

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ЧАСТОТЫ АСВ В ЭСКЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ АЭС С ВВЭР

© 2018 К.Н. Проскуряков, А.В. Аникеев, К.И. Беляев, Д.А. Писарева

Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

Проведено сопоставление результатов расчета частот акустических стоячих волн с автоспектральными плотностями мощности сигналов датчиков пульсаций давления для сложных комбинаций акустических элементов 1-го контура АЭС с ВВЭР-440. Получено удовлетворительное соответствие результатов расчета частот акустических стоячих волн с данными измерений. Приведен новый подход к формированию комбинационных акустических контуров в системе теплоносителя в ВВЭР-440. Впервые исследован колебательный контур теплоносителя, включающий соединенные трубопроводами реактор и компенсатор давления. Установлено, что в исследованных режимах частота акустических стоячих волн в этом контуре близка к 2 Гц. Показана возможность смещения этой частоты в области резонансного взаимодействия с ТВС при изменении компоновки этой системы.

Ключевые слова: стоячие волны, вибрации, виброакустический резонанс, акустически-стоячие волны, АСВ, АСПМ, акустический резонанс.

Поступила в редакцию: 29.05.2018

Практика эксплуатации АЭС показывает, что потоки рабочей среды вызывают механические колебания и вибрации оборудования и его элементов. Эти процессы относятся к числу основных факторов, определяющих динамические нагрузки на оборудование, его срок службы и надежность. Наиболее опасно взаимодействие оборудования с потоком текучей среды в резонансной области колебаний механических элементов и потока [1]. В первом контуре АЭС с ВВЭР основными источниками возбуждения колебаний являются нестационарные гидродинамические процессы в теплоносителе (акустические волны, турбулентность, вихреобразование, кавитация и др.) и главные циркуляционные насосы (ГЦН). В настоящее время актуальной задачей атомной энергетики является обоснование возможности продления проектного срока эксплуатации энергоблоков АЭС. Для выполнения этой задачи необходимо знать остаточный ресурс конструкционных материалов оборудования ответственного за безопасность эксплуатации. При этом, необходимо учитывать потерю несущей способности конструкционных материалов при воздействии циклических нагрузок [2,3,4], возрастающих в условиях виброакустических резонансов (ВАР). Необходимо отметить, что регламентом пусконаладочных работ не предусмотрено определение ВАР в режимах пуска и останова энергоблоков, их продолжительность не фиксируется и, следовательно, не учитывается в оценках остаточного ресурса.

Для обоснования возможности продления сроков эксплуатации необходимо выявить условия, при которых уровень вибраций превышает допустимые значения, провести идентификацию причин превышения проектного уровня вибраций и по возможности предотвратить или ограничить их воздействие на оборудование. Для решения этих задач используют данные систем технической диагностики, состоящих из разнообразных измерительных каналов [5,6].

На энергоблоке № 3 Нововоронежской АЭС в 2015 году впервые проведены детальные измерения пульсаций теплоносителя и вибраций оборудования для 17 этапов пуска энергоблока и для номинального режима работы [7], что существенно больше числа этапов, предусмотренного регламентом. Для каждого этапа проведена обработка сигналов от датчиков пульсаций давления (ДПД) и идентификация источников возникновения акустических стоячих волн (АСВ) в первом контуре АЭС с ВВЭР-440.

В Табл.1 приведены данные расчета, по методикам [1], частот АСВ в участках акустической схемы для 2 этапов пуска (режим 1 и режим 2) и номинального режима (режим 3) работы энергоблока. В графе Табл.1 "параметры режима" приведены теплофизические параметры теплоносителя (температура T и давление P) на выходе из активной зоны реактора и значение уровня в компенсаторе давления H , при котором были рассчитаны частоты АСВ на участках 7 и 8. Разработанная акустическая схема первого контура, состоит из 16 участков, показанных на Рис.1. Она включает в себя основные элементы 1-го контура АЭС с ВВЭР-440. На Рис.2 показан впервые исследованный акустический контур, образованный реактором, компенсатором давления, дыхательным трубопроводом и участками 1-го контура от главной запорной задвижки (ГЗЗ) до реактора.

Таблица 1. – Результаты расчета частот АСВ в участках акустической схемы первого контура [The results of calculating the frequencies of the acoustic standing waves in the sections of the acoustic circuit of the primary circuit]

| | | | | | | | | |
|-----------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Параметры режима 1 | $T = 256 \text{ }^{\circ}\text{C}, P = 127 \text{ кг/см}^2, H=4.34 \text{ м}$ | | | | | | | |
| № участка | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Частота, Гц | 18.3 | 44.1 | 71.7 | 28.6 | 20.4 | 7.1 | 23.7 | 11.5 |
| № участка | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Частота, Гц | 6.7 | 43.6 | 42.5 | 19.3 | 42.6 | 20.7 | 56.9 | 36.3 |
| Параметры режима 2 | $T = 268 \text{ }^{\circ}\text{C}, P = 125 \text{ кг/см}^2, H=3.37 \text{ м}$ | | | | | | | |
| № участка | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Частота, Гц | 17.7 | 43.1 | 69.2 | 27.6 | 19.5 | 6.8 | 29.5 | 9.9 |
| № участка | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Частота, Гц | 6.4 | 41.8 | 40.6 | 18.5 | 41.3 | 20.1 | 55.3 | 35.3 |
| Параметры режима 3 | $T = 296 \text{ }^{\circ}\text{C}, P = 124 \text{ кг/см}^2, H=4.04 \text{ м}$ | | | | | | | |
| № участка | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Частота, Гц | 17.5 | 42.8 | 64.9 | 24.5 | 17.3 | 6.3 | 25.2 | 10.9 |
| № участка | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Частота, Гц | 5.9 | 37.0 | 35.7 | 17.5 | 40.9 | 20.0 | 54.8 | 35.0 |

В настоящее время на Нововоронежской АЭС успешно используется система контроля вибрации основного оборудования SUS, внедрены и используются в виде программных пакетов: программа для автоматической отбраковки спектров; программа для автоматического выделения пиков в вибрационных спектрах [8]. Автоспектральная плотность мощности (АСПМ) сигналов от ДПД для трех режимов представлена на рисунке 3,4,5. На рисунках также показаны рассчитанные значения частот АСВ из Табл.2.

В Табл.2, колебательный контур, образованный реактором, КД и соединительными трубопроводами обозначен 16+1+2+3+4+5, показан на Рис.2. На Рис.3, Рис.4,Рис.5 приведены АСПМ сигналов ДПД для трех режимов. На Рис.5 виден доминирующий пик с частотой 2,04 Гц, который, как это следует изТабл.2, соответствует расчетной оценке для сложного контура, образованного участками 16+1+2+3+4+5 в номинальном режиме.

В пусковых режимах 1, 2 получены частоты АСВ 2,41 и 2,31 соответственно, показанные на Рис.3, Рис.4. Так же следует отметить, что исключение элемента 16 из контура образует новый колебательный контур, в котором частота АСВ равна 2,49 Гц, этот пик выражен слабее, но его так же можно обнаружить на Рис. 5.

Следует отметить, что изменение геометрических параметров колебательного контура влечет за собой изменение величины резонансной частоты. Изменение компоновки

оборудования, представленного на Рис. 2 может привести, как к увеличению частоты АСВ, так и к ее уменьшению. В случае увеличения частоты АСВ она может попасть в диапазон частот вибраций ТВС с двумя закрепленными концами, а в случае уменьшения может сместиться в диапазон частот ВАР с частотами вибраций ТВС с одним закрепленным концом.

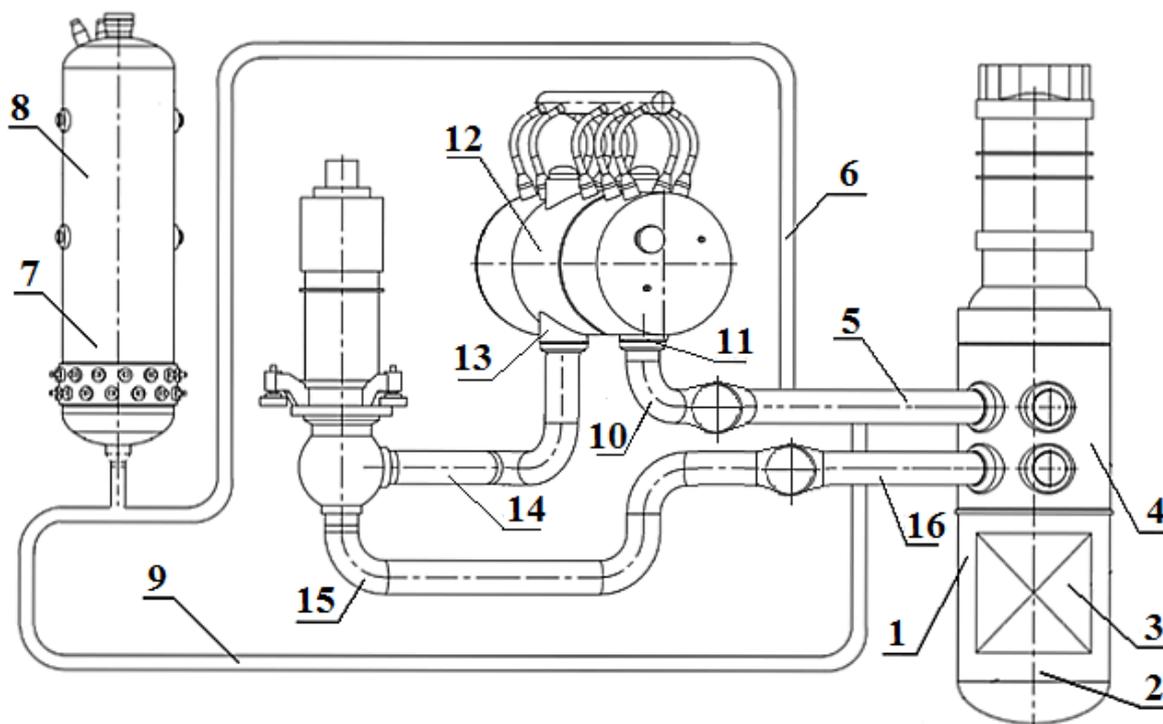


Рис. 1. – Акустическая схема АЭС с ВВЭР – 440:

1 – опускающей участок реактора; 2 - пространство под активной зоной;
 3 – активная зона; 4 – пространство над активной зоной; 5 – участок главного циркуляционного контура (ГЦК) от реактора до главной запорной задвижки (ГЗЗ); 6 – дыхательный трубопровод от горячей нитки до компенсатора давления (КД); 7 – КД (вода); 8 – КД (пар); 9 – дыхательный трубопровод от КД до горячей нитки; 10 – участок горячей нитки ГЦК от ГЗЗ до горячего коллектора; 11 – горячий коллектор ПГ; 12 – теплообменная поверхность парогенератора (ПГ); 13 – холодный коллектор ПГ; 14 – участок от холодного коллектора ПГ до ГЦН; 15 – участок холодной нитки ГЦК от ГЦН до ГЗЗ; 16 – участок холодной нитки ГЦК от ГЗЗ до входа в опускающей участок реактора

[The acoustic scheme of the NPP with WWER - 440:

1 - reactor descending section ; 2 - space under the active zone;

3 - active zone; 4 - the space above the active zone; 5 - section of the main circulation circuit (MCC) from the reactor to the main gate valve (MGV); 6 - the breathing pipe from the hot thread to the pressure compensator (PC); 7 - PC (water); 8 - PC (steam); 9 - breathing duct from PC to hot thread; 10 - hot line section of MCC from MG V to hot collector; 11 - hot collector of SG; 12 - heat exchange surface of the steam generator (SG); 13 - cold collector of SG; 14 - a section from the cold collector SG to MCP; 15 - cold thread section of MCC from MCP to MG V; 16 - section of the cold line of the MCC from the MG V to the inlet to the descending section of the reactor]

Например, сместить колебания в область более высоких частот можно уменьшив длину дыхательного трубопровода. При длине дыхательного трубопровода 3 м, пик на частоте 2,04 Гц сместится, и будет соответствовать частоте 2,29 Гц.

Таким образом, одним из эффективных способов продления срока службы АЭС является оптимизация компоновки оборудования, обеспечивающая предотвращение ВАР в оборудовании и внутрикорпусных устройствах.

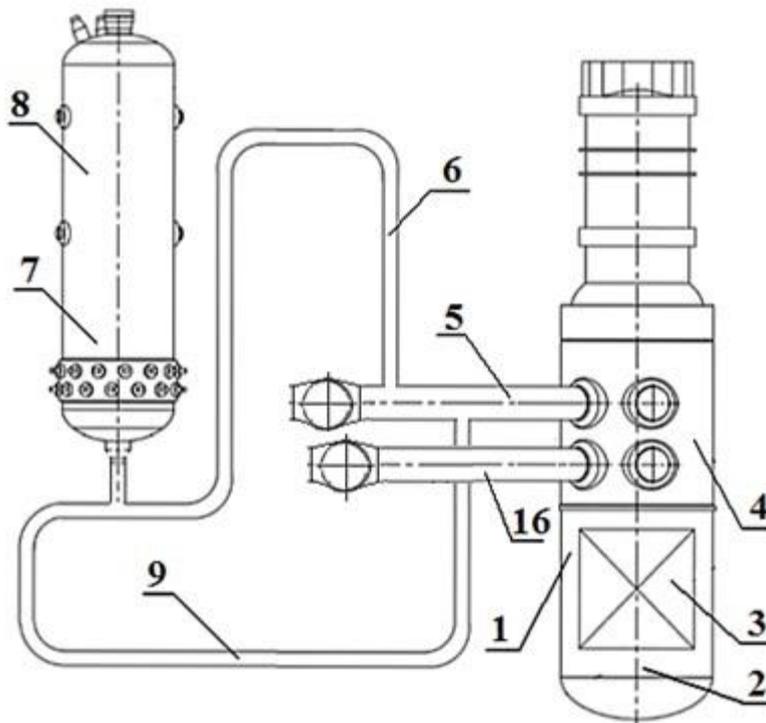


Рис. 2. – Акустический контур, образованный, КД и соединительными трубопроводами [Acoustic circuit, formed by PC and connecting pipelines]

Разработанная методика является универсальной, и применима для предотвращения ВАРв любых модификациях ВВЭР.

Значения геометрических характеристик участков акустической модели приняты в соответствии с проектом первого контура 3 блока НВАЭС. Скорость распространения акустических колебаний определялась в соответствии с [9].

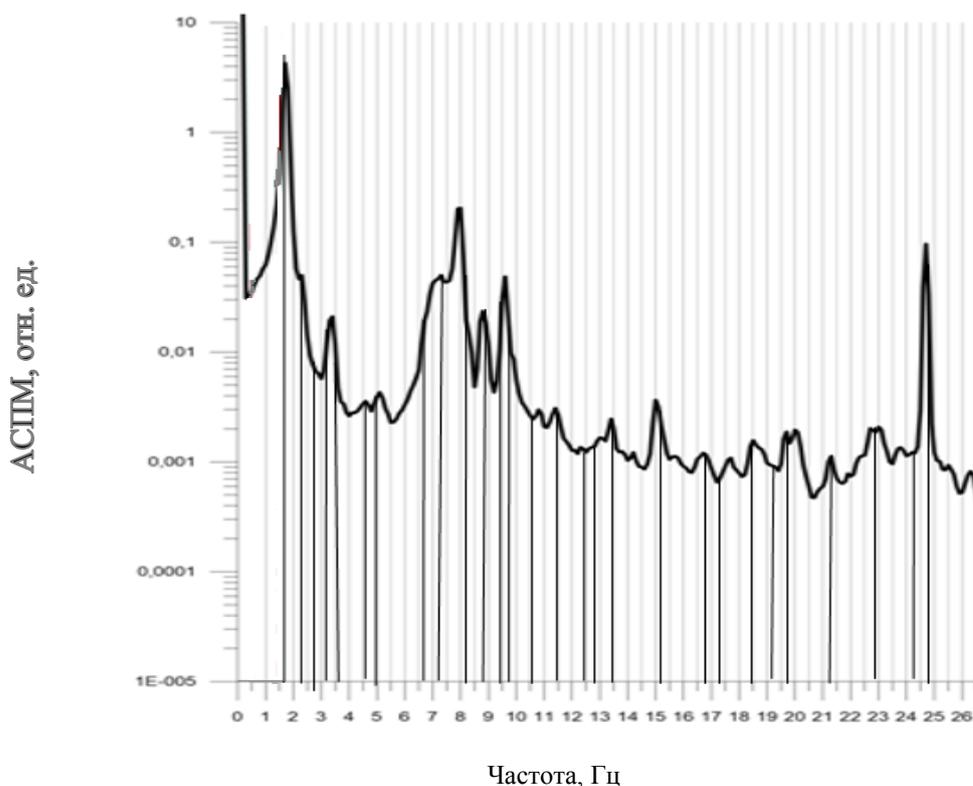


Рис. 3. – АСПМ ВВЭР-440 режим 1 [Autospectral power density of WWER-440 mode 1]

Таблица 2. – Результаты расчета частот АСВ в комбинационных контурах акустической схемы ВВЭР-440 [The calculation results of the acoustic standing waves frequencies in the combinational circuits of the WWER-440 acoustic circuit]

| Номера участков в составе комбинационных контуров | Частота АСВ, Гц | | |
|---|-----------------|---------|---------|
| | Режим 1 | Режим 2 | Режим 3 |
| 1 | 17,5 | 17,5 | 17,5 |
| 1+2 | 11,3 | 11,0 | 10,9 |
| 1+2+3 | 9,7 | 9,5 | 9,3 |
| 1+2+3+4 | 6,8 | 6,6 | 6,1 |
| 1+2+3+4+5 | 2,93 | 2,81 | 2,49 |
| 1+2+3+4+5+6+7 | 2,1 | 2,2 | 2,0 |
| 1+2+3+4+5+6+7+8 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| 1+2+3+4+5+10+11 | 2,1 | 2,1 | 1,8 |
| 1+3+4+5 | 3,2 | 3,3 | 2,8 |
| 4+5+10+11 | 2,7 | 2,8 | 2,3 |
| 16+1 | 7,2 | 6,9 | 6,9 |
| 16+1+2 | 4,7 | 4,6 | 4,5 |
| 16+1+2+3 | 4,3 | 4,2 | 4,1 |
| 16+1+2+3+4 | 3,73 | 3,58 | 3,14 |
| 16+1+2+3+4+5 | 2,41 | 2,31 | 2,04 |
| 16+1+2+3+4+5+ 10+11 | 1,8 | 1,9 | 1,6 |
| 2+3 | 22,9 | 22,9 | 22,9 |
| 10+11 | 19,5 | 19,6 | 19,4 |
| 11+12 | 11,9 | 11,8 | 11,6 |
| 13+14 | 16,8 | 16,9 | 16,9 |
| 6+7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 8 | 11,5 | 11,5 | 11,5 |
| 7+8 | 3,8 | 3,8 | 3,8 |
| 9+7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| 6+7+8 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 9+7+8 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 10+11 | 19,4 | 18,5 | 16,3 |
| 11+12+13 | 9,9 | 9,5 | 8,9 |
| 10+11+12+13+14 | 5,0 | 4,8 | 4,5 |
| 13+14 | 12,7 | 12,3 | 12,2 |
| 14 | 19,9 | 19,9 | 19,9 |
| 4+5 | 8,1 | 8,4 | 7,3 |
| 5+7+8+9 | 2,3 | 2,4 | 2 |
| 4+5+7+8+9 | 2,7 | 2,8 | 2,6 |
| 7+9+10+11 | 3,1 | 3,1 | 3,2 |
| 7+8+9+10+11 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| 7+8+9+10+11+12+13 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| ГЦН | 24,9 | 24,9 | 24,9 |

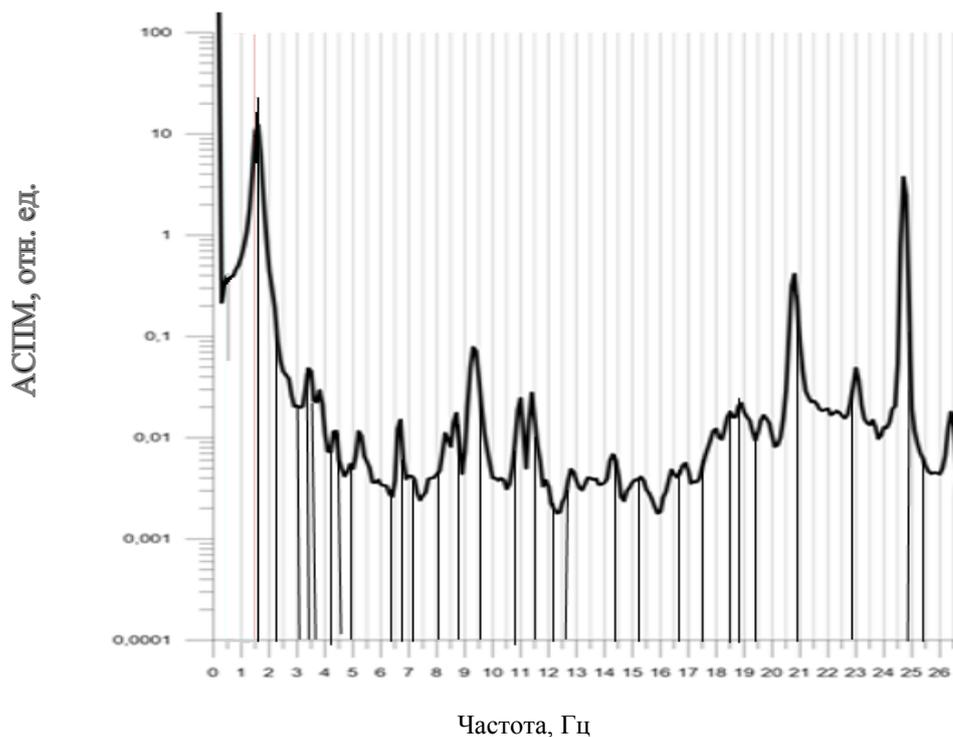


Рис. 4.– АСПМ ВВЭР-440 режим 2 [Autospectral power density of WWER-440 mode 2]

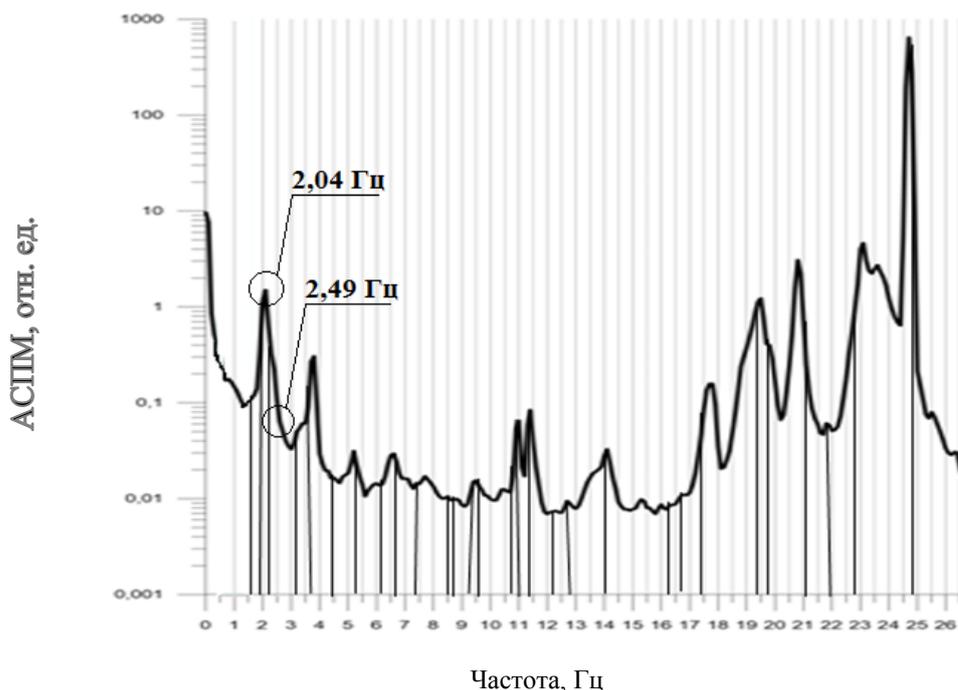


Рис. 5. – АСПМ ВВЭР-440 режим 3 [Autospectral power density of WWER-440 mode 3]

Из рисунков видно, что АСПМ имеет пилообразный характер, причем большинство из доминирующих пиков в публикациях, посвященных идентификации источников возбуждения АСВ, до настоящего времени не были интерпретированы [7,10]. Результаты расчета частоты АСВ для всех этапов сопоставлены с данными измерений вибраций основного оборудования первого контура приведенными в [10]. Результаты сопоставления

указывают на то, что в элементах оборудования АЭС в исследованных этапах пусковых режимов могут возникать ВАР.

Практически все заметные пики обусловлены колебательными процессами, например, 1+2, 1+2+3, 1+2+3+4, а так же 2+4, 1+4 и т.д.

ВЫВОДЫ

- Достоверность результатов расчета частот акустических стоячих волн, возникающих в отдельных элементах и в комбинациях акустических элементов 1-го контура блока №3 НВАЭС в пусковых и номинальном режимах, подтверждена данными измерений пульсаций давления.
- Идентифицированные доминантные пики в АСПМ соответствуют частотам акустических стоячих волн возникающих в отдельных акустических элементах или в акустических контурах, образованных несколькими последовательно соединенными элементами.
- В исследованных этапах пусковых режимов наблюдаются резонансные взаимодействия акустических стоячих волн с вибрациями оборудования 1-го контура.
- При оценке остаточного ресурса оборудования необходимо учитывать длительность резонансных взаимодействий конструкций и теплоносителя при выводе реактора на номинальный уровень мощности и количество пусков (остановов) за весь период эксплуатации энергоблока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проскуряков, К.Н.* Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Текст] / К.Н. Проскуряков. - М.: МЭИ, 1984. – 67 с.
2. *Капустин, С.А. и др.* Моделирование нелинейного деформирования и разрушения конструкций в условиях многофакторных воздействий на основе МКЭ [Текст] / С.А. Капустин, Ю.А. Чурилов, В.А. Горохов: монография. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2015. – 347 с.
3. *Капустин S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A.* Models and prediction algorithms of fracture of structural elements for low- and high-cycle loading based on FEM. *Materials Physics and Mechanics*, 2015, Vol. 23, pp. 79–82.
4. *Антипов, А.А. и др.* Экспериментально-теоретическое исследование усталости материалов и конструкций в условиях высокотемпературных многоцикловых нагружений [Текст] / А.А. Антипов, А.Н. Горохов, В.А. Горохов, Д.А. Казаков, С.А. Капустин // Проблемы прочности и пластичности. – 2014. – Вып. 76(1). – С. 26–38.
5. *Пархоменко, П.П. и др.* Основы технической диагностики [Текст] / П.П. Пархоменко, Е.С. Согомоян. – М.: Энергоиздат, 1981. – 460 с.
6. ГОСТ 2091189. Техническая диагностика. Термины и определения [Текст]. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 13 с.
7. *Proskuriakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V. and Volkov G.Y.* Identification of standing pressure waves sources in primary loops of NPP with WWER and PWR. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*. Vol. 4, 2016, ISSN 2412-5954, e-ISSN 2414-6935
8. *Слепов, М.Т.* Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС [Текст] / М.Т. Слепов. Авторефер. дисс. канд. техн. наук, Обнинск –1999.
9. *Жуковский, Н.Е.* О гидравлическом ударе в водопроводных трубах [Текст] / Н.Е. Жуковский. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. –108 с.
10. *Аркадов, Г.В. и др.* Виброшумовая диагностика ВВЭР [Текст] / Г.В. Аркадов, В.И. Павелко, А.И. Усанов. – М.: Энергоатомиздат, 2004. – 344 с.

REFERENCES

- [1] Proskurjakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Thermohydraulic Excitation of Coolant Fluctuations in In-House Devices of Nuclear Power Plants]. M. Pub. MEI [MEI], 1984, 67 p. (in Russian)

- [2] Kapustin S.A., Churilov Ju.A., Gorohov V.A. Modelirovanie nelinejnogo deformirovanija i razrushenija konstrukcij v uslovijah mnogofaktornyh vozdeystvij na osnove MKE [Modeling of Nonlinear Deformation and Destruction of Structures under Conditions of Multifactor Effects on the Basis of FEM]. Nizhnij Novgorod. Pub. Nizhegorodskij gosudarstvennyj niversitet im. N.I. Lobachevskogo [Nizhny Novgorod Lobachevsky State University], 2015, 347 p. (in Russian)
- [3] Kapustin S.A., Gorokhov V.A., Churilov Yu.A. Models and prediction algorithms of fracture of structural elements for low- and high-cycle loading based on FEM. *Materials Physics and Mechanics*, 2015, Vol. 23, pp. 79–82. (in English)
- [4] Antipov A.A., Gorohov A.N., Gorohov V.A., Kazakov D.A., Kapustin S.A. Eksperimentalno-teoreticheskoe issledovanie ustalosti materialov i konstrukcij v uslovijah vysokotemperaturnyh mnogociklovyh nagruzenij [Experimental and Theoretical Study of Fatigue of Materials and Structures under Conditions of High-Temperature Multi-Cycle Loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*, 2014, Issue 76(1), pp. 26–38. (in Russian)
- [5] Parhomenko P.P., Sogomonjan E.S. *Osnovy tehnicheckoj diagnostiki [Basics of Technical Diagnostics]*. M. Pub. Energoizdat [Energoizdat], 1981, 460 p. (in Russian)
- [6] GOST 2091189. Tehnicheckaja diagnostika. Terminy i opredelenija [Technical Diagnostics. Terms and Definitions]. M. Pub. Standartov [Publishing house of standards], 1990, 13 p. (in Russian)
- [7] Proskuriakov K.N., Fedorov A.I., Zaporozhets M.V. and Volkov G.Y. Identification of standing pressure waves sources in primary loops of NPP with WWER and PWR. *Mechanics, Materials Science & Engineering Journal*. Vol. 4, 2016, ISSN 2412-5954, e-ISSN 2414-6935 (in English)
- [8] Slepov M.T. Razrabotka metodov i interpretacija dannyh primenitelno k sistemam shumovoj diagnostiki reaktornyh ustanovok Novovoronezhskoj AES [Development of Methods and Interpretation of Data Applied to Noise Diagnostics Systems of Reactor Installations at Novovoronezh NPP]. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehnicheckih nauk [PhD Thesis in Engineering]. Obninsk, 1999. (in Russian)
- [9] Zhukovskij N.E. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnyh trubah [About Hydraulic Hit in Water Pipes]. M. Leningrad. Gosudarstvennoe izdatelstvo tehniko-teoreticheskoy literatury [State Publishing House of Technical and Theoretical Literature], 1949, 108 p. (in Russian)
- [10] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibroshumovaja diagnostika VVER [WWER Vibration Diagnosis]. M. Pub. Energoatomizdat [Energoizdat], 2004, 344 p. (in Russian)

Development the Methods of Standing Wave Frequency Calculation in Operating of NPP with WWER Reactor

K.N. Proskuryakov*, A.V. Anikeev, K.I. Belyaev, D.A. Pisareva

*National Research University «MPEI»,
Krasnokazarmennaya St., 14, Moscow, Russia, 111250
* e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru
ORCID: 0000-0002-1884-5576
WoS ResearcherID: I-3583-2017*

Abstract – The paper carries out a comparison of calculation results of acoustic standing waves frequencies with auto-spectral power densities of the sensor signals of pressure fluctuations for complex combinations of acoustic elements of the 1st contour of nuclear power plants with WWER-440. The calculation results of acoustic standing wave frequencies are found to be in satisfactory agreement with the measurement data.

A new approach to the formation of combinational acoustic circuits in the coolant system in WWER-440 is presented. The oscillating circuit of the coolant including the reactor and pressure compensator connected by pipelines is investigated for the first time. It is found that the frequency of acoustic standing waves in this circuit is close to 2 Hz in the investigated modes. The possibility of this frequency shift in the area of resonant interaction with FA when changing the system layout is shown.

Keywords: standing waves, vibration, vibration, acoustic resonance, acoustic standing waves.