

**ИЗЫСКАНИЕ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ,  
СТРОИТЕЛЬСТВО И МОНТАЖ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ  
ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.384.039

**ВЛИЯНИЕ ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ КОЛЕБАНИЙ  
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР НА СРОК  
СЛУЖБЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

© 2018 К.Н. Проскуряков

*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия*

Работа энергоблока АЭС в маневренных режимах в сравнении с эксплуатацией в базовом режиме создает дополнительные низкоцикловые и высокоцикловые нагрузки на оборудование. Количество циклов зависит от диссипации энергии в процессе затухания колебаний давления и вибраций в акустических элементах (участках) образующих первый контур ВВЭР. Показано, что результаты приближенных теоретических оценок декрементов затухания существенно отличаются от значений определенных по результатам измерений автоспектральных плотностей мощности сигналов от датчиков пульсаций давления и вибраций. Из сопоставления результатов сделан вывод о необходимости тщательных экспериментальных исследований диссипации энергии при отключении/включении главных циркуляционных насосов. Установлено, что соединения участков главного циркуляционного трубопровода: с дыхательным трубопроводом компенсатора давления; на входе и выходе из реактора; с горячим и холодным коллекторами парогенератора имеют малые логарифмические декременты затухания колебаний давления и количество высокоцикловых нагрузок в этих соединениях при работе АЭС не только в маневренных, но и в базовых режимах превышает проектные оценки и является одной из причин повреждений сварных соединений. Для подавления высокоцикловых виброакустических нагрузок НИУ МЭИ ведет разработки акустических фильтров частот.

*Ключевые слова:* маневренные режимы, высоко-цикловые нагрузки, акустическая модель, оборудование, вибрации, добротность, резонанс, демпфер

Поступила в редакцию: 21.06.2018

В проекте ВВЭР-ТОИ, в отличие от предыдущих проектов, появились новые требования работы в маневренных режимах, для участия в первичном и вторичном регулировании частоты сети, а также в суточном регулировании мощности по графику (100-50-100)% от номинального уровня мощности ( $N_{\text{ном}}$ ).

В [1] указано, что работа энергоблока в таких режимах при существующих способах регулирования неэффективна, «как с точки зрения потребления электроэнергии на собственные технологические нужды, так и с точки зрения качества систем регулирования и работы всего технологического оборудования I, II контура энергоблока, а также уровня надежности и безопасности работы всего энергоблока, предъявляемым в новых проектах АЭС с ВВЭР». Реализовать оптимальный режим работы энергоблока АЭС в переходных и маневренных режимах возможно с применением современных систем частотно-регулируемого электропривода (ЧРП) на главных циркуляционных насосных агрегатах (ГЦНА). ЧРП может плавно и синхронно изменять производительность четырех ГЦНА по заданному или изменяемому технологическому параметру или любой другой закономерности, сохраняя одинаковый поток теплоносителя во всех петлях реакторной установки [1].

Следует отметить, что для обоснования применения ЧРП на ГЦНА необходимо

проведение комплекса НИОКР с проведением комплексных натуральных испытаний на стендовом оборудовании.

Регулирование расхода теплоносителя I-го контура за счет отключения/включения разного количества ГЦНА (из четырех одновременно работающих ГЦНА в номинальном режиме) имеет ряд недостатков как с точки зрения управления электродвигателем ГЦНА, ограничение количества пусков – не более 1500 за весь срок службы, так и с точки зрения увеличения циклических нагрузок на оборудование I-го контура. В связи с этим актуальной задачей является выявление акустических элементов, образующих первый контур ВВЭР, в которых возникающие при эксплуатации акустические стоячие волны (АСВ) имеют меньшие значения логарифмических декрементов затухания, чем предусмотрено в нормах [2].

Работа энергоблока АЭС в переходных и маневренных режимах в сравнении с эксплуатацией в базовом режиме на  $N_{ном}$  создает дополнительные низкоцикловые термические нагрузки на оборудование, и приводит к увеличению высокоцикловых нагрузок, за счет импульсных нагрузок, возникающих при отключении/включении ГЦНА. В процессе затухания импульсного возмущения, возникающего при каждом отключении/включении ГЦНА, количество высокоцикловых нагрузок в акустических элементах, образующих контур теплоносителя, возрастает пропорционально их добротностям ( $Q$ ). Иными словами, чем меньше значение логарифмического декремента затухания АСВ, тем больше суммарное число высокоцикловых нагрузок.

В соответствии с требованиями [2] Общих положений обеспечения безопасности атомных станций сейсмостойкая АЭС должна обеспечивать безопасность при сейсмических воздействиях до МРЗ (максимальное расчетное землетрясение) включительно, при проектном землетрясении (ПЗ) выработку (выдачу) электрической и тепловой энергии вплоть до уровня ПЗ включительно.

«При расчете систем и элементов АЭС I и II категорий сейсмостойкости на сейсмические воздействия параметры затухания колебаний (логарифмические декременты колебаний) должны приниматься на основе специальных обоснований» [2]. В случае отсутствия данных значения логарифмических декрементов колебаний допускается принимать по таблице 1.

Таблица 1 – Логарифмические декременты колебаний строительных конструкций и трубопроводов [Logarithmic decrements of vibrations of building structures and pipelines] [2]

Вид конструкции	Логарифмический декремент $\delta$ в долях от критического при расчетных напряжениях $\sigma$ в зависимости от сопротивления материала R	
	$\sigma=0.67R$	$\sigma \geq 0.9R$
Железобетонные конструкции обычные	0.04	0.07
Железобетонные конструкции преднапряженные	0.02	0.05
Стальные конструкции сварные	0.02	0.04
Стальные конструкции на болтах	0.04	0.07
Оборудование и трубопроводные системы большого диаметра (>300 мм)	0.02	0.03
Оборудование и трубопроводные системы малого диаметра (<300 мм)	0.01	0.02

Следует отметить, что в проектной документации АЭС с ВВЭР не предусмотрено определение и нормирование логарифмических декрементов затухания колебаний теплоносителя в оборудовании первого контура.

Акустическая модель петли первого контура ВВЭР-1000 приведена на рисунке 1.

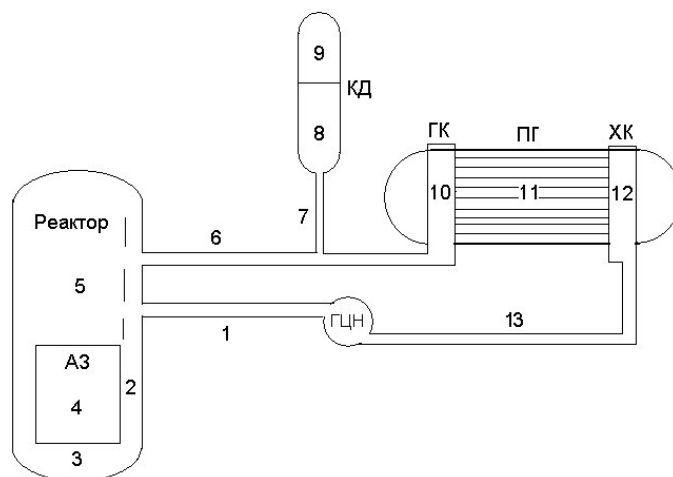


Рисунок 1 – Акустическая модель петли первого контура ВВЭР-1000 [Acoustic model the loop of the WWER-1000 primary circuit]

АЗ – активная зона [RC-reactor core]; ПГ – парогенератор [SG – steam generator]; КД – компенсатор давления [Pr- pressurizer]; ХКСС и ГК НС – холодный и горячий коллекторы [cold and hot collector of SG]; 1-13 – номера элементов первого контура [numbers of elements of the first circuit]: 1 – «холодная нитка» от главного циркуляционного насоса (ГЦН) до входного патрубка реактора [«cold loop» from main circulating pump (MCP) to reactor vessel]; 2 – опускной участок [down camera]; 3 – пространство под активной зоной [bottom plenum]; 4 – активная зона [reactor core]; 5 – пространство над активной зоной [top plenum]; 6 – «горячая нитка» (от выходного патрубка реактора до входа в горячий коллектор ПГ) [«a hot loop» from a reactor up to an input in hot collector steam generator (SG)]; 7 – дыхательный трубопровод [respiratory pipe]; 8 – жидкая фаза в компенсаторе давления [volume of water in pressurizer (Pr.)]; 9 – паровая фаза в компенсаторе давления [volume of steam in pressurizer]; 10 – горячий коллектор [hot collector of SG]; 11 – трубочка ПГ [tubes of SG]; 12 – холодный коллектор [cold collector of SG]; 13 – «холодная нитка» от выхода из холодного коллектора ПГ до ГЦН [«a cold loop» from an output from cold collector of SG up to MCP]

Добротность потока определяется по формуле [3]:

$$Q = \frac{X}{R},$$

где  $X = \sqrt{\frac{m}{c}}$  – волновое сопротивление (реактивное сопротивление определяется силами упругости), кг/м<sup>4</sup>·с;

$R$  – активное сопротивление (активное сопротивление элемента определяется вязкостными силами);

$m$  – акустическая масса, кг/м<sup>4</sup>;

$c$  – акустическая податливость, м<sup>4</sup>·с<sup>2</sup>/кг.

Активное сопротивление равно [3]:

$$R = \frac{E}{W^2},$$

где  $E$  – мощность диссипируемой энергии, Вт;

$W$  – объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с.

В данной работе для расчета диссипации в трубах применена методика, разработанная в [4], согласно которой удельная мощность диссипации энергии (Вт/м) в круглой трубе равна:

$$E = \tau_0 \cdot 2\pi R V = 2\pi \rho u_*^3 R \sqrt{\frac{8}{\xi}}$$

где  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$  – динамическая скорость, м/с ( $\tau_0$  – касательное напряжение на стенке, Па;

$\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>);

$R$  – радиус трубы, м;

$V$  – средняя скорость потока жидкости, м/с;

$\xi$  – коэффициент сопротивления трения.

Касательное напряжение на стенке трубы при движении однофазной среды определяется следующим образом:

$$T_0 = \frac{\Delta p \cdot S}{F},$$

где  $\Delta p$  – перепад давления, определяемый по уравнению Дарси-Вейсбаха.

Добротность связана с логарифмическим декрементом затухания, как показано в [9]:

$$\Delta = \frac{\pi}{Q}.$$

При использовании этой методики не учитывается диссипация энергии в строительных конструкциях и в оборудовании первого контура.

Наиболее сложным объектом является активная зона, в которой диссипация энергии обусловлена не только трением, но и возбуждением колебаний элементов ТВС, ТВЭЛ.

Результаты расчета добротности и логарифмических декрементов затухания колебаний давления по этой методике для элементов первого контура ВВЭР-1000 в таблице 2.

Таблица 2 – Добротность и декременты затухания в теплоносителе акустических элементов первого контура.  $P=16$  МПа,  $t_{\text{вх}}=289$  °С,  $t_{\text{вых}}=322$  °С [Quality factor and decrement of attenuation in the coolant of acoustic elements of the primary circuit.  $P=16$  МПа,  $t_{\text{вх}}=289$  °С,  $t_{\text{вых}}=322$  °С]

Номер участка	1	2	3	4	5	6	10	11	12	13
$Q \cdot 10^3$	1.974	2.1	5.1	0.055	7.2	2.551	4.451	0.042	5.476	2.257
$\Delta \cdot 10^{-3}$	1.591	1.5	0.62	56	0.44	1.232	0.7	76	0.57	1.392

Величину логарифмического декремента можно также определить по автоспектральным плотностям мощности (АСПМ) сигналов от датчиков пульсаций давления и вибраций, т.е. по измеренным зависимостям амплитуды колебаний от частоты. Согласно [5] декремент для каждого пика на АСПМ рассчитывается следующим образом:

$$\Delta = \frac{\pi \Delta f}{f_p \sqrt{\frac{1}{\alpha^2} - 1}}$$

где  $\alpha = \frac{A}{A_p}$  и  $\Delta f = f_2 - f_1$  (здесь  $A_p$  – амплитуда пика;

$A=0,707 A_p$ ,  $f_1$  и  $f_2$  – значения частоты при  $\Delta p=A$  (рис. 2).

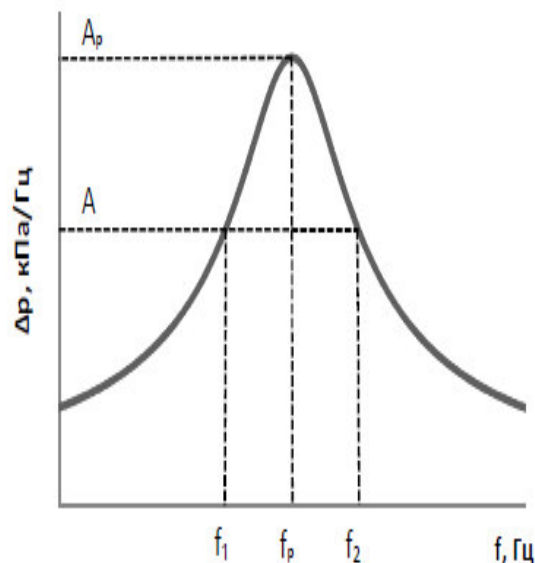


Рисунок 2 – Определение логарифмического декремента по резонансной кривой [The definition of the logarithmic decrement for resonance curve]

Для оценки значений коэффициентов затухания использованы спектральные характеристики вибраций и пульсаций давления.

На рисунке 3 представлены значения декрементов затухания, построенные по результатам измерений АСПМ сигналов от датчиков пульсаций давления и вибраций на Ростовской АЭС. Декременты представлены в значениях  $\delta$ , где  $\delta = \Delta/2\pi$ ,  $\Delta$  – декремент затухания. Логарифмические декременты  $\delta$  указаны в долях от значения критического декремента, равного  $2\pi$ . Каждому источнику колебаний соответствует выраженный пик на АСПМ. Колебания давления в каждом источнике возникновения АСВ имеют свой декремент затухания.

Из сопоставления результатов расчетов, представленных в таблице 2, с данными обработки экспериментальных измерений, показанных на рисунке 3, видна существенная недооценка энергии диссипации при учете только той ее части, которая обусловлена трением. Расчет диссипации в круглой трубе является наиболее простой задачей. Первый контур АЭС включает реактор, ГЦН, парогенератор, компенсатор давления, соединенные трубопроводами Ду-850. Расчет диссипации энергии в таком контуре представляет значительную сложность. В литературе не имеется достоверных сведений о расчете диссипации энергии в первом контуре АЭС. В стационарных режимах в первом контуре АЭС с ВВЭР турбулизация потока в местных сопротивлениях приводит к передаче энергии от потока к конструкции.

Опыт эксплуатации АЭС и, в частности, с реакторами типа ВВЭР 1000, свидетельствует о повреждениях сварных соединений главного циркуляционного трубопровода с горячим и холодным коллекторами парогенератора [6], с патрубками компенсатора давления и на входе и выходе из реактора [7]. Регулярно возникающие повреждения основного оборудования РУ свидетельствует о не соответствии ряда сварных соединений требованиям безопасной эксплуатации АЭС [8, 9, 10].

При работе АЭС в маневренных режимах число импульсных воздействий, как показано выше, значительно возрастает и количество циклов в процессе их затухания зависит от добротности потока теплоносителя в акустических элементах (участках) образующих первый контур ВВЭР.

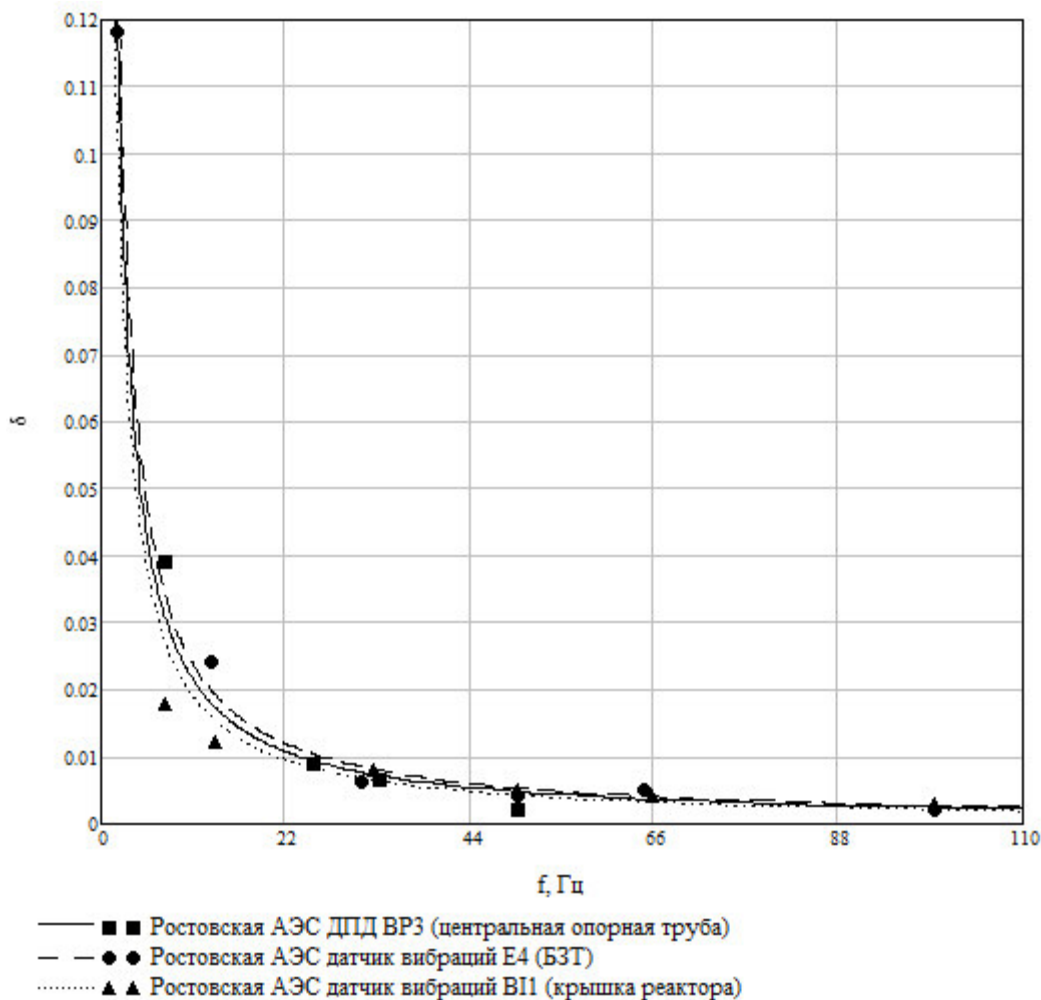


Рисунок 3 – Сравнение зависимостей  $\delta(f)$  для ДПД и датчиков вибраций Ростовской АЭС [Comparison of  $\delta(f)$  dependencies for the sensor of the pressure pulsation and vibration sensors, measured at Rostov NPP]

Анализ большого объема данных показал, что декременты затухания пульсаций давления в теплоносителе могут быть меньше, значений указанных для оборудования [2]. Сопоставление результатов расчета, представленных в таблице 2, с данными обработки экспериментальных измерений указывает на существенную недооценку диссипации энергии при учете только той ее части, которая обусловлена трением.

Требования обеспечения надежной работы АЭС в маневренных режимах, с учетом импульсных нагрузок, возникающих при отключении/включении разного количества ГЦНА, для регулирования расхода теплоносителя I-го контура является актуальной задачей. Для решения этой задачи необходим поиск и разработка эффективных технологических решений для подавления высокоцикловых виброакустических нагрузок на оборудование, ответственное за надежность и безопасность АЭС. К наиболее перспективным направлениям технологических решений для подавления высокоцикловых виброакустических нагрузок на оборудование АЭС относятся проводимые НИУ МЭИ разработки акустических фильтров частот [11].

Опережающее внедрение в проектно-конструкторскую документацию изменений, придающих оборудованию первого контура свойств акустических фильтров с управляемым диапазоном параметров, обеспечит АЭС с ВВЭР долговременные

конкурентные преимущества, основанные на разработке и применении на практике научно обоснованных прорывных технологий.

#### ВЫВОДЫ

1) Логарифмические декременты затухания колебаний давления в акустических элементах первого контура ВВЭР-1000, соединяемых сваркой: с дыхательным трубопроводом компенсатора давления; с входом/выходом реактора; с горячим и холодным коллекторами парогенератора меньше нормируемых для строительных конструкций величин.

2) В проектной документации АЭС с ВВЭР не предусмотрено определение и нормирование логарифмических декрементов затухания колебаний теплоносителя в оборудовании первого контура.

3) Высокая добротность соединяемых сваркой акустических элементов являются диагностическим признаком потенциально опасных повреждений сварных соединений.

4) Придание на этапе проектирования оборудованию первого контура свойств акустических фильтров с управляемым диапазоном параметров, обеспечит АЭС с ВВЭР долговременные конкурентные преимущества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зыков, А.С. Техничко-экономические аспекты обоснования применения высоковольтного частотно-регулируемого электропривода на насосах ГЦНА, ПЭН, КЭН и ЦН в новых и перспективных проектах АЭС с ВВЭР с учетом новых требований по маневренным режимам [Текст] / А.С. Зыков // 8-я МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ. – Подольск : «ГИДРОПРЕСС», 2013. – С.1-7.
2. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01, 2002.
3. Лепендин, Л.Ф. Акустика [Текст] / Л.Ф. Лепендин. – Москва : Высшая школа, 1978. – 272 с.
4. Гиргидов, А.Д. О диссипации энергии в кругло цилиндрической трубе [Текст] / А.Д. Гиргидов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №6. – С. 5-11.
5. Ананьев, А.Н. Сейсмическая безопасность атомных станций [Текст] / А.Н. Ананьев, П.С. Казновский, С.П. Казновский [и др.]. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 229 с.
6. Нетяга, Н.Н. Оценка рисков повреждения узла приварки коллектора к патрубку ПГ АЭС с ВВЭР [Текст] / Н.Н. Нетяга, С.П.Саакян, В.П. Поваров // Известия вузов. Ядерная энергетика. – № 4. – 2016. – С. 31-41.
7. Miyoshi Y. Replacement of Pressurizer Safe end Weld. 4th international conference on Nuclear Power Plant Life Management (PLiM). Oct. 23-26. 2017, Lyon, France. [www-pub.iaea.org/MTCD](http://www-pub.iaea.org/MTCD)
8. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок, НП -089-15.
9. Основные требования к продлению срока эксплуатации блока атомной станции, НП-017-2000.
10. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170ФЗ «Об использовании атомной энергии» (с изменениями и дополнениями).
11. Проскураков, К.Н. Исследование акустических колебаний в реакторных установках и перспективы их использования для обоснования остаточного ресурса [Текст] / К.Н. Проскураков, М.В. Запорожец. – Вестник Московского энергетического института. – 2016. – №5. – С. 20-25.

#### REFERENCES

- [1] Zy`kov A.S. Texniko-e`konomicheskie aspekty` obosnovaniya primeneniya vy`sokovol`tnogo chastotno-reguliruемого e`lektroprivoda na nasosax GCzNA, PE`N, KE`N i CzN v novy`x i perspektivny`x proektax AE`S s VVE`R s uchetom novy`x trebovanij po manevrenny`m rezhimam [Technical and Economic Aspects of Justification of Application of the High-Voltage Frequency-Controlled Electric Drive on Pumps of GTSNA, PEN, KEN and TSN in New and Perspective Projects of NPP with WVER Taking into Account New Requirements for Maneuvering Modes]. 8-ya MNTK «Obespechenie bezopasnosti AE`S s VVE`R» ОКБ. Podol`sk, «GIDROPRESS»,

2013. S.1-7. [8th International Scientific and Technical Conference "Ensuring the NPP Safety with WWER" Design Bureau. Podolsk: "GIDROPRESS"] (in Russian).
- [2] Normy` proektirovaniya sejsmostojkix atomny`x stancij NP-031-01 [Standards of Design of Seismic-Resistant Nuclear Power Plants]. 2002 (in Russian).
- [3] Lependin L.F. Akustika [Acoustics]. Moskva. Vy`sshaya shkola [Moscow. Higher school]. 1978. 272 p. (in Russian).
- [4] Girgidov A.D. O dissipacii e`nergii v kruglo cilindricheskoj trube [Energy Dissipation in a Round Cylindrical Tube]. Inzhenerno-stroitel`nyj zhurnal [Engineering and Construction Journal]. 2012. № 6. P. 5-11 (in Russian).
- [5] Anan`ev A.N., Kaznovskij P.S., Kaznovskij S.P. Sejsmicheskaya bezopasnost` atomny`x stancij [Seismic Safety of Nuclear Power Plants]. Moskva. Izd-vo MGTU im. N.E`. Bauman [Moscow. Bauman MGTU Publishing House]. 2011. 229 p. (in Russian).
- [6] Netyaga N.N., Saakyan S.P., Povarov V.P. Ocenka riskov povrezhdeniya uzla privarki kollektora k trubku PG AE`S s VVE`R [Risk Assessment of Damage to the Collector Welding Unit to the SG pipe of NPP with VVER], Izvestiya vuzov. Yadernaya e`nergetika [News of Universities. Nuclear Power]. № 4. 2016. P. 31-41 (in Russian).
- [7] Miyoshi Y. Replacement of Pressurizer Safe end Weld. 4th international conference on Nuclear Power Plant Life Management (PLiM). Oct. 23-26. 2017. Lyon. France. www-pub.iaea.org/MTCD
- [8] Pravila ustrojstva i bezopasnoj e`kspluatacii oborudovaniya i truboprovodov atomny`x e`nergeticheskix ustanovok, NP -089-15 [Rules of construction and safe operation of equipment and pipelines of nuclear power plants, NP-089-15] (in Russian).
- [9] Osnovny`e trebovaniya k prodleniyu sroka e`kspluatacii bloka atomnoj stancii, NP-017-2000 [Basic Requirements for the Life Service Extension of Nuclear Power Plant Unit, NP -017-2000] (in Russian).
- [10] Federal`nyj zakon ot 21 noyabrya 1995 g. № 170FZ «Ob ispol`zovanii atomnoj e`nergii» (s izmeneniyami i dopolneniyami) [Federal Law of 21 November 1995 No. 170SL "Use of Atomic Energy" (with amendments and additions)] (in Russian).
- [11] Proskuryakov K.N., Zaporozhec M.V. Issledovanie akusticheskix kolebanij v reaktorny`x ustanovkax i perspektivy` ix ispol`zovaniya dlya obosnovaniya ostatochnogo resursa [Investigation of Acoustic Oscillations in Reactor Plants and the Prospects of Their Use to Justify the Residual Life], Vestnik Moskovskogo e`nergeticheskogo institute [Bulletin of Moscow Power Engineering Institute]. 2016. № 5. P. 20-25 (in Russian).

## The Influence of Coolant Oscillation Damping Decrement of the NPP Primary Circuit with WWER during Service Life of Welded Joints

K.N. Proskuryakov

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

*ORCID iD: 0000-0002-1884-5576*

*WoS Researcher ID: I-3583-2017*

*e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru*

**Abstract** – The operation of the NPP power unit in maneuverable modes in comparison with the operation in the basic mode creates additional low-cycle and high-cycle loads on the equipment. The number of cycles depends on the energy dissipation in the process of attenuation of pressure oscillations and vibrations in the acoustic elements (sections) forming the first WWER circuit. It is shown that the results of approximate theoretical estimates of the damping decrements differ significantly from the values of the signal power spectra of pulsation pressure and vibration sensors determined by the results of measurements of the auto-spectral power densities. It is concluded From the comparison of the results that careful experimental studies of energy dissipation are necessary when the main circulation pumps are turned off / on. It was established that the connections of the main circulation pipe sections: with the respiratory pipe of the pressure compensator; at the inlet and outlet of the reactor; with hot and cold collector steam generators have small logarithmic decrements of attenuation of pressure fluctuations. The number of high-cycle loads in these compounds when the plant operates not only in maneuverable, but also in basic modes exceeds design estimates and it is one of the causes of welded joint damage. NRU MEI develops acoustic frequency filters to suppress high-cycle vibration-acoustic loads.

*Keywords:* maneuverable modes, high-cycle loads, acoustic model, equipment, vibrations, quality factor, resonance, damper