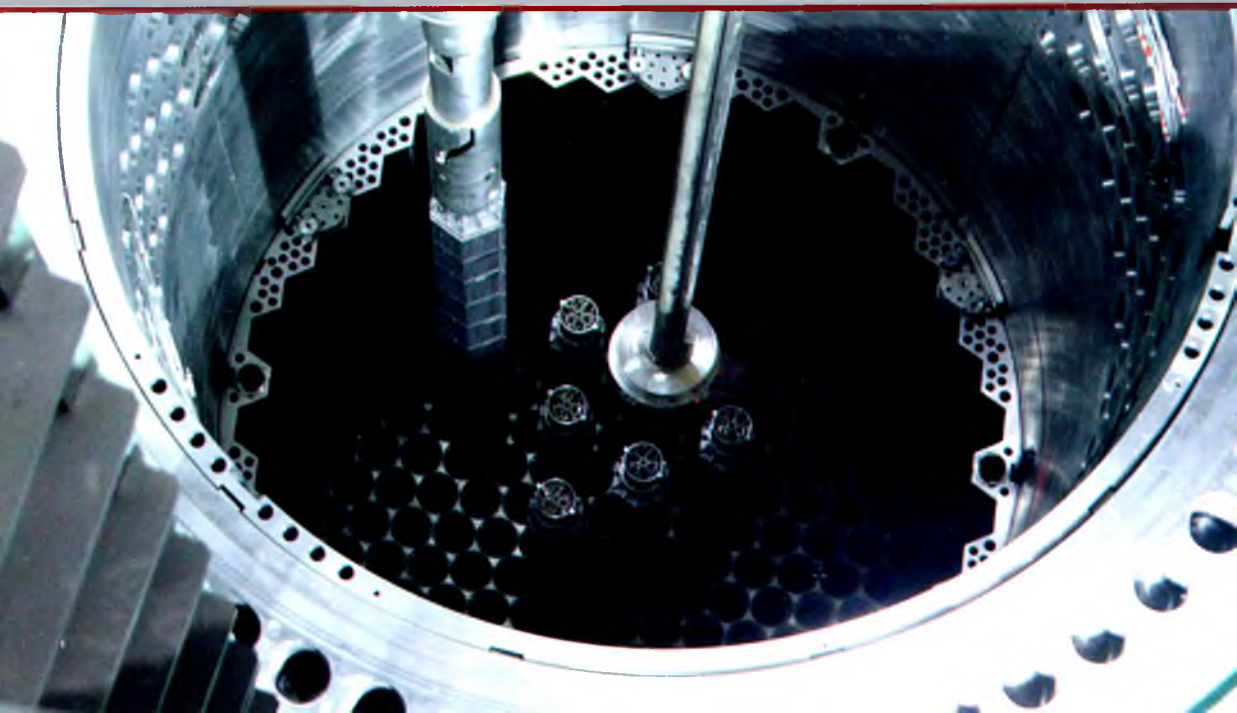




Г.В. Аркадов В.И. Павелко М.Т. Слепов

# **ВИБРОАКУСТИКА В ПРИЛОЖЕНИЯХ К РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКЕ ВВЭР-1200**



# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Мысли о диагностировании, возникшие при чтении монографии «Виброакустика в приложениях к реакторной установке ВВЭР-1200»</b> .....	4
<b>Вместо предисловия. Исторический экскурс и путеводитель по библиографии</b> .....	7
<b>Список сокращений</b> .....	17
<b>Глава 1</b>	
<b>Уравнения движения динамической системы</b>	
1.1. Динамические системы с одной степенью свободы .....	19
1.2. Простейшая аналитическая модель колебаний основного оборудования теплообменной петли ВВЭР .....	20
1.3. Точки приложения внешних вынуждающих вибрации сил .....	29
1.4. Численные оценки соотношения собственных частот колебаний ГЦНА и ПГ .....	32
1.5. О модальном анализе в простейшем случае колебаний связанных масс .....	36
<b>Глава 2</b>	
<b>Параметры элементарной динамической системы</b>	
2.1. Динамическая жесткость и передаточная функция ДС .....	39
2.2. Глобальные свойства динамической системы .....	42
2.2.1. Модуль и фаза передаточной функции .....	42
2.2.2. Детерминированная и случайная вынуждающая сила .....	51
2.2.3. Характеристическое уравнение ДС .....	53
2.3. Решения однородного уравнения динамической системы .....	58
2.3.1. Свободные колебания .....	58
2.4. Оценивание параметров уравнения движения из спектральных измерений .....	71
2.5. Практические аспекты измерений параметров передаточной функции ДС .....	74
2.5.1. Оценивание малых коэффициентов демпфирования .....	74
2.5.2. Оценивание произвольных коэффициентов демпфирования .....	78
2.6. Пульсации давления теплоносителя в качестве внешней вынуждающей вибрации силы .....	83

## Глава 3

### Вибрационные диагностические признаки

3.1. Динамическая система с одной степенью свободы как диагностическая модель .....	92
3.2. Вибрационные диагностические пространства .....	95
3.3. Интегральные параметры резонанса ДС с одной степенью свободы .....	100
3.4. Относительные диагностические вибрационные пороги .....	101
3.5. Соображения о конструировании диагностического признака в ЛСД .....	107
3.6. Параметры резонанса ДС как функция времени .....	109

## Глава 4

### Моделирование вибраций ГЦК

4.1. Математическая модель взаимодействия механической динамической системы и поля пульсаций давления ГЦК .....	113
4.2. Конечно-элементное моделирование .....	116
4.3. Неопределенности математического моделирования .....	118
4.3.1. Внешнее поле вынуждающих сил и трактовка классического понятия «собственная частота колебаний элемента конструкции» .....	118

## Глава 5

### Акустика ГЦК в сосредоточенных параметрах

5.1. Аналитические и эмпирические подходы, применяемые при описании акустики ГЦК .....	121
5.2. Акустическая масса, акустическая жесткость, акустическое демпфирование как аналоги параметров уравнения движения. Аналогии из механики и электротехники .....	123
5.3. Элементы ГЦК в сосредоточенных электротехнических аналогиях. Компенсатор давления как резонатор Гельмгольца .....	131
5.4. Формулы Френеля. Почти оптическая аналогия для точечных акустических неоднородностей .....	142

## Глава 6

### Волновое уравнение

6.1. Свойства волнового уравнения .....	147
6.2. Частные решения уравнения гармонического осциллятора .....	152
6.3. Типы комплексного гармонического решения волнового уравнения .....	154
6.4. Фундаментальные свойства комплексного гармонического представления волны .....	156

6.5. Связь уравнения Гельмгольца и Даламбера с обыкновенным дифференциальным уравнением движения Лагранжа. Стоячие волны в решении однородного волнового уравнения .....	160
6.6. Стоячая волна в решении однородного волнового уравнения с единственным начальным условием. Метод Даламбера .....	161
6.7. Энергетические свойства стоячей волны.....	165
6.8. Неоднородное волновое уравнение .....	166
6.8.1. Нулевые начальные условия .....	166
6.8.2. Общий случай.....	169
6.9. Стоячие волны в решении волнового уравнения с граничными условиями. Метод Фурье.....	172
6.10. Свойства решений волнового уравнения .....	179

## Глава 7

### Уравнения гидрогазодинамики

7.1. Стоячие волны в решении уравнений гидрогазодинамики .....	181
7.2. Акустическое сопротивление .....	183
7.3. Мощностные характеристики акустических волн.....	188

## Глава 8

### Длинные линии как аналог акустической среды

8.1. Стоячая волна в решении системы телеграфных уравнений .....	192
8.2. Длинные линии с потерями .....	199
8.3. Свойства комплексного сопротивления и коэффициента распространения длинной линии.....	204
8.4. Поглощение электрической энергии в длинной линии и акустической энергии в среде трубопровода .....	210
8.5. Способы уменьшения амплитуды стоячей волны .....	214
8.5.1. Согласование.....	214
8.5.2. Поглощение при отражении .....	215
8.5.3. Обтекание.....	215
8.6. Волновое уравнение с погонными параметрами.....	216
8.7. Комплексное сопротивление, эквивалентное длинной линии, совместно с точечным элементом .....	218
8.8. Четырехполюсник как электротехническая аналогия элемента акустического тракта .....	220

## Глава 9

### Длинные линии, нагруженные на комплексные сосредоточенные сопротивления

9.1. Неоднородности, порождающие «чистую» стоячую волну.....	226
--	-----

9.2. Неоднородности, вызывающие смешанное акустическое поле.....	231
9.3. Объемные акустические неоднородности и добротность резонансов АСВ.....	235
9.4. Ветвление.....	239
9.5. Совокупность длинных линий как эквивалентная схема петли циркуляции ВВЭР в электротехнических аналогиях.....	249

## Глава 10

### Упругая диссипативная среда. Затухание акустических волн

10.1. Волновое уравнение с комплексным собственным параметром.....	253
10.2. Дисперсионное соотношение – комплексная функция частоты.....	256
10.3. Собственные колебания упругой диссипативной среды.....	258
10.4. Вынужденные колебания диссипативных сред.....	265
10.5. Примеры вынуждающих сил.....	268
10.6. Резонансное возбуждение при совпадении гармоники оборотной частоты ГЦНА с частотой АСВ.....	270
10.7. Коэффициент затухания амплитуды волны. Формула Кирхгофа–Стокса.....	272
10.8. Вывод формулы Кирхгофа–Стокса.....	275
10.9. Демпфирование и вязкость.....	277
10.10. Описание вязкой среды уравнением диффузии.....	278
10.11. Вязкость как причина возникновения перепада давления в поперечном направлении.....	280
10.12. Возмущение давления ТН в ГЦК.....	281
10.13. Волны Стокса. Дисперсионные свойства теплоносителя в теплообменных трубах парогенератора.....	285
10.14. Акустический импеданс для трубопроводов малого диаметра.....	286
10.15. Параметры модуляции сигнала датчика пульсаций давления.....	289
10.16. Типичные ошибки применения аналитических моделей упругих сред.....	293

## Глава 11

### Глобальность-локальность АСВ

11.1. Петлевые АСВ и ее гармоники.....	299
11.2. Априорное качественное сравнение виброакустических свойств ВВЭР-1200 и ВВЭР-1000.....	304
11.3. Основные типы АСВ ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200.....	307
11.4. Экспериментальные петлевые компоненты пульсаций давления ТН в теплообменной петле ВВЭР.....	313
11.5. Глобальность низших типов АСВ.....	320

## Глава 12

### Феноменология АСВ

12.1. Идентификация резонансных спектральных особенностей сигналов вибродатчиков и ДПД при разогреве блока и выводе его на мощность...	329
12.2. Линейные аппроксимации температурных зависимостей параметров АСВ ВВЭР-1200 .....	333
12.3. Общие источники сигналов датчиков пульсаций давления и акселерометров.....	337
12.4. Вынужденные колебания корпуса РУ и ГЦНА на частотах АСВ .....	342
12.5. Изменение глобального поля первой петлевой АСВ при изменении числа функционирующих ГЦНА.....	349

## Глава 13

### Вибрации ГЦНА

13.1. Классы вибродиагностических признаков ГЦНА.....	354
13.2. Амплитуда и мощность вибраций .....	357
13.3. Пульсации давления ТН в ГЦК и вибрации ГЦНА в широком диапазоне частот.....	360
13.4. Траектории виброперемещений АЭД и вала ГЦНА.....	371
13.5. Вибрации функционирующего ГЦНА и вибрации отключенного ГЦНА под действием противотока теплоносителя. Единственный функционирующий ГЦНА как источник когерентных бегущих волн давления.....	373
13.6. Амплитудная модуляция колебаний отключенного ГЦНА .....	375
13.7. Обнаружение эффектов кавитации по сигналам ДПД .....	378

## Глава 14

### Экспериментальные результаты по виброакустике ВВЭР-1200

14.1. Виброакустические задачи в пусконаладочных измерениях.....	382
14.2. Диагностическая информация, получаемая из совместных измерений сигналов пусконаладочных систем и штатных систем диагностирования .....	384
14.3. Пример выявления первоисточника совместных колебаний .....	388
14.4. Виброакустические признаки при увеличении мощности РУ от МКУ до 100%. Частота резонанса АСВ как диагностический признак состояния ТН .....	391
14.5. Виброшумовые измерения на этапе освоения мощности блока 1 НВО АЭС-2.....	397
14.5.1. Колебания корпуса РУ .....	397
14.5.2. Контроль ОР СУЗ в режиме набора мощности РУ по виброшумовым каналам СВШД.....	402
14.5.3. Нейтронно-вибрационные измерения центральных частот АСВ .....	406

## Глава 15

### **Совместные колебания корпуса РУ и ШВК**

15.1. Конструктивные особенности узлов крепления корпуса РУ и ШВК.....	423
15.2. Колебания корпуса РУ и ШВК при разном числе функционирующих ГЦНА.....	426
15.3. Нейтронно-вибрационные измерения на мощности 100% блока 6 НВОАЭС.....	436
Литература .....	442