

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ  
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.039.56

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИСТОЧНИКОВ  
ВОЗНИКНОВЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СТОЯЧИХ ВОЛН  
В ПЕРВЫХ КОНТУРАХ АЭС С ВВЭР-440**

© 2015 г. К.Н. Проскуряков\*, А.И. Фёдоров\*\*, М.В. Запорожец\*,  
А.А. Дятловский\*, В.А. Гусейнов\*

\*«Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

\*\* Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж,  
Воронежская область

Авария на японской АЭС Фукусима Дайичи, произошедшая в результате землетрясения в 2011 г., привела к пониманию необходимости ужесточения требований, предъявляемых к обеспечению сейсмостойкости и к обоснованию возможности продления сроков службы АЭС.

В этих условиях, для обеспечения безопасности, сейсмостойкости и конкурентоспособности отечественных АЭС, актуальным становится использование на практике результатов исследований, полученных в НИУ «МЭИ» в последние десятилетия и стимулирование проведения дальнейших исследований виброакустических процессов и резонансов в оборудовании АЭС.

Ряд опубликованных результатов, полученных впервые в мире в НИУ «МЭИ» и, до настоящего времени не имеющих аналогов, включен в глобальную научную базу данных World Wide Science.org в качестве ключевых глобальных научно-исследовательских результатов.

В работе приведены разработанные и верифицированные методы и алгоритмы расчета частот акустических стоячих волн и идентификации источников их возникновения. Указаны главные направления актуальных научных и проектных работ, в которых должны найти применение полученные результаты.

*Ключевые слова:* стоячие волны, вибрации, виброакустический резонанс, АЭС.

Поступила в редакцию 15.05.2015

В НИУ «МЭИ» с середины 1970-х годов ведутся исследования теплогидравлического возбуждения колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ и методов их идентификации. Имеется приоритет в обосновании существования и в способах моделирования колебаний давлений теплоносителя, находящегося в одно- и двухфазном состоянии, включая автоколебания, системные, собственные и параметрические колебания. Исследования привели к пониманию причин возникновения нештатных динамических нагрузок в оборудовании [1].

Во многих случаях благодаря существованию нештатных динамических нагрузок происходят внезапные отказы оборудования и аварии. Отметим, что рекомендации [2] по раннему обнаружению вскипания теплоносителя в активной зоне реакторов типа WWER и PWR были опубликованы до аварии на АЭС «Три-Майл Айленд» (США). Знание и использование этих рекомендаций могло бы предотвратить ошибочные действия оперативного персонала, последствия которых привели к одной из тяжелейших в мировой практике эксплуатации АЭС аварий.

Акустическая модель компенсатора давления (КД), разработанная в 1979 г. [2], широко используется в мире [3,4,5].

После аварии на японской АЭС Фукусима Дайичи ужесточились требования обеспечения сейсмостойкости и продления сроков службы АЭС. Особо важной стала задача предотвращения резонансного взаимодействия вибраций оборудования с акустическими стоячими волнами (АСВ) и с периодическими внешними динамическими нагрузками.

В этих условиях использование, опередивших в свое время текущие потребности ядерной энергетики результатов исследований виброакустических процессов, проведенных в НИУ «МЭИ» и стимулирование их дальнейшего развитие, актуально для обеспечения конкурентоспособности и безопасности отечественных АЭС.

В базу данных «WorldWideScience.org», разработанную департаментом энергии (DoE) США, Управлением энергетики научной и технической информации в 2014 г. включено более 10 публикаций, автором или соавтором которых является К.Н. Проскуряков. WorldWideScience.org реализует охват ключевых глобальных научно-исследовательских результатов и является научной базой данных и поисковых систем, предназначенных для ускорения научных открытий и прогресса за счет ускорения обмена научными знаниями. Эта глобальная научная база данных предназначена способствовать сотрудничеству и обмену идеями между исследователями.

Результаты дальнейшего исследования АСВ, возникающих в КД, приведены в [6]. В этой работе впервые теоретически обоснованы: а) генерация АСВ, обусловленных самостоятельными и совместными колебаниями парового и водяного объемов, содержащихся в КД; и б) использование разработанной акустической модели КД для идентификации источников генерации АСВ в первом контуре АЭС с ВВЭР-440, частота которых зависит от термодинамических параметров теплоносителя и уровня воды в КД. Однако в более поздних работах, [7, 8, 9], приведены только результаты измерений АСВ в первом контуре АЭС с ВВЭР-440. Отсутствие в этих работах результатов расчетной оценки частоты АСВ даже для номинального режима работы энергоблока не позволяет осуществить идентификацию источников их возникновения в диапазоне изменения термодинамических параметров теплоносителя в режимах, предусмотренных регламентом эксплуатационных режимов энергоблока.

Данная работа посвящена разработке акустических моделей теплоносителя в оборудовании АЭС с ВВЭР-440 и на их основе методического обеспечения построения акустического паспорта теплоносителя, как в отдельных компонентах оборудования, так и системе первого контура в целом.

Исследования, проведенные на одной из автономных систем АЭС, подтверждают правомерность гипотезы о том, что установка местного сопротивления подобного диафрагме, используемой для измерения расхода текучей среды, делит участок трубопровода между запорными задвижками 1 и 2 на два акустических контура представленных на рисунке 1.

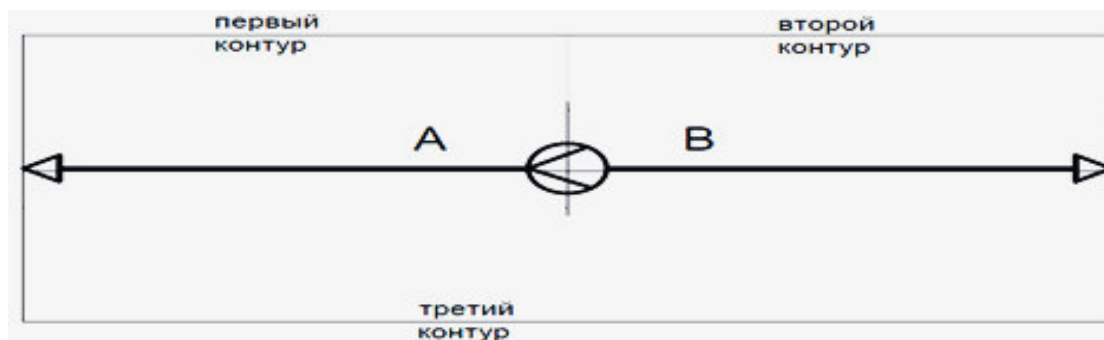
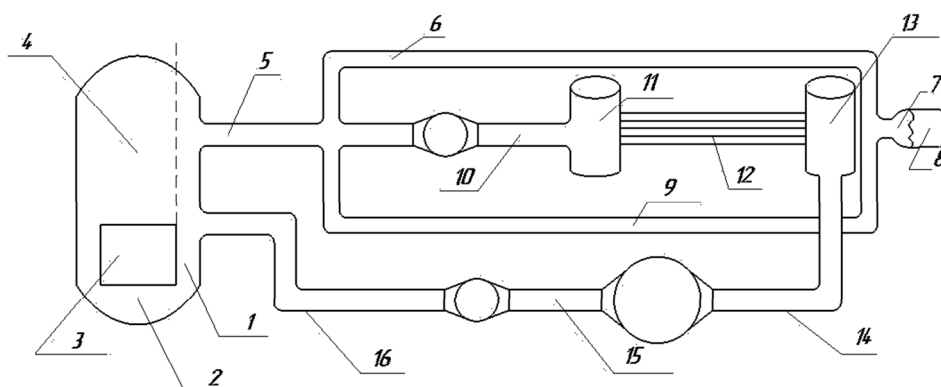


Рис. 1. – Напорный трубопровод, разделенный диафрагмой на первый и второй контуры

Из сопоставления данных измерения вибраций, полученных до установки и после установки диафрагмы, сделан вывод о том, что при установке диафрагмы в автоспектре вибраций появляются составляющие, обусловленные собственными частотами колебаний давления теплоносителя на участках трубопровода А и Б.

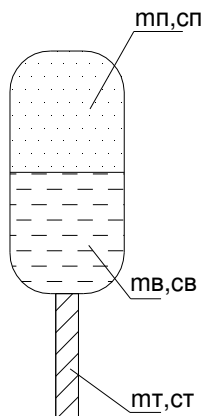
В соответствии с этим выводом разработана акустическая модель теплоносителя в оборудовании первого контура АЭС с ВВЭР-440 энергоблоков АЭС «Дукованы» (ВВЭР – 440, В – 213), которая представлена на рисунке 2. Акустические элементы промаркированы цифрами от 1 до 16. На рисунке 2 показано, что наличие главных запорных задвижек (ГЗЗ) делит трубопроводы на два акустических элемента: – элементы 15 и 16 на холодной нитке и элементы 5 и 10 на горячей нитке главного циркуляционного контура (ГЦТ).



**Рис. 2.** – Акустическая модель петли с компенсатором давления РУ «Дукованы» (ВВЭР – 440)

- 1 – опускной участок в реакторе; 2 – пространство под АЗ; 3 – активная зона; 4 – пространство над АЗ;  
 5 – трубопровод от реактора к ГЗЗ; 6 – подводящий трубопровод к КД; 7, 8 – КД;  
 9 – подводящий трубопровод к КД; 10 – трубопровод от ГЗЗ до горячего коллектора ПГ;  
 11 – горячий коллектор; 12 – трубы теплообменной поверхности ПГ; 13 – холодный коллектор;  
 14 – трубопровод от холодного коллектора до ГЦН; 15 – трубопровод от ГЦН до ГЗЗ на холодной нитке гл; 16 – трубопровод от ГЗЗ к входу в реактор

Согласно [6] водный объем КД обладает акустической массой  $m_g$  и акустической податливостью  $c_g$ ; вода в трубопроводе обладает акустической массой  $m_T$  и акустической податливостью  $c_T$ ; паровой объем КД обладает акустической массой  $m_n$  и акустической податливостью  $c_n$ . Схема включения акустических масс и акустических податливостей представлена на рисунке 3.



**Рис. 3.** – Акустическая модель КД

Акустические массы сред:  $m_n = \frac{\rho_n \cdot l_n}{S_k}$ ;  $m_B = \frac{\rho_B \cdot l_B}{S_k}$ ;  $m_T = \frac{\rho_T \cdot l_T}{S_T}$

Акустические податливости сред:  $c_n = \frac{S_k \cdot l_n}{\rho_n \cdot a_n^2}$ ;  $c_B = \frac{S_k \cdot l_B}{\rho_B \cdot a_B^2}$ ;  $c_T = \frac{S_T \cdot l_T}{\rho_T \cdot a_T^2}$

Результаты расчета частоты АСВ в КД для уровней воды  $l_B = 5,1 \pm 1$  м в номинальном режиме приведены в таблице 1.

Алгоритм расчета параметров акустических элементов петли с компенсатором давления РУ «Дукованы» (ВВЭР – 440, В – 213).

*Акустическая масса*

$$m = \frac{\rho \cdot l}{S},$$

где  $\rho$  – плотность жидкости (газа) в оборудовании первого контура,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$l$  – длина (высота) жидкости (газа) в оборудовании первого контура, м;

$S$  – площадь поперечного сечения участка трубопровода или оборудования первого контура,  $\text{м}^2$ .

$$[m] = \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^4} \right]$$

*Акустическая емкость*

$$c = \frac{V}{\rho \cdot a^2} = \frac{l \cdot S}{\rho \cdot a^2}, \text{ где}$$

$a$  – скорость звука в жидкости (газе),  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$

**Таблица 1.** – Результаты расчета в номинальном режиме частоты АСВ в КД для различных уровней воды

Уровень воды в КД, м	Уровень пара в КД, м	Частота АСВ воды (СЧКДВ), Гц	Частота АСВ пара (СЧКДП), Гц	Частота АСВ (СЧКД) в КД, Гц
4,1	6,09	28,9	12,0	4,850
4,5	5,69	26,3	12,8	4,789
5,1	5,09	23,2	14,3	4,756
5,5	4,69	21,5	15,5	4,771
6,1	4,09	19,4	17,8	4,851

*Собственная частота колебания давления в жидкости (газе):*

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{m \cdot c}}$$

*Собственная частота колебания давления в трубопроводе с жидкостью:*

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\rho \cdot l}{S} \cdot \frac{l \cdot S}{\rho \cdot a^2}}} = \frac{a}{2\pi \cdot l}, [\text{Гц}]$$

где  $a$  – скорость распространения ударной волны воды в трубопроводе [10]

$$a = \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot \left( \frac{d_{\text{внутр}}}{E_m \delta} + \frac{1}{K_{\text{ж}}} \right)}}$$

$$K_{\text{ж}} = c_B^2 \cdot \rho [^*]$$

где  $d_{\text{внутр}}$  – внутренний диаметр трубопровода, м;  
 $E_m$  – модуль упругости материала трубопровода, Па;  
 $\delta$  – толщина стенки трубопровода, м;  
 $c_B$  – скорость звука в воде (газе), м/с;  
 $\rho$  – плотность жидкости (газа), кг/м<sup>3</sup>.

При расчете резонансной частоты состоящей из одного участка имеем:

$$f = \frac{a}{2\pi \cdot l}$$

Алгоритм расчета собственной частоты колебаний давления теплоносителя (СЧКДТ) при кипении в активной зоне реактора [12]:

$$f = \frac{a}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ДФ}}}{\rho_{\text{В}}}} \cdot (L_{\text{В}} \cdot L_{\text{ДФ}})^{-0.5}$$

где  $\rho_{\text{ДФ}}$  – плотность теплоносителя в двухфазной области;  
 $\rho_{\text{В}}$  – плотность теплоносителя в однофазной области;  
 $L_{\text{В}}$  – длина однофазного (экономайзерного) участка;  
 $L_{\text{ДФ}}$  – длина двухфазного участка;  
 $a$  – скорость звука,  $f$  – СЧКД.

Использование этих методов позволяет определить частоту АСВ в различных режимах предусмотренных регламентом эксплуатации энергоблока. Например, на различных этапах в режимах «холодного» и «полугорячего» состояния при пуске энергоблока совпадают значения:

- частоты вращения насоса и частоты АСВ в участке трубопровода от холодного коллектора ПГ до ГЦН;
- двукратной оборотной частоты ГЦН с частотами АСВ в холодном и горячем коллекторах ПГ;
- двукратной частоты колебаний шахты реактора совместно с корпусом реактора с частотами АСВ теплоносителя в отводящем от КД трубопроводе, в подводящем к КД трубопроводе с частотами АСВ в водяном объеме КД.

Результаты расчета частоты АСВ в номинальном режиме представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** – Результаты расчёта частоты АСВ в номинальном режиме

Номер участка	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Частота АСВ, Гц	16,8	41,1	64,6	22,7	16,9	6,8	23,2	14,3	6,5	36	35,2	17,3	40,8	19,9	53,7	34,5

В настоящее время на Нововоронежской АЭС успешно используется система контроля вибрации основного оборудования 1 контура SÜS, внедрены и используются в виде законченных программных продуктов результаты исследований, а именно: программа для автоматической отбраковки спектров; программа для автоматического выделения пиков в вибрационных спектрах [8]. Типичный вид спектра ДПД представлен на рисунке 4. Наличие основных пиков: пик оборотной частоты (24.625 Гц), низкочастотная составляющая (1 Гц.), два характерных только для ДПД пика (~6 Гц и ~8 Гц), образуемые двумя АСВ.

В одной из первых работ [7], посвященных измерениям и анализу шумовых сигналов в первом контуре АЭС Дукованы с ВВЭР-440, предпринята попытка

идентификация источников АСВ по результатам измерений. В работе высказано предположение, что одна из главных доминирующих частот стоячей волны давления, равная 6,6 Гц, может быть локализована в участке трубопровода, соединяющим ГЦН с парогенератором и корпусом реактора. АСВ.

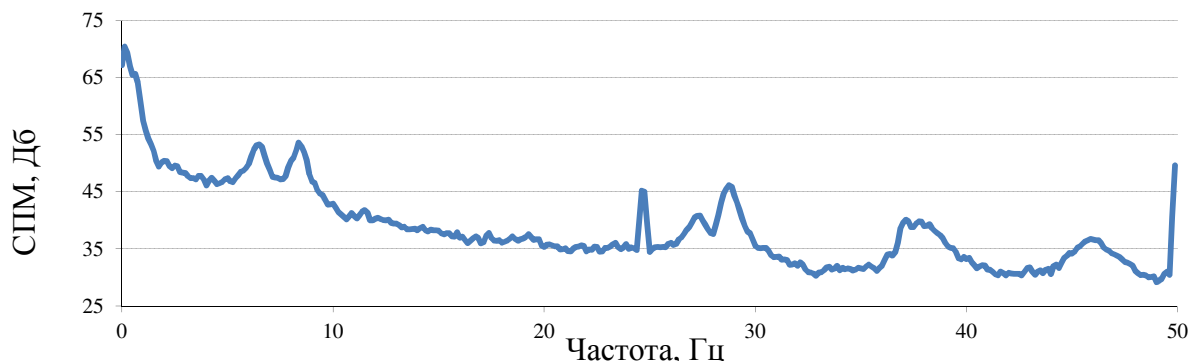


Рис. 4. – Типичный вид спектра ДПД 3 блока Нововоронежской АЭС

Применение разработанных методов и алгоритмов идентификации источников возникновения акустических стоячих волн в первом контуре АЭС с ВВЭР показывает, что источником возникновения этой АСВ является акустический контур образованный участками 16 и 1, показанными на рисунке 2.

Разработанные модели могут быть применены, как в условиях нормальной эксплуатации, так и в аварийных [11] режимах АЭС для решения следующих задач:

- разработки виброакустических паспортов реакторных установок;
- диагностирования и прогнозирования состояния оборудования;
- совершенствования управления технологическими процессами;
- обоснования конструкторских и проектных решений при выборе оборудования и компоновках систем теплоотвода от реактора;
- совершенствования компьютерных кодов.

В свою очередь решение этих задач позволит дать научное обоснование направлений модернизации и совершенствования проектно-конструкторских разработок, средств технической диагностики и систем управления технологическими процессами АЭС, а также уменьшить вероятность внезапных отказов оборудования. Выявления и устранение на ранней стадии причин аномальных вибраций основного оборудования дает большой экономический эффект т.к. приводит к сокращению объемов ремонтных работ и недовыработки энергии. Акустическая сертификация оборудования и теплоносителя необходима для совершенствования систем виброакустической диагностики и обнаружения на ранней стадии, возникающих аномалий в работе оборудования и технологическом процессе, идентификации аномалий и разработки систем управления колебательными и вибрационными процессами в оборудовании АЭС. Эти новые системы явятся важным дополнительным средством повышения безопасности, эффективности эксплуатации и срока службы, как действующих, так и проектируемых АЭС.

Разработанные методы и алгоритмы идентификации источников возникновения АСВ акустических стоячих волн в первых контурах АЭС с ВВЭР предназначены для использования в следующих актуальных тематических направлениях научных и проектных работ, которые должны найти отражением в работах отрасли:

- обоснование целостности основного оборудования новых РУ на срок службы до 60-80 лет, включая материаловедческое обеспечение;

- обоснование возможности продления эксплуатации действующих блоков сверх проектного срока службы;
- обоснование возможности прогнозирования и предотвращения виброакустических резонансов в оборудовании АЭС в маневренных и аварийных режимах, а также при воздействии ударных и сейсмических нагрузок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Proskuryakov K.N. Calculating Method of Coolant Resonant Frequencies Oscillation in Normal and Emergency Operating of NPP with WWER. Kernenergie, Vol. 3, 1983, p.102–104.
2. Проскуряков, К.Н. и др. Теоретическое определение частот собственных колебаний теплоносителя в первом контуре АЭС [Текст] / К.Н. Проскуряков, С.П. Стоянов, Г. Нидцбалла // МЭИ. – Вып. 407(1979). – С. 87–93.
3. Mullens A. etc. Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance and Diagnostic Applications, Proceeding of 5th Power Plant Dynamics, Controls and Testing / A. Mullens J. Thie. // Symposium University of Tennessee, Knoxville, March, 1983.
4. Grunwald G. etc. Investigation of Pressure Oscillation in PWR Primary Circuit» / G. Grunwald, K. Junghans, P. Liewers. Progress in Nuclear Energy, 15(1985), p. 651–659.
5. Nagy I. etc. Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs / I. Nagy, T. Katona. Progress in Nuclear Energy ,15(1985), p. 671.
6. Проскуряков, К.Н. Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Текст] / К.Н. Проскуряков. – М.: МЭИ, 1984. – 67 с.
7. Runkel J. etc. Results of Noise Analysis in the WWER 440 – Type Nuclear Power Plant Dukovany / J. Runkel, D. Stegemann, J. Fiedler , P. Hrosso, S. Figeby , J. Sad Пек, J. Hulfn // Proceedings of SMORN VII, Avignon, France, June 19–23, 1995, NEA OECD Vol. 1, p. 78–86.
8. Слепов, М.Т. Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС [Текст] / М.Т. Слепов : автореф. дисс. канд. техн. наук. – Обнинск, 1999.
9. Хайретдинов, В.У. и др. Экспериментально-расчетное обоснование вибропрочности реакторного оборудования АЭС «Дукованы» при эксплуатации ВВЭР-440 на повышенной мощности [Текст] / В.У. Хайретдинов, В.В. Тарханов, В.В. Абрамов // Материалы V Междунар. науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 29 мая – 1 июня 2007. – Подольск. 2007.
10. Жуковский, Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах [Текст] / Н.Е. Жуковский. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. – 108 с.
11. Proskuryakov K.N. Early Boiling Detection Method of Pre-or Post-Accident Situation on WWER and RBMK. SMORN VII, Avignon, France, 19-23 June 1995. NEA OECD Vol. 1, p. 426-434.

## REFERENCES

- [1] Proskuryakov K.N. Calculating Method of Coolant Resonant Frequencies Oscillation in Normal and Emergency Operating of NPP with WWER. Kernenergie, Vol. 3, 1983, ISSN 1431-5254, p. 102–104. (in English)
- [2] Proskuryakov K.N., Stoyanov S.P., Nidcballa G. Teoreticheskoe opredelenie chastot sobstvennykh kolebanij teplonositelya v pervom konture AES [Theoretical determination of frequencies of own fluctuations of the heat carrier in the first contour of the NPP]. Moskovskij energeticheskij institut [MPEI], Vol. 407(1979), ISSN 1993-6982, p. 87–93. (in Russian)
- [3] Mullens A. etc. Understanding Pressure Dynamic Phenomena in PWRs for Surveillance and Diagnostic Applications, Proceeding of 5th Power Plant Dynamics, Controls and Testing / A. Mullens J. Thie. // Symposium University of Tennessee, Knoxville, March, 1983. (in English)
- [4] Grunwald G. etc. Investigation of Pressure Oscillation in PWR Primary Circuit» / G. Grunwald, K. Junghans, P. Liewers. Progress in Nuclear Energy, 15(1985), ISSN 0149-1970, p. 651–659. (in English)
- [5] Nagy I. etc. Theoretical Investigation of the Low-Frequency Pressure Fluctuation in PWRs / I. Nagy, T. Katona. Progress in Nuclear Energy ,15(1985), ISSN 0149-1970, p. 671. (in English)
- [6] Proskuryakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Heathydraulic initiation of fluctuations of the heat carrier in the YaEU intra case devices]. М.: МЭИ [MPEI], 1984, 67 p. (in Russian)

- [7] Runkel J. etc. **Results of Noise Analysis in the WWER 440 – Type Nuclear Power Plant Dukovany / J. Runkel, D. Stegemann, J. Fiedler, P. Hrosso, S. Fignedy, J. Sad Пек, J. Hulfn** // Proceedings of SMORN VII, Avignon, France, June 19–23, 1995, NEA OECD Vol. 1, p. 78–86. (in English)
- [8] Slepov M.T. Razrabotka metodov i interpretaciya dannyh primenitelno k sistemam shumovoj diagnostiki reaktornyx ustanovok Novovoronezhskoj AES [Development of methods and interpretation of data in relation to systems of noise diagnostics of reactor installations of the New Voronezh NPP] : avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk [thesis abstract of PhD in Technical Sciences]. – Obninsk, 1999. (in Russian)
- [9] Xajretdinov V.U., Tarxanov V.V., Abramov V.V. Eksperimentalno-raschetnoe obosnovanie vibroprochnosti reaktornogo oborudovaniya AES «Dukovany» pri ekspluatcii VVER-440 na povyshennoj moshhnosti [Experimental and settlement justification of vibration strength of the reactor equipment of the NPP of "Dukovana" at operation of WWER-440 at the increased power]. Materialy V Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii «Obespechenie bezopasnosti AES s VVER», 29 maya – 1 iyunya 2007 [Materials of the V International scientific and technical conference "Safety of the NPP with WWER", on May 29 – on June 1, 2007]. Podolsk, 2007. (in Russian)
- [10] Zhukovskij N.E. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnyh trubah [About a water hammer in water pipes [Text] / N. E. Zhukovsky]. M., Leningrad. Pub. Gosudarstvennoe izdatelstvo texniko-teoreticheskoj literatury [State publishing house of technical and theoretical literature], 1949, 108 p. (in Russian)
- [11] Proskuryakov K.N. Early Boiling Detection Method OF Pre-or Post-Accident Situation on WWER and RBMK. SMORN VII, Avignon, France, 19-23 June 1995. NEA OECD Vol. 1, p. 426–434. (in English)

### **Methods and Algorithms Identification of Sources Acoustic Standing Wave in the Primary Circuit of NPP with WWER-440**

**K.N. Proskuryakov\*, A.I. Fedorov\*\*, M.V. Zaporozhets\*,  
A.A. Dyatlovsky\*, V.A. Huseynov\***

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

*\*\* Novovoronezh NPP the branch of JSC Rosenergoatom Concern, Novovoronezh, Russia 396072  
<sup>1</sup> e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru*

**Abstract** - The accident at the Japanese nuclear power plant Fukushima Daiichi, which occurred as a result of the earthquake in 2011, has led to an understanding of the need for more stringent requirements imposed on the providing of seismic stability and to the justification of the possibility of extending the service life of nuclear power plants.

Under these conditions, it becomes more urgent realizing the benefits and encouraging the further development of processes and research of vibration -acoustic resonances in nuclear power plants that have been worked out in the NRU "MPEI" in recent decades for safety, seismic stability and competitiveness of domestic nuclear power plants

A number of published results that worked out for the first time in the world in the NRU "MPEI" and up to the moment hitherto unparalleled are included in the global scientific database World Wide Science. org as a key global research results.

The paper presents the developed and verified methods and algorithms for calculating the frequency of acoustic standing waves and identifying the sources of their occurrence. The main current direction of research and design works, in which the results could be applied are indicated.

*Keywords:* standing waves, vibration, vibro-acoustic response, NPP.