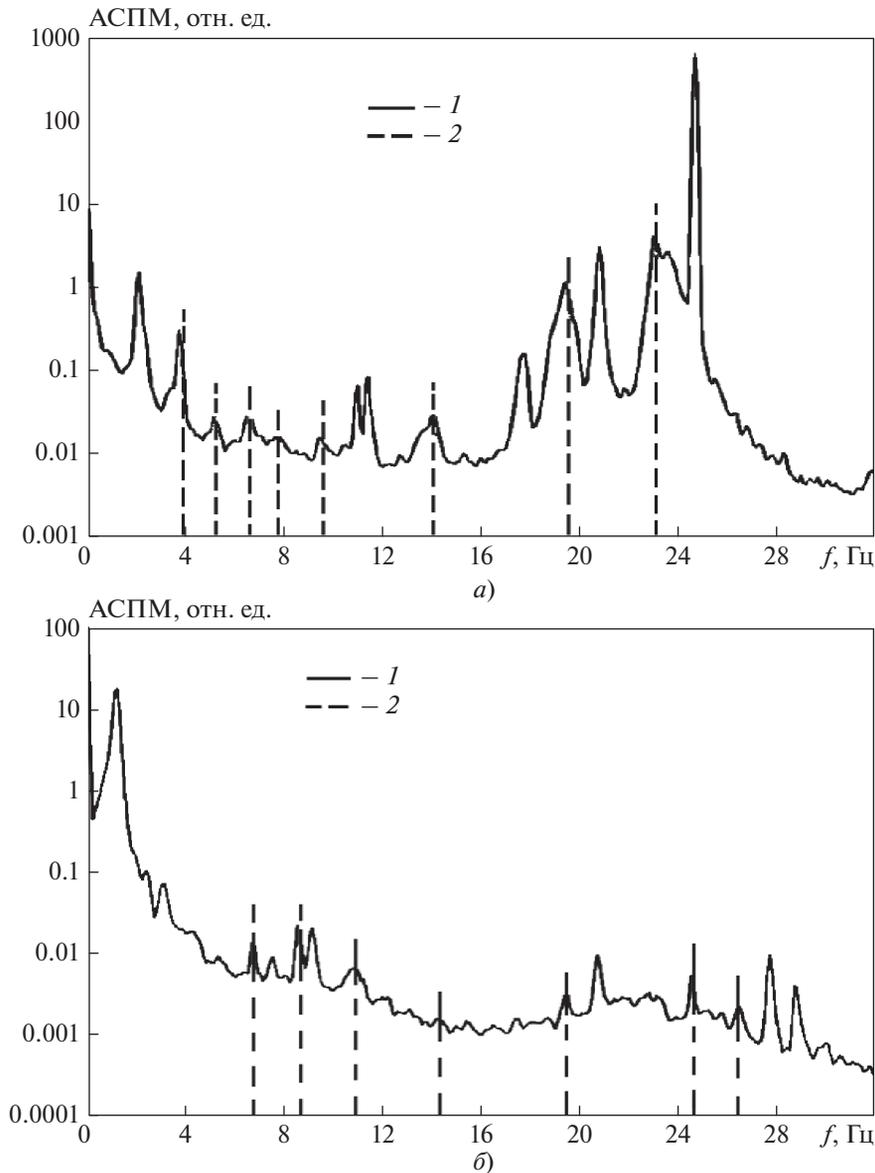


Рис. 3. Зависимость АСПМ от частоты при работе в номинальном режиме (а) и режиме нулевой мощности реактора (б). 1 – АСПМ пульсаций давления; 2 – результаты расчета прогнозируемых частот АСВ, генерируемых в цифровых акустических моделях реактора и парогенератора

доминирующих пиков в АСПМ пульсаций давления в публикациях, посвященных выявлению источников возбуждения АСВ, до сих пор не интерпретированы [11, 12]. Системы SÜS, установленные на энергоблоках с ВВЭР-440 № 1 и 2 Кольской АЭС, № 3 и 4 Нововоронежской АЭС, показывают очень близкие спектральные составные значения колебаний корпуса реактора. Результаты расчета частот АСВ по принятой методике сравниваются с данными виброизмерений основного оборудования ВВЭР-440 в [11]. Результаты частотного расчета АСВ в I контуре ВВЭР-440 характеризуют его индивидуальное акустическое поле, которое не могло быть воспроизведено в лабораторных

условиях. По этой причине в работах [13–19] исследуется влияние локальных вихрей, которые не являются системными причинами колебаний.

В работе [13] для моделирования сложных трехмерных процессов теплогидравлических и гидродинамических расчетов активной зоны реактора были применены модельные коды CFD. Показано, что для определения нагрузок на твэлы для последующего динамического анализа может быть использован расчет CFD. В [14] представлены результаты моделирования больших вихрей с использованием топливных трубок CANDU и вихревых явлений. В работе [15] для определения зависящих от времени сил, действующих на пучок

Таблица 2. Акустические характеристики участков контура, входящих в акустическую модель парогенератора

Номер участка (см. рис. 1)	Скорость распространения ударной волны, м/с	Акустическая податливость, $10^{-9} \text{ м}^4 \cdot \text{с}^2/\text{кг}$	Акустическая масса, $\text{кг}/\text{м}^4$	СЧКД, Гц
5	951.9	2.5525	32017	17.267
10	951.7	1.1927	16491	36.944
11	965.5	3.1717	6254	35.734
12	1024.0	8.9710	9429	17.305
13	1105.1	2.2607	6696	40.905
14	1082.8	1.8157	34857	19.948

твэлов, были применены методы моделирования больших вихрей (LES – Large Eddy Simulation).

В работе [13] рассмотрено взаимодействие потока и конструктивных конструкций в упрощенной ТВС и показано, что потеря устойчивости стержня происходит при высоких скоростях осевого потока. В [14] представлены данные о вызванной потоком вибрации и связанном с ней фреттинг-износе в пучке твэлов. Термогидравлический код Hydra-TH использовали для расчета течений с высоким числом Рейнольдса. Запатентованный код VITRA, разработанный компанией Westinghouse, был применен для нелинейных расчетов динамики конструкции и скорости износа. Однако оказалось, что ТВС и твэлы, предназна-

ченные для реакторов PWR, не пригодны для использования в ВВЭР, а ТВС и твэлы, предназначенные для ВВЭР, не пригодны для использования в PWR, так как компоновки их первых контуров имеют существенные различия. Причины этого заключаются в том, что каждая модификация реактора имеет свое индивидуальное акустическое поле, в котором колебания ТВС удовлетворяют требованию не превышать допустимого уровня. Чтобы обеспечить выполнение этого требования в другом акустическом поле, необходимо соответствующее изменение конструкции ТВС.

В работах [18, 19] приведены результаты вычислительных экспериментов по исследованию гидродинамики и теплообмена в различных элементах трубных систем ядерных энергетических установок. Установлено, что вихревая структура течения теплоносителя существенно зависит от схемы трубопровода и последовательности изгибов различной направленности. Показано, что наличие участков с трехмерной кривизной каналов обуславливает генерацию крупномасштабного вихревого движения и возникновение низкочастотных акустических колебаний в трубопроводе. В результате проверки по условиям отстройки частот, генерируемых крупными вихревыми структурами, от собственных частот колебаний элементов трубной системы определены частоты, опасные с точки зрения возможности наступления режима резонансной неустойчивости.

Ценность создания и верификации ЦАМЯР и ЦАМПГ заключается в возможности прогнозирования динамических нагрузок в реакторах большой, малой и средней мощности, рассчитанных на длительную эксплуатацию в маневренных условиях. Разработанная модель может быть адаптирована к любым ВВЭР независимо от их геометрических размеров, состояния теплоносителя и типов его циркуляции. Метод расчета частоты акустических колебаний в теплоносителе горячей петли ВВЭР основан на том, что теплоноситель, как и любой конструктивный элемент, обладающий массой и упругостью, имеет собственные частоты колебаний, которые могут резонировать с источ-

Таблица 3. Контур, в которых наблюдаются вибрации и колебания

Контур (см. рис. 1)	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{ МПа}$
Частота вибрации ТВС с двумя закрепленными концами равна 4.0–6.0 Гц		
16 + 1 + 2	60–296	1.8–12.3
16 + 1 + 2 + 3	60–296	1.8–12.3
	201–296	7.3–12.3
Вторая мода колебаний ТВС с двумя закрепленными концами составляет 8.0–12.0 Гц		
16 + 1	60–201	1.8–7.3
1 + 2	241–296	10.7–12.3
1 + 2 + 3	136–296	4.8–12.3
1 + 2 + 3 + 4	60–1396	1.8–4.8
Частота колебаний ТВС совместно с корпусом равна 11.5–13.5 Гц		
13 + 14	241–296	10.7–12.3
11 + 12 + 13	60–172	1.8–7.0
Частота вертикальных колебаний корпуса 16.0–17.0 Гц совпадает с частотами АСВ		
13 + 14	61–136	1.77–4.60

никами гидродинамических возмущений и вибрациями.

В данной работе исследована акустическая схема горячей петли ВВЭР, образованной акустическими элементами парогенератора, трубопроводами I контура и частью реактора, заключенной между перфорированной обечайкой шахты реактора с учетом особенностей их компоновки и трассировки и присущих им теплогидравлических и геометрических параметров. Методика расчета построена на использовании механической системы, состоящей из груза, расположенного между двумя соединенными с ним и закрепленными по краям пружинами, и ее электроакустического аналога.

Анализ результатов расчета частот АСВ, генерируемых парогенератором при работе реактора, позволяет сделать важный вывод о зависимости обратных связей между нейтронно-физическими и теплофизическими процессами, обусловленных самовозбуждением АСВ, не только от температурного (плотностного) коэффициента реактивности, но и от акустических параметров (акустической массы и акустической податливости) источника их возникновения. Однако верификация моделей, разработанных для конкретной АЭС, может быть выполнена только на ней самой. В то же время верификация, проведенная на Нововоронежской АЭС, подтверждает достоверность теоретических основ и расчетных методов, использованных при создании ЦАМЯР и ЦАМП.

ВЫВОДЫ

1. В результате самоорганизации хаотические турбулентные пульсации и вихри в АЭС с ВВЭР преобразуются в упорядоченные колебания.
2. Разработанный метод и алгоритм расчета акустических стоячих волн имеет четкий физический смысл и механическую интерпретацию.
3. Результаты теоретического анализа и расчета акустических стоячих волн, генерируемых в цифровых акустических моделях, подтверждены данными измерений на АЭС с ВВЭР.
4. Верификация цифровой акустической модели ВВЭР-440 проводилась в условиях взаимодействия нейтронно-физических и теплогидравлических процессов.
5. Акустические свойства ядерного реактора, независимо от количества подключенных к нему петель теплоносителя, аналогичны свойствам группы одновременно функционирующих резонаторов Гельмгольца.
6. Применение цифровых акустических моделей позволяет оптимизировать конструкторские и технологические решения путем минимизации циклических нагрузок в эксплуатационных и ава-

рийных режимах и при сейсмических воздействиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лизоркин М.П.** Расчетное моделирование нейтронно-физических и сопряженных физико-теплогидравлических процессов в реакторах ВВЭР: дис. ... канд. техн. наук. М.: РНЦ "Курчатовский институт", 2007.
2. **Krysl V.** Руководство пользователя Moby-Dick. Отчет SCODA JS. Пльзень: Ae 10068/Dok Rev3. 2005.
3. **Proskuryakov K.** Scientific basis for modelling and calculation of acoustic vibrations in the nuclear power plant coolant // J. Phys. Conf. 2017. Ser. 891. P. 012182. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/891/1/012182>
4. **Ольсон Г.** Динамические аналогии. М.: Гос. изд-во иностр. лит., 1947.
5. **Самарин А.А.** Вибрации трубопроводов энергетических установок и методы их устранения. М.: Энергия, 1979.
6. **Шарый Н.В.** Методы расчетного обоснования прочности и динамика конструкций реакторных установок для АЭС с ВВЭР: дис. ... докт. техн. наук. Подольск: ФГУП ОКБ "Гидропресс", 2008.
7. **Проскураков К.Н.** Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ. М.: МЭИ, 1984.
8. **Проскураков К.Н.** Цифровая акустическая модель водо-водяного энергетического реактора // Теплоэнергетика. 2021. № 9. С. 16–22. <https://doi.org/10.1134/S004036362109006X>
9. **Слепов М.Т.** Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС: дис. ... канд. техн. наук. Обнинск, ФГУП ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999.
10. **Проскураков К.Н.** Создание и верификация акустической модели ядерного реактора // Научно-технические технологии. 2019. Т. 20. № 4. С. 62–69. <https://doi.org/10.18127/j19998465-201904>
11. **Аркадов Г.В., Павелко В.И., Усанов А.И.** Виброшумовая диагностика ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 2004.
12. **Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У.** Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2016. № 4. С. 44–52.
13. **A new method to predict grid to-rod in a PWR fuel assembly inlet region / J. Yan, K. Yuan, E. Tatli, Z. Karoutas // Nucl. Eng. Des. 2011. V. 241. P. 2974–2982. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.06.019>**
14. **Bhattachary A., Yu S.D., Kwall G.** Numerical simulation of turbulent flow through a 37-element CANDU fuel bundle // Ann. Nucl. Energy. 2012. V. 40. Is. 1. P. 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.10.017>
15. **Delafontaine S., Ricciardi G.** Fluctuating pressure calculation induced by axial flow through mixing grid // Nucl. Eng. Des. 2012. V. 242. P. 233–246. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.09.033>

16. **Lui Z., Liu Y., Lu J.** Numerical simulation of the fluid-structure interaction for two simple fuel assemblies // Nucl. Eng. Des. 2013. V. 258. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.01.029>
17. **Mohany A., Hassan M.** Modelling of fuel bundle vibration and the associated wear in a CANDU fuel channel // Nucl. Eng. Des. 2013. V. 264. P. 214–222. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.08.039>
18. **Митрофанова О.В.** Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерных энергетических установок. М.: Ленанд, 2020.
19. **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. 74–282.

Verification of a Reactor’s Digital Acoustic Model in the Startup and Nominal Operation Modes of NPPs Equipped with VVER Reactors

K. N. Proskuryakov^{a,*}, A. V. Anikeev^a, and I. Afshar^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI), Moscow, 111250 Russia

*e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru

Abstract—At present, the regulatory technical documents developed in the late 21st century that stipulate design solutions and operating regulations for nuclear power plants do not include provisions for predicting and preventing the occurrence of vibroacoustic resonances of structures involving acoustic standing waves (ASWs) in operational and emergency modes and also under the effect of seismic waves. This results in that the existing feedbacks between neutronic and thermophysical processes under the conditions of coolant density fluctuations caused by ASWs have not been given proper attention. A nuclear reactor digital acoustic model (NRDAC), using which it is possible to identify the sources of self-exciting ASWs and to predict their frequency, has been developed at the NRU MPEI Department of Nuclear Power Plants. The article presents a new method for identifying the ASW frequencies in the acoustic system comprising a pressurized water reactor (in its Russian version known as a VVER, meaning a water-cooled, water moderated power-generating reactor) with the cold and hot leg pipelines connected to it. The models and analysis methods have passed verification in the Novovoronezh NPP unit 3 equipped with a VVER-440 reactor. For measuring the auto-spectral power densities (ASPD) of pressure pulsations, the main equipment vibration monitoring system SÜS developed by Siemens was used. The predicted values of ASW frequencies are consistent with the signals measured by pressure pulsation sensors. It is shown that the ASW frequencies depend on the operation conditions and may coincide with the pressure fluctuation frequencies caused by the operation of reactor coolant pumps (RCPs) with vibration of fuel assemblies (FAs) and equipment of the NPP reactor coolant system. It is shown that, whatever the number of coolant circulation loops, the nuclear reactor acoustic properties are similar to the properties of a group of simultaneously used Helmholtz resonators. By using the verified procedure, it is possible to optimize the design and layout solutions by constructing equipment able to minimize undesirable cyclic loads. This possibility is the most important one from the viewpoint of ensuring long-term operation of small modular reactors in maneuverable modes. Small NPPs should be highly maneuverable to complement renewable energy sources. The majority of small modular reactors are designed for little-attended operation with long periods of time between refueling outages (2–10 years vs. 12–24 months in large power units) or with the fuel loaded for the entire life cycle. The requirements of ensuring long-term operation in maneuverable modes can be fulfilled subject to minimizing the dynamic loads applied to the reactor plant structures by preventing the occurrence of hydrodynamic instability and resonances of structural vibration with acoustic fluctuations of coolant.

Keywords: vibration, fuel assemblies, Helmholtz resonator, cyclic loads, dynamic loads, coolant, optimization of structures and layouts, verification of analysis methods