

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И
ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
NUCLEAR, RADIATION AND
ENVIRONMENTAL SAFETY

УДК 621.039.58:621.311.25

<https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

EDN CZXZWF

Оригинальная статья / Original paper



Разработка методов и средств повышения экологической,
радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200

К.Н. Проскуряков  , М.С. Хвостова 

Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, Российская Федерация

 proskuriakovkn@mpei.ru

Аннотация. Во введении проведен обзор научных исследований источников генерации, характеристик и классификации инфразвука. Отмечается, что инфразвук обладает рядом особенностей, связанных с низкой частотой колебаний упругой среды и свойством дифракции. Инфразвук оказывает вредное воздействие на слух, дыхание, зрение, желудочно-кишечный тракт, нервную и сердечно-сосудистую системы, мозг и вестибулярный аппарат, приводя к снижению работоспособности, общему недомоганию и преждевременному старению человеческого организма. Методология теоретического обоснования методов обнаружения ранее неизвестных источников инфразвука, повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200 построена на использовании разработанных под руководством К.Н. Проскурякова цифровых акустических моделей оборудования первого контура, ответственного за безопасность эксплуатации. Методология практического подтверждения результатов расчетно-теоретического прогнозирования акустических параметров неизвестных ранее источников инфразвука представлена в виде двух этапов: а) разработка методики проведения верификации результатов прогнозирования и выбор в виде объектов энергоблока № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2; б) исследование условий возникновения вибро-инфразвуковых резонансов в первом контуре. Разработанный метод исследования источников инфразвука верифицирован на реакторной установке ВВЭР-1200. При обсуждении результатов проведенных исследований выявлены ранее неизвестные источники инфразвука. Разработаны инновационные методы анализа и демпфирования источников инфразвука и получен патент на изобретение № 2803181 «Способ предотвращения резонансного взаимодействия колебаний оборудования водо-водяных энергетических реакторов с акустически стоячими волнами и устройство для его реализации». Отмечены ошибки главного конструктора реакторных установок с ВВЭР в регламенте пуска новых энергоблоков, указаны их негативные последствия для здоровья персонала и состояния оборудования ответственного за экологическую, радиационную и промышленную безопасности АЭС с ВВЭР.

Ключевые слова: инфразвук, вибрации, резонанс, спектр отклика, акустические стоячие волны, землетрясение, регламент пуска новых энергоблоков.

Для цитирования: Проскуряков К.Н., Хвостова М.С. Разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200. *Глобальная ядерная безопасность*. 2024;14(1):29–36. <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

For citation: Proskuryakov K.N., Khvostova M.S. Development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial safety of NPPs with WWER-1200. *Global nuclear safety*. 2024;14(1):29-36 (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/gns-2024-01-04>

Development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial
safety of NPPs with WWER-1200

Konstantin N. Proskuryakov  , Marina S. Khvostova 

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

 proskuriakovkn@mpei.ru

Abstract. The introduction provides an overview of scientific research on the sources of generation, characteristics and classification of infrasound. It is noted that infrasound has a number of features related to the low oscillation frequency of the elastic medium and the diffraction property. Infrasound has harmful effects on hearing, breathing, vision, gastrointestinal tract, nervous and cardiovascular systems, brain and vestibular apparatus, leading to decreased performance, general malaise and premature aging of the human body. The methodology of theoretical substantiation of methods for detecting previously unknown sources of infrasound, improving the environmental, radiation and industrial safety of nuclear power plants with WWER-1200 is based on the use of digital acoustic models of primary circuit equipment responsible for operational safety developed under the guidance of K.N. Proskuryakov. The methodology of practical confirmation of the results of computational and theoretical forecasting of acoustic parameters of previously unknown infrasound sources is presented in the form of two stages: a) development of a methodology for verifying forecasting results and selection of power units No. 1, 2 of Novovoronezh NPP-2 in the form of objects; b) investigation of the conditions for the

occurrence of vibro-infrasound resonances in the first circuit. The developed method for investigating infrasound sources has been verified at the WWER-1200 reactor plant. When discussing the results of the conducted research, previously unknown sources of infrasound were identified. Innovative methods of analysis and damping of infrasound sources have been developed and a patent for invention No. 2803181 «A method for preventing resonant interaction of vibrations of water-water power reactor equipment with acoustically standing waves and a device for its implementation» has been obtained. The errors of the chief designer of reactor installations with WWER in the regulations for the launch of new power units are noted; their negative consequences for the health of personnel and the condition of equipment responsible for environmental, radiation and industrial safety of nuclear power plants with WWER are indicated

Keywords: infrasound, vibrations, resonance, response spectrum, acoustic standing waves, earthquake, regulations for the start-up of new power units.

1. Введение

Биологическое действие на организм человека ^{1,2}, а также экологическое и радиационное влияние АЭС на окружающую среду может быть значительно снижено при создании защиты от низкочастотных вибрации и инфразвука. Вибрационная безопасность означает «отсутствие условий, приводящих или способных привести к ухудшению состояния здоровья человека или к значительному снижению степени комфортности его труда в результате неблагоприятного воздействия вибрации. По способу передачи на тело человека вибрация подразделяется на локальную и общую. Общая вибрация подразделяется на: низкочастотную вибрацию (с преобладанием максимальных уровней в октавных полосах частот 1-4 Гц – для общей вибрации, 8-16 Гц».³ Для ослабления вибраций необходима отстройка от резонансного значения частоты вынуждающей силы.

Источники, характеристика и классификация инфразвука АЭС. АЭС являются источниками инфразвуковых колебаний, например главный циркуляционный насосный агрегат (ГЦНА) имеет частоту вращения 16,6 Гц и корпус реактора (5-12 Гц), здания реакторного острова совершают низкочастотные механические колебания (инфразвук механического происхождения), а турбулентные двухфазные и однофазные потоки газов и жидкостей в оборудовании генерируют инфразвук аэродинамического или гидродинамического происхождения.

Инфразвук обладает рядом особенностей:

- во много раз большие амплитуды колебаний, чем другие акустические волны, при равных мощностях источников звука;

- распространяется на большие расстояния от источника ввиду слабого поглощения его атмосферой;

- большая длина волны приводит к дифракции (огибание волнами).

Благодаря этому инфразвуки легко проникают в помещения и обходят преграды, задерживающие слышимые звуки; инфразвуковые колебания способны вызывать вибрацию крупных объектов вследствие явлений резонанса. Особенности инфразвука затрудняют борьбу с ним, так как классические способы, применяемые для снижения шума (звукопоглощение и звукоизоляция), а также удаление от источника малоэффективны. Предельно допустимые уровни инфразвуковых волн на рабочих местах указаны в санитарных нормах ⁴.

Воздействие инфразвука на организм человека.

Инфразвук является вредным фактором, оказывающим воздействующим на весь организм человека, и ухудшающим его здоровье и работоспособность. Инфразвуковые колебания изменяют нервную, сердечно-сосудистую, дыхательную, эндокринную и другие системы организма выраженность этих изменений зависит от интенсивности инфразвука и длительности воздействия. Колебания с уровнем звукового давления более 120-130 дБ в диапазоне частот от 2 до 10 Гц могут приводить к резонансным явлениям в организме. Для органов дыхания опасны колебания с частотой 1-3 Гц, для сердца – 3-5 Гц, для биотоков мозга – 8 Гц (особенно с частотой 7 Гц, так как совпадают с частотой α -ритмом биотоков мозга), для желудка – 5-9 Гц, для глазных яблок – 12-27 Гц. Инфразвуки очень высокой мощности вызывают кровоизлияния и разрывы тканей в грудной клетке и брюшной полости. Преходящие инфразвуки повышенной мощности вызывают повреждения внутренних органов [1]. Измерения инфразвука должны проводиться в соответствии с санитарными нормами ⁵. Для оценки доли инфразвука в общей шумовой обстановке на рабочем месте должны быть определены следующие характеристики: спектр шума, измеренный согласно «Мето-

¹ ГОСТ 12.1.003-2014 Шум. Общие требования безопасности. Система стандартов безопасности труда. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606> (дата обращения: 20.12.2023).

² СанПиН 2.2.4/2.1.8.10-32-2002 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9051905/page/24/> (дата обращения: 13.11.2023).

³ ГОСТ 12.1.012-2004 Вибрационная безопасность. Общие требования. Система стандартов безопасности труда. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200059881> (дата обращения: 20.12.2023).

⁴ СН 2.2.4/2.1.8.583-96 Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки. Санитарные нормы. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200029239> (дата обращения: 13.11.2023).

⁵ СанПиН № 11-12 РБ 94 Санитарные нормы инфразвука на рабочих местах. – Режим доступа: <https://tnpa.by/#!/DocumentCard/60217/60217> (дата обращения: 20.12.2023).

дам измерения шума на рабочих местах»⁶ с оценкой в соответствии с действующими допустимыми уровнями шума на рабочих местах. Вопросам шумового анализа уделяется большое внимание со стороны многих исследовательских коллективов и групп, что находит отражение в многочисленных публикациях [2–9]. В ряде работ высказывались обоснованные предположения о возможности возникновения резонансных явлений при совпадении частот гидродинамических колебаний теплоносителя с частотой вращения ГЦНА или ее гармониками, а также другого роторного оборудования. Однако экспериментальных работ для оценки предполагаемого эффекта до настоящего времени не проводилось.

2. Методология использования цифровых акустических моделей оборудования первого контура для теоретического обоснования ранее неизвестных источников инфразвука

Созданная цифровая акустическая модель КД не имеет аналогов; ее практическая значимость заключается в совершенствовании процессов проектирования и эксплуатации АЭС за счет учета влияния конструкций водо-водяных реакторов, трассировки трубопроводов на экологическую, радиационную и промышленную безопасность, сейсмостойкость, экономичность и срок службы оборудования.

Акустическая система реакторной установки (РУ) АЭС с ВВЭР-1200, приведенная на рисунке 1, состоит из ядерного реактора с присоединенными трубопроводами, она обладает 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. Расчет такой системы возможен с помощью трех различных моделей (первая представляет собой систему из реактора, соединенного с последовательным объединением холодных патрубков всех четырех петель (рис. 2а); вторая – система из реактора, соединенного с последовательным объединением горячих патрубков всех четырех петель (рис. 2б); третья – это резонатор Гельмгольца, образованный соединением с параллельным объединением горячих и холодных патрубков всех петель (рис. 2в)), разработанных и представленных в статье «Цифровая акустическая модель водо-водяного энергетического реактора» [3], проведен для энергоблоков № 1, 2 Нововоронежской АЭС-2. В таблице 1 приведены результаты расчета акустических параметров для номинального режима работы энергоблоков.

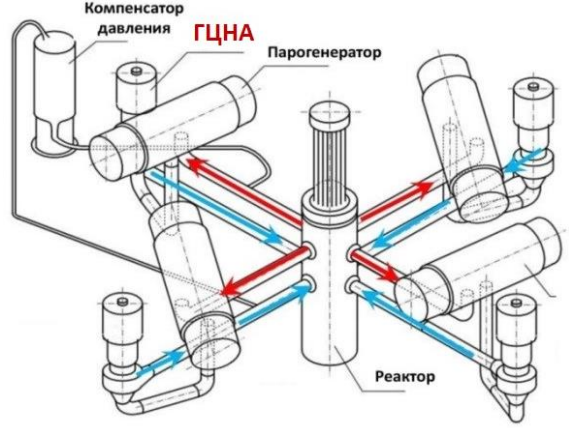


Рисунок 1. Схема четырехпетлевой реакторной установки⁷
Figure 1. Scheme of a four-loop reactor plant⁷

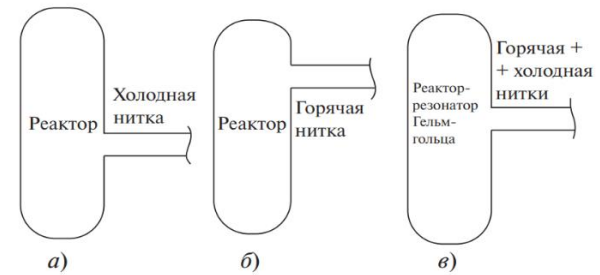


Рисунок 2. Стадии формирования сложного резонатора Гельмгольца [3]
Figure 2. Stages of formation of a complex Helmholtz resonator [3]

Таблица 1. Акустические параметры РУ с ВВЭР-1200 [составлено авторами]

Table 1. Acoustic parameters of the RP with WWER-1200 [compiled by the authors]

Наименование модели	Акустическая масса системы, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$	Акустическая податливость, $\frac{\text{м}^4 \cdot \text{с}^2}{\text{кг}}$	АСВ, Гц
Реактор + 4 «холодные» нитки	87200	$7,00 \cdot 10^{-8}$	2,04
Реактор + 4 «горячие» нитки	60900	$7,00 \cdot 10^{-8}$	2,44
Реактор + 4 ХН + 4 ГН	35900	$7,00 \cdot 10^{-8}$	6,35

Модели могут быть адаптированы и применены к ВВЭР независимо от их геометрических размеров, а также к однофазному и двухфазному состояниям теплоносителя в условиях принудительной или естественной циркуляции. Экстраполированная, показанная на рисунке 3 для температуры 360°C, частота АСВ равная 6,5 Гц практически совпадает с частотой АСВ равной 6,35 Гц приведенной в таблице 1.

⁶ ГОСТ 12.1.050-86 Методы измерения шума на рабочих местах. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005186> (дата обращения: 20.12.2023).

⁷ K.N. Proskuryakov, M.S. Khvostova, R.M. Ismail, M.M. Kaverznev, K.A. Yakovlev, Application of information technology to create the digital acoustic models of WWER. Nuclear Engineering and Design. Volume 421, 2024, 113098, ISSN 0029-5493.

3. Методология практического применения результатов расчетно-теоретического прогнозирования неизвестных ранее источников инфразвука на энергоблоках №1, 2 Нововоронежской АЭС-2

Описание методов и результатов исследований приведено в публикации «Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200» [10]. Выявлены причинно-следственные связи между эксплуатационными режимами РУ и изменениями в шумовых сигналах. Серия нейтронно-шумовых исследований выполнена с целью получения реперных характеристик для всех РУ данной серии. Многоканальный нейтронно-шумовой эксперимент позволил выявить ранее неизвестные факторы, влияющие на ресурсные характеристики, но не учтенные в проекте. В нормах проектирования сейсмостойких атомных станций показана процедура полного разогрева энергоблока⁸. В работе «Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200» показано, что главный циркуляционный контур (ГЦК) последовательно проходит через 8 режимов резонансного возбуждения вибраций, обусловленными гидродинамическими воздействиями. На рисунке 3 приведены линейные аппроксимации температурных зависимостей частот АСВ. Там же показаны точки совпадения частот АСВ и трех первых гармоник оборотной частоты ГЦНА. Совпадения частот гармоник оборотных частот ГЦНА и частот АСВ, возникают регулярно и многократно при разогреве/расхолаживании блока в диапазоне рабочих температур теплоносителя, но без заметных изменений вибрационных характеристик, регистрируемых проектными средствами.

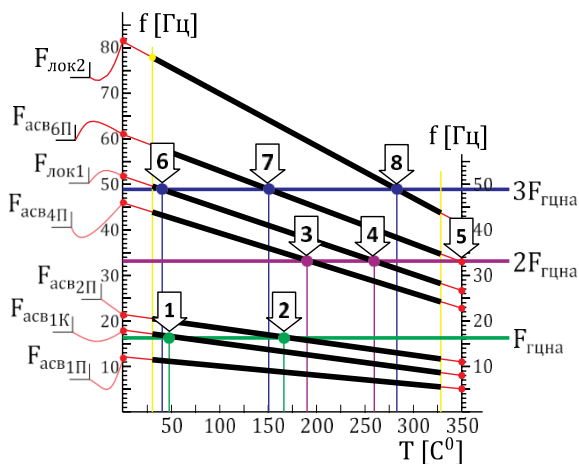


Рисунок 3. Восемь точек резонансов частот колебаний давления теплоносителя, которые вызваны гармониками оборотных частот ГЦНА, с частотами АСВ [10]

Figure 3. Eight points of resonance of coolant pressure oscillation frequencies, which are caused by harmonics of the [10] circulating frequencies of the main circulation pump, with the frequencies of the ASW [10]

⁸ Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01. – Вестник Госатомнадзора России. – 2001. – № 9. – С. 1-29. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294815/4294815342.pdf> (дата обращения: 26.12.2023).

Указанные режимы резонансного возбуждения не учтены главным конструктором АЭС с ВВЭР при оценке ресурсных характеристик и не описаны в эксплуатационной документации, как режимы, требующие минимального времени их прохождения [10]. Выявление неучтенных и ранее неизвестных причин резонансного возбуждения является доказательством необходимости проверки главным конструктором АЭС с ВВЭР соответствия действующим допустимым уровням шума на рабочих местах при пуске каждого энергоблока [11].

Проектное обоснование сейсмической безопасности АЭС. Обоснование должно проводиться поэтапно для всех важных для безопасности элементов: зданий и внешних инженерных сооружений и осуществляться по исходным сейсмическим данным в соответствии с действующими нормативными документами и установленными в них требованиями и критериями (НП-031-01, см. постраничную сноску 7). Как указано в одном из фундаментальных исследований [12], при пуске каждого нового энергоблока применим только метод поэтапной проверки, важных для безопасности систем энергоблоков АЭС. Поскольку этот метод включает экспериментальное определение динамических характеристик (собственных частот и декрементов колебаний) в реальных условиях раскрепления и обвязки и может гарантировать целостность важных для безопасности систем и выполнение их элементами своих функций при внешних воздействиях. Сейсмические нагрузки на оборудование АЭС существенно зависят как от собственных частот объекта, так и от демпфирующих процессов и характеристик (декрементов колебаний) в области резонансных частот. В работе П.С. Казновского с соавторами разработаны методологические основы подтверждения сейсмостойкости оборудования в натуральных условиях [11]. Инфразвуковые нагрузки на персонал АЭС регулируют Санитарно-эпидемиологические правила отклика на землетрясение получают в результате и нормативы⁹. В работе [12] отмечено, что спектры обобщения данных экспериментов и опыта реальных землетрясений в месте расположения АЭС. Спектр отклика зависит от места расположения АЭС. На рисунке 4 показан спектр отклика для НВАС-2 на отметке +26,30 м, на рисунке 5 приведен спектр отклика для АЭС «Аккую» на отметке +26,30 м.

⁹ Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. – Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.2.4.3359-16. – Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 21.06.2016 N 81. Введены в действие 01.01.2017. – Режим доступа: https://10.rospotrebnadzor.ru/upload/medialibrary/f42/sanpin-2.2.4.3359_16.pdf (дата обращения: 26.12.2023)

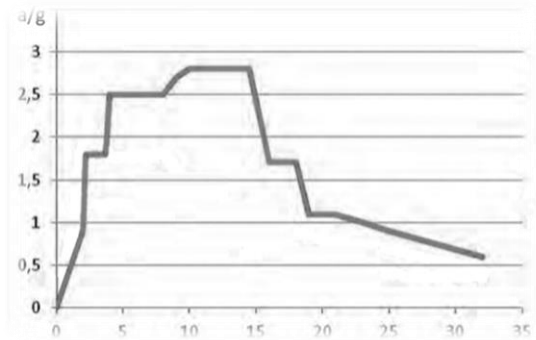


Рисунок 4. Спектр отклика для НВАЭС-2 на отметке +26,30 м a/g – амплитуда колебаний [12]

Figure 4. Response spectrum for NVNPP-2 at +26.30 m a/g – oscillation amplitude [12]

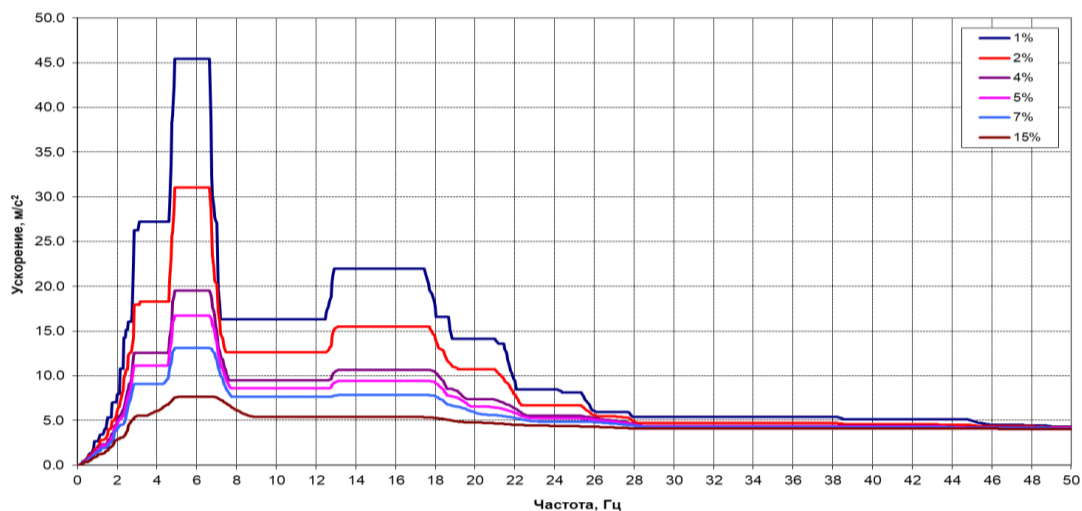


Рисунок 5. Спектр отклика на отметке +26,30 м расположения опорной фермы реактора АС с ВВЭР-1200 при воздействии локального проектного землетрясения. Цветом обозначены разные декременты колебаний¹⁰

Figure 5. Response spectrum at elevation +26.30 m of the location of the support frame of the NPP with WWER-1200 under the influence of a design local basis earthquake. The colours indicate different decrements of oscillations¹⁰

4. Обсуждение методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200

В работе [12] показано, что сложная геометрическая форма трубопроводов может приводить не только к увеличению гидравлических потерь и ухудшению тепло-массообменных процессов вследствие генерации крупномасштабных вихревых структур, но и возбуждению акустических колебаний.

В публикации [13] проведено сопоставления частот, генерируемых крупными вихревыми структурами в элементах трубопроводов, с собственными частотами акустических элементов, рассчитанными по методике, приведенной в работе «Разработка методики расчета частот акустических стоячих волн генерируемых реакторами АЭС с ВВЭР» [14]. Обнаружено, что в зависимости от режима работы реактора генерируются частоты, способные привести к резонансным явлениям. Исследование процессов вихреобразования в сложных каналах транспортных ядерных энергетических установок представлено в [15].

АСВ в первом контуре реакторов ВВЭР признаны одной из наиболее значимых причин износа конструк-

ционных компонентов реактора. Эти волны, возникающие при работе ГЦНА могут привести к чрезмерным вибрациям, создавая угрозу целостности конструкции и надежности реактора. Необходимость смягчения этих вибраций и связанных с ними рисков привела к разработке инновационных методов их анализа и контроля. Создание цифровой акустической модели компенсатора давления [16] явилось научным прорывом, благодаря которому выяснилось, что решающую роль в демпфировании АСВ играет система КД, традиционно рассматриваемая только как элемент поддержания заданного давления в первом контуре. Действуя подобно нескольким резонаторам Гельмгольца, КД существенно снижает амплитуду и воздействие АСВ в требуемых диапазонах частот акустических волн. Способность системы компенсации

¹⁰ АЭС «Аккую». Главный циркуляционный контур. Расчет на прочность по определению нагрузок от внешних динамических воздействий на оборудование и трубопроводы. – Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, 2014.

давления подавлять инфразвуковые волны повышает экологическую, радиационную и промышленную безопасность АЭС с ВВЭР.

РУ ВВЭР-1200 отличается от серийной РУ ВВЭР-1000 теплофизическими, гидравлическими параметрами и конструктивными особенностями. Эти отличия могут вызывать колебания на, ранее не известных частотах, и привести к увеличению амплитуд колебаний в результате резонансного взаимодействия (усиления). Поскольку средняя температура теплоносителя (ТН) в активной зоне ВВЭР-1200 больше по сравнению с ВВЭР -1000, в РУ с ВВЭР-1200 имеет место «недогретое» до температуры насыщения кипение ТН, что приводит к уменьшению частот АСВ обусловленных уменьшением скорости звука. Задача экспериментального оценивания скорости звука является одной из наиболее важных задач пуско-наладочных испытаний (ПНИ), т.к. позволяет получать реальные, отличающиеся от табличных, приводимых в справочниках, зависимостях скорости звука от параметров ТН. Знание реальных скоростей звука необходимо для разработки вибро-шумовых диагностических признаков проектируемых и работающих РУ. В работах [10,12] показано, что динамические и вибрационные характеристики оборудования могут быть определены только экспериментально. По экспериментальным значениям собственных частот и декрементов должны корректироваться расчетные схемы, по которым должны проводиться перерасчеты сейсмостойкости. Однако этому требованию противоречит совместное решение главного конструктора АЭС с ВВЭР и АО НТЦД АО НТЦД [17] – «датчики пульсаций давления из поставки для ВВЭР-1200 исключить». Вероятно, это ошибочное решение будет отменено Ростехнадзором, как противоречащее методологическим основам подтверждения сейсмостойкости оборудования в натурных условиях [11]. Для повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200, а также с целью увеличения

коэффициента использования установленной мощности необходимо демпфировать соответствующую часть акустического поля ГЦК. Для демпфирования нежелательных колебаний разработан способ предотвращения резонансного взаимодействия колебаний оборудования ВВЭР с АСВ и устройство для его реализации [18] – Патент является технологической реализацией нормативного документа СанПиН 2.2.4.3359-16 (см. постраничную сноску 8).

5. Выводы

Разработаны методы и средства повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200.

Для повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200, а также с целью увеличения коэффициента использования установленной мощности предложено демпфировать с помощью системы компенсации давления инфразвуковую часть акустического поля РУ с ВВЭР.

Цифровая акустическая модель системы компенсации давления не имеет аналогов; ее практическое применение позволяет совершенствовать процессы проектирования и эксплуатации АЭС и обеспечить экологическую, радиационную и промышленную безопасность, сейсмостойкость, экономичность и срок службы оборудования.

Решение главного конструктора АЭС с ВВЭР и АО НТЦД об исключении датчиков пульсаций давления из поставки для ВВЭР-1200 противоречит нормативным документам и должно быть отменено.

В связи с резонансным характером колебательных процессов, возникающих при внешних динамических воздействиях на оборудование АЭС и вызывающих увеличение мощности источников инфразвука реальные значения этих воздействий должны измеряться при пуско-наладочных испытаниях каждого нового энергоблока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Иванов Н.И., Зинкин В.Н., Сливина Л.П. Биомеханические механизмы действия низкочастотных акустических колебаний на человека. *Российский журнал биомеханики*. 2020;24(2):216-231. doi: [10.15593/RZhBiomech/2020.2.09](https://doi.org/10.15593/RZhBiomech/2020.2.09)
Ivanov N.I., Zinkin V.N., Slivina L.P. Biomechanical mechanisms of action of low-frequency acoustic vibrations on a person. *Russian journal of biomechanics*. 2020;24(2):216-231. doi: [10.15593/RZhBiomech/2020.2.09](https://doi.org/10.15593/RZhBiomech/2020.2.09)
2. Проскуряков К.Н., Новиков К.С. Определение области виброакустических резонансов теплоносителя и ТВС в перспективных реакторах повышенной мощности. *Атомная энергия*. 2010;108(3):151–155. Режим доступа: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t108-3_2010/p151/ (дата обращения: 25.12.2023).
Proskuryakov K.N., Novikov K.S. Determination of the region of vibroacoustic resonances of the coolant and fuel assemblies in promising high-power reactors. *Atomic Energy*. 2010;108(3):151–155. (In Russ.) Available at: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t108-3_2010/p151/ (accessed: 25.12.2023).
3. Проскуряков К.Н. Цифровая акустическая модель водо-водяного энергетического реактора. *Теплоэнергетика*. 2021;9:14–20. Режим доступа: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=tepen&year=2021&vol=2021&iss=9&file=TepEn2109006Proskuryakov.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).
Proskuryakov K.N. Digital acoustic model of a water-cooled power reactor. *Thermal power engineering*. 2021;9:14–20. (In Russ.) Available at: <https://sciencejournals.ru/cgi/getPDF.pl?jid=tepen&year=2021&vol=2021&iss=9&file=TepEn2109006Proskuryakov.pdf> (accessed: 25.12.2023).
4. Павелко В.И. Спектральные методы оценивания времени запаздывания в реакторно-шумовых исследованиях. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов*. 1989;2:58–65. Режим доступа: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/007/22007316.pdf (дата обращения: 25.12.2023).

Pavelko V.I. Spectral methods for estimating delay time in reactor noise studies. *Questions of atomic science and technology. Series: Physics of nuclear reactors*. 1989;2:58–65. (In Russ.) Available at: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/22/007/22007316.pdf> (accessed: 25.12.2023).

5. Thie J.A. Reactor noise monitoring for malfunctions. *Reactor Technology*. 1971;14(4):354–365. Available at: https://archive.org/details/sim_reactor-technology_winter-1971-1972_14_4/page/354/mode/2up (accessed: 25.12.2023).

6. Проскуряков К.Н. Научные основы создания и практического применения цифровой акустической модели АЭС с ВВЭР. Современные проблемы теплофизики и энергетики: Материалы III Международной конференции. Москва, 19–23 октября 2020 года. Москва: МЭИ, 2020. С. 645–646. https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=ak2rNCsAAAAJ&citation_for_view=ak2rNCsAAAAJ:qxL8FJ1GzNcC (дата обращения: 25.12.2023).

Proskuryakov K.N. Scientific foundations for the creation and practical application of a digital acoustic model of nuclear power plants with WWER. Modern problems of thermophysics and energy: Materials of the III International Conference. Moscow, October 19–23, 2020. Moscow: MPEI. 2020. P. 645–646. (In Russ.) Available at: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=ak2rNCsAAAAJ&citation_for_view=ak2rNCsAAAAJ:qxL8FJ1GzNcC (accessed: 25.12.2023).

7. Яскеляин А.В., Смирнов Л.В., Хайретдинов В.У. Исследование акустических колебаний теплоносителя в главном циркуляционном контуре ВВЭР-440. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Обеспечение безопасности АЭС*. 2010;27:100–111. Режим доступа: <https://diss.unn.ru/files/2015/560/diss-Savikhin-560.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).

Yaskelyain A.V., Smirnov L.V., Khairtdinov V.U. Study of acoustic oscillations of the coolant in the main circulation circuit of WWER-440. *Issues of atomic science and technology. Series: Ensuring the safety of nuclear power plants*. 2010;27:100–111. (In Russ.) Available at: <https://diss.unn.ru/files/2015/560/diss-Savikhin-560.pdf> (accessed: 25.12.2023).

8. Grunwald G., Junghans K., Liewers P. Investigation of Pressure Oscillation in PWR Primary Circuit. *Progress in nuclear energy*. 1985. Vol. 15. P. 651–659. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(85\)90094-0](https://doi.org/10.1016/0149-1970(85)90094-0)

9. Махутов Н.А., Фролов К.В., Гаденин М.М. и др. Научные основы повышения малоциклового прочност. Москва: Наука, 2006. 584 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603799> (дата обращения: 25.12.2023).

Makhutov N.A., Frolov K.V., Gadenin M.M. and others. Scientific basis for increasing low-cycle strength. Moscow: Nauka, 2006. 584 p. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19603799> (accessed: 25.12.2023).

10. Аркадов Г.В., Павелко В.И., Поваров В.П., Слепов М.Т. Феноменология акустических стоячих волн применительно к реакторной установке ВВЭР-1200. *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика*. 2021;4:110–121. Режим доступа: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2021/04/10.pdf> (дата обращения: 25.12.2023).

Arkadov G.V., Pavelko V.I., Povarov V.P., Slepov M.T. Phenomenology of acoustic standing waves as applied to the WWER-1200 reactor installation. *News of higher educational institutions. Nuclear energy*. 2021;4:110–121. (In Russ.) Available at: <https://static.nuclear-power-engineering.ru/articles/2021/04/10.pdf> (accessed: 25.12.2023).

11. Казновский П.С., Казновский А.П., Сааков Э.С., Рясный С.И. Нормативное регулирование в области обеспечения сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов энергоблоков АЭС. *Электрические станции*. 2012;9:17–22. Режим доступа: <https://www.asepro.ru/public/01-sejismostojkost-ehnergoblokov.pdf> (дата обращения: 26.12.2023)

Kaznovsky P.S., Kaznovsky A.P., Saakov E.S., Ryasny S.I. Normative Regulation in the Field of Seismic Resistance of Safety Important Systems and Elements of NPP Power Units. *Electrical stations*. 2012;9:17–22. (In Russ.) Available at: <https://www.asepro.ru/public/01-sejismostojkost-ehnergoblokov.pdf> (accessed: 25.12.2023).

12. Казновский П.С. Обоснование сейсмостойкости важного для безопасности оборудования АС в натурных условиях. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.11 Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности. Москва, 2019. 299 с. Режим доступа: www.gidropress.podolsk.ru (дата обращения: 25.12.2023).

Kaznovsky P.S. Justification of the seismic resistance of NPP equipment important for safety under natural conditions. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. 05.04.11 Nuclear reactor engineering, machines, units and technology of materials for the nuclear industry. Moscow, 2019. 299 p. (In Russ.) Available at: www.gidropress.podolsk.ru (accessed: 25.12.2023).

13. Митрофанова О.В. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков в каналах ядерных энергетических установок. Москва: Ленанд, 2020. Режим доступа: <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=ru&blang=ru&page=Book&id=253828> (дата обращения: 25.12.2023).

Mitrofanova O.V. Hydrodynamics and heat exchange of swirling flows in the channels of nuclear power plants. Moscow: Lenand, 2020. (In Russ.) Available at: <https://urss.ru/cgi-bin/db.pl?lang=ru&blang=ru&page=Book&id=253828> (accessed: 25.12.2023).

14. Проскуряков К.Н., Белова С.К., Аникеев А.В., Афшар И. Разработка методики расчета частот акустических стоячих волн генерируемых реакторами АЭС с ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2019;3:80–88. <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-03-09>

Proskuryakov K.N., Belova S.K., Anikeev A.V., Afshar I. Development of methods for calculating the frequency of acoustic standing waves generated by WWER reactors. *Global Nuclear Safety*. 2019;3:80–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/GNS-2019-03-09>

15. Митрофанова О.В., Байрамукوف А.Ш., Уртенев Д.С. Исследование процессов вихреобразования в сложных каналах транспортных ядерных энергетических установок. *Тепловые процессы в технике*. 2018;10(7–8):274–281. Режим доступа: https://mai.ru/upload/iblock/f8e/t4ecpa7mio2v5fjx5smuxnk09a4t0c1g/Mitrofanova-TPT_7_8_block_2.pdf (дата обращения: 25.12.2023).

Mitrofanova O.V., Bayramukov A.Sh., Urtenov D.S. Study of vortex formation processes in complex channels of transport nuclear power plants. *Thermal processes in technology*. 2018;10(7–8):274–281. (In Russ.) Available at: https://mai.ru/upload/iblock/f8e/t4ecpa7mio2v5fjx5smuxnk09a4t0c1g/Mitrofanova-TPT_7_8_block_2.pdf (accessed: 25.12.2023).

16. 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>

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>

17. Павелко В.И., Слепов М.Т., Хайретдинов В.У. Опыт проведения комплексных измерений с использованием разнородных систем на различных этапах пуска энергоблока ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2016;4:44–54. <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

Pavelko V.I., Slepov M.T., Khairetdinov V.U. Experience in carrying out complex measurements using heterogeneous systems at various stages of startup of the WWER-1200 power unit. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2016;4:44–54. (In Russ.) <https://doi.org/10.26583/npe.2016.4.05>

18. Проскуряков К. Н., Анисеев А.В., Исмаил Раги Мухаммед Наср Хассанин, Макарова Л.Е. Способ предотвращения резонансного взаимодействия колебаний оборудования водо-водяных энергетических реакторов с акустически стоячими волнами и устройство для его реализации. Патент на изобретение № 2803181. Патентообладатель: ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ». Режим доступа: <https://fips.ru/EGD/d96a5948-959d-4922-9865-4515cfb4b8d0> (дата обращения: 25.12.2023).

Proskuryakov K.N., Anikeev A.V., Ismail Ragi Muhammad Nasr Hassanin, Makarova L.E. A method for preventing resonant interaction of oscillations of water-cooled water power reactor equipment with acoustically standing waves and a device for its implementation. Patent for invention No. 2803181. Patent holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National Research University MPEI» Available at: <https://fips.ru/EGD/d96a5948-959d-4922-9865-4515cfb4b8d0> (accessed: 25.12.2023).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Проскуряков К.Н. – разработка методов и средств повышения экологической, радиационной и промышленной безопасности АЭС с ВВЭР-1200, оформление материалов статьи;

Хвостова М.С. – разработка программы исследований, систематизация результатов исследований источников инфразвука в оборудовании реакторной установки ВВЭР-1200, анализ результатов расчетов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Работа выполнена без привлечения внешних источников финансирования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликта интересов отсутствует.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Константин Николаевич Проскуряков, доктор технических наук, 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, кандидат географических наук, 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

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Proskuryakov K.N. – development of methods and means to improve environmental, radiation and industrial safety of NPPs with WWER-1200, design of article materials;

Khvostova M.S. – development of a research program, systematization of research results of infrasound sources in WWER-1200 reactor equipment, calculation result analysis,

FUNDING:

The study was carried out without external funding sources.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflicts of interest.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Konstantin N. Proskuryakov, Dr. Sci. (Eng.), 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, Cand. Sci. (Geo.), 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

Поступила в редакцию 08.01.2024

После доработки 15.03.2024

Принята к публикации 19.03.2024

Received 08.01.2024

Revision 15.03.2024

Accepted 19.03.2024