

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ВВОД
В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**
DESIGN, MANUFACTURE AND COMMISSIONING
COMMISSIONING OF EQUIPMENT
NUCLEAR INDUSTRY FACILITIES

УДК 621.384.039
DOI 10.26583/gns-2023-03-05
EDN PGYCOF



Цифровая акустическая модель компенсатора давления АЭС с ВВЭР

К.Н. Проскуряков , М.С. Хвостова , Р.М. Исмаил , К.А. Яковлев

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Россия

proskuriakovkn@mpei.ru

Аннотация. Экспериментально доказано, что главной причиной возбуждения вибраций оборудования и внутрикорпусных устройств главного циркуляционного контура (ГЦК) являются акустические стоячие волны (АСВ), которые образуются, как результат сложения двух бегущих в противоположных направлениях волн и главные циркуляционные насосы (ГЦН). Использование междисциплинарного подхода позволило создать цифровую акустическую модель системы компенсации давления (КД) с присоединёнными к нему трубопроводами и доказать, что он представляет собой автоколебательную систему, генерирующую акустические стоячие волны (АСВ) подобно одновременному функционированию нескольких резонаторов Гельмгольца. Каждый резонатор Гельмгольца в КД способен подавить определенную частоту АСВ, генерируемых реактором, которая зависит от температуры теплоносителя. Расчёт частот акустических волн, иначе говоря, собственных частот колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ), в системе компенсации давления проведенный по формуле Томсона основан на методе электроакустической аналогии. Акустическая податливость КД и акустическая масса различных сочетаний подключаемых к нему трубопроводов позволяют рассчитать СЧКДТ, в рассматриваемой системе, по формуле, представленной в виде акустических аналогов индуктивности и емкости. Рассчитаны акустические параметры системы резонаторов Гельмгольца образованных КД и соединительным трубопроводом с горячей ниткой третьей петли в номинальном режиме эксплуатации АЭС с ВВЭР-1000. Разработана и верифицирована технология, преимуществом которой является использование КД, для демпфирования АСВ, частоты которых попадают в полосу пропускания вибрации конструктивных элементов первого контура. Приведено расчётное и экспериментальное доказательство ранее неизвестной способности КД демпфировать в широком диапазоне частот АСВ генерируемые реактором и обоснована возможность предотвращать резонансы с вибрациями оборудования и конструкциями АЭС.

Ключевые слова: система компенсации давления, демпфирование АСВ, АСПМ пульсаций давления, резонатор Гельмгольца, собственная частота колебаний, вибрации срок службы, маневренный режим, оборудование, акустическое поле.

Для цитирования: Проскуряков К.Н., Хвостова М.С., Исмаил Р.М., Яковлев К.А. Цифровая акустическая модель компенсатора давления АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2023;13(3):51–61. <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-05>

Digital acoustic model of an NPP pressurizer with WWER

Konstantin N. Proskuryakov , Marina S. Khvostova ,
Ragy M. Ismail , Kirill A. Yakovlev

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

proskuriakovkn@mpei.ru

Abstract. It is experimentally proven that the main cause of vibration excitation of equipment and internals of the main circulation circuit (MCC) are acoustic standing waves (ASW) and main circulation pumps (MCP). Usage of an interdisciplinary approach made it possible to create a digital acoustic model of pressurizer system with pipelines attached to it and prove that it is a self-oscillating system capable of generating acoustic standing waves (ASW) similar to simultaneous operation of several Helmholtz resonators. Each Helmholtz resonator in

pressurizer is able to suppress a certain frequency of ASW generated by the reactor, which depends on coolant temperature. Determination of natural frequencies of coolant pressure oscillations (NFCPO) in pressurizer using Thomson formula is based on method of electroacoustic analogy. Acoustic compliance of pressurizer and acoustic mass of various combinations of pipelines connected to it make it possible to calculate NFCPO, in the system under consideration, according to the formula presented in the form of acoustic analogues of inductance and capacitance. Acoustic parameters of a system of Helmholtz resonators formed by a pressurizer and a connecting pipeline with hot leg of the third loop in nominal operating mode of NPP with WWER-1000 are calculated. A technology has been developed and verified, advantage of which is usage of a pressurizer for damping ASW, frequencies of which fall within vibration bandwidth of primary circuit structural elements. Calculation and experimental proof of previously unknown ability of pressurizer to damp ASW generated by the reactor in a wide frequency range is given, and possibility of preventing resonances with vibrations of equipment and NPP structures is substantiated.

Keywords: pressurizer system, ASW damping, ASPD of pressure pulsations, Helmholtz resonator, natural oscillation frequency, vibration life, maneuvering mode, equipment, acoustic field.

For citation: 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;13(3):51–61 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2023-03-05>

Введение

Одной из приоритетных проблем является создание методов, технических средств и программного обеспечения для раннего выявления и предотвращения условий эксплуатации, приводящих к совпадению резонансному или близкому к резонансному взаимодействию колебаний и вибраций внутрикорпусных устройств (ВКУ) оборудования, тепловыделяющих сборок (ТВС) и тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) с СЧКДТ. Источниками колебаний давления теплоносителя являются: ГЦН, вращение которых приводит к появлению в спектре пульсаций давления частот комбинационных и кратных его оборотной частоте, турбулентность потока, вихреобразования в зонах изменения проходных сечений и направлений движения потока, а также СЧКДТ, поскольку теплоноситель обладает, как и любой конструктивный элемент, массой и упругостью. Эти колебания, фиксирующиеся датчиками, расположенными в различных точках проточной части первого контура вызывают вибрации оборудования и отдельных его элементов. Вибрации могут стать причиной повреждения трубных систем, ВКУ оборудования и ТВС [1-6].

В настоящее время во всех передовых странах процессы резонансного взаимодействия вибраций оборудования и колебаний теплоносителя в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) исследованы недостаточно и требования их предотвращения не предусмотрены нормативной документацией. Резонансное разрушение конструкций происходит в тех случаях, когда СЧКДТ возникающие при авто генерации АСВ начинают сравниваться с собственными частотами колебаний конструкции. Если СЧКДТ попадёт в полосу пропускания собственных колебаний оборудования или его конструктивных элементов, то эти колебания усиливаются, что может привести к механическим повреждениям оборудования [7-9]. Однако, исследованию механизма генерации АСВ и их подавления не уделено должного внимания.

Предотвращение условий эксплуатации, приводящих к повышению вибраций из-за возникновения виброакустических резонансов (ВАР) в первом контуре АЭС с ВВЭР-1000 должно быть обеспечено внесением дополнений в регламент эксплуатации и осуществлено средствами штатных систем АСУТП АЭС с ВВЭР. При этом повышается эффективность и срок службы основного оборудования, а также обеспечивается безотказная работа энергоустановок в маневренных режимах, которая относится к числу приоритетных требований к АЭС нового поколения.

Современные аналитические математические модели базируются на результатах расчетов распределения масс и жесткости при определенных граничных условиях. Эти

расчеты обычно выполняются по методу конечных элементов и в результате выводится система большого числа дифференциальных уравнений, которые рассчитываются с помощью специального программного обеспечения типа ANSYS [4,5,10,11]. При этом отсутствует возможность распознавания источников авто генерации пульсаций давления в ядерном реакторе.

В работе К.Н. Проскурякова «Верификация цифровой акустической модели реактора в пусковых и штатных режимах работы АЭС с реакторами ВВЭР» [7] показано, что реактор является автоколебательной системой, с отрицательной диссипацией, генерирующей акустические волны, параметры которых, не зависят от начальных условий и определяются только геометрическими характеристиками оборудования первого контура и термодинамическими характеристиками теплоносителя.

Недостатком ANSYS, при решении задач в области акустики и динамики жидкости, является отсутствие математического моделирования механизма возникновения автоколебаний в акустической системе первого контура и анализа, возникающих в нём системных эффектов, при которых акустические свойства системы не сводятся к сумме свойств колебательных процессов в отдельных составляющих её акустических элементах, но придают системе новые свойства, отсутствующие у отдельно взятых элементов.

Следствием этого является непригодность ANSYS не только для прогнозирования и предотвращения ВАР в эксплуатационных режимах, но, что особенно важно, при авариях и воздействии сейсмических и ударных нагрузок.

Создание в НИУ «МЭИ» Цифровой акустической модели компенсатора давления АЭС с ВВЭР (ЦАМКД ВВЭР) стало возможным благодаря объединению трех фундаментальных научных результатов, полученных за период более ста лет: формулы Томсона-Кельвина для разряда конденсатора, полученной в 1853 г.; открытия свойства акустического резонатора, сформулированных Гельмгольцем в 1869 г.; доказательство К.Н. Проскуряковым в 1984 г. обоснованности применимости метода электроакустических аналогий для исследования пульсирующих течений однофазной и двухфазной среды при наличии отрицательной диссипации.

В публикации К.Н. Проскурякова «Создание цифровой акустической модели компенсатора давления атомной электрической станции с водо-водяным энергетическим реактором и ее практическое применение» [12] приведена информация о теоретическом и расчётном обосновании ранее неизвестных свойств компенсатора давления, как акустического фильтра, способного подавлять акустические волны, частоты которых попадают в полосу пропускания вибраций оборудования, внутрикорпусных устройств и опорных конструкций. В работах «Верификация цифровой акустической модели реактора в пусковых и штатных режимах работы АЭС с реакторами ВВЭР» и «Цифровая акустическая модель водо-водяного реактора» [7,8] дано описание механизма возникновения АСВ и определения их частот, проведенное с помощью идеализированных моделей в виде резонаторов Гельмгольца, а также результаты верификации ЦАМЯР ВВЭР-440, свидетельствующие о её достоверности и применимости для прогнозирования акустического поля РУ ВВЭР иных модификаций, с достаточной для практического применения точностью. Созданная цифровая акустическая модель компенсатора давления не имеет аналогов, её практическая значимость заключается в совершенствовании процессов проектирования и эксплуатации АЭС путём учета влияния конструкций водо-водяного энергетического реактора, компенсатора давления, трассировки трубопроводов на сейсмостойкость, безопасность, эффективность и срок службы, оборудования.

Целью работы является обоснование правомерности гипотезы К.Н. Проскурякова о существовании ранее неизвестного свойства системы компенсации давления ВВЭР, которое проявляется в том, что акустическое поле системы компенсации давления,

образованное стоячими волнами, адекватно воспроизводится одновременным функционированием нескольких резонаторов Гельмгольца. Эти резонаторы демпфируют соответствующую часть акустического поля остального оборудования первого контура АЭС с ВВЭР.

Система компенсации давления

Система КД (рис. 1) обеспечивает поддержание давления в первом контуре в стационарных режимах и ограничение отклонений давления в переходных и аварийных режимах. Система КД включает в себя паровой компенсатор давления с комплектом электронагревателей для испарения воды, импульсно-предохранительные устройства (ИПУ), барботер, трубопроводы и арматуру.

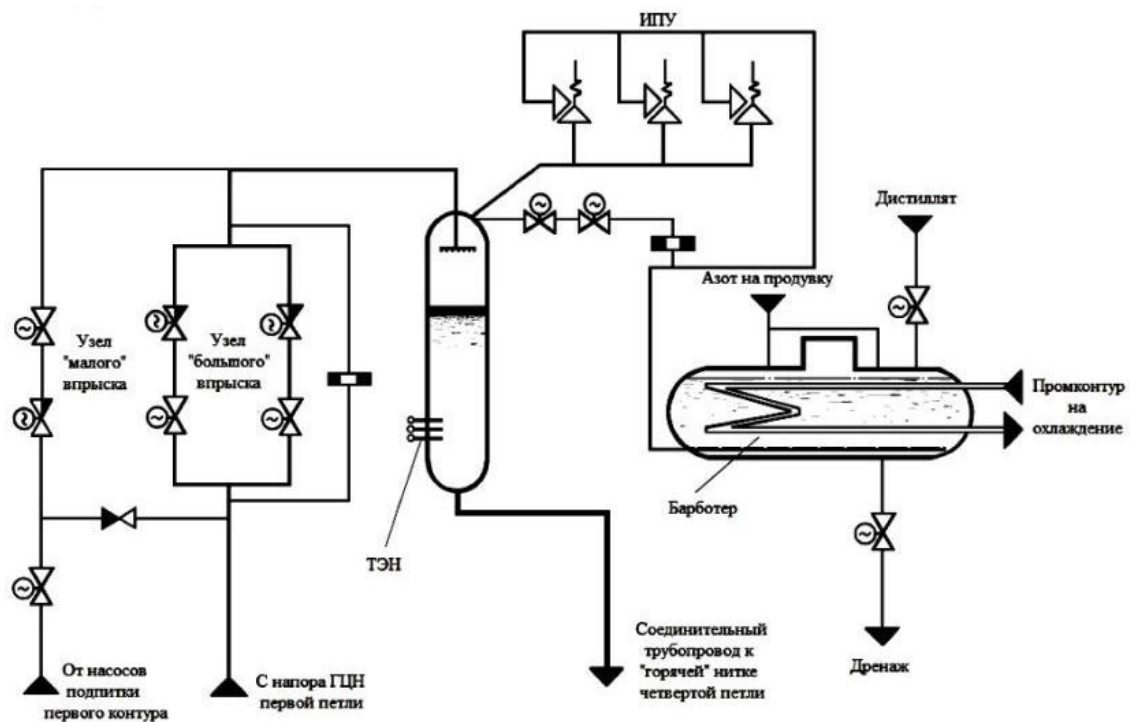


Рисунок 1. Система компенсации давления
Figure 1. Pressurizer system

Ограничение отклонений давления от заданного значения достигается за счет сжатия или расширения паровой подушки в КД. При увеличении давления паровая подушка сжимается, в результате чего происходит конденсация пара и ограничивается рост давления в первом контуре. В верхнее днище КД вварен трубопровод впрыска, соединяющий главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ) первой петли с парогазовым объемом КД. Впрыск предназначен для снижения давления в КД и, следовательно, в ГЦТ, а также для расхолаживания КД. Трубопровод через штуцер впрыска соединяется внутри сосуда компенсатора с коллектором распылителей. Впрыск условно разделяется на узел «большого» и «малого» впрыска. «Большой» впрыск имеет две идентичных параллельных нитки с запорной и запорно-регулирующей арматурой.

Линия «большого» впрыска имеет байпас диаметром 18 мм, обеспечивающий, при четырех работающих ГЦН перепад давления 0,6 МПа и расход 1,5 м³/ч. Байпасная линия обеспечивает постоянную циркуляции теплоносителя через трубопровод впрыска, с целью поддержания разогретого состояния и перемешивания среды для выравнивания концентрации борной кислоты и реагентов в первом контуре и в КД. ИПУ предназначены для сброса пара из КД в случае превышения давления в I контуре

выше заданного при неисправности впрыска или недостаточной его эффективности. ИПУ состоит из главного предохранительного клапана, импульсных клапанов, электротехнических устройств и трубопроводов связи.

Барботер представляет собой горизонтальный цилиндрический сосуд, заполненный «чистым» конденсатом. Внутри барботера размещены 2 раздающих коллектора, к ним по трубопроводу подводится пар от импульсного предохранительного клапана (ИПК) КД. По длине каждого коллектора расположены сопла, которые повышают эффективность конденсации пара.

КД (рис. 2) – это вертикальный сосуд, который установлен на цилиндрической опоре. В верхнем днище имеется люк для осмотра внутренних конструкций. Люк имеет штуцер под трубопровод сброса парогазовой смеси в барботер и под уровнемеры.

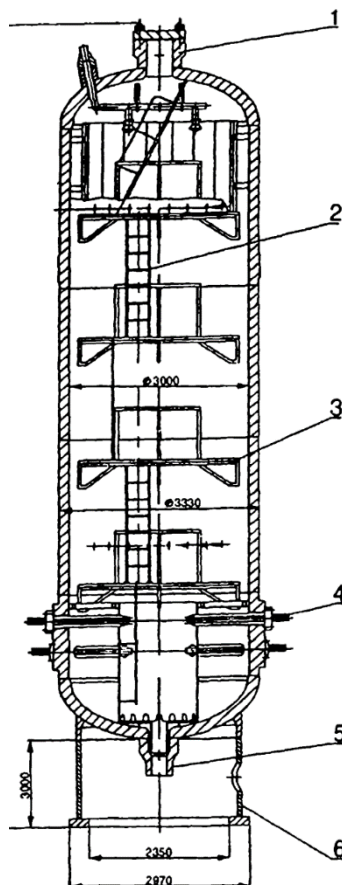


Рисунок 2. КД ВВЭР-1000: 1 – горловина; 2 – лестница; 3 – площадка; 4 – блок трубчатых электронагревателей; 5 – патрубок; 6 – опора

Figure 2. WWER-1000 pressurizer: 1 – neck; 2 – ladder; 3 – platform; 4 – block of tubular electric heaters; 5 – branch pipe; 6 – support

Механизм генерации акустических волн

Рассмотрим компенсатор давления, как резонатор Гельмгольца, способный генерировать несколько АСВ, частоты которых зависят от термодинамических параметров теплоносителя в системе компенсации давления и её геометрических размеров. Частота АСВ рассчитывается с учётом допустимой погрешности определения температуры и давления теплоносителя.

Определение СЧКДТ образующиеся в рассматриваемой, системе резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом проведено по формуле Томсона, представленной в виде акустических аналогов индуктивности и емкости (1) и полученной при использовании метода электроакустической аналогии [7]. Акустическая податливость КД и акустическая

масса различных сочетаний подключаемых к нему трубопроводов позволяют рассчитать СЧКДТ:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{mC}}, \quad (1)$$

где f_0 – расчетное значение СЧКДТ, Гц;

C – акустическая податливость среды, $\text{м}^4 \cdot \text{с}^2 / \text{кг}$;

m – сумма акустической массы системы, состоящей из акустических масс (акустической массой теплоносителя внутри КД пренебрегаем) подсоединенных к ней трубопроводов, $\text{кг}/\text{м}^4$, и ее расчет производится по формулам (2) и (3), а акустическая податливость рассчитывается по формуле (4):

$$m = \frac{\rho L}{S}, \quad (2)$$

$$\frac{1}{m_n} = \sum_i^n \frac{1}{m_i}, \quad (3)$$

$$C = \frac{LS}{\rho a^2}, \quad (4)$$

где L – длина сечения;

S – площадь поперечного сечения;

ρ – плотность среды;

a – средняя скорость звука, рассчитанная по формуле Н.Е. Жуковского (5) с учетом деформации труб и сжимаемости среды:

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot \left(\frac{D}{E_m \cdot \delta} + \frac{1}{\rho \cdot c^2} \right)}}, \quad (5)$$

где D – диаметр сечения;

E_m – объемный модуль упругости материала сечения;

δ – толщина стенки сечения;

c – скорость звука в среде.

Схема соединительного трубопровода КД и горячей нитки третьей петли показана на рисунке 3.

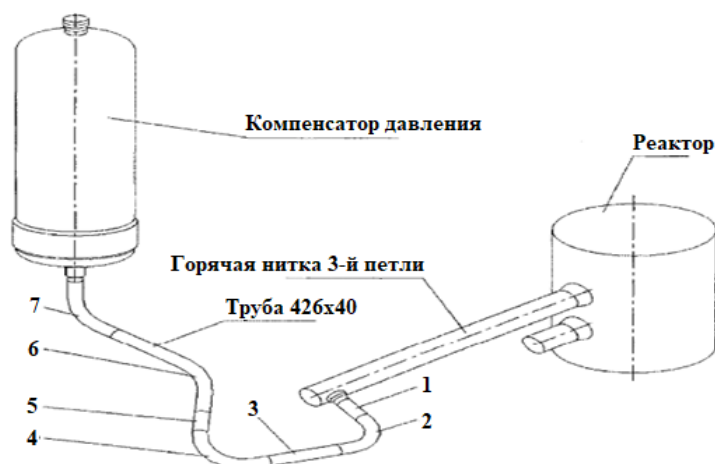


Рисунок 3. Схема соединительного трубопровода КД с горячей ниткой третьей петли
Figure 3. Scheme of pressurizer connecting pipeline with the hot leg of the third loop

КД соединен с горячей ниткой четвертой петли не имеющей арматуры трубопроводом, диаметр которого 400 мм. Через него теплоноситель перетекает из первого контура в компенсатор давления и обратно при изменениях температуры первого контура. В таблице 1 приведены значения СЧКДТ в участках соединительного трубопровода КД с горячей ниткой третьей петли при номинальном режиме работы реактора.

Таблица 1. СЧКДТ при номинальном режиме работы реактора

Table 1. NFCPO at the nominal mode of operation of the reactor

Участок	СЧКДТ, f Гц
1	6.855
2	19.83
3	67.653
4	34.544
5	42.488
6	39.812
7	77.016
8	36.7
9	40.837
10	50.123
11,12	148.059
13,14	112.891

Расчет трубопровода «холодного» впрыска

В верхней части днища компенсатора давления установлен трубопровод «холодного» впрыска, который соединяет напорный трубопровод насоса первой петли ГЦК с верхним паро-газовым объемом КД. Впрыскиваемая жидкость снижает давление в КД и, соответственно, в первом контуре реактора, а также охлаждает КД. «Холодный» впрыск разделен на две части: «малый» впрыск с трубопроводом 100 мм и «большой» впрыск с трубопроводом 200 мм. На рисунке 4 показана схема трубопровода «холодного» впрыска, обозначены участки, представляющие собой отдельные соответствующие им резонаторы. Всего в трубной системе «холодного» впрыска 14 резонаторов. СЧКДТ конкретных трубопроводов, изображенных на рисунке, можно рассчитать по формуле Проскурякова (6):

$$f = \frac{a}{2 \cdot \pi \cdot l}, \quad (6)$$

где a – скорость распространения ударной волны в упругом трубопроводе, м/с;

l – длина трубопровода, м;

f – частота собственных колебаний давления теплоносителя, Гц.

При различных режимах работы, узлы «большого» и «малого» впрысков могут быть заполнены как водой (переходный процесс), так и паром (останов).

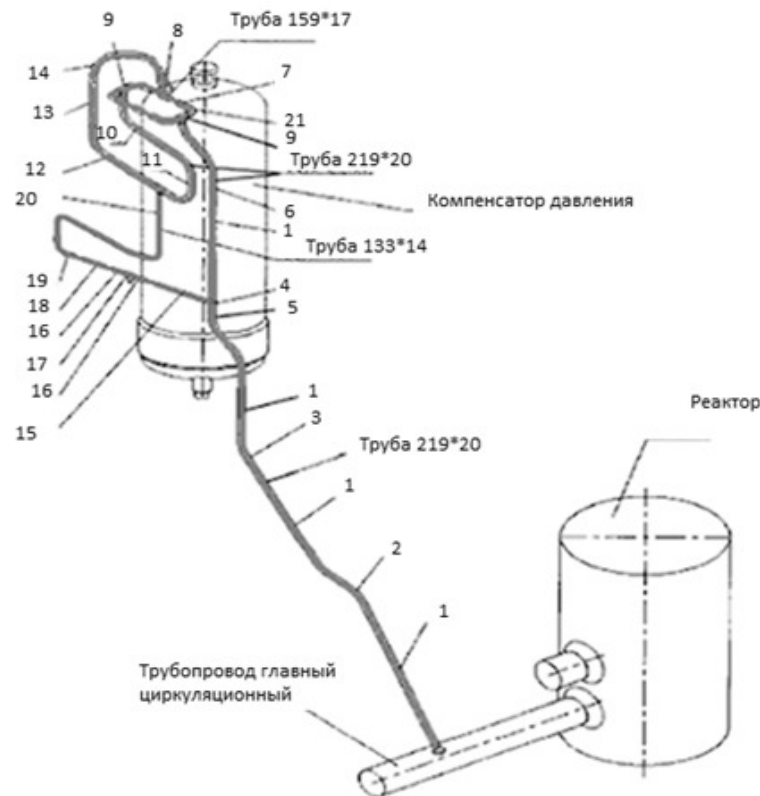


Рисунок 4. Схема трубопровода «холодного» впрыска
Figure 4. Scheme of the "cold" injection pipeline

На рисунке 5 [13] представлены автоспектральные плотности мощности (АСПМ) пульсаций давления теплоносителя, полученные при обработке сигналов от ДПД, установленных в первом контуре.

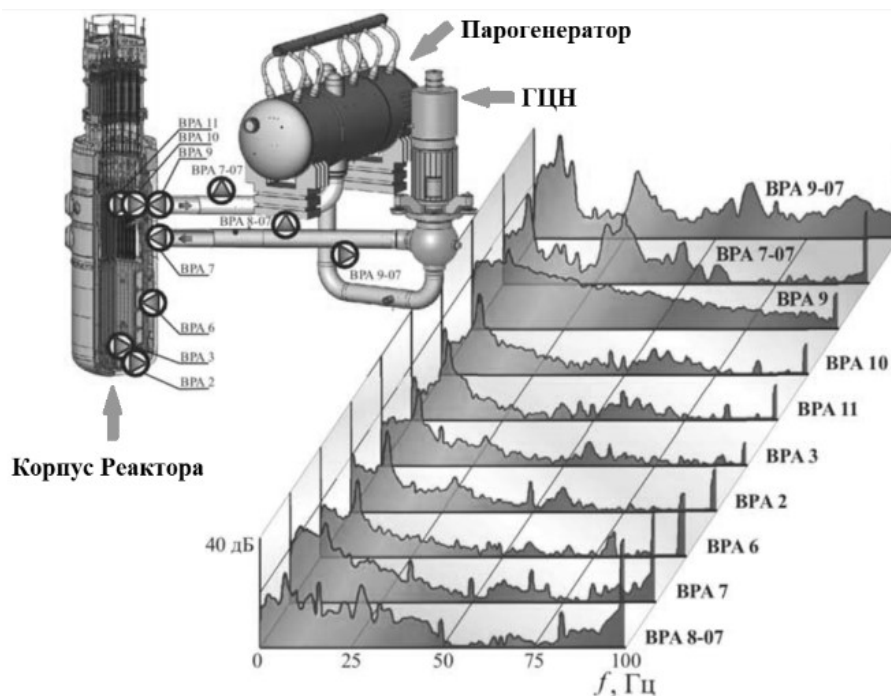


Рисунок 5. Распределение автоспектральной плотности мощности пульсаций давления по контуру РУ серии В-320 при работе четырёх ГЦН на номинальных параметрах [13]
Figure 5. Distribution of the autospectral power density of pressure pulsations along the circuit of the V-320 series reactor plant when four MCPs are operating at nominal parameters [13]

ДПД ВРА 7-07 установлен на петле №4, соединяющей реактор с парогенератором и с помощью дыхательного трубопровода с КД. При сопоставлении АСПМ ВРА-9 с АСПМ ВРА 7-07 видно демпфирование компенсатором давления пульсаций в диапазоне от 50 до 100 Гц (см. рис. 5). На рисунке 6 представлено соответствующее демпфирование динамических напряжений.

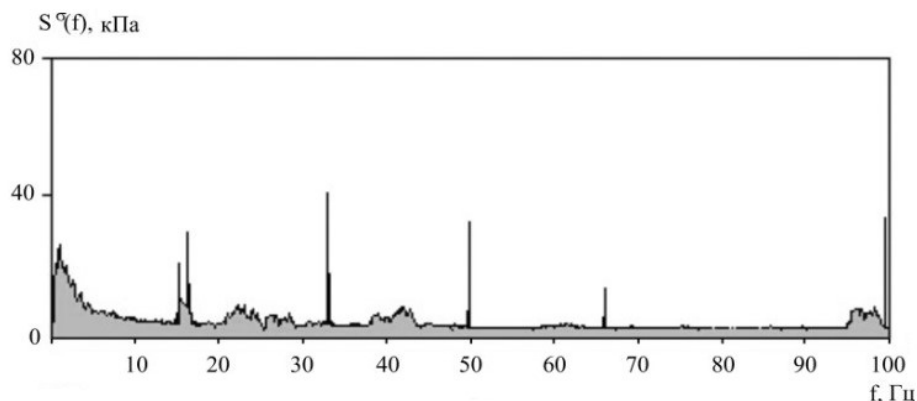


Рисунок 6. Спектрограмма динамических напряжений в шахте реактора на блоке 1 Балаковской АЭС
Figure 6. Spectrogram of dynamic stresses in the reactor shaft at Unit 1 of the Balakovo NPP

В таблице 2 представлены размеры и акустические параметры в номинальном режиме системы резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом с горячей ниткой петли 3, рассчитанные по соответствующим методикам¹ [7].

Таблица 2. Акустические параметры в системе резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом при давлении 16,0 МПа, температура на входе 289 °С, на выходе 322

Table 2. Acoustic parameters in the system of Helmholtz resonators, formed by the NPP pressurizer with WWER-1000 and connecting pipeline at a pressure of 16.0 MPa, inlet temperature 289 °C, outlet temperature 322

Резонатора Гельмгольца	Длина, м	Диаметр, м	Толщина стенки, м	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Скорость звука, $\frac{\text{м}}{\text{с}}$	$M, \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$	$C, \frac{\text{м}^4 \cdot \text{с}^2}{\text{кг}}$	СЧКДТ $f_0, \text{Гц}$
Участок 1 трубопровода	1,253	0,426	0,02	676,3	834,8	5945	3,9E-10	103
Участок 2 трубопровода	3,069	0,426	0,02	676,3	834,8	14562	9,7E-10	42
Участок 3 трубопровода	1,065	0,426	0,02	676,3	834,8	5053	3,3E-10	121
Участок 4 трубопровода	3,8697	0,426	0,02	676,3	834,8	18361	1,2E-09	33
Участки трубопровода 5+6+7	2,3	0,426	0,02	676,3	834,8	46801	3,2E-10	40
	3,8835							
	3,6799							
КД вода	9,167	3	0,165	585	597,7	759	3,1E-07	10
КД пар	3,833	3	0,165	107,4	429,2	58	1,3E-06	17
КД вода и пар	13	3	0,165	-	-	817	1,6E-06	4
Система (КД и трубопровод)	-	-	-	-	-	91541	9,6E-11	53

¹ Александров А.А., Очков А.В., Орлов К.А., Очков В.Ф. Программный комплекс WaterSteamPro. URL: <http://www.wsp.ru/ru/documentation/wsp/6.0/about.htm> (дата обращения: 02.08.2023).

Сопоставление значений СЧКДТ (см. табл. 2) с АСПМ от датчика БПА 9, БПА 9-07, установленного на выходе из реактора и датчика БПА 7-07 (см. рис. 5), а также всех остальных датчиков, показывает гашение СЧКДТ системой резонаторов Гельмгольца, образованных КД АЭС с ВВЭР-1000 и соединительным трубопроводом с горячей ниткой петли 3. Видны «провалы» АСПМ (см. рис. 5) при следующих значениях СЧКДТ: 42,33,40,10,17,4,53 (Гц).

Заключение

Разработана оригинальная цифровая акустическая модель КД (ЦАМКД), которая является ценным дополнением к ранее разработанным цифровым акустическим моделям оборудования первого контура.

Компенсатор давления и трубопроводы представляют собой несколько одновременно работающих резонаторов Гельмгольца, генерирующих серию АСВ.

Доказано, что акустическое поле системы компенсации давления АЭС с ВВЭР, образованное стоячими волнами, генерируемыми несколькими резонаторами Гельмгольца, демпфирует акустическое поле остального оборудования первого контура АЭС с ВВЭР и обеспечивает безопасность эксплуатации, эффективность работы и срок службы оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Егоров Ю.В. Экспериментальные исследования вибрации твэлов ТВС- 2М и ТВС-КВАДРАТ в потоке теплоносителя в обоснование вибрационной прочности. *XV Научно-техническая конференция молодых специалистов ОКБ «Гидропресс», 20-21 марта 2013 года : сборник трудов.* ОКБ «Гидропресс». Подольск, 2013. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2013/documents/kms2013-002.pdf> (дата обращения: 02.08.2023).
2. Bhattachary A., Yu S.D., Kawall G. Numerical simulation of turbulent flow through a 37 element CANDU fuel bundle. *Annals of nuclear energy.* 2012;40(1):87–105. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.10.017>
3. Delafontaine S., Ricciardi G. Fluctuating pressure calculation induced by axial flow through mixing grid. *Nuclear engineering and design.* 2012;(242):233–246. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.09.033>
4. Lui Z.G., Liu Y., Lu J. Numerical simulation of the fluid-structure interaction for two simple fuel assemblies. *Nuclear engineering and design.* 2013;(258):1–12. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.01.029>
5. Mohany A., Hassan M., Modeling of fuel bundle vibration and the associated wear in a CANDU fuel channel. *Nuclear engineering and design.* 2013;(264):214–222. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.08.039>
6. Макаров В.В., Афанасьев А.В., Матвиенко И.В. Модальный анализ макетов ТВС реакторов ВВЭР при силовом и кинематическом возбуждении вибрации. *V Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», ОКБ «Гидропресс», 29 мая - 1 июня 2007 года : сборник трудов.* ОКБ «Гидропресс». Подольск, 2007. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article56-ru.htm> (дата обращения: 02.08.2023).
7. 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;68(11):834–840. <https://doi.org/10.1134/S0040601521100049>
8. Proskuryakov K.N. The digital acoustic model of a pressurized water reactor. *Thermal Engineering.* 2021;68(9):673–678. <https://doi.org/10.1134/S0040601521090068>
9. Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Ismail R.M. Digital technology for constructing the acoustic field of reactor plants of the VVER type. *2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE).* Moscow, Russian Federation. 2023. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REEPE57272.2023.10086792>
10. Бугаева В.А., Олексюк Д.А., Киреева Д.Р. Моделирование с помощью CFD-кода поля температуры теплоносителя в головках ТВС АЭС-2006 и ВВЭР-1000. *Научно-техническая конференция «Теплофизика реакторов нового поколения», 16-18 мая 2018 года, г. Обнинск: сборник трудов.* Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского. Обнинск, 2018. С. 331–341. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37193067> (дата обращения: 02.08.2023).
11. Рябов А.А., Скибин А.П., Волков В.Ю., Голибродо Л.А., Крутиков А.А., Кудрявцев О.В. Создание цифрового двойника АЭС на основе вычислительной теплогидравлики. *CAD/CAM/CAE Observer.* 2018;7(123):41–45. URL: <http://www.cadcamcae.lv/N123/41-45.pdf> (дата обращения: 02.08.2023).

12. Проскуряков К.Н. Создание цифровой акустической модели компенсатора давления атомной электрической станции с водо-водяным энергетическим реактором и её практическое применение. *Вестник МЭИ*. 2022;(6):126–127. URL: <https://vestnik.mpei.ru/index.php/vestnik/article/view/887> (дата обращения: 02.08.2023).

13. Аникин А.А., Хайретдинов В.У. Исследование вибронпряженного состояния внутриреакторного оборудования ВВЭР-1000 при вводе в эксплуатацию энергоблока №2 Ростовской АЭС. *XII Научно-техническая конференция молодых специалистов ОКБ «Гидропресс», 17-18 марта 2010 года : сборник трудов*. ОКБ «Гидропресс». Подольск, 2010. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/kms2010/documents/kms2010-004.pdf> (дата обращения: 02.08.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Проскуряков К.Н. – создание цифровой акустической модели системы, состоящей из компенсатора давления и присоединённых к нему трубопроводов; анализ результатов расчета собственных частот колебаний давления теплоносителя;

Хвостова М.С. – разработка программы исследований, систематизация опубликованных результатов экспериментальных исследований вибраций и вибронпряженного состояния реакторного оборудования ВВЭР-1000;

Исмаил Р.М. – систематизация проектной информации, анализ результатов расчетов и оформление материалов статьи;

Яковлев К.А. – проведение расчетов акустического поля системы компенсации давления адекватной нескольким резонаторам Гельмгольца.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Константин Николаевич Проскуряков, д.т.н., профессор, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1884-5576>
Wos Researcher ID: I-3583-2017
e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

Марина Сергеевна Хвостова, к.г.н., начальник отдела экологии, радиационной и промышленной безопасности; и.о. зав. кафедрой АЭС, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0239>
e-mail: KhvostovaMS@mpei.ru

Раги Мухаммед Наср Хассанин Исмаил, аспирант кафедры АЭС, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2082-8322>
Wos Researcher ID: IAR-0530-2023
e-mail: IsmailIK@mpei.ru

Кирилл Алексеевич Яковлев, магистр, инженер, Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7672-7042>
e-mail: YakovlevKA@mpei.ru

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Proskuryakov K.N. – creation of a digital acoustic model of a system consisting of a pressure compensator and pipelines connected to it; based on the results of calculating the natural frequencies of fluctuations in the pressure of the coolant;

Khvostova M.S. – development of a research program, systematization of published results of experimental studies of vibrations and vibration-stressed state of WWER-1000 reactor equipment;

Ismail R.M. – systematization of project information, analysis of calculation results and design of article materials;

Yakovlev K.A. – calculations of the acoustic field of a pressure compensation system adequate to several Helmholtz resonators.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Konstantin N. Proskuryakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1884-5576>
Wos Researcher ID: I-3583-2017
e-mail: proskuriakovkn@mpei.ru

Marina S. Khvostova, Head of the Department of Ecology, Radiation and Industrial Safety, Acting head Department of Nuclear Power Plant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4141-0239>
e-mail: KhvostovaMS@mpei.ru

Ragy M. Ismail, graduate student of the Department of Nuclear Power Plant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2082-8322>; Wos Researcher ID: IAR-0530-2023 ; e-mail: IsmailIK@mpei.ru

Kirill A. Yakovlev, M.Sc., Engineer, National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7672-7042>
e-mail: YakovlevKA@mpei.ru

Поступила в редакцию 08.07.2023
После доработки 01.09.2023
Принята к публикации 05.09.2023

Received 08.07.2023
Revision 01.09.2023
Accepted 05.09.2023