
ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

**ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ
РЕЗОНАНСОВ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ НА АЭС**

© 2017 К.Н. Проскураков *, А.И. Фёдоров **, М.В. Запорожец *

* Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

** Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная электростанция»,
Нововоронеж, Воронежская обл., Россия

В статье показано, что опередившие в свое время текущие потребности ядерной энергетики результаты научных исследований, проведенные в XX в. в Московском энергетическом институте, в настоящее время сохраняют актуальное значение. Приведенные результаты подтверждают необходимость государственной поддержки для продолжения научно-исследовательских работ, в созданном на кафедре АЭС Национального исследовательского университета «МЭИ» новом научном направлении «Прогнозирование, диагностика и предотвращение виброакустических резонансов в оборудовании АЭС» для повышения безопасности и конкурентоспособности российских АЭС. Опережение России в разработке и внедрении проектно-конструкторские решений по предотвращению виброакустических резонансов при авариях и землетрясениях необходимо для создания конкурентных преимуществ отечественных АЭС на мировом рынке.

Ключевые слова: стоячие волны, вибрации, виброакустический резонанс, электроакустические аналогии, резонатор Гельмгольца, сейсмические воздействия, АЭС.

Поступила в редакцию: 12.05.2017

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ, ДИАГНОСТИКА И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ В ОБОРУДОВАНИИ АЭС**

В Национальном исследовательском университете «МЭИ» с середины 1960-х гг. ведутся исследования теплогидравлического возбуждения акустических колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ и методов их идентификации. Ранее была обоснована возможность возникновения теплогидравлической неустойчивости типа автоколебаний в одиночном парогенерирующем канале и их влияния на уменьшение величины критического теплового потока при увеличении длины испарительного участка [1], её содержание нашло отражение в работе [2], в которой систематизированы публикации, внесшие новые знания в изучение кризисов кипения и критических тепловых потоков.

В статье [1] обоснована физическая природа возникновения автоколебаний скорости потока в одиночном парогенерирующем канале, частота которых является собственной частотой колебаний содержащейся в нём текучей среды. Показано что сильное уменьшение величины критического теплового потока происходит при большом паросодержании и обусловлено увеличением длины испарительного участка.

Именно этот эффект, как установлено в [3] привел к разрушению реактора на Чернобыльской АЭС: «Продолжающееся снижение расхода воды через технологический канал (ТК) реактора в условиях роста мощности привело к интенсивному парообразованию, а затем к кризису теплоотдачи, разогреву топлива, его

разрушению, бурному вскипанию теплоносителя, в который попали частицы разрушенного топлива, резкому повышению давления в ТК, их разрушению и тепловому взрыву, разрушившему реактор и часть конструкций здания и приведшему к выбросу активных продуктов деления во внешнюю среду».

В работах [4, 5] впервые показано, что если при увеличении скорости двухфазного потока сила трения уменьшается, то это приводит к самовозбуждающимся колебаниям давления. Такие условия возникают при работе парогенерирующего канала в диапазоне массовых расходов, соответствующих падающему участку гидродинамической характеристики. Этот феномен необходимо учитывать в качестве главного фактора, вызывающего многократное увеличение динамических нагрузок на оборудование при протекании максимальной проектной аварии (МПА) на АЭС с ВВЭР. В более поздних публикациях [6-8] отмечается влияние этого эффекта на колебания трубопроводов и надежность парогенераторов.

В МЭИ (ТУ) с середины 1970-х годов ведутся исследования термогидравлических источников возмущений и методов их идентификации. К ним относится публикация [9], в которой впервые было показано, что частота пульсаций давления теплоносителя в аварийном режиме при наличии кипения в активной зоне реактора в несколько раз меньше частоты, соответствующей режиму нормальной эксплуатации. Это изменение в спектре пульсаций давления является диагностическим признаком кипения в активной зоне реакторов типа ВВЭР и PWR.

ТЯЖЕЛЫЕ АВАРИИ НА АЭС С ВОДНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Авария на АЭС «Три-Майл Айленд-2» (ТМІ) произошла после появления данной информации. Если бы был датчик пульсаций давления теплоносителя, позволявший фиксировать изменение спектра пульсаций давления, то персонал АЭС ТМІ своевременно заметил бы начало кипения в активной зоне и принял бы правильные решения для предотвращения одной из самых тяжелых аварий на АЭС. В этой же работе предложена акустическая модель компенсатора давления, используемого на АЭС с ВВЭР (и их зарубежных аналогах - PWR), согласно которой компенсатор давления представляет собой резонатор Гельмгольца нескольких акустических волн. Через несколько лет эта модель, была использована для расчета одной из этих частот [10-12].

Важным этапом в развитии методов анализа акустических систем теплоносителя в АЭС явилось обоснование правомерности электроакустических аналогий для одномерного пульсирующего потока двухфазной среды, как с однозначной, так и многозначной гидродинамической характеристиками [13].

Разработанные в [13] методы расчета акустических параметров теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора и в акустических системах АЭС, с однофазной и двухфазной средами, позволяют учитывать влияние на скорость звука, а, следовательно, и на частоту акустических стоячих волн (АСВ), давления, температуры, паросодержания и скоростей движения фаз в потоке. Эти методы достаточно просты и эффективны при определении акустических свойств сложных систем с несколькими степенями свободы, дают результаты с точностью достаточной для решения практических задач [14]: определения частот АСВ, добротности акустических контуров теплоносителя, полосы пропускания, волнового сопротивления и пр. Методы могут быть применены для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах, а также при сейсмических и ударных воздействиях.

В [14] показано, что расчетные значения частот АСВ, полученные при использовании метода электроакустических аналогий, разработанного для анализа акустических систем с двухфазной текучей средой [13], совпадают с результатами измерений колебаний давления теплоносителя в парообразующих каналах активной зоны ядерного реактора. Экспериментальное доказательство, приведенное в [14], правомерности использования метода электроакустических аналогий, для расчета частот АСВ в кипящих реакторах, в настоящее время приобретает особое значение для повышения конкурентоспособности и безопасности российских АЭС. Разработанные методы и алгоритмы расчета АСВ имеют ясный физический смысл, позволяют проводить идентификацию источников генерации АСВ по результатам измерений вибраций оборудования и пульсаций давления теплоносителя на АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах.

Следует отметить, что повышенные вибрации и соударения ТВС и стенок ТК наблюдались в процессе эксплуатации реакторов Чернобыльской АЭС. В связи с необходимостью диагностирования такого рода соударений и их предотвращения, на основе результатов, полученных в работах [1, 4, 5, 13] по инициативе ЧАЭС в 1985 году, был заключен хоздоговор между МЭИ и ВНИИАЭС «Исследования влияния потока теплоносителя на виброакустические характеристики технологических каналов реактора РБМК для разработки систем диагностики методами неразрушающего контроля основного и вспомогательного оборудования АЭС». Работы, начатые с Чернобыльской АЭС, послужили основанием того, что старший автор этой статьи в мае 1986 г. был привлечен в качестве эксперта к работе Правительственной комиссии по расследованию причин чернобыльской аварии. В представленном им экспертном заключении были указаны следующие вероятные причины аварии: недопустимый рост паросодержания в ТК, привел к развитию автоколебаний теплоносителя, кризису теплообмена [1] и, весьма вероятно, возникновению виброакустического резонанса с колебаниями ТВС. В качестве неотложных мер было предложено сформировать службы технической диагностики на всех АЭС, а в МЭИ создать: а) новую специализацию «Техническая диагностика АЭС» для подготовки кадров, и б) материальные условия для форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

ДОКЛАД ГОСАТОМНАДЗОРА СССР В СОВЕТ МИНИСТРОВ СССР В МАЕ 1986 г.

Согласно поручению Совета министров СССР, ПП-8768 от 18.05.86 первым лицам министерств и ведомств, работающих по атомной тематике, эти предложения были рассмотрены. Особенно большое значение имел ответ министра среднего машиностроения СССР Е.П. Славского. В его ответе было сказано, что предполагаемый экспертом сценарий аварии, вполне вероятен, что следует одобрить в целом сделанные предложения, оказать необходимую поддержку МЭИ для подготовки кадров и форсирования исследований в области шумовой диагностики оборудования и технологических процессов АЭС.

Госатомнадзором СССР в Совет Министров с учетом консультаций со специалистами ИАЭ им. И.В. Курчатова и НИИ энерготехники было доложено:

«1) Предложение т. Проскурякова К.Н. к Межведомственному техническому совету по АЭС по уточнению существующей концепции о максимальной проектной аварии (МПА) является правильным. Предполагаемое автором исходное событие и путь развития аварии потенциально возможны и должны быть проанализированы Научным руководителем, Главным конструктором и Генеральным проектировщиком

АЭС. 2). Автор предложений справедливо указывает на необходимость ускорения внедрения системы непрерывной диагностики эксплуатируемого оборудования с использованием в частности контроля состояния теплоносителя. 3). Следует форсировать работы по выполнению предложений к Минприбору и Минэнерго по оснащению АЭС средствами виброакустической диагностики. 4) Госатомнадзор поддерживает рекомендации т. Прокуракова К.Н. Минвузу СССР о необходимости создания специализации «Диагностика технического состояния АЭС и обслуживание систем надежности и безопасности». К сожалению, осуществлению этих рекомендаций помешала происходившая в стране перестройка. Финансирование научной группы кафедры АЭС, которая работала в новом не имевшим аналогов научном направлении «Создание методов диагностики, прогнозирования и предотвращения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС» было прекращено.

КОММЕНТАРИЙ ПО ПОВОДУ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА ДАЙИЧИ»

И, наконец, по поводу последней тяжелой аварии на АЭС «Фукусима Дайичи». По официальным данным, авария произошла из-за того, что дизель - генераторы, обеспечивающие аварийное охлаждение активной зоны, пострадали в результате цунами. Однако, в ряде публикаций и бесед с персоналом станции, попавших в интернет, содержится информация о том, что наблюдались течи теплоносителя, которые возникли в результате землетрясения, ещё до прихода цунами. Проверить правдоподобность этой версии в настоящее время не представляется возможным. Ввиду этого официальная версия способна вуалировать иную вероятную первопричину потери охлаждения активной зоны и игнорировать версию резонансного усиления сейсмических воздействий, произошедшего при совпадении частот сейсмических волн с частотой акустических колебаний в кипящем реакторе. По нашему мнению, необходимо проведение дополнительных исследований свойств реактора типа BWR, как резонатора Гельмгольца.

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРЕВЫШЕНИЯ ПРОЕКТНОГО УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИИ

В [15] показана возможность превышения проектного уровня вибраций основного оборудования АЭС с ВВЭР внешних периодических нагрузках, вызванных землетрясением, и попадании частоты вибраций основного оборудования реакторной установки и частоты упругих волн в полосу частот, соответствующую максимальным значениям огибающих спектров отклика

Этот результат получен путем сопоставления спектра отклика сооружений АЭС, с частотами вибраций оборудования I контура АЭС с ВВЭР-1000, из которого следует, что частоты вибраций основного оборудования РУ попадают в полосу частот в спектре отклика, соответствующую максимальным огибающим спектрам отклика.

В публикации [16] указаны частоты вибраций оборудования I контура АЭС с ВВЭР-1000: частота 9.277 Гц соответствует вертикальной форме колебаний корпуса реактора ВВЭР1000. Приведены также результаты расчета собственной частоты, равной 10.1 Гц, поперечных колебаний топливных сборок (третья форма), корпуса реактора, металлоконструкций верхнего блока и собственной частоты, равной 13.1 Гц, вертикальных колебаний топливных сборок, корпуса реактора, металлоконструкций верхнего блока.

В настоящее время прогнозирование возникновения виброакустических

резонансов при тяжелых авариях на АЭС является неразрешимой задачей, поскольку планировать и осуществлять на энергоблоке аварийную ситуацию для измерения вибрации оборудования неприемлемо. В этих условиях использование, разработанных и апробированных на АЭС, моделей и алгоритмов расчета частот АСВ для прогнозирования и предотвращения возникновения виброакустических резонансов при авариях с течами теплоносителя и при ударных воздействиях и землетрясениях, может быть своевременным и полезным.

Игнорирование возможности возникновения виброакустических резонансов с сейсмическими волнами в оборудовании АЭС объясняется отсутствием в российской и зарубежной нормативной документации требований проведения количественного определения СЧКДТ в оборудовании АЭС в эксплуатационных и аварийных режимах и, следовательно, отсутствием нормативов для предотвращения резонансного взаимодействия вибраций оборудования АЭС с упругими волнами в теплоносителе.

В качестве наиболее эффективного средства предотвращения виброакустических резонансов предлагается использование акустического фильтра частот, типа резонатора Гельмгольца. Данное устройство будет обеспечивать подавление акустических колебаний теплоносителя совпадающими с частотами вибраций оборудования, вынужденными колебаниями давления, вызванными работой ГЦН или внешними ударными и сейсмическими воздействиями.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ РЕЗОНАНСОВ

Актуальность обеспечения АЭС средствами предотвращения виброакустических резонансов определяется тем, что, в настоящее время, поставлена задача обеспечить надежную эксплуатацию АЭС в маневренных режимах и в регионах с высокой сейсмической активностью. Ввиду этого необходимо заложить в проектные решения АЭС предотвращения возникновения условий резонанса вибраций в пусковых и маневренных режимах, а также в условиях сейсмических и волновых нагрузок.

Для создания конкурентных преимуществ российским АЭС необходимо обеспечить опережение зарубежных поставщиков АЭС в разработке отечественных технологий и проектно-конструкторские решений, предотвращающих возникновение виброакустических резонансов как в эксплуатационных режимах, так и при авариях и землетрясениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проскуряков, К.Н.* Автоколебания в одиночном парогенерирующем канале [Текст] / К.Н. Проскуряков // Теплоэнергетика. – 1965. – №12. – С. 75–77.
2. Tong L.S. Boiling crisis and critical heat flux. Westinghouse Electric Corporation. Published by Atomic Energy Commission office of information services, 1972.
3. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и её последствиях, подготовленная для МАГАТЭ [Текст] // Атомная энергия. – 1986. – Т. 61. – Вып. 5. – Ноябрь. – С. 301–320.
4. *Проскуряков, К.Н.* Электрическая модель парогенерирующего канала [Текст] / К.Н. Проскуряков. – М.: Труды МЭИ, 1972. – Вып. №126.
5. *Проскуряков, К.Н.* Условие возникновения колебаний в парогенерирующем канале [Текст] / К.Н. Проскуряков // Kernenergie I. – №5. – 1975. (на немецком яз.)
6. Van Blarcom P.P., Smitt R.D. Flashing fluids at low pressures. Proc. ISA Conf. And Exhib. Chicago, 1979, pp. 391–340.
7. *Овчинников, В.Ф. и др.* Колебания трубопроводов с нестационарным потоком жидкости [Текст] / В.Ф. Овчинников, Л.В. Смирнов // Вопросы атомной науки и техники. Физика и техника ядерных реакторов. – 1981. – Вып. 2. – С. 3–11.
8. *Вереземский, В.Г. и др.* Влияние режимов работы контуров циркуляции АЭС с ВВЭР-1000 на надежность парогенераторов ПГВ-1000 [Текст] / В.Г. Вереземский, Л.В. Смирнов, В.Ф. Овчинников, А.В. Яскеляин // Теплоэнергетика. – 1998. – №5. – С. 36–41.

9. *Проскуряков К.Н. и др.* Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в первом контуре АЭС / К. Н. Проскуряков, С. П. Стоянов, Г. Нидцбалла, А. В. Грязев и др. // Труды МЭИ. – 1979. – Вып. 407. – С. 87–92.
10. Mullens L.A., Thie J.A. Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance, Diagnostic Application. Proceedings of 5-th Power Plant Dynamics, Controls, Testing Symposium University of Tennessee. Knoxville, March 1983.
11. Por G., Izsak E.t Valka S. Some Results of Noise Measurements in PWR NPP. Progress in Nuclear Energy. 1985, №15, P. 387.
12. Nagy I., Katona T. Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs. Progress in Nuclear Energy, 1985, №15, pp. 651–659.
13. *Проскуряков, К.Н.* Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Текст] / К.Н. Проскуряков. – М.: МЭИ, 1984. – 67 с.
14. *Фомичев, М.С.* Экспериментальная гидродинамика ЯЭУ [Текст] / М.С. Фомичев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 247 с.
15. *Проскуряков, К.Н. и др.* Прогнозирование условий возникновения в первых контурах АЭС с ВВЭР виброакустических резонансов с внешними периодическими нагрузками [Текст] / К.Н. Проскуряков, А.И. Фёдоров, М.В. Запорожец // Теплоэнергетика. – 2015. – №8. – С. 17–23.
16. *Печинка, Л. и др.* Влияние вибраций ВКУ реактора ВВЭР_1000/320 АЭС “Темелин” на устойчивость шахты реактора [Текст] / Л. Печинка, П. Стулик, В. Земан // Материалы V Межд. науч. техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. Подольск. 29 мая–1 июня 2007 г. – Подольск, 2007.

REFERENCES

- [1] Proskuriakov K.N. Avtokolebaniya v odinochnom parogeneriruiushchem kanale [Self-Oscillations in the Individual Steam-Generating Channel]. Teploenergetika [Heat Power Engineering], 1965, №12, ISSN 0040-3636, pp. 75–77. (in Russian)
- [2] Tong L.S. Boiling crisis and critical heat flux. Westinghouse Electric Corporation. Published by Atomic Energy Commission office of information services, 1972. (in English)
- [3] Informatsiya ob avarii na Chernobylskoi AES i ee posledstviakh, podgotovlennaya dlya MAGATE [Information of the Chernobyl Accident and Its Consequences Prepared for the IAEA]. Atomnaya energiya [Nuclear Energy], 1986, Vol. 61, Issue 5, November, ISSN 0004-7163, pp. 301–320. (in Russian)
- [4] Proskuriakov K.N. Elektricheskaia model parogeneriruiushchego kanala [Electrical Model of Steam Generating Channel]. M. Pub. Trudy MPEI [MPEI Works], 1972, Issue №126. (in Russian)
- [5] Proskuriakov K.N. Uslovie vznikhoveniia kolebaniy v parogeneriruiushchem kanale [Condition of Fluctuation Emergence in the Steam-Generating Channel]. Kernenergiia I [Kernenergy I], №5, 1975. (in German)
- [6] Van Blarcom P.P., Smitt R.D. Flashing fluids at low pressures. Proc. ISA Conf. And Exhib. Chicago, 1979, pp. 391–340. (in English)
- [7] Ovchinnikov V.F., Smirnov L.V. Kolebaniia truboprovodov s nestatsionarnym potokom zhidkosti [Fluctuations of Pipelines with an Unsteady Flow of Liquid]. Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Fizika i tekhnika yadernykh reaktorov [Nuclear Science and Technology Issues. Physics and Technique of Nuclear Reactors.], 1981, Issue 2, ISSN 0205-4671 pp. 3–11. (in Russian)
- [8] Verezhemskii V.G., Smirnov L.V., Ovchinnikov V.F., Iaskeliain A.V. Vliyanie rezhimov raboty konturov tsirkulatsii AES s VVER-1000 na nadezhnost parogeneratorov PGV-1000 [Influence of the NPP Circulation Contour Modes with PWR-1000 on Reliability of PGV-1000 Steam Generators]. Teploenergetika [Heat Power Engineering], 1998, №5, ISSN 0040-3636, pp. 36–41. (in Russian)
- [9] Proskuriakov K.N., Stoianov S.P., Nidtsballa G., Griazev A.V. Teoreticheskoe opredelenie chastot sobstvennykh kolebaniy teplonositelia v pervom konture AES [Theoretical Determination of Frequencies of Heat Carrier in the NPP First Contour]. Trudy MPEI [MPEI Works], 1979, Issue 407, pp. 87–92. (in Russian)
- [10] Mullens L.A., Thie J.A. Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance, Diagnostic Application. Proceedings of 5-th Power Plant Dynamics, Controls, Testing Symposium University of Tennessee. Knoxville, March 1983. (in English)
- [11] Por G., Izsak E.t Valka S. Some Results of Noise Measurements in PWR NPP. Progress in Nuclear Energy. 1985, №15, P. 387. (in English)
- [12] Nagy I., Katona T. Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs. Progress in Nuclear Energy, 1985, №15, pp. 651–659. (in English)

- [13] Proskuriakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во vnutrikorpusnykh ustroystvakh IaEU [Heathydraulic Excitation of the Heat Carrier Oscillations in the NPP Intra Body Devices]. M. Pub. MPEI, 1984, 67 p. (in Russian)
- [14] Fomichev M.S. Eksperimentalnaia gidrodinamika IaEU [The Experimental Hydrodynamics of Nuclear Installations]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 1989, 247 p. (in Russian)
- [15] Proskuriakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V. Prognozirovanie uslovii vozniknoveniia v pervykh konturakh AES s VVER vibroakusticheskikh rezonansov s vneshnimi periodicheskimi nagruzkami. Teploenergetika [Heat Power Engineering], 2015, №8, ISSN 0040-3636, pp. 17–23. (in Russian)
- [16] Pechinka L., Stulik P., Zeman V. Vliianie vibratsii VKU reaktora VVER_1000/320 AES “Temelin” na ustoychivost shakhty reaktora. Materialy V Mezhd. nauch._tekh. konf. “Obespechenie bezopasnosti AES s VVER”. Podolsk. 29 maya–1 iyunya 2007 g. Podolsk, 2007. (in Russian)

Causes of Vibroacoustic Resonances in Severe Accidents at Nuclear Power Plants

K.N. Proskuryakov^{*1}, A.I. Fedorov^{2}, M.V. Zaporozhets^{*3}**

** National Research University «MPEI»,
Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia, 111250*

¹ e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru

ORCID: 0000-0002-1884-5576

WoS ResearcherID: I-3583-2017

³ ORCID: 0000-0002-8017-5200

WoS ResearcherID: K-3710-2017

*** Novovoronezh Nuclear Power Plant the branch of «Rosenergoatom Concern» JSC
Yuzhnaya St., 1, Plant zone, Novovoronezh, Voronezh region, Russia, 396072*

² ORCID: 0000-0002-5661-9502

WoS ResearcherID: K-3752-2017

Abstract – The paper shows that the results of scientific research carried out in the past century in MPEI, which outpaced in the past the current requirements of nuclear power, are of great importance. The results confirm the need for state support for scientific research work continuation in the new scientific area "Forecasting, Diagnostics and Prevention of Vibroacoustic Resonances in NPP Equipment" created at the Department of NPP MPEI, to increase safety and competitiveness of Russian nuclear power plants.

Keywords: standing waves, vibrations, vibroacoustic resonance, electro-acoustic analogies, Helmholtz resonator, seismic effects, NPP.