

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

УДК 621.384.039

**ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СТОЯЧИХ ВОЛН
В ПЕРВОМ КОНТУРЕ АЭС С ВВЭР-440 В ПУСКОВЫХ РЕЖИМАХ**

© 2016 К.Н. Проскуряков*, А.И. Фёдоров**, М.В. Запорожец*, Г.Ю. Волков*

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

** *Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», Нововоронеж, Воронежская обл., Россия*

Разработана акустическая модель первого контура блока №3с ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС. По разработанной программе проведены измерения пульсаций давления теплоносителя в процессе поэтапного (18 этапов) вывода энергоблока из холодного состояния на номинальный уровень мощности. Разработаны методы расчета акустических характеристик теплоносителя в оборудовании первого контура и представлены результаты расчета акустических стоячих волн для 18 этапов пуска энергоблока. Проведено сопоставление результатов расчета частот акустических стоячих волн (АСВ) с автоспектральными плотностями мощности (АСПМ) сигналов от датчиков пульсаций давления. Получено удовлетворительное соответствие результатов расчета частот АСВ с данными измерений. Показано, что компенсатор давления представляет собой резонатор Гельмгольца, резонансная частота которого зависит от уровня теплоносителя в нем.

Ключевые слова: стоячие волны, вибрации, виброакустический резонанс, резонатор Гельмгольца.

Поступила в редакцию 1.06.2016 г.

Практика эксплуатации АЭС показывает, что потоки рабочей среды вызывают механические колебания и вибрации оборудования и его элементов. Эти процессы относятся к числу главных 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. 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 в частности, необходимо учитывать потерю несущей способности конструкционных материалов при воздействии высокоцикловых нагрузок, 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 на энергоблоках № 3, 4 Нововоронежской АЭС в 2015 году впервые проведены детальные измерения для 18 этапов пуска энергоблока, что существенно больше числа этапов, предусмотренного регламентом. Для каждого этапа проведены обработка сигналов от датчиков пульсаций давления (ДПД) и идентификация источников возникновения акустических стоячих волн в первом контуре АЭС с ВВЭР-440.

Разработанная акустическая схема первого контура, состоит из 16 участков, показанных на рисунке 1. На рисунке 2 показана акустическая схема реактора. Она включает в себя 4 участка. Каждый участок акустической схемы реактора выделен соответствующим цветом.

В таблице 1 приведены данные расчета, по методикам [1], частот АСВ в участках акустической схемы для 3 этапов пуска энергоблока. В графе таблицы 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.

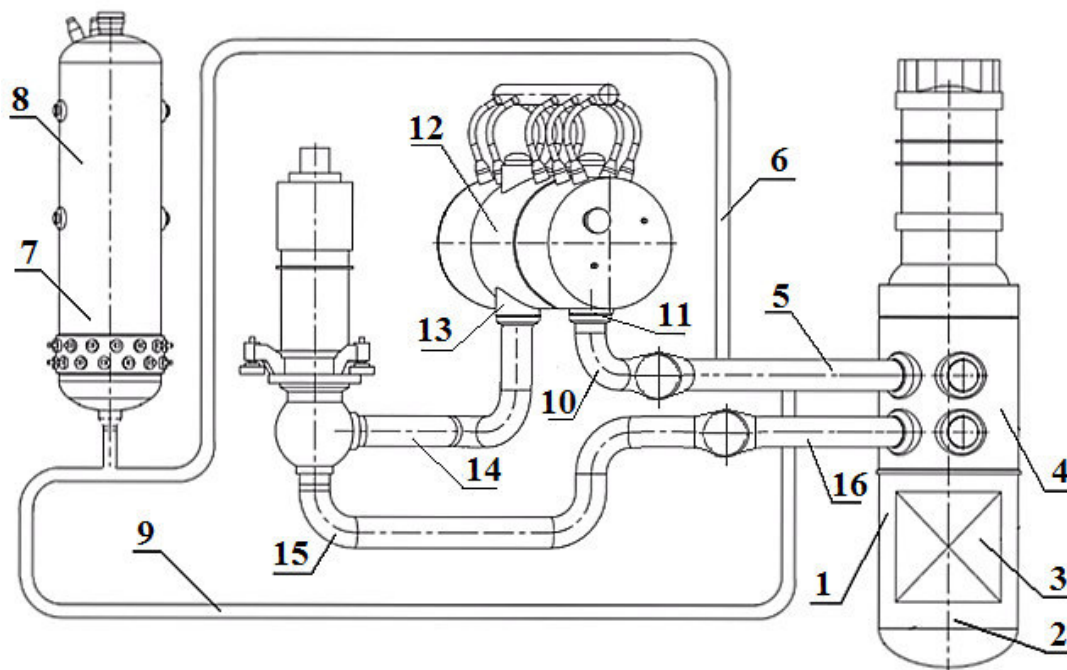


Рис. 1. – Акустическая схема АЭС с ВВЭР – 440:

- 1 – опускающий 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 опускающий участок реактора.

Значения геометрических характеристик участков акустической модели приняты в соответствии с проектом первого контура 3 блока НВАЭС. Скорость распространения акустических колебаний определялась в соответствии с [2].

Приближенная оценка погрешности расчета частот АСВ проведена по методике

[3], поскольку методы строгого анализа погрешности косвенных измерений отличаются значительной сложностью. Абсолютная погрешность определения частоты АСВ найдена по формуле:

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \Delta \rho\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \Delta c\right)^2}$$

- где ρ – плотность среды, кг/м³;
- c – скорость распространения акустических колебаний м/с;
- Δ – абсолютная погрешность определения соответствующего параметра.

Значения абсолютных погрешностей определения плотности и скорости звука теплоносителя связаны с погрешностью определения температуры и давления в контуре.

$$\Delta \rho = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \Delta P\right)^2}$$

$$\Delta c = \sqrt{\left(\frac{\partial c}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{\partial P} \Delta P\right)^2}$$

Значения максимальных абсолютных погрешностей определения частот АСВ (Δf) для трех рассматриваемых режимов на каждом участке акустической схемы сведены в таблицу 2.

Таблица 1. – Результаты расчета частот АСВ в участках акустической схемы первого контура

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

Таблица 2. – Абсолютная погрешность определения частоты АСВ

№ участка	1	2	3	4	5	6	7	8
Δf , Гц	0.25	1.30	1.34	0.60	0.34	0.14	0.58	0.63
№ участка	9	10	11	12	13	14	15	16
Δf , Гц	0.13	1.08	1.02	0.33	1.06	0.32	1.84	0.80

Частоты АСВ для отдельных участков ряда их комбинаций определены по методике [1] и представлены в таблице 3.

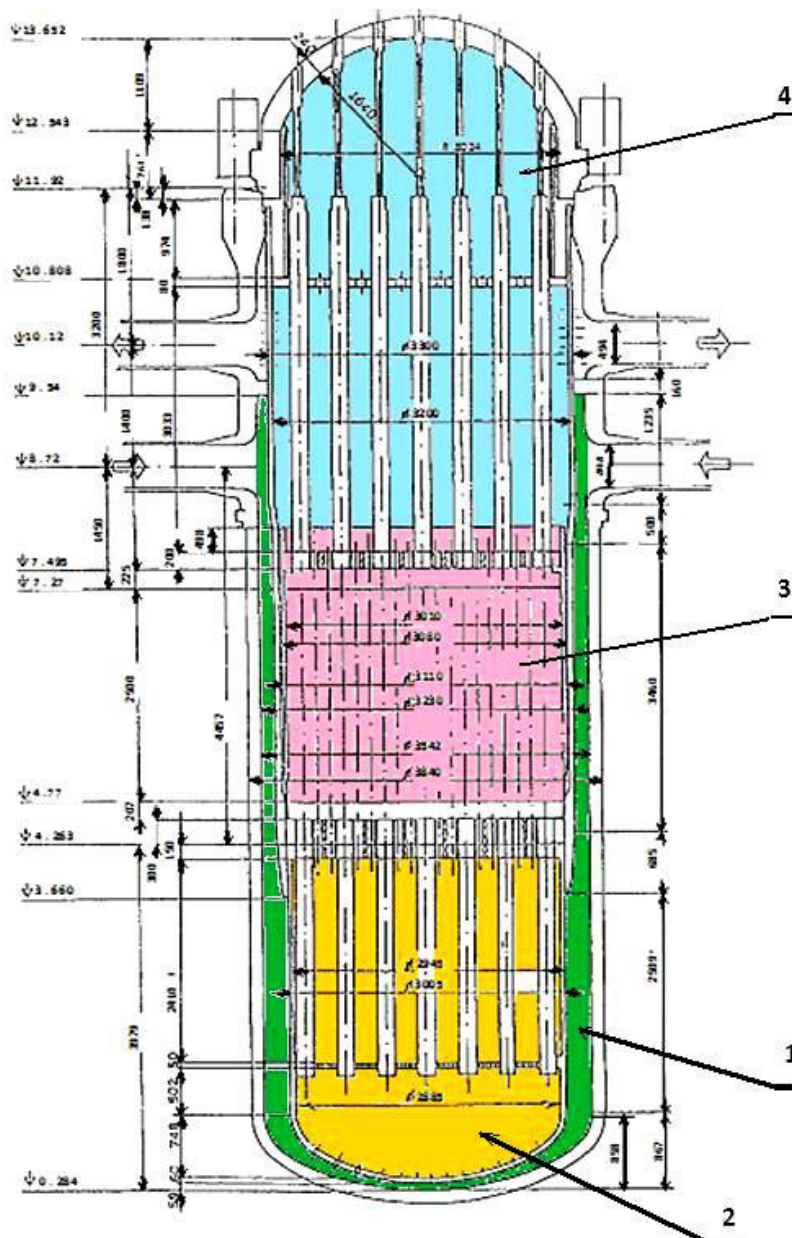


Рис. 2. – Акустическая схема ВВЭР-440:
 1 – опускной участок реактора; 2 – пространство под активной зоной;
 3 – активная зона; 4 – пространство над активной зоной.

Таблица 3. – Результаты расчета частот АСВ в комбинационных контурах акустической схемы ВВЭР-440

Номера участков в составе комбинационных контуров	Частота АСВ, Гц		
	Режим 1	Режим 2	Режим 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	3.2	3.1	2.8
16+1+2+3+4+5	2.0	2.0	1.9
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
10+11	19.4	18.5	16.3
13+14	12.7	12.3	12.2
11+12+13	9.9	9.5	8.9
10+11+12+13+14	5.0	4.8	4.5
7+8	3.8	3.8	3.8
6+7	0.8	0.8	0.8
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

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 [4]. Автоспектральная плотность мощности (АСПМ) сигналов от ДПД для режима 2 представлена на рисунке 3, на рисунке показаны рассчитанные значения частот АСВ с указанием соответствующих номеров участков акустической модели.

В таблице 4 приведены значения частот доминирующих пиков (в диапазоне от 0 до 30 Гц).

Как следует из таблицы 4, в рассмотренных трех режимах на соответствующих участках и комбинациях участков акустической схемы, значения частот измеренных и рассчитанных доминирующих пиков могут отличаться на величину Δf , которая находится в пределах значений абсолютных погрешностей расчета частот АСВ, приведенных в таблице 2.

Идентификация источников возникновения АСВ в первом контуре проведена во всех 18 этапах пуска энергоблока.

Результаты расчета частоты АСВ для всех этапов сопоставлены с данными измерений вибраций основного оборудования первого контура приведенными в [5].

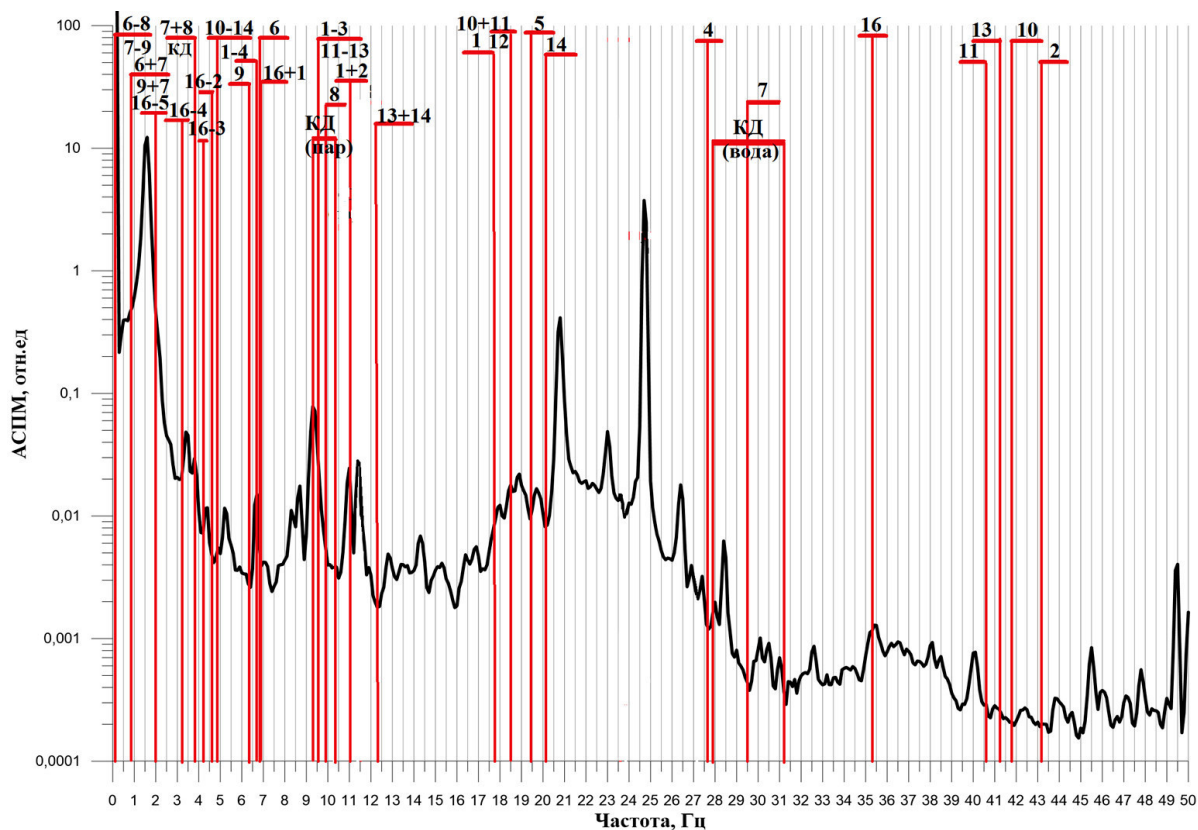


Рис. 3. – АСПМ ВВЭР-440 режим 2

Результаты сопоставления указывают на то, что в указанных ниже элементах оборудования АЭС в исследованных этапах пусковых режимов могут возникать резонансы АСВ с вибрациями оборудования:

- 1,5–3,0 Гц – частоты вибраций ТВС с одним закрепленным концом наблюдаются:*
- в комбинационном контуре (16+1+2+3+4) от ГЗЗ холодной нитки до выхода из активной зоны в диапазоне значений температуры 281–296 °С и давления 12.1–12.3 МПа на выходе из реактора;
 - в комбинационном контуре (16+1+2+3+4+5) от ГЗЗ холодной нитки до ГЗЗ горячей нитки в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 60–296 °С и 1.8–12.3 МПа;
 - в компенсаторе давления (7+8, где 8 – азотная подушка) в диапазоне значений температуры и давления соответственно 95–232 °С и 2.9–7.1 МПа;
 - в комбинационном контуре (6+7), включающем левый соединительный трубопровод системы компенсации давления и объем воды самого компенсатора в диапазоне значений температуры и давления в компенсаторе соответственно 74–179 °С и 1.8–7.0 МПа и соединительном трубопроводе 67–175 °С и 1.8–7.0 МПа;
 - в комбинационном контуре (9+7), включающем правый соединительный трубопровод системы компенсации давления и объем воды самого компенсатора в диапазоне значений температуры и давления в компенсаторе соответственно 74–140 °С и 1.8–4.8 МПа и соединительном трубопроводе 67–138 °С и 1.8–4.8 МПа.

Таблица 4. – Сопоставление рассчитанных значений с результатами измерений *

$N_{уч}$	Режим 1			Режим 2			Режим 3		
	$f_{расч}$	$f_{изм}$	Δf	$f_{расч}$	$f_{изм}$	Δf	$f_{расч}$	$f_{изм}$	Δf
1	18.3	18.5	-0.2	17.7	18.0	-0.3	17.5	17.8	-0.3
4	28.6	28.9	-0.3	27.6	27.4	0.2	24.5	24.7	-0.2
5	20.4	20.8	-0.4	19.5	19.7	-0.2	17.3	17.8	-0.5
6	7.1	7.0	0.1	6.8	6.7	0.1	6.3	6.6	-0.3
7	23.7	24.1	-0.1	23.6	23.6	0	23.9	23.8	0.1
8	11.5	11.7	-0.2	11.5	11.4	0.1	11.5	11.4	0.1
9	6.7	6.7	0	6.4	6.7	-0.3	5.9	5.2	0.7
12	19.3	19.2	0.1	18.5	18.5	0	17.5	17.8	-0.3
14	20.7	20.8	-0.1	20.1	19.7	0.4	20.0	19.5	0.5
16+1	7.2	7.0	0.2	6.9	6.7	0.2	6.9	6.6	0.3
16+1+2	4.7	5.3	-0.6	4.6	5.1	-0.5	4.5	4.8	-0.3
16+1+2+3	4.3	4.3	0.0	4.2	4.2	0.0	4.1	3.8	0.3
16+1+2+3+4	3.2	3.4	-0.2	3.1	3.2	-0.1	2.8	3.2	-0.4
16+1+2+3+4+5	2.0	2.3	-0.3	2.0	1.6	0.4	1.9	2.1	-0.2
1+2	11.3	10.9	0.4	11.0	11.0	0.0	10.9	11.0	-0.1
1+2+3	9.7	9.5	0.2	9.5	9.3	0.2	9.3	9.5	-0.2
1+2+3+4	6.8	6.7	0.1	6.6	6.7	-0.1	6.1	6.6	-0.5
10+11	19.4	19.2	0.2	18.5	18.5	0.0	16.3	15.9	0.4
13+14	12.7	12.4	0.3	12.3	11.9	0.4	12.2	11.4	0.8
11+12+13	9.9	9.5	0.4	9.5	9.3	0.2	8.9	8.8	0.1
10+11+12+13+14	5.0	5.3	-0.3	4.8	4.9	-0.1	4.5	4.8	-0.3
7+8	3.8	3.4	0.4	3.8	3.8	0.0	3.8	3.8	0.0
6+7	0.8	0.7	0.1	0.8	0.6	0.2	0.8	1.2	-0.4
9+7	0.8	0.7	0.1	0.8	0.6	0.2	0.8	1.2	-0.4
6+7+8	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	-0.0	0.1	0.1	0.0
9+7+8	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	-0.0	0.1	0.1	0.0

* В таблице 4 использованы следующие обозначения:





$f_{изм}$ – измеренная частота доминирующего пика, Гц;

$f_{расч}$ – расчётное значение частоты АСВ на участке $N_{уч}$, Гц;

Δf – отклонение расчётного значения $f_{расч}$ от измеренного $f_{изм}$ на участке $N_{уч}$, Гц;

$N_{уч}$ – Номер отдельного участка акустической схемы или номеров участков, образующих комбинационный контур.

Узор, подсветка или её отсутствие характеризуют выраженность доминирующего пика от незначительного до ярковыраженного, согласно следующей градации:

-  – незначительный пик;
-  – слабо выраженный пик;
-  – средневывраженный пик;
-  – ярковыраженный пик.

4,0–6,0 Гц – частоты вибраций ТВС с двумя закрепленными концами наблюдаются в:

- левом соединительном трубопроводе системы компенсации давления (участок 6) при температуре 310 °С и давлении 12.2 МПа;
- комбинационном контуре (16+1+2) от ГЗЗ холодной нитки до нижней части активной зоны в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 60–296 °С и 1.8–12.3 МПа;
- комбинационном контуре (16+1+2+3) от ГЗЗ холодной нитки до верха активной зоны в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 60–296 °С и 1.8–12.3 МПа;
- комбинационном контуре (10+11+12+13+14) от ГЗЗ горячей нитки до ГЦН в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 201–296 °С и 7.3–12.3 МПа.

8,0–12,0 Гц – 2-я мода колебаний ТВС с двумя закрепленными концами наблюдается в:

- левом соединительном трубопроводе системы компенсации давления (участок 6) в диапазоне значений температуры и давления соответственно 67–219 °С и 1.8–8.9 МПа;
- правом соединительном трубопроводе системы компенсации давления (участок 9) в диапазоне значений температуры и давления соответственно 67–219 °С и 1.8–8.9 МПа;
- азотном объеме КД (участок 8) в диапазоне значений температуры и давления соответственно 74–232 °С и 1.8–7.1 МПа;
- паровом объеме КД (участок 8) при температуре 326 °С и давлении 12.0 МПа;
- комбинационном контуре (16+1) от ГЗЗ холодной нитки до нижней части опускного участка реактора в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 60–201 °С и 1.8–7.3 МПа;
- комбинационном контуре (1+2) от начала опускного участка реактора до нижней части активной зоны в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 241–296 °С и 10.7–12.3 МПа;
- комбинационном контуре (1+2+3) от начала опускного участка реактора до верхней части активной зоны в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 136–296 °С и 4.8–12.3 МПа;
- комбинационном контуре (1+2+3+4) от начала опускного участка реактора до выхода из реактора в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 60–136 °С и 1.8–4.8 МПа;
- комбинационном контуре (11+12+13) от начала холодного коллектора ПГ до конца горячего коллектора в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 172–296 °С и 7.0–12.3 МПа.

6,6 Гц – частоты вынужденных колебаний корпуса, вызванные АСВ совпадают с частотами СЧКДТН в:

- левом подводящем трубопроводе (участок 6) при температуре 302 °С и давлении 12.2 МПа;
- правом подводящем трубопроводе (участок 9) при температуре 293 °С и давлении 12.2 МПа;
- комбинационном контуре (1+2+3+4) от начала опускного участка реактора до выхода из реактора при температуре и давлении на выходе из реактора соответственно 268 °С и 12.2 МПа.

11,5–13,5 Гц – частоты маятниковых колебаний совместно с корпусом наблюдаются в:

- азотном объеме компенсатора давления (участок 8) в диапазоне значений температуры и давления соответственно 232–301⁰С и 7.1–10.7 МПа;
- комбинационном контуре (1+2) от начала опускного участка реактора до нижней части активной зоны в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 172–241⁰С и 7.0–10.7 МПа;
- комбинационном контуре (1+2+3) от начала опускного участка реактора до верхней части активной зоны в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 60–136⁰С и 1.8–4.8 МПа;
- комбинационном контуре (13+14), включающем в себя холодный коллектор ПГ и участок ГЦК от коллектора до ГЦН в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 241–296⁰С и 10.7–12.3 МПа;
- комбинационном контуре (11+12+13) от начала холодного коллектора ПГ до конца горячего коллектора в диапазоне значений температуры и давления на выходе из реактора соответственно 60–172⁰С и 1.8–7.0 МПа.

16,0 – 17,0 Гц – частоты вертикальных колебаний корпуса совпадают с частотами АСВ:

- в комбинационном контуре (13+14), включающем в себя холодный коллектор ПГ и участок ГЦК от коллектора до ГЦН при температуре 61–136⁰С и давлении 1.77–4.6 МПа;
- в комбинационном контуре (10+11), включающем в себя горячий коллектор ПГ и участок ГЦК от коллектора до ГЗЗ при температуре 60–136⁰С и давлении 1.77–4.8 МПа.

14,2 Гц – частота колебания шахты реактора с двумя закрепленными концами наблюдается в комбинационном контуре, включающем в себя холодный коллектор ПГ и участок ГЦК от коллектора до ГЦН при температуре 201 – 219⁰С и давлении 7.1–8.7 МПа.

25 Гц – оборотная частота насоса может наблюдаться в:

- пространстве над активной зоной при давлении 12.2 МПа и температуре 287 – 296⁰С;
- участке от холодного коллектора ПГ до ГЦН при давлении 4.6–6.8 МПа и температуре 136–172⁰С.

50 Гц – удвоенная оборотная частота насоса совпадает с рассчитанными частотами АСВ в:

- горячем коллекторе ПГ при температуре 172–200⁰С и давлении 6.9–7.1 МПа;
- пространстве под активной зоной при температуре 173⁰С и давлении 7.1 МПа.

Расчеты частот АСВ возникающих в системе компенсации давления ВВЭР-440 проведены для различных значений уровня теплоносителя в КД и сведены в таблицу 5. Диапазон значений уровня теплоносителя соответствует диапазону, полученному в ходе измерений на 3 блоке НВАЭС в номинальном режиме работы блока. Теплофизические параметры воды и пара в КД: температура насыщения T_s , плотность пара ρ_p , плотность воды $\rho_{тн}$, скорость звука в паре c_p , скорость звука в воде $c_{тн}$ приведены в таблице 4. Их значения примерно одинаковы для всех трех рассматриваемых пусковых режимов, приведенных в таблице 1. Полученные диапазоны собственных частот, генерируемых в паровом объеме (10.4–11.4 Гц), водяном объеме (23.7–27.2 Гц) и в объеме компенсатора давления (~3.8 Гц) отображены на рисунке 3. Из рисунка видно, что частоты, рассчитанные при значении уровня ТН в

КД соответствующего рассчитываемым режимам (табл. 1 – участки 7, 8; табл. 4. – комбинация 7+8) попадают в указанные диапазоны частот. Как следует из таблицы 5 при незначительном изменении уровня, соответствующем регламенту пуска энергоблока имеет место пренебрежимо малое изменение частот. Однако, расчеты показывают, что при малых значениях уровня, выходящих за пределы, предусмотренные регламентом, происходит существенное изменение значений трех указанных в таблице 5 частот. Из чего следует, что компенсатор давления представляет собой резонатор Гельмгольца, генерирующий ряд акустических стоячих волн, частоты которых определяются собственными частотами колебаний как парового, так и водяного объемов теплоносителя, а также их совместными колебаниями и зависят от уровня воды.

Таблица 5. – Результаты расчета частот АСВ в компенсаторе давления ВВЭР-440 при $T_s = 326 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\rho_p = 72 \text{ кг/м}^3$, $c_p = 458 \text{ м/с}$, $\rho_{тн} = 651 \text{ кг/м}^3$, $c_{тн} = 753 \text{ м/с}$ и различных значениях уровня теплоносителя

Уровень воды в КД, м	Уровень пара в КД, м	Частота АСВ ТН, Гц	Частота АСВ пара, Гц	Суммарная частота, Гц
3,71	6,54	27.150	10.419	3.797
4,04	6,21	25.231	10.935	3.813
4,14	6,11	24.702	11.102	3.820
4,33	5,92	23.756	11.433	3.834

ВЫВОДЫ

- Результаты измерения частот АСВ на 3 блоке Нововоронежской АЭС подтверждают правомерность их расчета по разработанной методике.
- Определены режимы, в которых наблюдается резонанс вибраций основного оборудования первого контура блока 3 НВАЭС с частотами АСВ.
- При оценке остаточного ресурса необходимо учитывать длительность виброакустических резонансов при выводе реактора на номинальный уровень мощности и количество пусков (остановов) РУ за весь период эксплуатации энергоблока.
- Показано, что компенсатор давления может генерировать ряд акустических стоячих волн, частота которых определяется собственными частотами колебаний как парового, так и водяного объемов теплоносителя, а также их совместными колебаниями и представляет собой управляемый резонатор Гельмгольца.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проскуряков, К.Н.* Теплогидравлическое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Текст] / К.Н. Проскуряков. – М.: МЭИ, 1984. – 67 с.
2. *Жуковский, Н.Е.* О гидравлическом ударе в водопроводных трубах [Текст] / Н.Е. Жуковский. – М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. –108 с.
3. *Румицкий Л.З.* Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство. – М.: Изд-во «Наука», 1971. – 192 с.
4. *Слепов, М.Т.* Разработка методов и интерпретация данных применительно к системам шумовой диагностики реакторных установок Нововоронежской АЭС [Текст] / М.Т. Слепов : Автореферат дисс. канд. техн. наук, Обнинск, 1999.
5. *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] Proskuryakov K.N. Teplogidravlichesкое возбуждение колебаний теплоносителя во внутрикорпусных устройствах ЯЭУ [Heathydraulic excitation of oscillations of the heat carrier in intra case devices the nuclear power station]. М. Pub. MEI [MPEI], 1984. 67 p. (in Russian)
- [2] Zhukovskiy N.E. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh [Water hammer in water pipes]. М. Leningrad. Pub. Gosudarstvennoe izdatel'stvo tekhniko-teoreticheskoy literatury [State publishing house of technical and theoretical literature], 1949. 108 p. (in Russian)
- [3] Rumshiskiy L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta. Spravochnoe rukovodstvo [Mathematical processing of results of experiment]. М. Pub. «Nauka» [Science], 1971. 192 p. (in Russian)
- [4] Slepov M.T. Razrabotka metodov i interpretatsiya dannykh primenitelno k sistemam shumovoy diagnostiki reaktornykh ustanovok Novovoronezhskoy AES [Development of methods and interpretation of data in relation to systems of noise diagnostics of reactor installations of the New Voronezh NPP]. Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [PhD thesis abstract in Engineering]. Obninsk, 1999. (in Russian)
- [5] Arkadov G.V., Pavelko V.I., Usanov A.I. Vibroshumovaya diagnostika VVER [Vibronoise diagnostics of PWER]. М.: Pub. Energoatomizdat [Energoatomizdat], 2004, ISBN 5-283-00781-1344, p. (in Russian)

Identification of Acoustic Standing Waves in the First Circuit PWER-440 in Startup Mode

K.N. Proskuryakov* A.I. Fedorov **, M.V. Zaporozhets *, G.Y. Volkov *

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

*** Novovoronezh NPP the branch of JSC Rosenergoatom Concern, Novovoronezh, Russia 396072
e-mail: ProskuriakovKN@mpei.ru*

Abstract – BACKGROUND An acoustic model of the coolant in primary circuit of Novovoronezh NPP PWER-440 unit №3 is worked out. The special program of measuring the pressure fluctuations at reactor start up is carried out. The methods of calculating the acoustic characteristics of the coolant in the primary circuit equipment are developed. RESULTS The results of calculation of acoustic standing waves for 18 start-up stages are presented. A comparison of calculation results of acoustic standing waves (ASW) frequencies with auto power spectrum density (APSD) signals from the pressure pulsation sensors has been done. The satisfactory agreements of results ASW calculation frequencies with measured data are obtained. Pressure compensator shows itself as Helmholtz resonator which resonance frequency depends on the level of the coolant.

Keywords: standing waves, vibration, vibro-acoustic resonance, Helmholtz resonator.