

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»
(НГТУ)**

**Образовательно-научный институт ядерной энергетики и технической физики
им. академика Ф.М. Митенкова**

Выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»



УТВЕРЖДАЮ:

Директор института
Хробостов А.Е.
«01» июня 2020 г.

**Методические рекомендации по дисциплине
«Методы научных исследований»
ОП ВО**

по направлению: 14.04.02 Ядерная физика и технологии

Направленность (программы): Ядерные реакторы и энергетические установки

Квалификация выпускника: магистр

Очная форма обучения

г. Нижний Новгород
2020 г

Теоретическое введение.

Главной проблемой современного мира является проблема энергетики. Ресурсов становится все меньше и меньше, и атомные станции и ядерная энергетика становятся основными источниками получения энергии, поэтому обеспечение безопасности ядерных энергетических установок требует развития методов строгого контроля за состоянием теплоносителя. Среди многочисленных методов большое внимание уделяют акустическим методам, (их используют в экстремальных условиях ядерного реактора) .

Двухфазный поток теплоносителя – это поток, состоящий из перемещающейся смеси жидкости и газа. Более глубокое изучение двухфазного потока (это получение экспериментально информации о соотношении фаз, степени их дисперсности, и т.д), которое позволит определить допустимые режимы установки, является главной целью. Так, например, обнаружение паровой фазы в кипении теплоносителя дает понять об аварийной ситуации.

Методов изучения двухфазных потоков очень много, но некоторые методы подходят только для лабораторных установок. Существенный прогресс в решении задач определения паросодержания развитых двухфазных потоков по их акустической проводимости обеспечили акустозондовые методы, основанные на пропускании ультразвука через локальный объем контролируемой среды. Также не меньший интерес составляют акустоимпедансные методы измерения паросодержания, которые основаны на определении паросодержания в волноводе, погруженном в контролируемый двухфазный поток.

Физический смысл этого метода исследования двухфазных сред состоит в возбуждении резонансных колебаний сферических пузырьков жидкости под действием гармонически изменяющегося давления, в результате возникают вынужденные колебания пузырьков, которые ведут к затуханию звука. По измерению ослабления звуковых колебаний можно определить размеры пузырьков и их концентрацию, т.к затухание звуковых волн тем больше, чем больше концентрация пузырьков в жидкости и частоты колебаний.

Также акустические методы делятся на активные (посылка сигнала в область измерения) и пассивные (анализ собственного акустического излучения теплоносителя).

Рассмотрим подробнее изучении двухфазных потоков «достигли» методом акустического зондирования, который основан на прохождении ультра звука через объект исследования. (Рис.1)

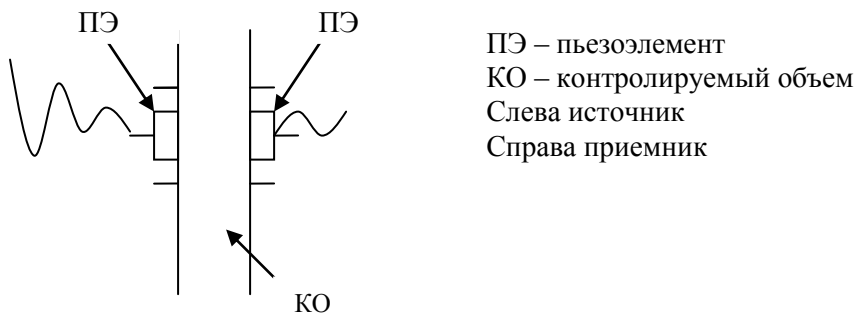


Рис.1 Принцип акустического зондирования

Необходимое условие для использования зонда - малые контролируемые объемы по сравнению с объемом фаз в потоке. Если в КО находится вода, то, т.к $\rho_{сж} \gg \rho_{сг}$, то УЗ колебания доходят до принимающего пьезоэлемента и вызывают сигнал достаточно большой амплитуды. Если газ – сигнал на уровне шума, т.к скачкообразно уменьшается акустическая проводимость контролируемого объема. Соответственно по амплитуде выделенного сигнала можно узнать какая среда находится в КО. Локальное истинное газосодержание можно определить как отношение полного времени нахождения газовых пузырей в контролируемом объеме ко времени измерений T:

$$\alpha = (\sum \tau_i) / T$$

где τ_i — время нахождения i -го пузырька в контролируемом объеме.

В процессе проведения эксперимента сигналы с выхода зонда вводятся в персональный компьютер при помощи программы и сигналы с выхода приемного пьезоэлемента, усиленные в схеме предварительной подготовки сигналов. Период зондирования и количество циклов снятия данных устанавливается предварительно в настройках программы. Синхронизация начала записи производилась в момент подачи импульса возбуждения на зонд.

Акустическая проводимость среды в контролируемом объеме определялась программно по величине максимальной амплитуды принимаемого сигнала, прошедшего через контролируемый объем. При этом, когда в контролируемом объеме зонда находится жидкость, амплитуда принятых сигналов максимальна, если газ - минимальна. Вид сигнала на выходе зонда и амплитудное распределение показаны на рис. 2.

(УЖ – уровень амплитуды жидкости, УГ- уровень амплитуды газа).

При возникновении пузырьков амплитуда сигнала начинает меняться в диапазоне от максимальной (жидкая фаза) до минимальной (газовая фаза). Это обусловлено попаданием движущихся газовых образований в контролируемый объем зонда, прерывающим прохождение ультразвуковых импульсов от излучающего волновода к приемному.

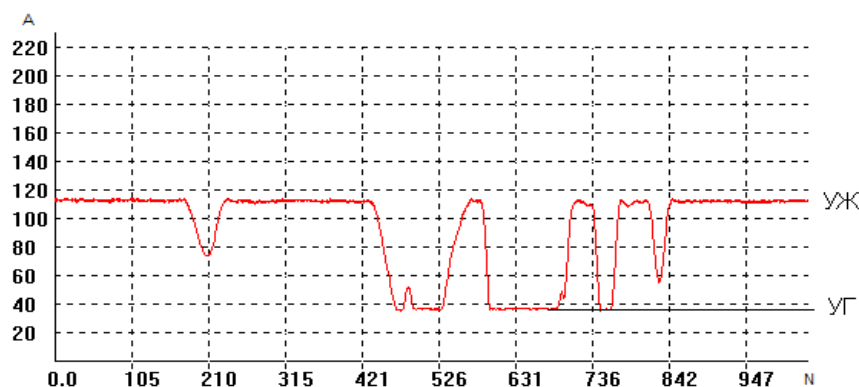


Рис.2 Вид сигнала и амплитудное распределение

Концентрация жидкой фазы при этом определяется как доля времени, когда амплитуда принятого сигнала находится выше заданного уровня дискриминации. При этом численное значение уровня дискриминаций равно среднему значению между уровнем жидкости и газа.

Принцип действия установки:

К контролируемому объему, наполненному водой, подключается компрессор, тем самым образуя в контролируемом объеме газовую фазу. На пути движения пузырьков установлены ультразвуковые датчики, задача которых заключается в получении амплитуды колебания ультразвука проходящего через среду. Далее эти данные при помощи АЦП (Аналого-цифрового преобразователя) переводятся в цифровой код соответствующий величине аналогового сигнала и посылаются в компьютер при помощи интерфейса Centronics (LPT порт). После этого данные обрабатываются программой.

(см. Приложение - Руководство к программе bubble v 1.0)

Применение метода:

Метод акустического зондирования может быть использован для разработки систем контроля уровня кипящего теплоносителя в оборудовании ЯЭУ в том числе в парогенераторах, компенсаторах объема, кипящих реакторах, моноблоках.

Схема установки приведена на Рис.3

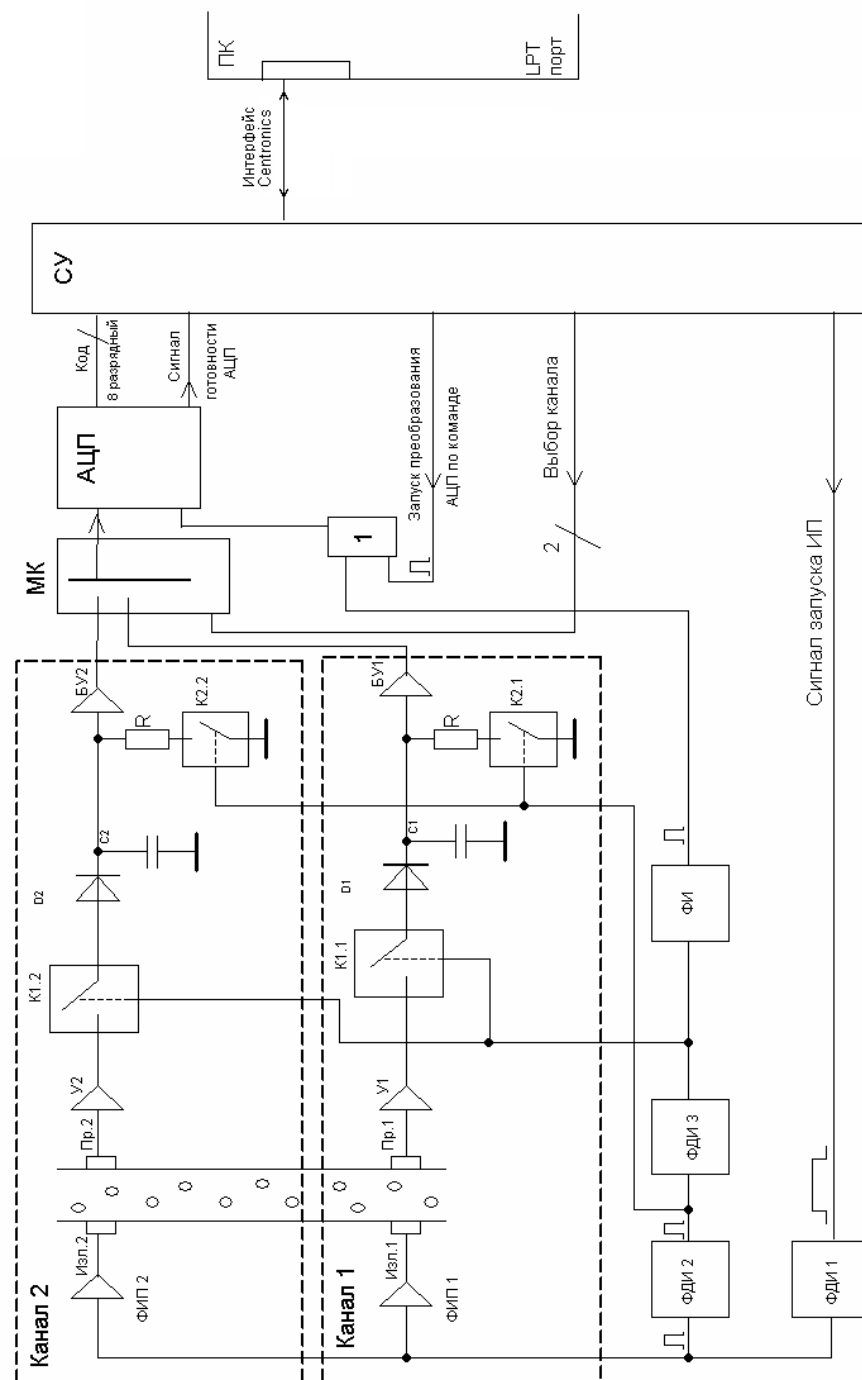


Рис.3 Схема установки

ФИП – формирователь импульсов послылки

МК – мультиплексор каналов

СУ – сх. управления

ФДИ1 – формирователь длительности импульса 1 посылки

ФДИ2 - формирователь длительности импульса 2посылки (Ожидание принятого сигнала)

ФДИЗ - формирователь длительности импульса 3 посылки

(строб импульса)

ФИ - формирователь импульса запуска АЦП

1 – сх. Или

БУ – буферные усилители

Тацп – время преобразования АЦП.

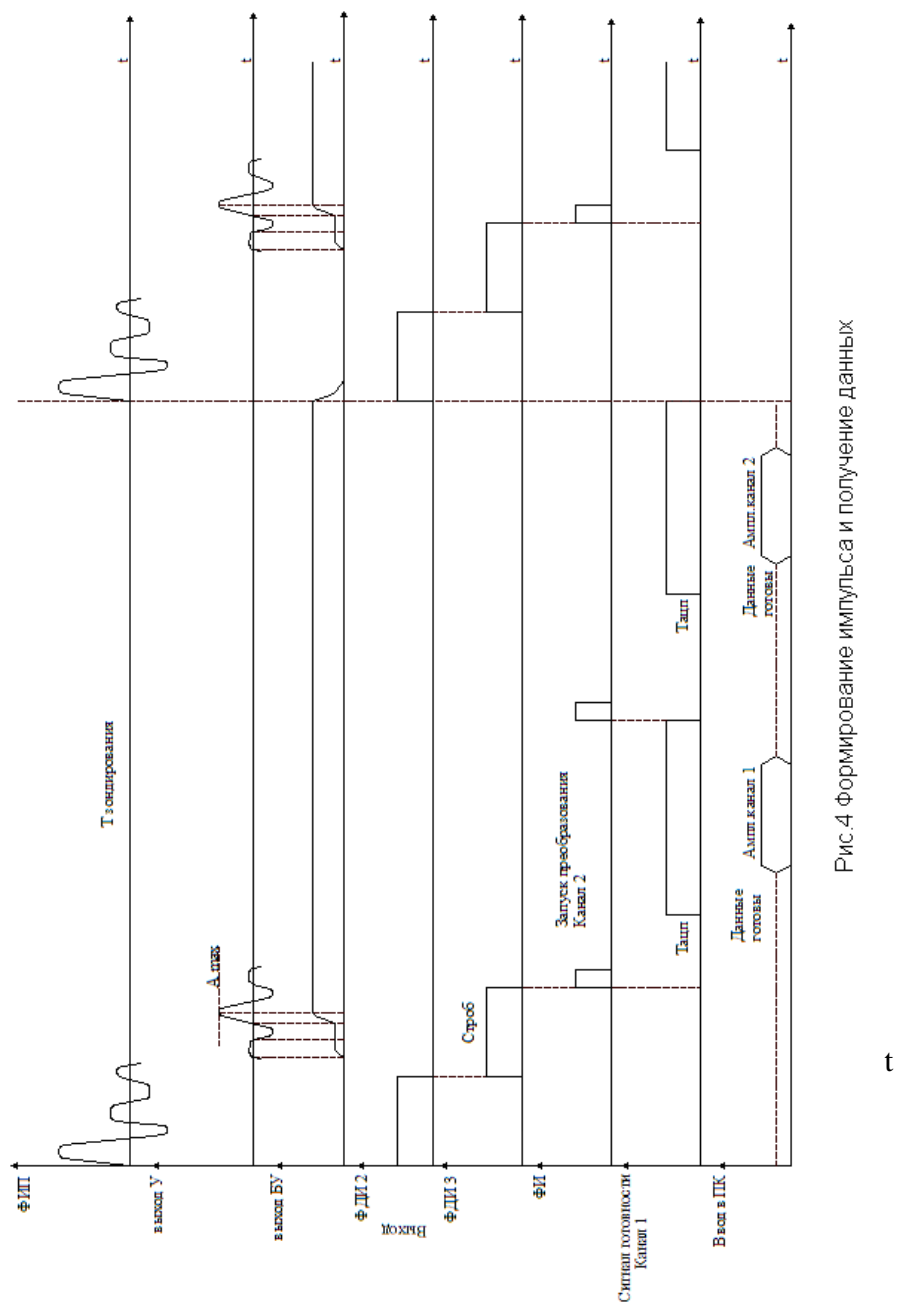


Рис.4 формирование импульса и получение данных

$\text{Log Apr} = 0 \div 255$

$U_{\text{ацп}} = 0\text{В} \div 5\text{В}$

В установке имеется два идентичных канала.

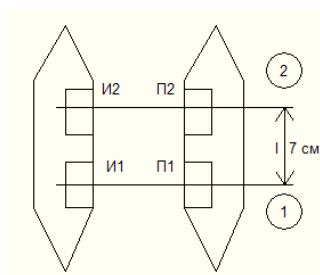


Рис.5

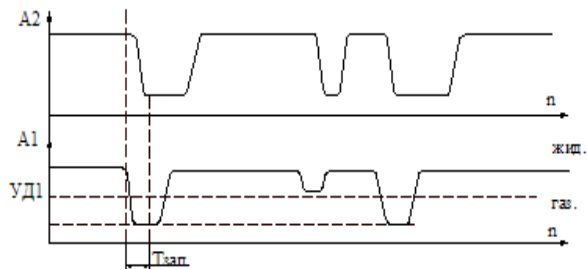


Рис.6

Рис.5 Расположение каналов в установке

Рис.6 Запаздывание сигналов

$$t_{\text{зап}} = n * T_{\text{зонд.}} \quad [1]$$

$$V = \frac{1}{t_{\text{зап}}} \sim \text{скорость пузырька.} \quad [2]$$

Цель : Определение оптимальной длины реализации при измерении газосодержания методом акустического зондирования.

Задание:

1. Вывести реализацию данных из файла.
2. Построить амплитудное распределение сигналов $N(A)$ (Число выпадения амплитуды A)

По амплитудному распределению определяем преобладающее значение амплитуды для газа и жидкости. На основе этих значений находим уровень дискриминации по формуле [3]:

$$UD = \frac{U_{\text{ж}} - U_{\text{г}}}{2} + U_{\text{г}} \quad [3]$$

Амплитуда жидкости выше чем газа следовательно максимум при большей амплитуде и есть преобладающая амплитуда жидкости. (для газа соответственно при меньшей амплитуде).

Амплитуда распределения строится отдельно для каждого канала. Используя полученный уровень дискриминации считаем газосодержание по формуле [4].

$$\varphi = \frac{\sum N(A < UD)}{N} \cdot 100\% \quad [4]$$

В числителе число измерений для которых амплитуда меньше UD . Аналогичные значения можно получить так же и для остальных каналов. N в знаменателе – полное число измерений.

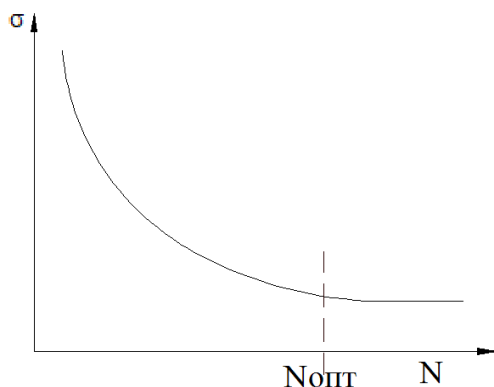
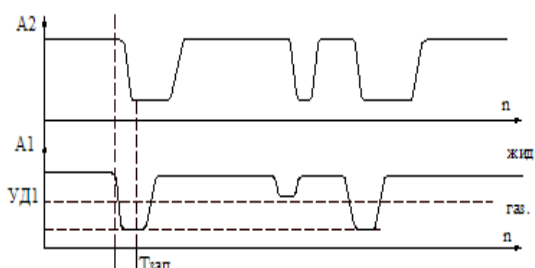


Рис.7 Зависимость среднеквадратичного отклонения от числа измерений

Данные снимаются несколько раз с количеством измерений $N=1000, 1500, 2000, \dots$

С шагом $\Delta N = 500$

Для каждой реализации считаем газосодержание. И после этого строим график зависимости $\sigma(N)$ (Рис.7). По графику определяем оптимальное число циклов. Оптимальным числом циклов является та точка графика после которой устанавливается линейный режим.



Цель : Определение скорости свободного всплытия пузырька методом взаимокорреляции.

Для определения величины запаздывания первого графика от второго строится функция корреляции.

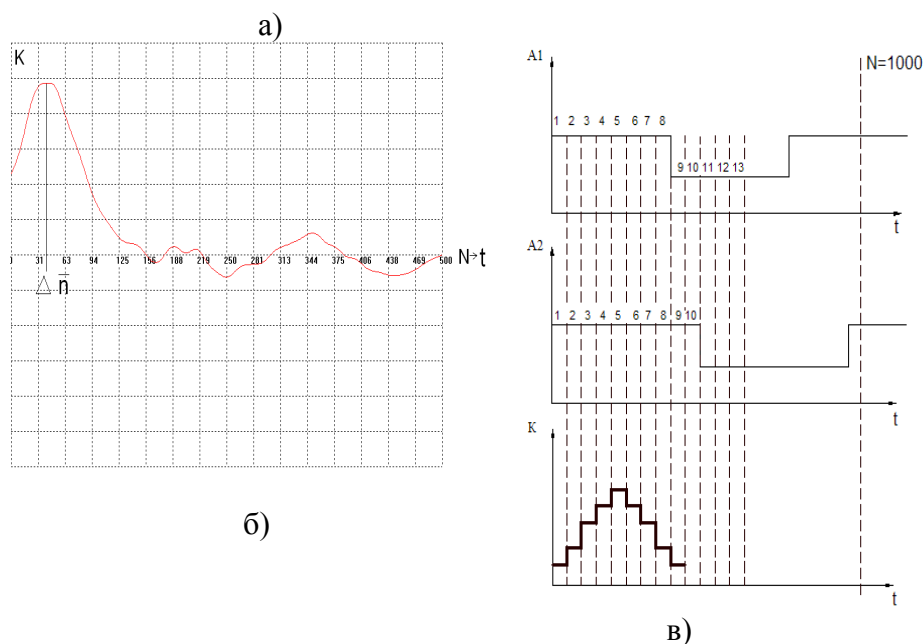


Рис.8 а)Запаздывание первого сигнала от второго
б)График взаимокорреляции.
в) Принцип взаимокорреляции

Значение под максимумом функции корреляции показывает на сколько первый сигнал отстает от второго.

$$l = 7 \text{ мм}$$

$$\Delta n - > \Delta t = \Delta n * T_{зонд}$$

$$V = \frac{l}{\Delta t} \quad [5]$$

Задание:

- 1) Вывести 1000 значений $A1(n), A2(n)$.
- 2) Построить функцию взаимокорреляции.
- 3) Определить Δt и подсчитать V .

Расчеты функции взаимокорреляции провести для всех измерений. Данные занести в таблицу.

Таблица 1.

N	Δn	Δt	V
1			
2			
.....			
50			

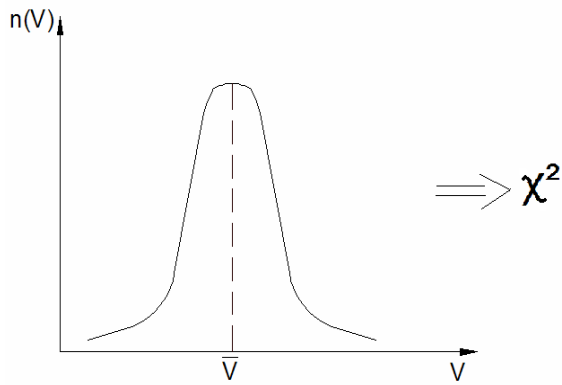


Рис.9 Распределение по скоростям

Построить распределение (Посчитать величину нормального распределения)

Расчет функции взаимокорреляции это умножение со сдвигом.

Порядок расчета:

- 1) Вычисляем среднее значения для обоих портов (массивов). $A1$ – амплитуда отстающего сигнала.

$A2$ – амплитуда опережающего сигнала.

$$\overline{A1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A1_i \quad \overline{A2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A2_i \quad [6]$$

- 2) Считаем функцию корреляции по формуле

$$K_i = \sum_{j=1}^{N/2} (A1_j - \overline{A1})(A2_{j+i} - \overline{A2}) \quad [7]$$

- 3) Изменяем шаг на 1 единицу и считаем новую функцию корреляции.

Для постоянной точности число шагов нужно брать равное половине числа измерений. Так же можно варьировать число шагов. Так как в большинстве случаев достаточно и 500-1000 шагов для нахождения максимум функции корреляции.

Вычисление реализуется при помощи двух циклов.

```
for(i=0; i<N/2; i++)
{
    for(j=0; j<N/2; j++)
    {
         $K_i = K_i + (A1_j - \overline{A1})(A2_{j+i} - \overline{A2})$ 
    }
}
```

Цель : Определение распределения пузырьков по диаметрам

Задание:

- 1) Для каждого распределения определить количество пузырьков и Δn . (Рис.10)

$$\Delta n = n_2 - n_1 \quad (n = n(A < \text{УД}))$$

- 2) По формуле [8] посчитать диаметр каждого пузырька.

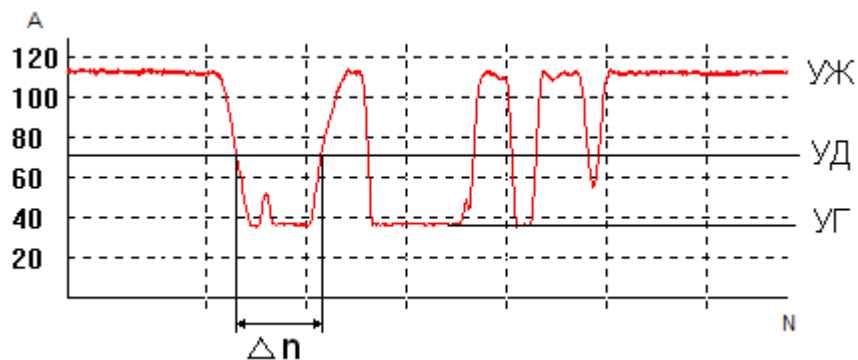


Рис.10 Определение Δn

$$D = \Delta n \cdot T_{\text{зонд}} \cdot \bar{V} \quad [8]$$

Этот расчет повторить для всех реализаций. На основе этих данных построить распределение пузырьков по диаметрам.

Считаем $\bar{D}, D, \sigma, \chi^2$

Для построения амплитудного распределения, A_i используют в качестве адреса в массиве $N(A)$.

Приложение.

На Рис.П1 представлена панель управления программы Bubble v1.0

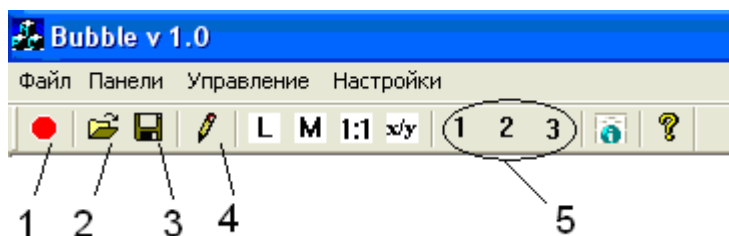


Рис .П1

1. “Измерение” – выход в режим снятия данных
2. “Открыть” – открытие файла измерений
3. “Сохранение” – выход в режим сохранения
4. “Просмотр” – отображение данных
5. “Лабораторные” – режим обработки данных

Проведение лабораторной работы.

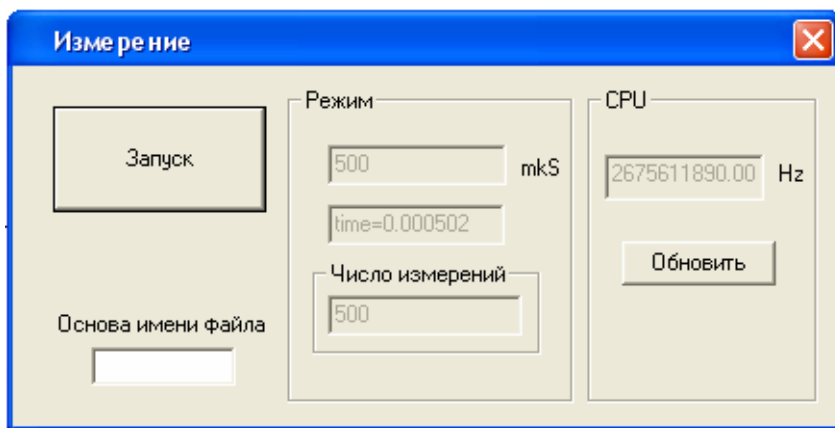


Рис. П2 Режим снятия данных

1. Проверьте начальные данные измерений.
2. Уточните частоту процессора вашего компьютера у лаборанта, она должна совпадать с той, которую выдает программа.
3. Если включен режим автосохранения, то введите основу имени файлов реализации.
4. Нажмите “Запуск”
5. Время, которое выдаст программа, не должно намного отличаться от того, которое задано. Если разница более 30 мкс, то следует заново провести измерения.

После снятия данных вы можете выйти в режим обработки данных и посмотреть результат по всем трем лабораторным работам.

Список используемой литературы:

1. Иванов В.В. Курс лекций
2. Мельников И.В. Указания к лабораторным работам
3. В.И. Мельников, В.Н. Хохлов, В.В. Иванов, А.В. Дунцев.;
 “Исследование акустической проводимости водяного
 теплоносителя высоких параметров при его вскипании”,
 ”Ядерная энергетика” №1 2006 год. стр.70

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»
(НГТУ)

Образовательно-научный институт ядерной энергетики и технической физики им.
академика Ф.М. Митенкова

Выпускающая кафедра «Ядерные реакторы и энергетические установки»



УТВЕРЖДАЮ:

Директор института
Хробостов А.Е.
«08» сентября 2018 г.

Методические рекомендации (указания)
по организации самостоятельной работы
по дисциплине «Методы научных исследований»

Направление: 14.04.02 Ядерная физика и технологии
Направленность (программа): Ядерные реакторы и энергетические установки

Квалификация выпускника: Магистр
Очная форма обучения

г. Нижний Новгород
2018 г.

УДК 621.039

ББК 31.46

М 47

Рецензент

заместитель начальника отдела электрооборудования, систем
контроля и управления АО «ОКБМ Африкантов» *И.Н.Киселев*

Мельников В.И., Иванов В.В., Тарасова Н.П.

**М 47 Лабораторный практикум по системам управления ЯЭУ и ме-
тодам научных исследований:** учеб. пособие / В.И. Мельников,
В.В.Иванов, Н.П.Тарасова; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева.
Нижний Новгород, 2018. – 160 с.

ISBN 978-5-502-00675-0

Рассмотрены акустические методы контроля и диагностики основных параметров ядерных энергетических установок, в частности, методы и техника определения температуры во внутренних частях активной зоны реактора, скорости движения потока теплоносителя, уровня и паросодержания. Приведены методы диагностики и визуализации двухфазного теплоносителя при проведении теплофизических исследований при отработке элементов оборудования ЯЭУ.

Включены материалы лабораторного практикума по системам управления ЯЭУ, касающиеся основ общей теории управления, динамики реакторных систем, методов калибровки средств управления ЯЭУ и теплофизических параметров АЭС.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям: 141401 «Ядерные реакторы и материалы», 14.05.01 «Ядерные реакторы и материалы» и для магистрантов по направлению 14.04.02 «Ядерные физика и технологии».

Рис. 88. Табл. 2. Библиогр.: 66 назв.

УДК 621.039

ББК 31.4

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1. Обзор акустических методов диагностики и контроля теплоносителя ЯЭУ.....	7
1.1. Акустические методы диагностики и контроля теплоносителя в ядерной энергетике.....	7
1.2. Обзор методов измерения основных параметров теплоносителя.....	9
1.2.1. Акустические методы определения температуры.....	9
1.2.2. Методы измерения расхода и скорости теплоносителя при помощи ультразвука.....	13
1.2.3. Акустические методы измерения уровня теплоносителя.....	19
1.2.4 Акустические методы определения давления теплоносителя.....	25
1.2.5. Измерение паросодержания ультразвуковыми методами.....	28
1.3. Обзор акустических методов диагностики теплоносителя в элементах ЯЭУ и теплофизических экспериментах.....	32
1.3.1. Активные и пассивные методы диагностики теплоносителя в энергетических реакторах.....	32
1.3.2. Ультразвуковые методы, применяемые в теплофизических экспериментах ядерной энергетики...	39
1.3.3. Визуализация структуры двухфазного потока использованием ультразвука.....	42
1.4. Вопросы совершенствования средств диагностики теплоносителя. Перспективные направления развития.....	46

2. Физические основы и элементы конструкций волноводных акустических датчиков.....	48
2.1. Особенности акустических датчиков для диагностики теплоносителя ЯЭУ.....	48
2.2. Физические основы волноводных акустических линий связи.....	51
2.2.1. Назначение линий связи и их состав.....	51
2.2.2. Закономерности волноводного распространения ультразвука в стержнях и пластинах.....	52
2.2.3. Влияние технологических факторов на распространение волн нулевого порядка в волноводах связи...	

2.2.4. Подвеска волноводов и их защита от внешних факторов.....	62
2.2.5. Герметизация и акустическое согласование волноводов связи.....	65
2.3. Принципы построения волноводных чувствительных элементов датчиков контроля теплоносителя ЯЭУ.....	68
2.3.1. Назначение чувствительных элементов.....	68
2.3.2. Влияние контакта волновода с жидкостью на распространение в нем ультразвука.....	69
2.3.3. Особенности построения волноводных чувствительных элементов.....	81
2.4. Акустические преобразователи волноводного датчика.....	87
2.4.1. Особенности преобразователя в составе волноводного датчика.....	87
2.4.2. Конструкции и основные характеристика преобразователей продольных волн.....	88
2.4.3. Конструкции и основные характеристики преобразователей изгибных и крутильных волн.....	98
2.4.4. Расширение функциональных возможностей преобразователей.....	102
2.5. Особенности вторичной аппаратуры активных волноводных систем контроля теплоносителя ЯЭУ.....	104
3. Лабораторный практикум по системам управления ЯЭУ.....	106
3.1. Лабораторная работа 1. Исследование динамических характеристик и изучение передаточных функций линейных звеньев систем управления.....	106
3.2. Лабораторная работа 2. Исследование обратной связи и устойчивости систем управления.....	116
3.3. Лабораторная работа 3. Исследование динамических свойств точечного реактора.....	124
3.4. Лабораторная работа 4. Определение критического состояния реактора и калибровка стержней управления ЯЭУ.....	130

3.5. Лабораторная работа 5. Изучение статических и динамических характеристик двухконтурной ЯЭУ.....	142
Библиографический список	154
ВВЕДЕНИЕ	

Возрастание требований к безопасности и надежности ядерных энергетических установок (ЯЭУ), повышение энергонапряженности блоков и приближение их к густонаселенным районам страны выдвигают на первый план проблему обеспечения их безопасности и надежности. В этих условиях существенно повышается роль систем контроля и диагностики основных элементов энергоблоков и рабочих тел на всех режимах работы, в том числе в аварийных ситуациях. Совершенная измерительная аппаратура является необходимым компонентом при проведении гидродинамических исследований на этапах НИР и ОКР создания ЯЭУ, а также в экспериментах по исследованию аварий с потерей теплоносителя и переходных процессов в активной зоне реактора.

Традиционные средства контроля и диагностики теплоносителя во многих случаях не обеспечивают измерение важнейших его параметров с требуемой точностью и быстродействием. Отсутствие совершенной измерительной техники – одно из основных препятствий в исследованиях теплообмена, особенно при измерениях параметров двухфазного потока. Недостоверность определения характеристик влияет не только на точность теплофизических расчетов, но и вынуждает сомневаться в выборе расчетных моделей, используемых для определения параметров потока.

В связи с этим весьма актуальной как с научной, так и с прикладной точек зрения является задача разработки новых нетрадиционных методов и средств контроля параметров и диагностики теплоносителя.

Акустические методы контроля в ядерной энергетике привлекают большое внимание научно-исследовательских организаций и специалистов различных отраслей промышленности. Это связано с их универсальностью, экономичностью, возможностью автоматизации измерений и, наконец, безопасностью для обслуживающего персонала.

Акустические методы контроля широко применяются в атомном машиностроении при проверке ответственных изделий и заготовок, сварных швов и т. п. [1,2].

Огромные возможности акустических методов особенно эффективно могут использоваться при контроле теплоносителей и рабочих тел в

экстремальных условиях ЯЭУ, где велики их преимущества по сравнению с другими методами. Можно выделить несколько направлений целесообразности применения акустических средств. Во-первых, это измерение основных технологических параметров теплоносителя: расхода, температуры, давления, паросодержания, уровня. Во-вторых, контроль отклонений от нормального режима работы, повышающий безопасность и надежность работы оборудования. К ним относятся устройства для контроля шума, структуры двухфазного потока, акустической визуализации и др. В-третьих, диагностика структуры теплоносителя при научных исследованиях: измерение распределения фаз, скоростей их перемещения, дисперсности потока теплоносителя по сечению и длине каналов, скорости генерации пара на поверхности теплопередачи и т. п.

Таким образом, совершенствование и внедрение в практику акустических средств измерений способствует более тщательному обоснованию характеристик ЯЭУ, повышению надежности и качества контроля за работой оборудования, дает возможность выявить дополнительные ресурсы повышения мощности и безопасности реакторных установок.

1. ОБЗОР АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЯЭУ

1.1. Акустические методы диагностики и контроля теплоносителя в ядерной энергетике

Ультразвуковые методы вошли в арсенал средств исследования, измерения и контроля в ядерной энергетике с момента ее возникновения. На международной конференции в Женеве по мирному исследованию атомной энергии в 1955 г. были опубликованы данные о свойствах металлического урана, измеренных ультразвуковыми методами при температуре до 350[±]С. К этому же времени можно отнести первые попытки применения ультразвуковых методов для изучения радиационных повреждений в конструкционных материалах. Успешные исследования реакторных материалов в дальнейшем проводили в лабораториях России, США, Великобритании, Франции, ФРГ и других стран [1].

Одновременно с промышленным освоением атомной энергии интенсивно развивались ультразвуковые методы контроля элементов конструкции ядерных реакторов. Преимущество этих методов состоит в их высокой чувствительности, возможности контроля широкого круга изделий, высокой производительности и универсальности аппаратуры.

Акустические методы измерений оказались весьма эффективными при эксплуатационном контроле ядерных реакторов. Созданы приборы для контроля теплоносителя ЯЭУ – уровнемеры, расходомеры, термометры. Ультразвуковые методы успешно используются для исследований свойств жидких и газообразных рабочих тел ЯЭУ. Исследован широкий круг веществ от воды и водяного пара до паров щелочных металлов в интервале температур от комнатной до 1100[±]С [2].

Для контроля параметров теплоносителя применяются различные методы: механические, акустические, оптические, электромагнитные и радиационные. Хотя для каждого из методов можно указать наиболее целесообразную область применения, где он имеет определенные преимущества перед другими, акустические методы обладают наибольшими потенциальными возможностями в технике энергетических реакторов.

Механические – отличаются простотой оборудования, достаточно надежны. Однако имеют сравнительно большую инерционность, пониженный ресурс. Для размещения первичных датчиков требуется довольно значительный внутрикорпусной объем или вывод теплоносителя за прочный корпус, что отрицательно сказывается на безопасности ядерной установки. Кроме того, автоматизация измерений требует использования электромагнитных или оптических датчиков. Применение механических методов для диагностики теплоносителя в первом контуре современных ЯЭУ встречает большие трудности.

Одно из главных затруднений, препятствующих использованию электромагнитных и оптических методов в ЯЭУ, состоит в необходимости применения материалов для изготовления датчиков, длительное время сохраняющих свои электрические и оптические свойства в условиях высокой температуры и интенсивности ионизирующего излучения. В мощном нейтронном потоке вблизи активной зоны работающего реактора в той или иной степени претерпевают изменения физические свойства любых материалов. Это связано с нарушением самой структуры материала из-за смещения атомов вещества под действием быстрых нейтронов. Действие мощного гамма-излучения сводится к ионизационному эффекту, нарушающему в первую очередь изоляционные электрические и оптические свойства материалов. При помещении датчиков за радиационной защитной оболочкой остается фактор высоких температур, лежащих за пределами стабильности электрических и оптических свойств многих материалов, сохраняется неблагоприятное физико-химическое воздействие теплоносителя.

Применение радиационных методов в условиях ядерного реактора затруднено теми же причинами, что и электромагнитных.

Акустические методы, которые можно считать одной из разновидностей механических, обладают наибольшими возможностями для измерения параметров высокотемпературного теплоносителя в условиях ЯЭУ. Они не имеют перечисленных недостатков. Для передачи акустических колебаний могут быть использованы как элементы самой установки (в том числе и теплоноситель), так и специальные волноводы. На распространение и передачу акустических колебаний не оказывает существенного влияния ни температура среды, ни мощные радиационные потоки. Акустические датчики, помещаемые в зону с экстремальными условиями, могут быть выполнены только с применением типовых

конструкционных материалов - легированных сталей, надежно работающих при любых параметрах водяного или жидкометаллического теплоносителя. Можно ожидать, что в будущем акустические методы станут одними из первых по надежности методами диагностики теплоносителя в ЯЭУ [3].

Кроме технологического контроля теплоносителя ЯЭУ, акустические методы могут эффективно использоваться в экспериментах по отработке элементов оборудования ядерной энергетики и при гидравлических исследованиях по безопасности реакторов. В том числе, в экспериментах по исследованию явлений, связанных с потерей теплоносителя. Малые габариты акустических датчиков и их высокое быстродействие позволяют проводить изучение двухфазных превращений в межфазном пространстве, а также визуализировать структуру двухфазного теплоносителя.

Акустические методы также пригодны для дистанционных измерений, в частности, возможно определение профиля скорости и расхода теплоносителя в трубопроводе без нарушения его поверхности, что существенно с точки зрения безопасности ЯЭУ.

1.2. Обзор методов измерения основных параметров теплоносителя

1.2.1. Акустические методы определения температуры

Приборы ультразвуковой термометрии основаны на функциональной зависимости скорости звука в средах от температуры. В качестве такой среды в термометрах для ядерной энергетики используют твердые тела или газы [4]. Отмечается, что свойства газа при облучении не меняются. Скорость звука в газе определяется соотношением γRT

$$c = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (1.1)$$

где γ – показатель адиабаты; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; M – молекулярная масса.

Для идеального газа $\gamma = 5/3$, поэтому $c = \sqrt{KT^{1/2}}$, т. е. идеальный газ может служить эталоном температуры.

Скорость продольных волн в протяженном твердом теле

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (1.2)$$

где E – модуль Юнга; ρ – плотность.

Для металлов скорость звука практически линейно зависит от температуры. Измерения температуры проводятся двумя способами. В первом в контролируемую среду вносят чувствительный элемент, акустические характеристики которого определяются; во втором измеряются характеристики самой среды. В первом случае на характеристики чувствительного элемента и погрешность термометра влияют те же факторы, что и для других контактных методов измерения температуры; во втором необходим учет неоднородности среды, существенной при нестационарных измерениях.

Большим вниманием разработчиков пользуется первое направление, в котором так же можно выделить два принципа. В одном из них измеряется скорость звука в образцовом элементе, выполненном в виде цилиндра или стержня, в другом – резонансная частота механического резонатора [2, 5-7]. Первые резонансные термометры изготавливались для ядерных реакторов с графитовым замедлителем [2]. Одна из разработок использует резонатор в виде цилиндра диаметром 12,5 мм и высотой 250 мм, заполненный гелием при давлении 2,1 МПа. Резонатор соединен с приемноизлучающим преобразователем акустической линией, выполненной из трубки диаметром 3,2 мм длиной 3,6 мм, и возбуждается радиоимпульсами с частотой заполнения 6-10 кГц и периодом 20 мс. Момент резонанса определяется по минимуму отраженного сигнала. Частота резонанса однозначно связана с температурой гелия в резонаторе и может быть точно определена. Погрешность такого термометра не превышает 1%. Недостатком рассмотренной системы является применение относительно низких частот, где высок уровень шумов работающего реактора. Это осложняет регистрацию полезных сигналов.

Следующим шагом в развитии резонансных акустических систем измерения температуры явилось применение металлических резонаторов. Первым акустическим резонатором такого типа явился, по-видимому, резонатор Белла (рис. 1.1, а) [5]. Он состоит из стерженька длиной четверть волны, который своим торцем состыкован с волноводной (проволочной) линией через согласующий четвертьволновый цилиндр большего диаметра. При возбуждении резонатора радиоимпульсами с частотой заполнения 100-150 кГц возникает отраженный резонансный эхо-сигнал. Частота эхосигнала определяется физическими свойствами материала резонатора и связана с его температурой.

После соответствующей градуировки, измеряя частоту эхо-сигнала, нетрудно определить температуру резонатора и, следовательно, окружающей его среды. В качестве излучателя-приемника на втором конце волновода применяют магнитоотриктор. Предложены разнообразные конфигурации резонаторов, использующие как продольный, так и изгибный резонанс [2]. Определенный интерес представляют резонаторы в виде камертона (рис. 1.1, б) [14]. Такой резонатор можно выфрезеровать непосредственно на торце проволочного волновода и избежать сварочного стыка и связанных с ним понижения надежности и паразитных переотражений. Описанный термометр камертонного типа имеет погрешность $\pm 2^\circ$ при температуре 1800°C .

Акустические термометры, использующие принцип измерения скорости распространения волн, были предложены практически одновременно с резонансными. В приборах такого типа измеряется время прохождения импульса от одного конца чувствительного элемента (проволочки) до другого. Для исключения влияния демпфирования колебаний средой проволочку помещают в защитный кожух, что ведет к повышению инерционности измерений.

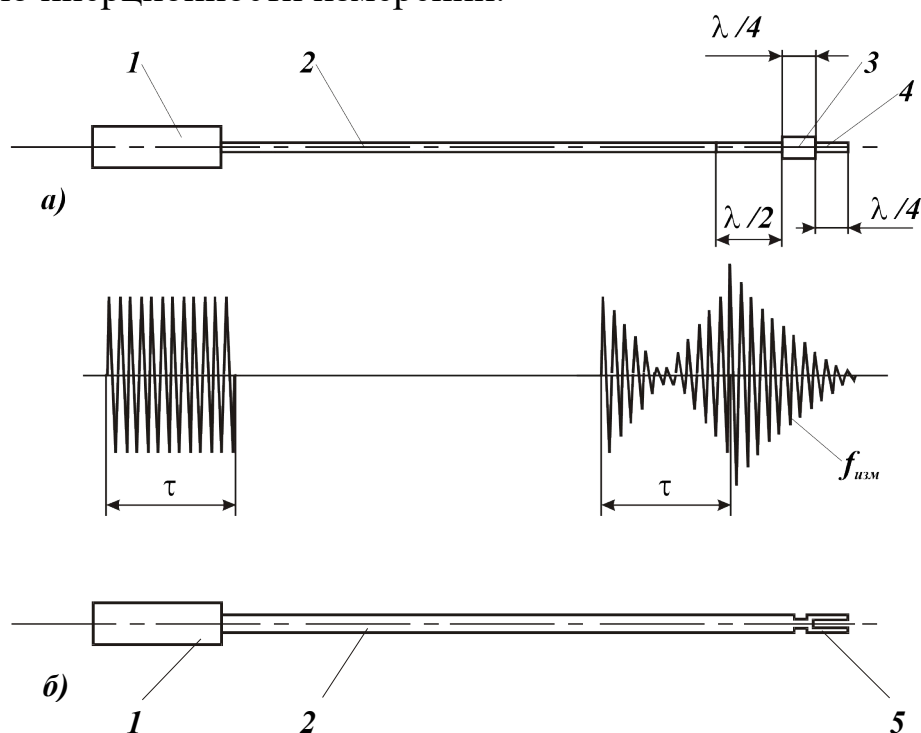


Рис. 1.1. Схемы волноводных резонаторов: а – резонатор Белла; б – камертонный резонатор;
1 – магнитоотриктор; 2 – волновод; 3 – согласующий цилиндр;
4 – резонатор Белла; 5 – камертон

Погрешность измерений не превышает 30°C в диапазоне $800-2800^{\circ}\text{C}$. В усовершенствованных температурных датчиках на поверхности чувствительного элемента наносятся насечки (искусственные дефекты), которые образуют ряд зон контроля (рис. 1.2).

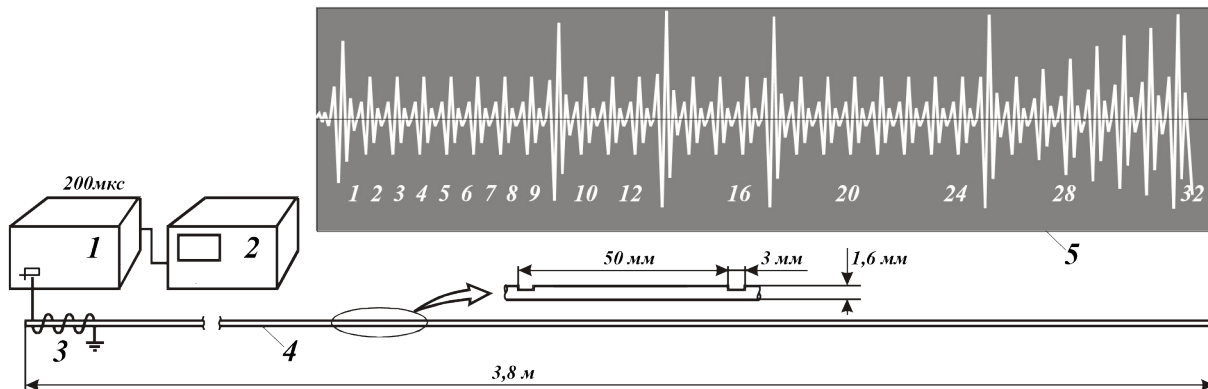
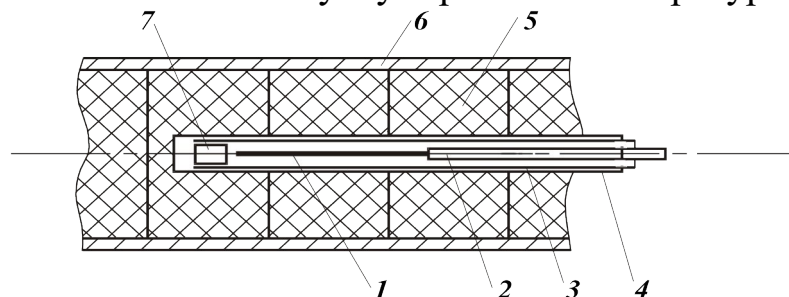


Рис. 1.2. Схема волноводного термометра с насечками:

1 – излучатель-приемник; 2 – осциллограф; 3 – магнитостриктор;
4 – волновод с насечками; 5 – осциллограмма сигналов

Регистрируя интервал времени между отраженными от соседних дефектов импульсами, определяют распределение скорости распространения ультразвука по длине чувствительного элемента и по ней - распределение температуры. Известные датчики такого типа содержат до 14 зон контроля длиной 15 мм каждая. Преобразователь датчика возбуждается радиоимпульсами с частотой заполнения 1 МГц [8].

Область применения акустических методов измерения температуры, в которой они имеют существенные преимущества перед другими, это определение температуры сердечника ТВЭЛ и температуры газового теплоносителя, где особо жесткие условия резко ограничивают выбор материала термодатчика, а электровывод сигналов датчика практически исключается. Ультразвуковая термометрия в экстремальных условиях ЯЭУ основана на использовании волноводных датчиков с электромеханическим преобразователем, вынесенным в зону с умеренной температурой.



**Рис. 1.3. Конструкция датчика для измерения
температуры сердечника ТВЭЛ:**

*1 – чувствительный элемент; 2 – волновод; 3 – экран;
4 – чехол; 5 – таблетки топлива; 6 – оболочка ТВЭЛ; 7 – заглушка*

Практическая конструкция датчика для измерения температуры ТВЭЛ (рис. 1.3) содержит чувствительный элемент диаметром 15 мкм, длиной 50 мм и волновод, изготовленный из проволоки диаметром 20 мкм, помещенный в трубчатый экран диаметром 63 мкм [9]. Экран заключен в чехол из огнеупорного материала. Датчик, изготовленный из вольфраморениевого сплава, расположен на оси топливного стержня. Температура сердечника ТВЭЛ определяется по скорости распространения ультразвуковых импульсов по длине чувствительного элемента. Погрешность термометра $\pm 25^\circ\text{C}$ при температуре до 2700°C .

Датчик температуры для газоохлаждаемых графитовых реакторов (ВГР) должен иметь ресурс работы до 10 лет при температуре до 1500°C в контакте с графитовыми и карбидными элементами активной зоны в атмосфере гелиевого теплоносителя. Расстояние от чувствительного элемента до преобразователя достигает 15 м. В этих условиях ультразвуковые датчики наиболее перспективны. В их конструкциях используются чувствительные элементы и волноводы из сплавов рутения и рения, торированного вольфрама, молибдена.

В результате исследования источников патентной информации установлено, что за период с 1978 г. в среднем в год патентуется 3-4 новые конструкции или усовершенствования ультразвуковых термометров. Из них около 40% направлены на разработку волноводных термодатчиков в основном для ядерных реакторов. Ведущими странами в области разработки волноводных систем измерения температуры являются Россия, Великобритания и США, на долю которых приходится 80-85% всех патентов в этой области.

**1.2.2. Методы измерения расхода и скорости теплоносителя
при помощи ультразвука**

Акустические методы измерения расхода теплоносителя основаны на зависящих от расхода акустических эффектах, возникающих при проходе ультразвуковых колебаний через поток. В настоящее время применяют

ультразвуковые расходомеры, основанные на перемещении ультразвуковых колебаний движущейся средой и на эффекте Доплера. Первые из них в зависимости от угла направления ультразвуковых колебаний можно разделить на угловые, осевые и со сносом луча [10].

Практическое применение акустических методов расходомерии осложняется рядом факторов. Это, во-первых, зависимость собственной скорости ультразвука от физико-химических свойств теплоносителя, во-вторых, зависимость результатов измерений от числа Рейнольдса и, в-третьих, скорость ультразвука в среде много больше транспортной скорости самой среды, что усложняет выделение информационного сигнала. Тем не менее, ультразвуковые расходомеры все шире используются в металлургии, химической и других отраслях промышленности, что связано с наличием у них ряда достоинств.

В первую очередь это возможность измерять расход среды в экстремальных условиях без внесения возмущений в поток, высокое быстродействие, отсутствие гидравлического сопротивления в датчике.

Характерная особенность расходомеров со сносом луча ультразвука состоит в том, что выходной сигнал является функцией смещения ультразвукового луча потоком теплоносителя. Расходомер состоит из излучателя, расположенного симметрично напротив двух приемников, размещенных вдоль оси трубопровода (рис. 1.4, а). Движение теплоносителя ведет к перераспределению энергии, поступающей на каждый из приемников, и изменению разностного сигнала на их выходе:

$$V_{\text{вых}} = K_{\text{эл}} \frac{4Q}{\pi D c}, \quad (1.3)$$

где $K_{\text{эл}}$ – коэффициент передачи вторичного преобразователя; Q – массовый расход теплоносителя; D – диаметр трубопровода; c – скорость звука в теплоносителе.

Расходомеры этой группы имеют наиболее простой и дешевый измерительный блок.

Предложены и другие расходомеры, основанные на том же принципе, содержащие линейку приемников и передатчиков для измерения в трубах большого диаметра.

Существенными недостатками измерения расхода по сносу луча является чрезвычайная сложность в обеспечении идентичности каналов

приема, нарушающейся из-за появления загрязнений на поверхности трубы, необходимости применения минимум трех датчиков в каждом измерительном канале, а также затруднения при определении малых расходов теплоносителя в трубах небольшого диаметра.

Расходомеры с измерением времени прохождения ультразвуковой волны участка излучатель-приемник в зависимости от способа излучения разностного сигнала, пропорционального скоростям потока, подразделяются на время-импульсные, фазовые и частотно-импульсные. К этой группе можно отнести и корреляционные расходомеры.

Структурная схема, поясняющая работу одноканального времяимпульсного расходомера, представлена на рис. 1.4, б. Генератор импульсов 2 через ключ 4 возбуждает пьезопреобразователи 1. Акустические сигналы распространяются от одного преобразователя к другому одновременно по потоку и против потока и подаются на входы усилителей-формирователей 3. В измерителе 5 осуществляется преобразование разности времен прихода импульсов в пропорциональное ей напряжение [12].

Время распространения импульса по потоку

$$t_{\text{поп}} = \frac{L}{v + c},$$

а против потока

$$t_{\text{прп}} = \frac{L}{v - c}.$$

Поэтому выходное напряжение блока

$$V_{\text{вых}} = K_{\text{эл}} (t_{\text{прп}} - t_{\text{поп}}) = 2L \frac{v}{c^2} = \frac{Q}{\pi D^2 c^2}, \quad (1.4)$$

где L – расстояние между преобразователями.

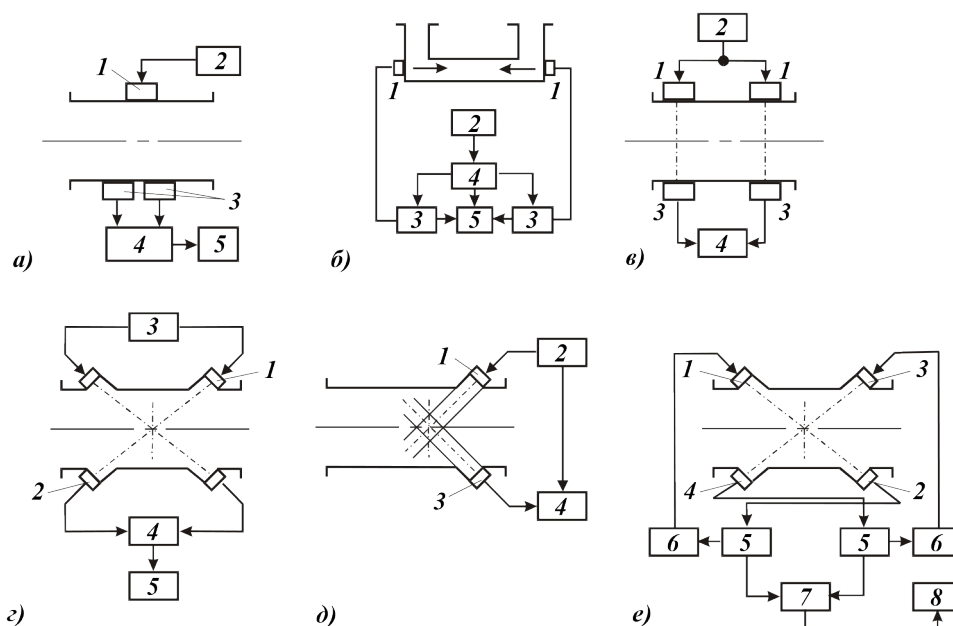


Рис. 1.4. Основные схемы расходомеров:

- а* – схема расходомера со сном луча: 1 – излучатель; 2 – генератор; 3 – приемники; 4 – усилитель; 5 – регистратор;
- б* – схема время-импульсного расходомера: 1 – преобразователь; 2 – генератор; 3 – усилитель-формирователь; 4 – ключ; 5 – измеритель; *в* – схема корреляционного расходомера: 1 – излучатель; 2 – генератор; 3 – приемник; 4 – коррелятор;
- г* – схема фазового расходомера: 1 – излучатель; 2 – приемник; 3 – генератор; 4 – фазомер; 5 – выходное устройство;
- д* – схема доплеровского расходомера: 1 – излучатель; 2 – генератор; 3 – приемник; 4 – демодулятор;
- е* – схема частотно-импульсного расходомера: 1, 3 – излучатели; 2, 4 – приемники; 5 – усилитель формирователь; 6 – генератор; 7 – измерительный блок; 8 – индикатор

В расходомерах этого типа существенную сложность представляет определение весьма малых времен задержки ($t-t$), в особенности при малых скоростях потока (1–10 см/с). Недостатком также является сильное влияние на результат измерений включений в потоке, например, пузырьков газа, и скорости звука в среде.

Фазовые измерительные системы (рис. 1.4, *в*) основаны на определении разности фаз синусоидальных сигналов, поступающих с двух приемников 2. Приемники фиксируют ультразвуковые сигналы излучателей 1, возбуждаемые генератором 3 и проходящие по идентичным каналам по потоку и против него. Сигналы с выходов приемников 2 поступают на фазомер 4 и далее на выходное устройство 5.

Фазовые схемы измерения обладают большими коэффициентами передачи, однако требуют четыре излучателя-приемника и им свойственна существенная зависимость выходного сигнала от скорости звука в теплоносителе.

В отличие от рассмотренных, частотно-импульсные расходомеры являются системами с обратной связью [13]. В каждом канале такой системы ультразвуковой импульс, достигающий приемного преобразователя 2 (4), после усиления и преобразования в блоке 5 возбуждает генерацию следующего импульса в генераторах 6 (рис. 1.4, з). В замкнутом кольце излучатель 1 (3), контролируемая среда, приемный преобразователь 2 (4), измерительный блок 5 (6) возникает автоциркуляция импульсов с частотой по потоку

$$f_{\text{поп}} = \frac{1}{L} \left(c + v \right)$$

и против потока

$$f_{\text{прот}} = \frac{1}{L} \left(c - v \right)$$

Разность частот, определяемая измерительным блоком 7, дает статическую характеристику частотно-импульсного расходомера

$$\Delta f = \frac{2v}{L} = \frac{8Q}{\pi D L^2} \quad (1.5)$$

Значение расхода отображается индикатором 8.

Частотно-временные расходомеры, благодаря независимости статической характеристики от скорости звука в среде, могут успешно применяться в загрязненных гомогенных жидкостях в широком диапазоне температур и скоростей теплоносителя и диаметров трубопроводов. Разработаны многочисленные схемы таких расходомеров, повышающих их помехозащищенность, быстродействие и точность измерений [13]. Однако требуется применение двух излучателей и такого же количества приемников.

Корреляционные расходомеры содержат две пары излучатель-приемник, расположенных по ходу движения теплоносителя [14]

(рис.1.4, е). Определяются пульсации амплитуды принимаемых сигналов, вызванные турбулентными вихрями, пузырьками, различными включениями, затем вычисляется функция их взаимной корреляции и по величине сдвига максимума корреляции ΔT измеряется скорость перемещения теплоносителя:

$$V = \frac{L}{\Delta T}, \quad (1.6)$$

где L – расстояние между парами преобразователей.

Существенным преимуществом корреляционных расходомеров является независимость измерений от скорости звука в теплоносителе и наличия включений в поток, в том числе пузырьков газа, а также высокая помехозащищенность. Имеющиеся трудности связаны с учетом профиля скоростей, влияния пограничного слоя, формы и интенсивности ультразвуковых полей. Такие расходомеры требуют применения вычислительных средств, например, микропроцессоров для определения функции взаимной корреляции. При измерении расхода чистого однофазного теплоносителя возникают проблемы выделения сигнала, которые, однако, могут быть разрешены введением турбулизаторов или газовых пузырьков в поток.

В расходомерах, основанных на эффекте Доплера, излучатель 1, питаемый генератором 2, возбуждает в потоке теплоносителя колебания частотой f (рис. 1.4, д). При наличии в потоке рассеивателей, перемещающихся со скоростью потока, возникает доплеровское смещение частоты исходных колебаний. Приемник 3 принимает сигнал с частотой, отличающейся от исходной на величину доплеровского смещения f_d , который выделяется демодулятором 4. Скорость потока определяется зависимо-

стью

$$V = \frac{c}{2f \cos \alpha} f_d, \quad (1.7)$$

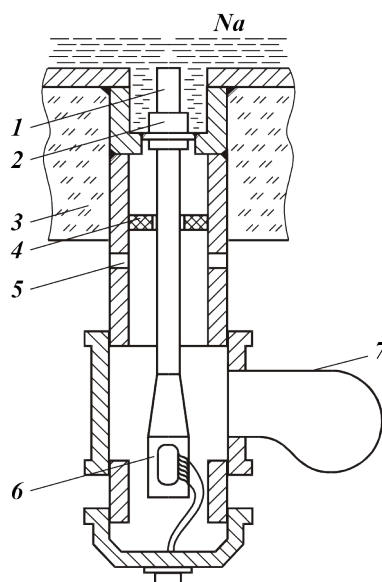
где α – угол, образуемый центральным лепестком диаграммы направленности излучателя (приемника) с осью потока.

У расходомеров этой группы отсутствует дрейф нуля, поскольку при остановке потока доплеровское смещение равно нулю, изменение

амплитуды ультразвуковой волны, обусловленное изменением затухания при ее распространении в среде, не влияет на показания. Кроме того, в этих расходомерах можно использовать единственный преобразователь для излучения и приема сигналов. Из недостатков можно отметить зависимость их показаний от скорости звука в теплоносителе и необходимость присутствия рассеивателей в потоке [11].

Ультразвуковые расходомеры перспективны для использования в ядерной энергетике в наиболее тяжелых условиях, например, для измерения расхода жидкометаллического и высокотемпературного газового теплоносителя, при обеспечении измерений без внесения гидродинамического сопротивления потоку, в частности, при естественной циркуляции теплоносителя, в труднодоступных местах.

Сведения о разработках акустических расходомеров для ЯЭУ в литературе немногочисленны. В них применены волноводные датчики. В частности, конструкция датчиков для натриевого контура (рис. 1.5), использующего фазовый метод измерения, содержит волноводные излучатели и приемники [15]. Волноводы одним своим концом погружены в натрий, на втором конце установлены ультразвуковые преобразователи, работающих в условиях, близких к нормальным. Измеряется разность фаз ультразвуковых волн, распространяющихся по течению теплоносителя и против течения. Расходомер рассчитан на использование при температуре теплоносителя до 650⁰С.



**Рис. 1.5. Конструкция узла излучателя расходомера
для жидкого натрия:**

1 – излучающий стержень; 2 – опорный элемент; 3 – теплоизоляция контура;
4 – керамическая теплоизолирующая втулка; 5 – вентиляционное отверстие;
6 – магнитостриктор; 7 – вентилятор

Большой интерес представляет идея применения для излучения и приема ультразвука волноводных антенн, погруженных в теплоноситель. Используется физическое явление возникновения конусообразной волны, распространяющейся в среду при прохождении продольной ультразвуковой волны по волноводу, помещенному в поток. Такая антенна, расположенная вдоль оси трубопровода, обеспечивает ввод акустических колебаний в теплоноситель под определенным углом к потоку, что упрощает реализацию датчика. Предложены разнообразные конструкции таких датчиков, дальнейшее усовершенствование которых может привести к созданию приборов для измерения скорости теплоносителя в экстремальных условиях ядерной энергетики.

Другое направление создания расходомеров для ЯЭУ, это развитие датчиков расхода, работающих с использованием волн Рэлея, распространяющихся по стенке трубопровода в осевом направлении, и волноводов [16,]. Применение таких волн обеспечивает ввод ультразвука в среду под углом к оси трубопровода через стенку толщиной до и свыше 10 мм. Для измерения расхода используется эффект Доплера. Конструкция датчиков позволяет исключить какое-либо их влияние на поток. Возможны различные варианты конструктивного исполнения таких датчиков.

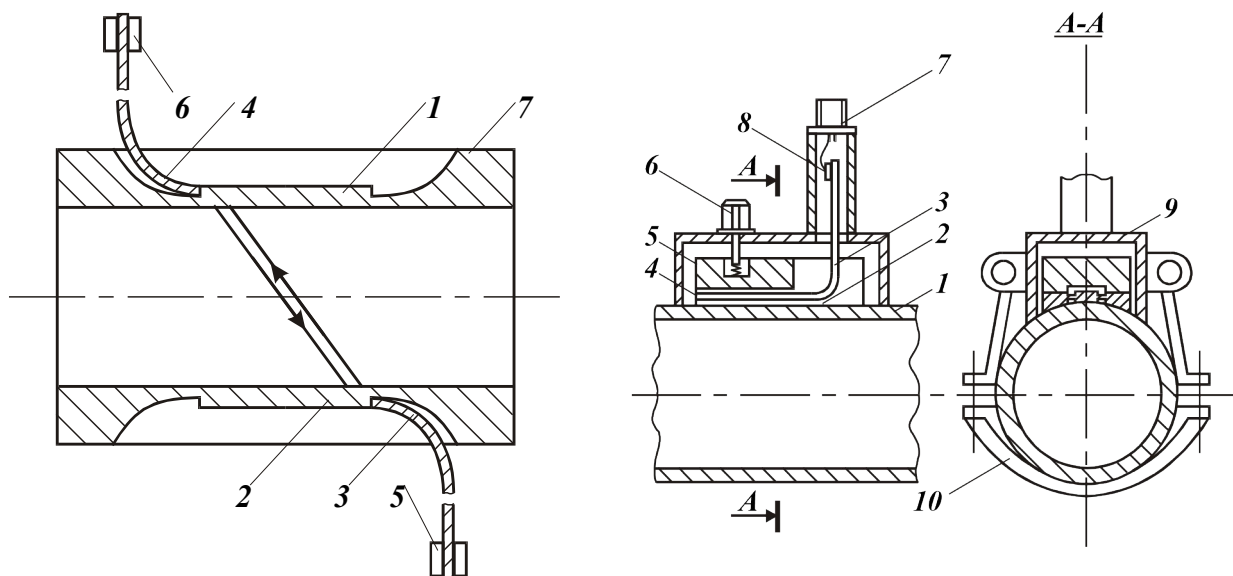
На рис. 1.6 показана конструкция с выфрезерованными чувствительными элементами. Повысить безопасность установки за счет сохранения целостности трубопровода и расширить эксплуатационные возможности подобного преобразователя расходомера позволяет конструкция накладного датчика (рис. 1.7).

Рис. 1.6. Конструкция датчика акустического расходомера: 1, 2

– чувствительные элементы; 3, 4 – волноводы; 5, 6 – пьезоэлектрические преобразователи; 7 – измерительный участок трубопровода

Рис. 1.7. Конструкция накладного расходомера:

1 – трубопровод; 2 – контактный акустический слой; 3 – волновод; 4 – чувствительный элемент; 5 – нажимная планка; 6 – регулировочный болт; 7 – узел крепления кабеля связи; 8 – пьезопреобразователь; 9 – корпус;



10 – хомут крепления

По данным патентных исследований за последние 10 лет в год патентуется в среднем около 30 конструкций ультразвуковых расходомеров. Разработки устройств для ядерной энергетики практически отсутствуют. Из общего количества заявок только 13% касаются усовершенствования первичного датчика расходомеров. Ведущими странами в области разработки акустических средств измерения расхода и скорости потока являются США, Россия, Япония и ФРГ, которые владеют 80% патентами в этой области.

1.2.3. Акустические методы измерения уровня теплоносителя

Принципы действия ультразвуковых уровнемеров основаны на определении времени распространения акустических волн от преобразователя до межфазной границы, на индикации прохождения звука через заданный объем среды и на измерении величины демпфирования ультразвука, распространяющегося по волноводу и частично погруженного в теплоноситель.

В уровнемерах, основанных на определении времени распространения ультразвука от преобразователя до межфазной границы, для измерения

уровня теплоносителя применяют принцип локации границы сред с различными волновыми сопротивлениями. Существующие методы используют отражение ультразвуковых импульсов от границ фаз или зондирование уровня по волноводам, частично погруженным в теплоноситель (рис. 1.8, а, б) [17].

При контроле уровня теплоносителя методом отражения ультразвуковых импульсов датчик может располагаться как выше, так и ниже межфазной границы. В первом случае исключается влияние затухания звука в теплоносителе, существенно возрастающем при появлении в нем пузырьков газа. Однако одновременно в значительной мере усложняется конструкция датчика, который должен обеспечивать эффективное излучение звука в газовую среду. Для учета и компенсации скорости звука в среде используют реперные отражатели, расположенные на фиксированном расстоянии от датчика.

Уровнемеры с зондированием уровня теплоносителя по волноводам практически свободны от погрешностей, обусловленных изменением свойств среды. В них используются изгибные волны нулевого порядка. Скорость изгибной волны в волноводе определяется выбором диаметра волновода и рабочей частотой. При этом, если скорость волны превышает скорость звука в теплоносителе, то происходит эффективное излучение ультразвука в среду. В противном случае наблюдается существенное уменьшение скорости звука в волноводе, вызванное реактивным характером нагрузки среды на его поверхности. В соответствии с этим изменяется функциональная схема измерений. В первом случае определяется время прохождения импульсного сигнала от излучающего к приемному волноводу, который проходит через шунтирующий объем теплоносителя в зазоре между ними. Увеличение уровня ведет к перемещению зоны шунтирования вверх, что сокращает время прохождения сигнала по акустическому тракту уровнемера. В уровнемерах, использующих второй принцип, волновод изгибается U-образно, и к его свободным концам прикрепляются излучающий и приемный преобразователи. В волноводе возбуждаются непрерывные изгибные колебания, фаза которых на выходе системы определяется степенью его погруженности в жидкость.

Среди устройств, использующих метод индикации прохождения ультразвука в среде (сигнализации), различают сигнализаторы, основанные на демпфировании акустического преобразователя средой, вследствие

изменения его сопротивления излучения при смене фаз на поверхности чувствительного элемента, и основанные на определении прохождения звука от излучателя к приемнику [18].

При использовании первого метода в контролируемом объеме размещают по высоте один или несколько преобразователей, выполненных обычно в виде полуволнового резонатора. Когда преобразователь находится в газовой среде, то излучения звука почти не происходит, вследствие низкого волнового сопротивления газа. Погружение излучателя в теплоноситель приводит к существенному демпфированию колебаний, что и фиксируется вторичным прибором. Известные высокотемпературные конструкции таких сигнализаторов уровня используют, как правило, магнитострикционный преобразователь с обмоткой из проводника с керамической изоляцией, залитой керамической массой. Применение таких сигнализаторов в ядерной энергетике ограничено низким ресурсом датчиков и неоднозначностью показаний при вскипании теплоносителя.

Более перспективны в условиях ЯЭУ уровнемеры, работающие на принципе прохождения ультразвука от излучателя к приемнику, особенно при использовании волноводов (рис. 1.8, в). Из-за значительной разницы в волновых акустических сопротивлениях жидкости и газа передача акустической энергии через жидкий теплоноситель существенно эффективней. Поэтому граница раздела фаз легко определяется по скачку уровня сигналов на выходах систем излучатель-приемник, погруженных в жидкость. При выборе излучателя малых размеров и достаточно близкой установки их друг к другу метод будет работоспособен даже в пузырьковых двухфазных средах. С помощью такого устройства можно определить также распределение газосодержания на высоте сосуда (рис. 1.9). К недостаткам метода относятся дискретность показаний, необходимость применения большого числа излучателей-приемников, которые не всегда удастся разместить в приемлемом объеме.

В уровнемерах, основанных на определении демпфирования ультразвука в волноводах теплоносителем, используются продольные, изгибные и крутильные волны [19]. Принцип действия таких уровнемеров основан на измерении затухания ультразвуковых импульсов в волноводе, частично погруженном в теплоноситель (рис. 1.8, г). При увеличении площади контакта волновода с жидкостью возрастает доля энергии, излучаемой его поверхностью в среду, что ведет к уменьшению амплитуды импульса, прошедшего через волноводный датчик. Амплитуда сигнала меняется по закону

$$A = A_0 \exp(-\alpha h), \quad (1.8)$$

где A_0 – амплитуда сигнала в отсутствие жидкости; α – постоянная затухания; h – уровень жидкости.

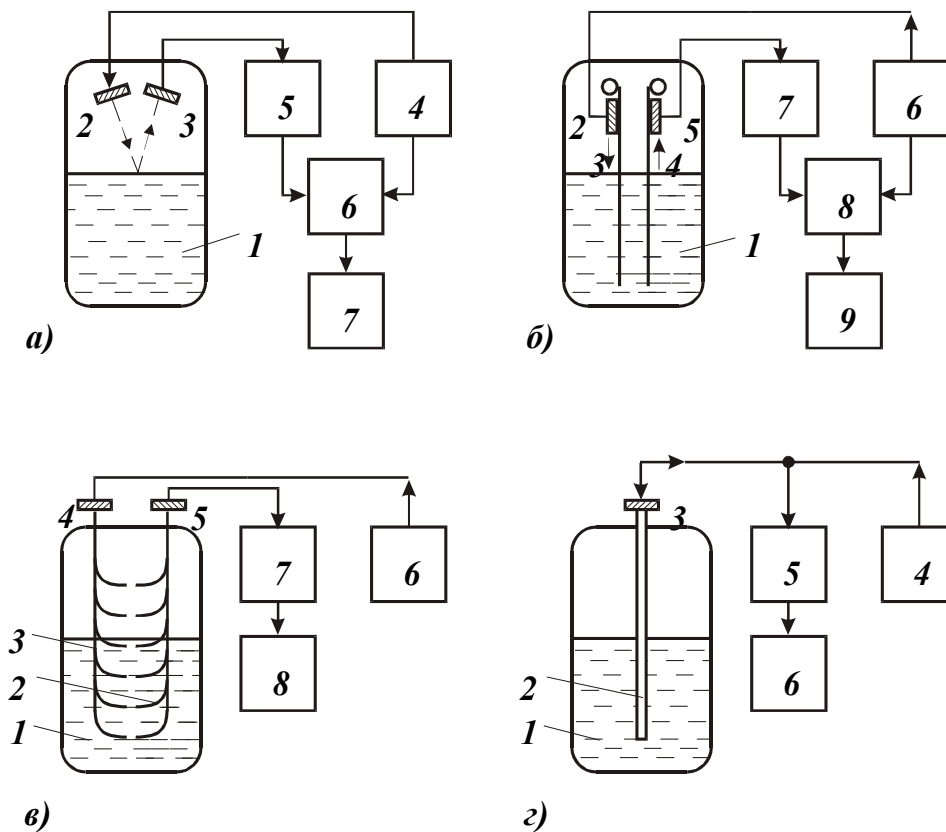


Рис. 1.8. Основные схемы уровнемеров:

а – уровнемер, основанный на определении времени распространения ультразвука до межфазной границы по отражению ультразвуковых импульсов от поверхности раздела фаз: 1 – жидкость; 2 – излучатель; 3 – приемник; 4 – генератор; 5 – усилитель;

6 – измерительный блок; 7 – индикатор;

б – уровнемер, основанный на определении времени распространения ультразвука до межфазной границы по эффектам шунтирования волноводов: 1 – измеряемая жидкость; 2 – излучатель; 3, 4 – волноводы; 5 – приемник; 6 – генератор; 7 – усилитель; 8 – измерительный блок; 9 – индикатор.

в – уровнемер, работающий на принципе прохождения ультразвука от излучателя к приемнику: 1 – измеряемая жидкость; 2 – система приемных волноводов; 3 – система

излучающих волноводов; 4 – излучатель; 5 – приемник; 6 – генератор; 7 – усилитель; 8 – измерительный блок.

2 – уровнемер, основанный на определении демпфирования ультразвука в волноводе: 1 – измеряемая жидкость; 2 – волновод; 3 – преобразователь;

4 – генератор; 5 – измерительный блок; 6 – индикатор

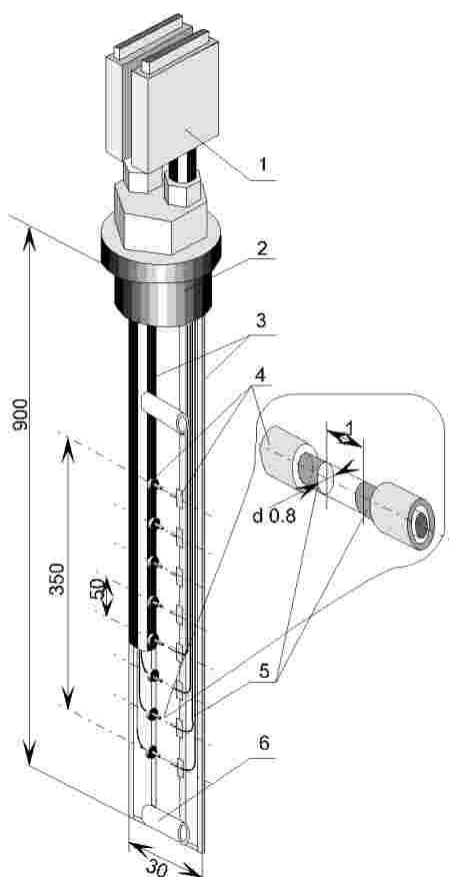


Рис. 1.9. Датчик акустического уровнемера, работающий по принципу прохождения ультразвука от излучателя к приемнику:

1 – блок предварительных усилителей; 2 – узел герметизации датчика;

3 – защитные чехлы; 4 – герметизирующие гильзы; 5 – волноводы;

6 – дистанционирующие элементы

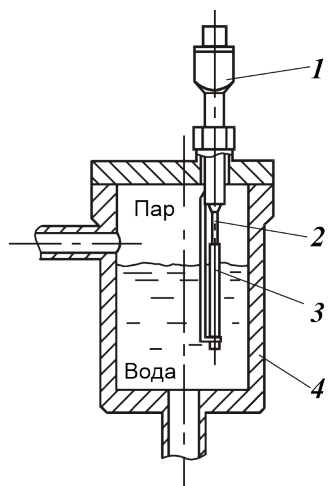


Рис. 1.10. Акустический уровнемер, работающий по принципу демпфирования ультразвуковых волн в стержне:

1 – узел крепления кабеля связи; 2 – волновод; 3 – чувствительный элемент;

4 – измерительный сосуд

Применяют уровнемеры, содержащие совмещенный излучатель-приемник, работающие в режиме излучение-прием (рис. 1.10), а также отдельные излучатель и приемник.

В литературе имеются данные о разработке уровнемера для водоводяного ядерного реактора, работающего на этом принципе

(рис. 1.11). В нем используются волноводы изгибных волн, составляющие три измерительные секции длиной 0,6 м каждая.

Для возбуждения ультразвуковых импульсов применены магнитострикционные преобразователи продольных волн с рабочей частотой 200 кГц, установленные на боковых поверхностях волноводов.

Уровнемер рассчитан на работу при температуре 95–345°C, давлении до 17 МПа, поток облучения 10^{15} нейтрон/см². В этих условиях погрешность составляет $\pm 1,5\%$, при постоянной времени 0,1 с, ресурс работы – 2000 ч.

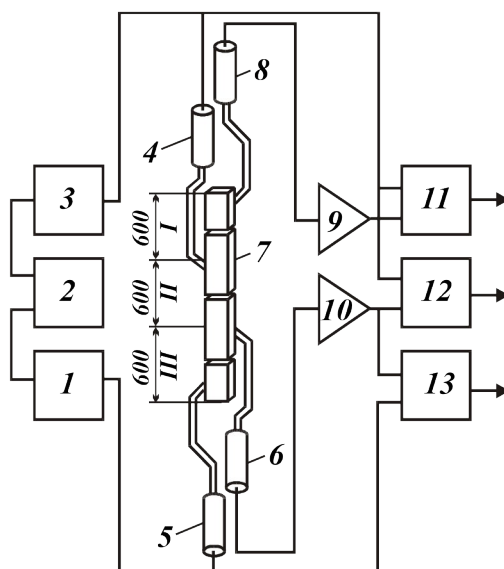


Рис. 1.11. Схема уровнемера, работающего по принципу затухания ультразвуковых волн в стержне:

1, 3 – усилители мощности; 2 – генератор импульсов; 4 – излучатель секций I и II; 5 – излучатель III секции; 6 – приемник секций II и III; 7 – стержень-датчик; 8 – приемник I секции; 9, 10 – усилители; 11, 12, 13 – амплитудно-аналоговые преобразователи

К недостаткам уровнемеров, работающих на принципе демпфирования ультразвука, относятся влияние на показания изменения волнового сопротивления теплоносителя, особенно при его вскипании. Для улучшения характеристик уровнемеров такого типа предлагается снабжать волновод искусственными отражателями, выполненными в виде неоднородностей: отверстий, проточек, насадок [17]. Отражатели используются в качестве амплитудных реперов, позволяющих определять затухание ультразвука на каждом участке волновода, независимо от общего затухания. Поэтому постоянная затухания в таком волноводе с отражателями может быть выбрана значительно большей.

В ядерной энергетике перспективны уровнемеры с волноводными чувствительными элементами, снабженные преобразователями, вынесенными из зоны с экстремальными воздействиями. Небольшие поперечные размеры датчика уровнемера такого типа позволяют размещать его практически в любом месте установки, в том числе в активной зоне реактора. Во многих случаях в качестве чувствительного элемента можно использовать стенки корпуса или трубчатые конструкции внутри корпусного оборудования реактора.

Исследование источников патентной информации показывает, что за последнее десятилетие в год предлагается в среднем 10-12 конструкций или усовершенствований ультразвуковых уровнемеров, из них около 10% относятся к разработкам волноводных датчиков, применение которых в ядерной энергетике представляется наиболее перспективным. Ведущими странами в области создания акустических средств уровнемеров являются Россия, США, ФРГ и Япония, на долю которых приходится 90-95% всех разработок в этой области.

1.2.4. Акустические методы определения давления теплоносителя

Известные методы измерения давления жидкого или газообразного теплоносителя основываются на определении акустических характеристик среды в контролируемом объеме, находящихся в функциональной зависимости от давления, либо на измерении деформации упругого чувствительного элемента ультразвуковым датчиком. Причем во втором случае чувствительный элемент и датчик могут быть совмещены и выполнены в виде, например, пьезоэлемента или кристалла кварца.

Наиболее разработан метод определения давления газа путем измерения его волнового акустического сопротивления [2]. Используя зависимость скорости звука в идеальном газе от давления P

$$c = \sqrt{P\gamma/\rho}, \quad (1.9)$$

где ρ – плотность газа; γ – показатель адиабаты, нетрудно получить формулу, связывающую волновое сопротивление с давлением

$$P = k_1 \rho c T^{1/2}, \quad (1.10)$$

где k_1 – константа.

В разработанном приборе для определения паров щелочных металлов ввод ультразвуковых импульсов в контролируемый объем и их прием осуществляется волноводами, дистанционированными при помощи акустического лабиринта [2]. Применение лабиринта задерживает прохождение ультразвука по стенкам измерительной камеры, что обеспечивает прием полезного сигнала с амплитудой на 2-3 порядка меньшей помехи. Выделение сигнала производится селекцией его во времени.

Принципиальная схема датчика приведена на рис. 1.12. Амплитуда полезного сигнала на выходе приемника при постоянной температуре пропорциональна величине волнового сопротивления газа и, следовательно, давлению среды.

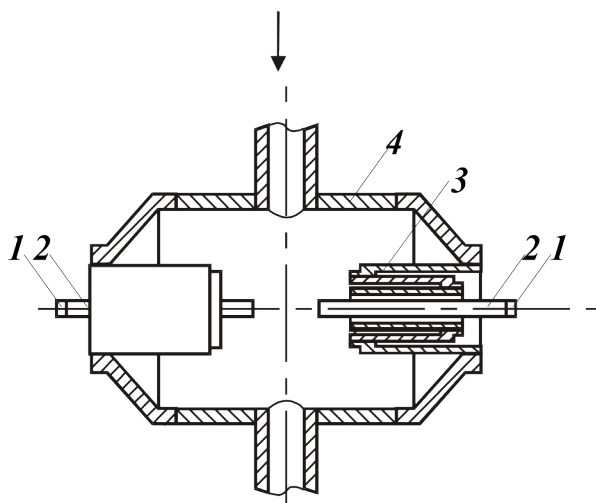


Рис. 1.12. Датчик давления газа:

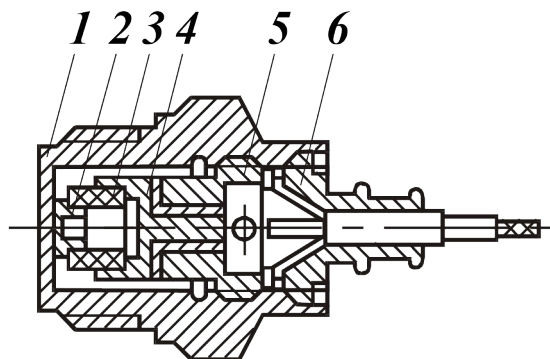
1 – пьезоэлемент; 2 – волновод;

3 – акустический лабиринт; 4 – измерительная камера

В металлических образцах под действием приложенного усилия возникает анизотропия скорости волн, что может быть использовано для измерения давления. Предложен метод измерения напряжений в металле, основанный на зависимости скорости сдвиговых волн от уровня нагрузки. В направлении приложения усилия скорость ультразвука увеличивается при сжатии образца и уменьшается при его растяжении. В перпендикулярной этому направлению плоскости скорость волн не меняется. Ультразвуковой манометр, основанный на этом принципе, содержит цилиндрический образец, пристыкованный к волноводу меньшего диаметра. К свободному концу волновода прикреплен пьезоэлемент. В режиме излучение-прием определяется время прохождения ультразвуковых импульсов по образцу, которое зависит от окружающего его давления. Манометр предназначен для работы в диапазоне высоких давлений – до 2000 МПа и требует учета температуры образца.

Большинство разработок акустических манометров основано на использовании в датчиках в качестве тензочувствительных элементов пьезокерамики. В одной из них тензочувствительный датчик содержит пару пьезорезонаторов, размещенных на упругом элементе, соединенном мембраной [20]. Под действием давления мембрана прогибается и передает усилие на упругий элемент, деформация которого ведет в свою очередь к деформации пьезоэлементов и изменению их резонансной частоты.

В другой – используются упругие элементы с возбуждением в них объемных или сдвиговых волн. Деформация упругого элемента ведет к изменению скорости звука в нем, что определяется при помощи двух пьезопреобразователей.



Датчики переменного давления погружного типа содержат один или несколько пьезоэлементов, обычно дискообразной формы, размещенных в гильзе, плотно прижатой к мембране дном (рис. 1.13).

Для надежной работы такие датчики

могут оснащаться жидкостной си-

Рис.1.13. Датчик переменного стемой охлаждения. Применение давления: нескольких пьезоэлементов позво-

1 – корпус; 2 – опора; 3 – пьезоэлемент; 4 – токосъемник; 5 – нажимная гайка; 6 – уплотнение кабеля

ляет компенсировать скачки температуры и уменьшить амплитуду разитных сигналов на выходе датчика.

Использование таких датчиков предполагает размещение их во внутриреакторном объеме, что вызывает проблемы обеспечения устойчивости пьезоэлементов. Применение жидкостного охлаждения приводит к использованию импульсных линий, снижающих безопасность энергетической установки.

Перспективно использование волноводов в датчиках акустической манометрии применительно к задачам ядерной энергетики. Однако в создании такой пригодной для промышленного использования системы измерения статического давления в литературе пока не сообщалось. Волноводные датчики переменного давления могут быть использованы лишь в ультразвуковом диапазоне частот, что ограничивает их применение в манометрии переменного давления.

Изучение источников патентной информации показывает, что в среднем в год предлагается 10-12 новых конструкций или усовершенствований акустических манометров постоянного давления.

Ведущими странами являются Россия, США, Япония и ФРГ, патентующие около 90% всех разработок в этой области.

1.2.5. Измерение паросодержания ультразвуковыми методами

Акустические методы измерения паросодержания изучались достаточно широко, причем большая часть работ посвящена экспериментальным исследованиям. Теоретически более полно изучены методы определения параметров жидких сред, содержащих пузырьки малого диаметра, когда их форма близка к сферической. Для этого случая и при малой концентрации газа в жидкости (объемная концентрация меньше 1%) предложено большое число методов измерений параметров среды, основанных на ее звукопроводности [21].

Интенсивность волны, прошедшей через слой двухфазной среды толщиной h с концентрацией пузырьков n_0 , составляет [22]

$$J_a = J_0 e^{-q n_0 h}, \quad (1.11)$$

где q – эффективное поперечное сечение поглощения звука пузырьками.

Основной вклад в сечение поглощения вносят пузырьки, радиус которых близок к резонансному на данной частоте облучения. Поэтому измерением ослабления звукового пучка на различных частотах можно определять как распределение пузырьков по размерам, так и их общую концентрацию.

На практике определяют коэффициент пространственного затухания звука как по однократному прохождению его через измеряемый объем, так и по измерению падения интенсивности звука, вследствие его многократных переотражений от стенок сосуда. Второй вариант предпочтительнее при низких концентрациях пузырьков. При этом обычно определяют время реверберации, т. е. интервал времени спада амплитуды сигнала в заданное число раз.

Количественные измерения данным методом проводят после предварительной калибровки прибора в условиях, близких к эксплуатационным. При этом опытным путем находят взаимосвязь между концентрацией пузырьков определенных размеров и коэффициентом пространственного затухания.

Различные варианты усовершенствованных устройств, реализующих описанный метод измерений, можно найти в [23-25].

Скорость звука в жидкости определяется сжимаемостью β и плотностью ρ [21]:

$$c = \sqrt{\frac{1}{\beta \rho}} \quad (1.12)$$

При небольших концентрациях пузырьков в жидкости ее плотность практически не меняется. Однако влияние пузырьков на сжимаемость велико, что и является физическим обоснованием определения паросодержания по изменению скорости звука.

В зависимости от частоты возбуждения скорость звука может возрастать или уменьшаться. Обычно применяют частоту возбуждения меньше резонансной частоты пузырьков. В этом случае сжимаемость среды увеличивается, затухание звука уменьшается, а скорость распространения не зависит от распределения пузырьков по размерам. Скорость звука в пузырьковой среде в этом случае можно оценить по соотношению [25]

$$c = c_0 \left(1 + 1,6 \cdot 10^4 \tau \cdot \frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.13)$$

где c_0 – скорость звука в обычной жидкости; τ – объемная концентрация.

Некоторые устройства, использующие принцип определения скорости звука для измерения паросодержания, приведены в [30].

Затухание звуковых волн в двухфазной среде значительно возрастает с увеличением концентрации пузырьков в жидкости, оно может достигать величин порядка 800 дБ/м на частотах 50-500 кГц [26]. Поэтому практически все приведенные методы, использующие интегральные характеристики звукопроводности контролируемого объема жидкости с большим числом пузырьков, становятся неэффективными уже при паросодержании свыше 1-2% и могут применяться лишь как индикаторы.

В элементах оборудования энергетических установок движение двухфазного теплоносителя отличается большим разнообразием. С ростом паросодержания пузыри сливаются, происходит расслаивание фаз и наблюдается последовательно целый ряд различных режимов течения. Распространение звука в таких условиях не изучено. Можно лишь отметить, что передача акустической энергии в среде с резко изменяющимися акустическими свойствами сопровождается значительным затуханием.

В реальных условиях, даже если удастся зарегистрировать ослабленный после прохождения через двухфазную среду сигнал, весьма сложно без априорной информации определить вследствие чего произошло поглощение звука. Следовательно, также затруднено получение количественной информации о соотношении фаз.

Существенный прогресс в решении задачи измерения паросодержания развитых двухфазных потоков по их акустической проводимости обеспечили акустозондовые методы, основанные на пропускании ультразвука через локальный объем контролируемой среды [3, 27-28]. Величину этого объема выбирают меньше или, по крайней мере, сравнимую с объемами диспергированных фаз в потоке. Тогда при определенных допущениях можно принять, что в контролируемом объеме находится либо только пар, либо только жидкость. При этом локальное истинное объемное паросодержание определяется соотношением

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{T}, \quad (1.14)$$

где τ_i – время нахождения i -го пузырька в контролируемом объеме; T – время измерений.

Для реализации акустозондовых методов были разработаны датчики, в которых для транспортировки акустических сигналов к измеряемому объему используются волноводные системы. Металлические волноводы малого диаметра позволяют без существенных потерь подводить ультразвуковые импульсы через стенки трубопровода и двухфазную среду к месту измерений и затем передавать их к приемнику. Индикация газовой фазы в контролируемом объеме производится по резкому уменьшению амплитуды принимаемых импульсов, образующих контролируемый объем (рис. 1.14, а).

Среднее паросодержание измеряется при помощи нескольких датчиков, расположенных в заданном сечении потока,

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N a_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^N a_i}, \quad (1.15)$$

где a_i – весовые коэффициенты.

Акустоимпедансные методы измерения паросодержания основаны на определении паросодержания в проволоке, погруженной в поток.

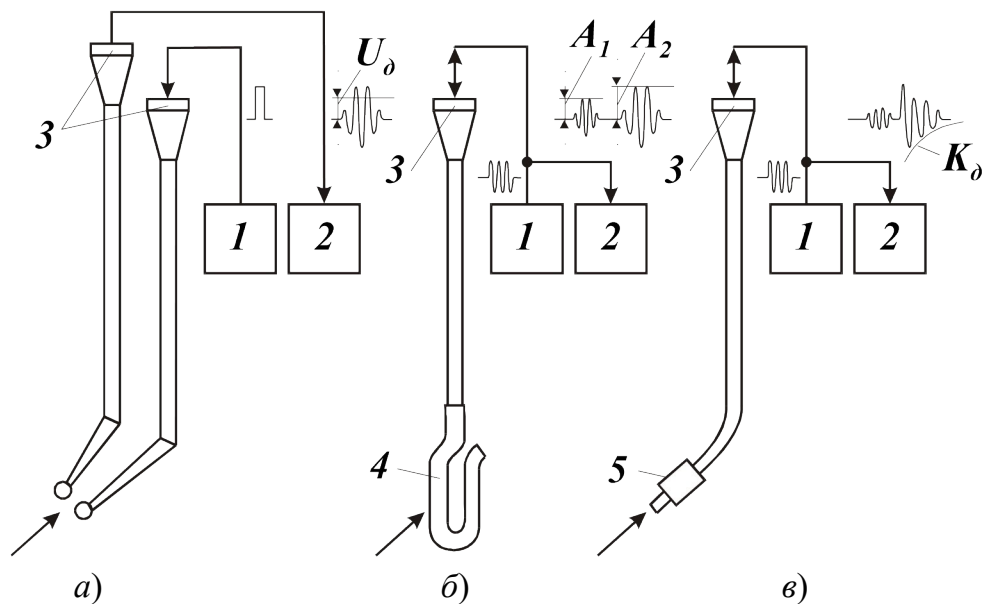


Рис. 1.14. Активные акустические методы

диагностики двухфазного теплоносителя: *а* – зондовый; *б* – импедансный; *в* – альбедный;

1 – генератор; *2* – вторичная аппаратура; *3* – пьезоэлементы;
4 – капилляр; *5* – резонатор

Первые сообщения, посвященные использованию эффекта демпфирования волновода измеряемой средой, относятся к началу 70-х годов [29]. Дополнительное затухание ультразвука, распространяющегося по волноводу, погруженному в жидкость, вызвано излучением волн в среду поверхностью волновода. При омывании волновода двухфазным потоком излучение энергии происходит только в тех местах поверхности, где в момент прохождения волны был контакт с жидкостью. Излучением звука в газовую среду в первом приближении можно пренебречь из-за большой разницы акустических волновых сопротивлений материала волновода и газа. Поэтому попадание в поток теплоносителя газовой среды ведет к уменьшению затухания, что и фиксируется. Интенсивность ультразвуковой волны вследствие излучения звука в среду на заданной частоте пропорциональна ее волновому акустическому сопротивлению и экспоненциально зависит от длины волновода.

Выражение, связывающее потерю амплитуды импульсов при прохождении по волноводу со средним газосодержанием потока, имеет вид

$$A = A_0 e^{-\alpha l} \quad (1.16)$$

где l – длина волновода; $(\square c)_0$ – волновое акустическое сопротивление жидкости; k – коэффициент пропорциональности.

Для повышения чувствительности метода используют волноводы большой длины. Свернутые в спираль они не только дают выигрыш в чувствительности, но и позволяют геометрически проинтегрировать данные измерений по сечению трубопровода [29]. Исключение влияния подводящей части волновода и повышение компактности датчика достигается за счет изготовления чувствительного элемента из тонкостенной трубки-капилляра, состыкованной с проволочным волноводом [30,31]. При этом ультразвуковые импульсы излучаются единственным преобразователем, установленным на свободном конце волновода (рис. 1.14, б). Выделением амплитуд разделенных во времени отраженных сигналов от места стыка волновода с капилляром и свободного кончика капилляра и определением их отношения удастся исключить влияние подводящего волновода на результаты измерений.

Если к свободному кончику волновода подключить миниатюрный резонатор, то по скорости затухания в нем резонансных колебаний, вызванных демпфированием окружающей его средой, можно определять фазовый состав теплоносителя (рис. 1.14, в).

Зондовые и импедансные методы эффективно работают в диапазоне паросодержаний 0–100% и вполне пригодны для использования в ядерной энергетике, так как основываются на применении волноводов, позволяющих вывести электроакустический преобразователь из зоны экстремальных воздействий.

По этим причинам значительно более ограничено применение метода измерения интегрального паросодержания по определению резонансных свойств пьезокерамического кольца, по которому пропускается контролируемый поток. Появление паровых пузырьков в потоке смещает частоту резонанса кольца, что фиксируется специальной схемой. Диапазон измерений паросодержания этим методом от 0 до 10-12%. В настоящее время этот метод может быть применен лишь в лаборатории и при близких к нормальным условиям.

1.3. Обзор акустических методов диагностики теплоносителя в элементах ЯЭУ и теплофизических экспериментах

1.3.1. Активные и пассивные методы диагностики теплоносителя в энергетических реакторах

Проблемы повышения безопасности ядерных установок стимулируют развитие новых методов и средств контроля теплоносителя на АЭС, состояние которого непосредственно связано с аномалиями в работе основного оборудования. Применение акустических методов контроля позволяет создавать дополнительные и независимые от других каналы получения информации о процессах в активной зоне реактора, теплообменном оборудовании и других элементах установки, в том числе и в аварийных ситуациях.

В системах контроля теплоносителя используют пассивные и активные методы. Первые основаны на измерении собственных шумов установки, вторые - предполагают ввод возмущения извне и определение характеристик датчика.

Активные акустические методы диагностики теплоносителя в технике энергетических реакторов развиваются в следующих направлениях:

- контроль технологических параметров теплоносителя: расхода, температуры, паросодержания, уровня;
- контроль за степенью нагрева теплоносителя в активной зоне;
- обнаружение вскипания теплоносителя в тепловыделяющих сборках (ТВС) реактора;
- обнаружение посторонних предметов в теплоносителе, в частности, подвсплывших ТВС в РБН;
- контроль за поведением теплоносителя в реакторе при аварийных процессах.

Методы контроля технологических параметров теплоносителя представлены в других параграфах, поэтому здесь мы не останавливаемся на их анализе. Отметим лишь одну интересную разработку, представляющую интерес для многих применений в ядерных реакторах. Для измерений давления, температуры и других параметров теплоносителя и ТВЭЛов натриевых реакторов предлагаются датчики с акустической связью без использования электрических кабелей [45]. Для этой цели в контролируемой зоне размещается колебательная система, собственная частота которой изменяется за счет измеряемого параметра, там же устанавливается устройство для возбуждения и приема колебаний.

Основная идея изобретения заключается в модуляции частоты колебаний, вводимых извне, сигналом колебательной системы. Для излучения и приема сигнала могут быть использованы как погружные, так и волноводные датчики.

Как уже указывалось, перегрев теплоносителя в натриевых реакторах может привести к взрывообразному осушению активной зоны с весьма серьезными последствиями. Поэтому контроль за недогревом натрия на выходе ТВС может служить эффективным средством повышения безопасности РБН.

Предложенные методы контроля за недогревом теплоносителя основаны на вводе дополнительной энергии внутрь активной зоны. Для подвода энергии можно использовать индукционный электронагрев [46], подогрев за счет гамма-лучей [47] или акустическую передачу энергии [2]. При электронагреве индуктор устанавливают в верхней части тепловыделяющей сборки и подачей энергии доводят теплоноситель до кипения. Существенными недостатками этого способа является необходимость электроподвода внутрь активной зоны и размещение индуктора в затесненном объеме. Более простым способом подогрева теплоносителя в активной зоне является использование потока гамма-излучения для радиационного нагрева. Для реализации способа внутрь активной зоны вводится тепловыделяющая сборка, выполненная из вольфрамовых стержней. Затеснение на входе создает необходимый пониженный расход теплоносителя через ТВС и обеспечивается выход в кипящий режим при превышении установленной мощности, который регистрируется по шуму акустическим датчиком. Недостаток способа с гамма-подогревом – сложность регулировки порога кипения.

Метод определения недогрева теплоносителя до кипения по вводимой акустической мощности, приводящей к возникновению кавитации, можно отнести к наиболее перспективным. Он основан на регистрации уровня подводимой акустической мощности, необходимой для возбуждения кавитации. Этот уровень уменьшается при приближении теплоносителя к состоянию насыщения, независимо от факторов, вызывающих это: падение давления (или расхода) повышение температуры и т. п. Реализация метода заключается в вводе в теплоноситель металлического стержня-волновода, один конец которого помещается в теплоноситель, а второй – выводится из корпуса реактора и снабжается акустическими излучателями и

приемником. Возбуждение колебаний производится на частоте 50 кГц. Возникающая кавитация на погруженном в теплоносителе конце волновода характеризуется более высокочастотным широкополосным спектром, поэтому легко селектируется и регистрируется. Предложено размещать ряд таких систем, распределенных по активной зоне реактора и позволяющих определять координаты потенциально опасной зоны.

Определение кипения жидкометаллического теплоносителя внутри ТВС может быть выполнено путем регистрации изменения акустического сигнала при прохождении его через сборку. Для этого к верхним и нижним концам ТВС подводятся волноводы для посылки и приема сигналов. При возникновении кипения скорость распространения звука по кипящей сборке уменьшается, что регистрируется фазовым детектором.

Для обнаружения и контроля отдельных частей и деталей внутри натриевой ванны в РБН применяют системы ультразвуковой визуализации. Внутрореакторная часть такой системы состоит из нескольких приемно-излучающих устройств, расположенных на определенных поворотных штангах, и ряда отражателей. Их работа основана на принципе локации объектов в заданном объеме. Используются режимы работы: излучение–прием, либо «на просвет». Второй вариант предпочтительней из-за лучшего разрешения за счет повышения отношения сигнал–шум, однако, требует организации вращательного движения датчиков для непрерывного контроля заданной области. Такие системы применяются в основном для обнаружения подвсплывших ТВС.

Активные акустические методы могут быть использованы для определения содержания газовой фазы в паро-водяной смеси, образующейся в корпусе ядерного реактора с водой под давлением в результате аварии, связанной с разгерметизацией первого контура. Метод основан на пропускании через объем корпуса ультразвуковых волн разной частоты. Определяются время их прохождения, а также наличие или отсутствие отраженных волн. Затем анализируются результаты сравнения времени прохождения волн различной частоты, и с учетом давления в корпусе делаются выводы о виде паровой фазы и равновесии смеси. В случае, если время прохождения ультразвука разных частот различно, то делается вывод о наличии в теплоносителе газовой фазы.

Преимуществом активных методов диагностики по сравнению с пассивными являются: возможность самоконтроля всего диагностического оборудования в любой момент времени; большая определенность получаемой информации; простота получения и обработки данных. Вместе

с тем, эти два направления в ряде случаев дополняют друг друга, позволяют получать разностороннюю информацию о процессах в теплоносителе и оборудовании ядерной установки.

Работы по развитию *пассивных методов* наиболее интенсивно ведутся по трем направлениям [3]:

- обнаружение вскипания натрия в реакторах на быстрых нейтронах (РБН) и определение места вскипания;
- диагностика режима кипения водяного теплоносителя в реакторах на тепловых нейтронах;
- контроль течей в парогенераторе натрий–вода.

В реакторах на быстрых нейтронах вскипание натрия рассматривается как возможная причина серьезной аварии ввиду положительного натриевого пустотного эффекта реактивности, а также из-за опасности массового расплавления ТВЭЛов и значительного разрушения активной зоны. Эти реакторы имеют весьма высокую теплонапряженность, и прекращение расхода теплоносителя через аварийную тепловыделяющую сборку (ТВС) приводит менее чем через одну секунду к полному ее осушению, а через 3-5 с – к плавлению топлива [37]. Возможен перегрев натрия, в результате которого осушение произойдет взрывообразно с ростом температуры топлива до 600 ± 50 °C/с. Высокая теплопроводность натрия и перемешивание потоков из отдельных ТВС не позволяют фиксировать начальную аварию по средней температуре на выходе.

Обнаружение и оценка кипения в каждой ТВС с помощью измерения температуры и расхода потребуют огромного числа датчиков, которые придется размещать в непосредственной близости от активной зоны. Если термопары размещать не над каждой ТВС, а располагать на некотором расстоянии от выходных окон, то аварийный сигнал будет существенно запаздывать. Также негативную роль играет инерционность самих термопар. В результате кипение будет обнаружено тогда, когда уже произошло значительное повреждение ТВЭЛов. Следует добавить, что в натриевом реакторе вывод сигнала от термопары на выходе из реактора требует надежной работы кабеля при температурах выше 550 ± 50 °C.

Для решения проблемы обнаружения локальных изменений условий теплоотдачи и возникновения кипения можно воспользоваться фиксацией и анализом акустических импульсов, возникающих при образовании паровых пузырьков. Для этого не обязательно иметь много датчиков и размещать их в областях вскипания теплоносителя. Возможная простота и очевидные

преимущества такого метода определили большой интерес к нему разработчиков РБН. Обзор публикаций по этому вопросу можно найти, например, в работах [38, 39]. Использованию акустических методов обнаружения кипения натрия в РБН способствует два обстоятельства. Во-первых, распространение сигнала здесь происходит в условиях однофазной среды, во-вторых, выход парового пузыря в сливную камеру с натрием, имеющим большой недогрев до температуры кипения, должен приводить к немедленному схлопыванию и акустическим импульсам, что облегчает нахождение места кипения.

В водо-водяных реакторах без кипения последствия вскипания теплоносителя в отдельных сборках не носят катастрофического характера, более того, в отдельных случаях подкипание теплоносителя, улучшающее теплосъем в активной зоне, может считаться допустимым явлением. Тем не менее, своевременное определение момента закипания и выяснение характера процесса кипения могут считаться необходимыми для предотвращения пленочного кипения, высыханий оболочек ТВЭЛов и их разрушения. В аппарате, где интенсивное кипение является нормальным явлением, применение пассивных методов встречает значительные трудности. Уже при сравнительно низком объемном паросодержании двухфазная среда становится акустически непрозрачной, величина затухания звуковых колебаний достигает сотен децибел на метр. Датчик, расположенный на периферии области с двухфазной средой, воспринимает в основном сигнал от периферийных участков этой области. Уровень сигнала из внутренних участков зависит от поглощения звука в двухфазной среде и от резонансов в системе и не всегда будет фиксироваться датчиком.

Пассивный акустический контроль оказался эффективным для диагностики состояния теплоносителя второго (натриевого) контура в РБН, в решении актуальной задачи обнаружения течей воды в натрий в парогенераторе [40]. Источниками шума при течи могут быть движение водяного пара в натрии, осцилляции пузырьков водорода, кипение натрия в зоне реакции и другие эффекты. Одним из главных преимуществ акустического метода перед другими является быстроедействие, позволяющее своевременно вывести парогенератор из работы до развития течи и значительного разрушения трубного пучка.

Наиболее трудной проблемой при внедрении методов пассивной акустической диагностики в ЯЭУ является выделение полезного сигнала из общего фоновых шума. Частотный диапазон акустических колебаний в

работающем реакторе простирается от долей Гц до единиц МГц и может быть использован для решения различных задач. Для решения задачи выделения полезного сигнала применяют все основные виды анализа: амплитудный, спектральный, временной, корреляционный [3].

Наиболее широкими возможностями для решения задач пассивной диагностики теплоносителя в ЯЭУ обладают методы распознавания образов [41]. Например, требуется произвести классификацию некоторой группы образов на основе совокупности признаков. Такими группами могут быть образы «кипит–не кипит», «кипит в данном объеме из четырех возможных» и т. д. Классификация основывается на некотором множестве признаков, формируемом из показаний датчиков. В это множество могут входить различные характеристики шумов: общий уровень, интенсивность в отдельных частотных полосах, корреляционные функции и др.

Выбор признаков в известной степени произволен и подбирается опытным путем. Упрощенная схема принятия решения показана на рис. 1.15. Задача классификации решается построением разделяющей

функции. Пусть имеется m возможных образов Φ , а X – вектор замера признаков. Разделяющая функция D_j определяется неравенством $D_j(X) \geq D_i(X)$; $i = 1, 2, \dots, m, i \neq j$, при условии, что данный вектор X представ-

ляет образ Φ_j . Уравнение $D_i(X) = D_j(X)$ выражает решающую границу. Простейшей разделяющей функцией является линейная комбинация

признаков $D_j(X) = \sum_{k=1}^n W_{jk} X_k$, где W_{jk} – соответствующим образом выбран-

ные весовые коэффициенты, а решающая граница представляет собой гиперплоскость в пространстве признаков. Процесс подбора весов W_{jk} на основе проведенных экспериментов (или расчетов) называется обучением системы распознавания. Разработаны общие рекомендации по отбору и упорядочению признаков, по выбору процедур классификации и обучения [41, 42].

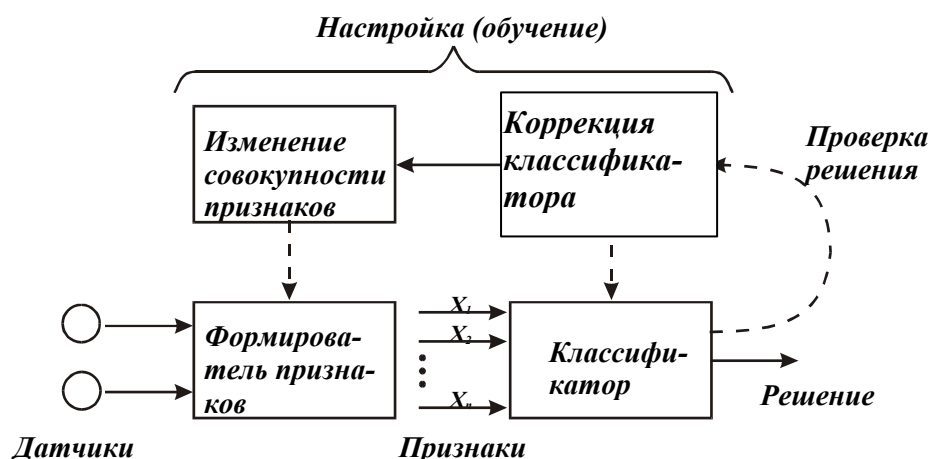


Рис. 1.15. Схема принятия решения при пассивной диагностике

В последние годы предложены разнообразные алгоритмы определения режимов течения теплоносителя в ТВС, основанные на методах распознавания образов [43,44]. В качестве определяющих признаков обычно используются уровни акустического шума в выбранных спектральных областях частот в диапазоне 1-200 кГц. Применяют алгоритмы, основанные на методе главных компонент, критерии максимального правдоподобия, а также проведения линейно разделяющих поверхностей. Описана специализированная аппаратура для реализации некоторых из перечисленных методов [44]. Она состоит из акустического датчика, подключенного через усилитель к ряду полосовых фильтров. Выходы фильтров через детекторы и интеграторы подключены к компараторам с задатчиками эталонных напряжений. В соответствии с процедурой применения алгоритмов распознавания образов необходима предварительная настройка аппаратуры, которая заключается в подборе эталонных напряжений по результатам «обучения», моделирующим процесс работы системы в составе конкретного оборудования. Следует

отметить, что при разработке пассивной акустической диагностики в системе дисперсного состава (особенно с двухфазным теплоносителем) выбор мест установки датчиков и информативных параметров являются решающими факторами, от которых зависят работоспособность системы. В ряде случаев проблемы, возникающие при этом, могут оказаться неразрешимыми либо потребуют серьезных изменений в конструкции основного оборудования, что часто неприемлемо.

1.3.2. Ультразвуковые методы, применяемые в теплофизических экспериментах ядерной энергетики

В ядерной энергетике в качестве среды, посредством которой осуществляется съем и передача тепла, используют поток одно- или двухфазного теплоносителя. Наиболее часто применяют воду, натрий и гелий.

Целью теплофизического эксперимента является, во-первых, определение параметров, необходимых при проектировании и разработке энергетической установки: коэффициентов теплообмена, объемного паросодержания, профилей скорости. Во-вторых, параметров, усредненных во времени, не используемых непосредственно при проектировании, но необходимых для составления аналитических моделей: толщины жидкой пленки, распределения фаз по сечению трубопроводов, их размера. И, наконец, необходимых для качественного физического понимания системы и ее строгого математического описания: пульсаций скорости, температуры стенки, структуры раздела фаз. В настоящее время акустические методы наиболее разработаны применительно к задачам диагностики двухфазных потоков, под которыми понимают получение информации о соотношении фаз, степени дисперсности, распределении по сечению и длине канала. В однофазном теплоносителе акустическими средствами можно получать данные о профиле скорости и температуре стенки, турбулентности потока и другую информацию.

Наиболее детальную и достоверную информацию о структуре двухфазного потока дают зондовые методы, а также методы сеточной томографии на их основе. В настоящее время созданы электрические, оптические, термические и акустические зонды. Каждый из этих типов зондов обладает своими достоинствами и недостатками, однако,

акустические зонды не имеют равных применительно к условиям ядерной энергетики.

Важнейшим качеством средств измерений, предназначенных для ЯЭУ, является их надежная длительная работоспособность в экстремальных условиях агрессивного теплоносителя. При этом ключевую роль играет материальное воплощение первичных датчиков. В этом смысле акустические зонды не имеют аналогов, в их рабочих элементах, погруженных в поток, могут быть исключены любые неметаллические материалы и использованы лишь основные конструкционные материалы. Другим практически важным качеством, которым обладают акустические зонды, является возможность определения при помощи единственного датчика не только паросодержания и плотности вероятности времени нахождения газовой фазы в контролируемом объеме, но и скорости перемещения межфазной границы. Скорость можно определить, измеряя интерференцию сигналов, приходящих непосредственно от излучающего к приемному волноводу и отраженных от поверхности пузырьков [3]. При помощи акустического зонда на основе миниатюрного резонатора возможно также определение температуры теплоносителя.

В настоящее время разработаны акустические зонды, состоящие из двух или одного волновода, а также сеточный датчик (томограф). Принцип работы зонда первого типа описан выше. Большими возможностями обладает резонансный зонд [32]. Поскольку в нем используется единственный волновод для излучения и приема сигналов, то габариты зонда могут быть значительно уменьшены, что повышает его разрешающие возможности. В этом зонде на кончик волновода, помещенного в поток, устанавливают миниатюрный резонатор. Ультразвуковые импульсы от преобразователя, размещенного на втором конце волновода, достигают резонатора, возбуждая в нем характерные затухающие сигналы, принимаемые теми же преобразователями. Скорость их затухания определяется излучением в среду и сильно зависит от фазового состава. При попадании на резонатор жидкости демпфирование сигналов резко возрастает, что и фиксируется вторичной аппаратурой. Используются частоты от 100 до 800 кГц. По статистическим параметрам сигналов зонда возможно определение локального паросодержания, скорости перемещения пузырьков в потоке, их размеров.

Зондовые методы позволяют определить параметры потока лишь в локальном объеме теплоносителя. Для интегрирования данных применяют

подвижные зонды либо установку нескольких зондов в измеряемое сечение потока и соответствующую обрабатывающую электронику.

Применение ультразвука во многих случаях позволяет вести теплофизические исследования без ввода в поток каких-либо зондов, определяя самые разнообразные параметры изучаемого объекта. Например, в работе [33] описан метод и установка для исследования геометрии, скорости подъема и роста пузырьков в жидком металле при помощи ультразвука. Использовалась цилиндрическая камера, в стенках которой закреплялся волноводный излучатель, формирующий кольцевое акустическое поле. Напротив излучателя устанавливался аналогичный приемник. Всплывающий одиночный пузырь, пересекая кольцевое акустическое поле, давал на выходе приемника характерный сигнал с двумя провалами, возникающими вследствие экранировки пучка в двух местах. Полагая скорость всплытия и траекторию движения пузыря постоянной, оценивали его размеры и форму.

Для исследований динамики процессов в двухфазных системах с четкой границей раздела фаз применялась методика ультразвуковой локации импульсами с частотой 5 МГц [34]. Эту методику использовали для изучения процессов парообразования на перегретых локальных участках плоских стенок. Предложенный метод особенно эффективен при высоких параметрах теплоносителей, где визуальные наблюдения затруднительны.

Метод, основанный на нелинейных свойствах газовых пузырьков в жидкости, заключается в искусственной стимуляции излучения звука пузырьками на резонансной частоте при облучении их двумя высокочастотными пучками ультразвука различной частоты (рис. 1.16) [35]. Возбуждение резонансных колебаний происходит в случае совпадения резонансных частот с частотой собственного резонанса пузырьков. При этом удастся исключить влияние на измерения твердых рассеивателей, которые не дают нелинейного отклика. С ростом паросодержания акустическая проводимость среды уменьшается и метод становится неэффективным. Этим методом можно определять распределение пузырьков по размерам и их плотность при низком паросодержании.

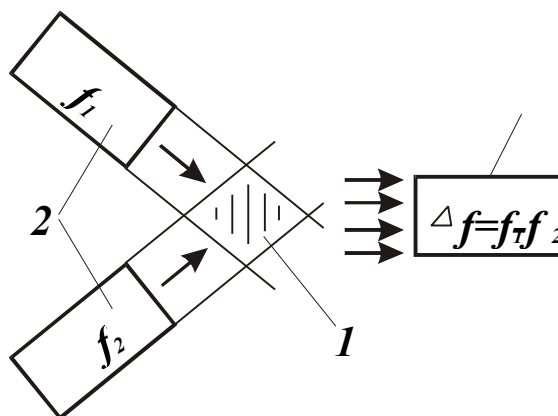


Рис. 1.16. Схема обнаружения пузырьков в теплоносителе по нелинейному отклику:

1 – контролируемый объем; *2* – излучатели; *3* – приемник

Рассеяние ультразвука на пузырьках в потоке теплоносителя позволяет определять не только их размеры, но и скорость перемещения. Устройство для таких измерений содержит пьезоэлектрический излучатель и приемник ультразвука, разнесенных по трубопроводу [36]. По амплитуде отклика оценивают количество газовой фазы в потоке, а доплеровское смещение частоты позволяет определять скорость их движения.

Материалы о применении акустических методов диагностики однофазного теплоносителя в литературе практически отсутствуют, что свидетельствует о значительной сложности этой задачи.

1.3.3. Визуализация структуры двухфазного потока с использованием ультразвука

В последние годы на фоне бурного развития электронновычислительной техники, с ростом производительности компьютеров возникло новое направление в измерительной технике – томографические системы, или системы визуализации. Применительно к процессам исследования двухфазных потоков системы визуализации позволяют получить: информацию об «истории» потока; картине газораспределения; взаимном движении фаз, их локализации и размерах. При решении задач визуализации наиболее важной целью является разработка диагностической системы с разрешением, позволяющим идентифицировать отдельные газовые (пузырьки, снаряды) и жидкие

(пробки, капли) фракции и определить их параметры (форму, объем, диаметр и т.д.).

В настоящее время разработаны бесконтактные и контактные системы визуализации. В системах бесконтактного типа датчики не содержат частей, внедренных в поток, а используется какое-либо проникающее излучение для получения проекций распределения определенных физических свойств вещества (например, показатель преломления, ослабление излучения и т.д.) в измеряемом поперечном сечении. По этим проекциям компьютером осуществляется восстановление изображения сечения по алгоритмам реконструктивной вычислительной томографии. Первичные преобразователи в системах контактного типа содержат чувствительные элементы (проволочки, стержни), помещенные непосредственно в контролируемый поток, при этом для уменьшения (минимизации) влияния этих контактирующих с теплоносителем элементов на измеряемые параметры используются различные технические решения (уменьшение диаметров чувствительных элементов, придание им специальной обтекаемой формы и т.д.). В таких системах восстановление изображения осуществляется по анализу характеристик сигналов, прошедших через контролируемые объемы, равномерно распределенные в измеряемом поперечном сечении.

Для бесконтактного исследования двухфазных потоков при помощи ультразвуковой техники применяется ультразвуковая отражательная томографическая система визуализации. Представленная в работе [7] ультразвуковая отражательная система с круговым массивом из 36 преобразователей позволяет генерировать реконструированные изображения в среднем со скоростью 30 кадров в секунду.

Методика измерения, реализованная в этой системе, следующая (рис. 1.17): последовательно друг за другом один из преобразователей излучает ультразвуковые импульсы и вместе со всеми улавливает эхосигналы. Информация о номере излучателя, номере приемника и времени прихода отраженного сигнала сохраняется в памяти компьютера. По времени прихода эхо-сигналов находится геометрическое место точек (эллиптическая или круговая дуга), на котором может лежать граница объекта, отразившего импульсы. Налагаясь друг на друга, на графическом дисплее компьютера кривые, полученные от разных преобразователей, формируют изображения объектов отражателей. В ситуации, когда нет никаких объектов, лежащих на пути между излучателем и приемником на

противоположных сторонах трубы, проекцией будет прямая линия, т. е. будет задетектировано прямое прохождение сигнала. Эта информация используется для улучшения качества изображения.

Наиболее существенными недостатками этой системы визуализации, даже при исследовании потоков с низким паросодержанием, является рассеяние эхо-сигналов и, как следствие, «смазывание» изображения, низкая скорость визуализации, которая зависит от сложности восстанавливаемого изображения.

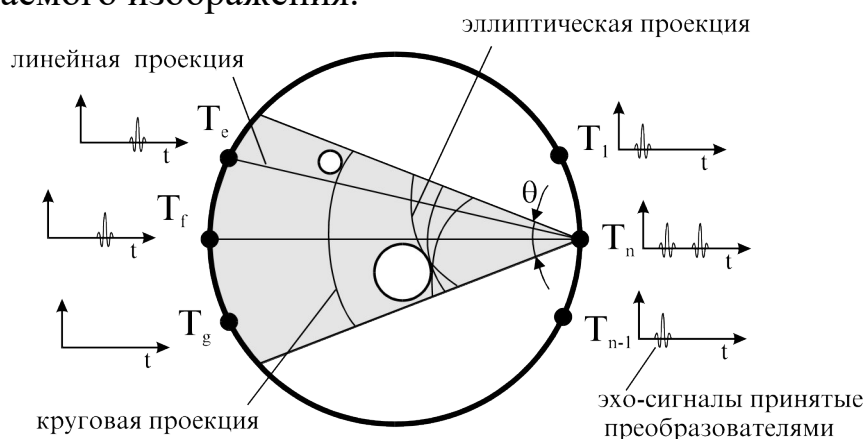


Рис. 1.17. Схематичное представление реконструкции сечения потока, применяемой в ультразвуковой отражательной томографии: T_1 - T_n – ультразвуковые преобразователи; Θ – ширина луча

Следует также отметить, что ультразвуковая отражательная техника работоспособна только в ограниченных режимах с достаточно редкими и крупными пузырями, так как в потоке с развитым пузырьковым течением ядро потока будет полностью блокироваться окружающими пузырьками.

Кроме этого, ее быстродействие существенно зависит от сложности исследуемых объектов.

Контактная система высокоскоростной визуализации нестационарных двухфазных потоков, основанная на измерении электропроводности, впервые описана в [9]. Несмотря на то, что в приборе не используются сложные и неточные математические алгоритмы, он обладает высокими разрешающими характеристиками.

Позже аналогичный решеточный датчик, но на основе ультразвуковых волноводов, был разработан для высокоскоростной

ультразвуковой волноводной многоточечной системы визуализации, основанной на измерении акустической проводимости двухфазной смеси (рис. 1.18).

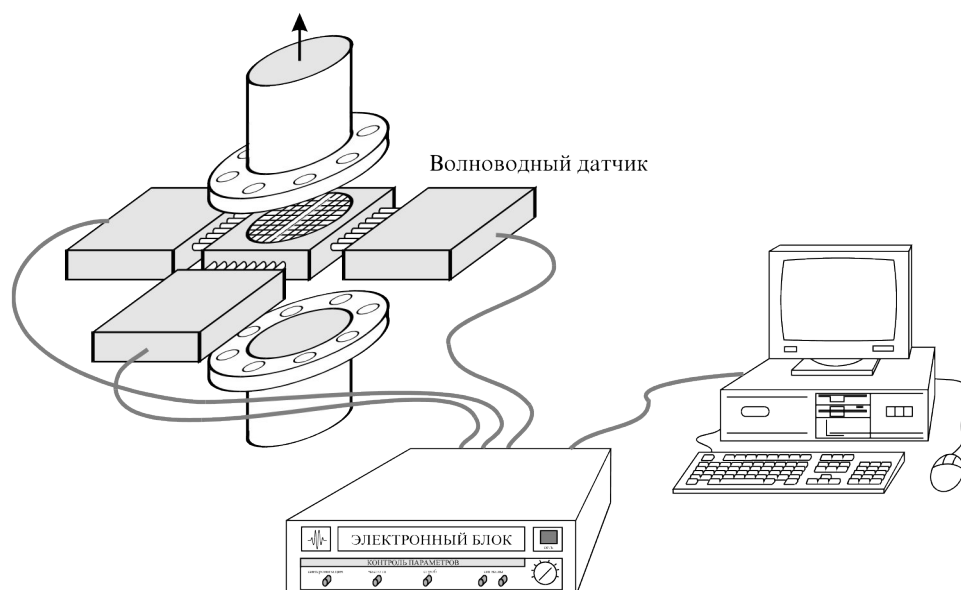


Рис. 1.18. Компоновка волноводной системы визуализации

Упрощенная четырехволноводная схема решеточного датчика показана на рис. 1.19. Электрические импульсы, генерируемые электронным блоком, преобразуются пьезоэлементами в акустические волны и излучаются цилиндрическими волноводами. Если в контролируемом объеме находится жидкость (вода), то затухание ультразвука, проходящего через контролируемый объем, незначительно, акустические колебания достигают приемного волновода и, после преобразования в электрические сигналы, поступают в электронную систему обработки. Если в контролируемом объеме находится газовая фаза, то ультразвук затухает и не достигает приемного волновода.

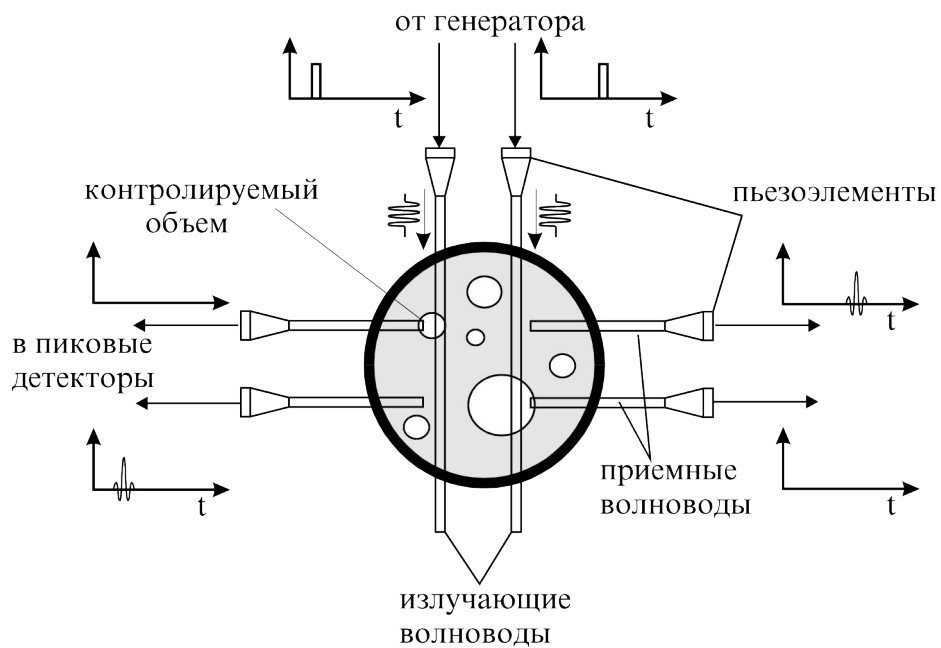


Рис. 1.19. Упрощенная четырехволноводная схема акустической волноводной измерительной системы

Излучение акустической энергии в данной системе осуществляется вследствие радиальных колебаний излучателей. Затухание продольной акустической волны в цилиндрическом волновоеде длиной l , погруженном в измеряемую среду, вызванное излучением, описывается выражением

$$A = A_0 e^{-\alpha l}, \quad (1.17)$$

где α – коэффициент затухания:

$$\alpha = \frac{a \omega^2 v^2 \rho c}{E c_{ст}}, \quad (1.18)$$

где a – радиус волновода; ω – циклическая частота продольной ультразвуковой волны; ρc – акустическое волновое сопротивление; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга материала волновода; $c_{ст}$ – стержневая скорость.

Излученные акустические колебания распространяются через среду - двухфазный поток – от излучающего волновода к приемному через соответствующие контролируемые объемы.

Амплитуда сигналов, прошедших через каждый контролируемый объем, измеряется. Эта амплитуда пропорциональна акустическому волновому сопротивлению среды

$$Z = \rho c, \quad (1.20)$$

где ρ – плотность среды; c – скорость звука в ней.

Через жидкость (воду), вследствие сравнительно высокого по сравнению с газом (паром) акустического волнового сопротивления, $\rho c_{\text{воды}} = 1,5 \cdot 10^6$ кг/м²с, передача ультразвука происходит достаточно эффективно. Через газ (при прохождении воздушного пузыря через контролируемый объем) из-за гораздо меньшего акустического волнового сопротивления ($\rho c_{\text{воздуха}} = 300$ кг/м²с) сигнал практически не проходит. Фактически наблюдается полное исчезновение акустического сигнала (если пренебречь паразитными просачиваниями через конструктивные элементы датчика).

1.4. Вопросы совершенствования средств диагностики теплоносителя. Перспективные направления развития

Приведенный аналитический обзор акустических методов контроля и диагностики показывает, что область их применений в энергетике практически неограниченна. Это контроль основных параметров: расхода, температуры, уровня, паросодержания теплоносителя; обнаружение опасных аномалий в работе оборудования; кипения теплоносителя, течей в теплообменниках; слежения за процессами при развитии аварий, пуске и отладке оборудования. Однако практическое применение акустических методов на промышленных ЯЭУ пока ограничено единичными разработками, а в России практически отсутствует. Другой перспективной областью использования акустических средств являются гидродинамические исследования: изучений аварий, связанных с потерей теплоносителя, процессов тепломассопереноса в ячейках ТВС, устойчивости естественной циркуляции двухфазного теплоносителя. Но и такие применения акустических приборов значительно меньше существующих потребностей.

Вместе с тем, в отечественных ЯЭУ с интегральной компоновкой активной зоны (ВВЭР, БНР, АСТ) многие важные параметры теплоносителя определяются косвенным путем или не контролируются

вообще. Это относится, например, к измерению расхода теплоносителя в каналах ТВС и паросодержания. При проведении гидродинамических исследований на полномасштабных сборках практически не исследуется локальные параметры двухфазного потока в межтрубном пространстве, распределение скоростей фаз и паросодержания. Ощущается нехватка быстродействующих приборов для контроля параметров в экспериментах по безопасности

ЯЭУ, в частности, в опытах по исследованию процессов осушения активной зоны.

Отсутствие необходимого набора измерительных средств для ядерной энергетики обусловлено трудностями материального воплощения источников первичной информации о процессах в экстремальных условиях ЯЭУ при существенных ограничениях по размерам и возможного размещения, а также по безопасности. Другими словами, нет требуемых датчиков, служащих информационной основой диагностики и контроля.

Применяемые в настоящее время традиционные средства контроля параметров теплоносителя основаны на самых разнообразных физических принципах: механических, электромагнитных, акустических. Каждое из этих средств разработано на своей технологической и научной базе и в большинстве случаев положительные стороны какой-либо из разработок не могут быть перенесены на другие и использованы в другой области измерительной техники. Кроме того, традиционные средства измерений достигли высокой степени совершенства, и их качественного улучшения ожидать не приходится.

Все это вынуждает разработчиков атомной техники искать новые пути получения информации о процессах. Как видно из обзора, именно акустические методы позволяют создавать широкий набор измерительных средств для контроля практически любого параметра теплоносителя. В них заложена общая информационная основа, что позволяет при сравнительно небольших затратах быстро внедрять эти средства в промышленность. Развитию и использованию акустических методов диагностики и контроля весьма способствует появление дешевых и мощных информационно-измерительных систем, в том числе на основе микропроцессоров. Все это дополняется уникальной способностью акустических датчиков работать при любых параметрах водяного, жидкометаллического и газового теплоносителя.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИЙ ВОЛНОВОДНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

2.1. Особенности акустических датчиков для диагностики теплоносителя ЯЭУ

Применение и развитие акустических методов диагностики теплоносителя находится в прямой связи с прогрессом в разработке конструкций и технологии изготовления средств приема и излучения акустических волн, способных работать в экстремальных условиях ЯЭУ. Хотя к настоящему времени имеется большое число разработок термо- и радиационностойких датчиков, вопросы создания надежных и пригодных для массового производства средств приема и излучения звука в оборудовании ЯЭУ пока нельзя считать решенными. Разработка акустических датчиков для диагностики теплоносителей является комплексной проблемой, включающей в себя решение ряда конструктивных, технологических, акустических и электромеханических задач. Выбор материалов и конструкцию датчиков существенно ограничивают воздействие интенсивных потоков нейтронного и γ -

излучения, высокой температуры и давления, а также агрессивность теплоносителя.

Сложились два направления решения проблемы устойчивости датчиков в экстремальных условиях ЯЭУ. Первое связано с использованием звукопроводов (волноводов), когда электромеханический преобразователь выносится из зоны с высокой температурой, подверженной воздействию реакторных излучений, а акустическая связь его с чувствительными элементами осуществляется волноводами. Второе основано на применении теплостойких пьезоактивных материалов и высокотемпературных электрических кабелей либо принудительного охлаждения датчика.

Для целей акустической диагностики теплоносителей ЯЭУ используются сигналы с частотным диапазоном от долей Гц до 10 МГц.

Верхняя граница диапазона ограничена резким увеличением поглощения ультразвука в конструкционных материалах и рабочих средах установки. Типичная область применения погружных датчиков до 200 кГц обусловлена минимально возможными габаритами корпуса и внутренних деталей, частоты паразитных резонансов которых обратно пропорциональны размерам. Преобразователи погружных датчиков могут изготавливаться как из пьезокристаллических, так и магнитострикционных материалов.

Волноводные датчики применяются в диапазоне частот 50-10 000 кГц, где могут быть подавлены низкие резонансы звукопровода. С ростом частоты вследствие увеличения затухания ультразвука относительная ширина и плотность резонансных пиков на единичный относительный интервал частот возрастает, происходит их наложение друг на друга, что ведет к сглаживанию частотной и фазовой характеристик датчика. Этим процессом можно управлять, вводя дополнительное демпфирование поверхности волновода. Электромеханическое преобразование сигналов волноводных датчиков до 200-300 кГц производится как пьезокерамическими, так и магнитострикционными элементами. На более высоких частотах, как правило, применяется пьезокерамика. Ограничение по частоте для применения магнитострикторов связано с технологическими сложностями изготовления малогабаритных катушек и деталей крепления, а также со снижением чувствительности датчиков.

При решении многих задач диагностики требуется размещение датчиков вблизи активной зоны, в парогенераторах и теплообменном оборудовании, то есть там, где экстремальные воздействия максимальны, а выбор места и объема для установки датчика существенно затруднены. В этих условиях применение волноводных датчиков часто является единственно возможным решением. Контроль технологических параметров теплоносителя в более доступных местах, например, в трубопроводах и на стендах обладает большими возможностями по выбору конструкции датчиков.

Однако и в этом случае применение волноводных систем целесообразно ввиду их существенно более высокой стойкости к температурным воздействиям, увеличенному ресурсу и ремонтпригодности, низкой стоимости изготовления. Если учесть, что уровень технологических шумов в оборудовании с ростом частоты существенно уменьшается и на частотах свыше 100 кГц минимален, а большинство задач диагностики, как следует из обзора, легче решить с использованием сигналов ультразвуковой частоты, то очевидно наиболее приемлемыми для диагностики теплоносителя являются волноводные датчики с пьезокерамическим преобразователем.

В них применением волновода из основного конструкционного материала решают проблему термо- и радиационной стойкости датчика, поскольку преобразователь может быть вынесен в зону с параметрами окружающей среды, близкими к нормальным. Это позволяет с минимальными потерями, целенаправленно подводить зондирующие импульсы даже через двухфазную среду к контролируемому объему потока теплоносителя. Сочленение чувствительного элемента и блока электромеханического преобразования акустическими разъемами с волноводом упрощает монтаж датчика в оборудовании и увеличивает его ремонтпригодность, а выполнение преобразователя из пьезокерамики существенно упрощает конструкцию датчика и расширяет диапазон его рабочих частот.

В волноводном датчике выделим следующие составные части: акустический преобразователь, волновод связи и чувствительный элемент (рис. 2.1)

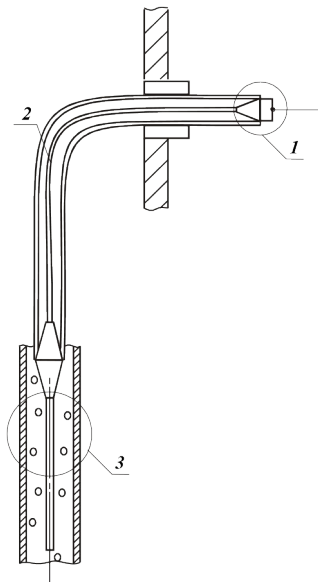


Рис. 2.1. Схема волноводного акустического датчика

1 – акустический преобразователь;
2 – волновод связи; 3 – чувствительный элемент

Динамические свойства датчика определяются конструкцией и размерами преобразователя и представляются амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), имеющей обычно резонансный вид. Положение резонансного максимума на частотной оси дает рабочую частоту датчика, с учетом которой и поставленной задачи выбирают чувствительный элемент. Волновод связи должен обеспечивать передачу ин-

формационных и зондирующих акустических сигналов между преобразователем и чувствительным элементом с необходимой скоростью и приемлемыми искажениями.

Роль чувствительного элемента заключается в акустическом согласовании контролируемого объема теплоносителя с волноводом связи с учетом требований его размещения и габаритов.

Коэффициент передачи волноводного датчика определяется произведением

$$K_d = K_{пр} \leftarrow K_{ч.э} \leftarrow K_{св1} \leftarrow K_{св2} \leftarrow \exp(-\mathfrak{D}_{в.с} \leftarrow l), \quad (2.1)$$

где $K_{пр}$ – коэффициент передачи электромеханического преобразователя, равный отношению амплитуды акустического сигнала на выходе волновода связи к амплитуде электрического сигнала на выходе датчика; $K_{ч.э}$ – коэффициент передачи чувствительного элемента, равный отношению изменения величины измеряемого параметра в контролируемом объеме теплоносителя к изменению амплитуды акустического сигнала на входе чувствительного элемента; $K_{св1}$, $K_{св2}$ – коэффициенты передачи соединительных элементов волновода связи с преобразователем и чувствительным элементом; $\mathfrak{D}_{в.с}$ – коэффициент затухания на единицу длины волновода связи в подвеске, 1/м; l – длина волновода связи, м.

Разработка реального волноводного пьезодатчика для диагностики теплоносителя предполагает исследование вопросов распространения ультразвуковых волн в стержнях, проволоках, капиллярах и влияния на этот процесс технологических и конструктивных факторов, а также изучение работы пьезокерамических преобразователей нагруженных на волновод.

Эти вопросы рассматриваются далее в настоящей главе.

2.2. Физические основы волноводных акустических линий связи

2.2.1. Назначение линий связи и их состав

Акустическая волноводная линия связи является информационным каналом, обеспечивающим передачу диагностических и информационных сигналов между преобразователем и чувствительным элементом в экстремальных условиях: поле ионизирующих излучений, высокая температура и давление. В зависимости от условий применения волноводная линия связи может быть выполнена жесткой или гибкой. Жесткая линия выполняется, как правило, в виде единого целого с подвеской кругового или прямоугольного сечения, весьма устойчива в поле вибрационных и ударных воздействий, ее применение целесообразно в транспортных установках. Гибкая линия связи содержит волновод, в качестве которого используется проволока различного сечения, и трубчатую подвеску. При ее использовании существенно ослабляется ограничение на места установки датчика, чувствительный элемент которого по направляющей трубе может быть помещен практически в любой точке оборудования ЯЭУ. Основная область применения датчиков с гибкой линией связи - стационарные установки.

В акустическую волноводную линию связи входят: волновод связи; подвеска волновода; узлы герметизации выводов волновода. Волновод связи, чаще всего, выполняется в виде стержня или ленты, реже в виде продольного ребра на поверхности трубы, пластины или цилиндрического стержня. Могут быть использованы и другие конфигурации (рис. 2.2). Роль волновода заключается в организации направленного потока акустической энергии. Подвеска волновода и узлы герметизации обеспечивают защиту волновода связи от внешних воздействий, прежде всего, от

демпфирующего действия теплоносителя и конструктивных элементов установки.

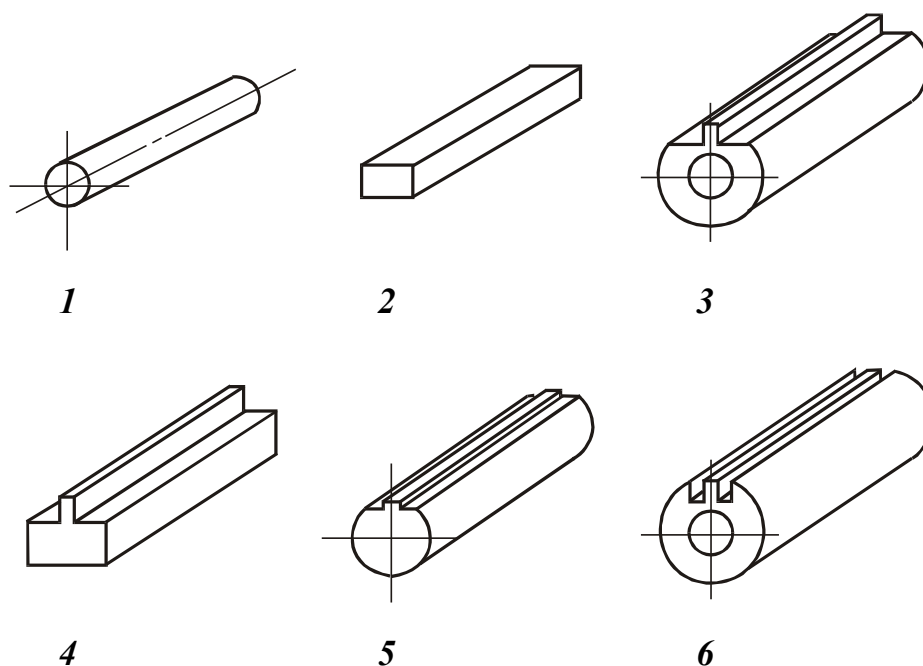


Рис. 2.2. Конструктивные элементы, используемые в качестве волноводов связи:

1 – стержень (проволока); 2 – лента; 3 – ребро на поверхности трубы;
4 – ребро на поверхности пластины; 5 – ребро на поверхности цилиндра;
6 – полоса, встроенная в трубу

Линия связи должна обеспечивать заданную скорость передачи информации с минимальными искажениями на требуемую дистанцию при воздействии технологических факторов ЯЭУ. Для решения этой задачи необходимо исследовать закономерности распространения акустических волн в волноводах, условие проводки акустических сигналов через узлы герметизации, влияние подвески и внешних воздействий на передачу сигналов и возникновение паразитных колебаний.

2.2.2. Закономерности волноводного распространения ультразвука в стержнях и пластинах

В акустических линиях связи находят применение нормальные волны нулевого порядка: продольные, крутильные и изгибные. Теория их

распространения приведена автором в работе [3], поэтому здесь даются только основные результаты исследования.

В цилиндрических волноводах продольные волны описываются уравнением Похгаммера [3]:

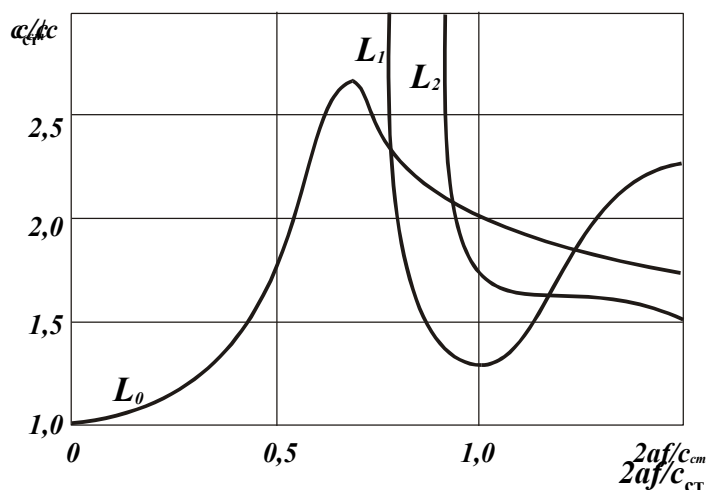
$$\frac{2\alpha}{a}(\beta^2 - \gamma^2)J_1(\alpha a)J_1(\beta a) - (\beta^2 - \gamma^2)J_0(\alpha a)J_1(\beta a) - 4\gamma^2\alpha\beta J_1(\alpha a)J_0(\beta a) = 0, \quad (2.2)$$

$$\alpha^2 = \frac{\omega^2}{c_l^2} - \gamma^2; \quad \beta^2 = \frac{\omega^2}{c_\tau^2} - \gamma^2; \quad \gamma^2 = \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{2\lambda}{\pi} \quad \omega c - \text{постоянная распространения;}$$

где $\alpha = l/\lambda \rightarrow$

\bullet – длина волны; c – фазовая скорость звука в волноводе; \diamond – круговая частота; $c_l = \sqrt{\frac{(2-\mu-\lambda)}{\rho}}$ – скорость продольных волн; $c_\tau = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$ – скорость сдвиговых волн; a – радиус волновода; λ – постоянная Ламе; ρ – плотность материала волновода; J_0, J_1 – функция Бесселя.

Это уравнение имеет три переменные, допустимые значения каждой из них определяются двумя другими. Обычно этими переменными пользуются в безразмерном виде и применяют коэффициент Пуассона μ , частоту распространения $F=2fa/c_{ст}$ и постоянную распространения γ_0 . Здесь $c_{ст}$ – скорость продольных волн нулевого порядка в стержнях при $f \rightarrow 0$.



**Рис. 2.3. Дисперсионные кривые и родольных волн
в цилиндрических волноводах**

Используя дисперсионное уравнение, определяют зависимость постоянной распространения γ_0 от частоты при заданных свойствах материала волновода и его радиуса. Тем самым находят взаимосвязь между фазовой скоростью акустической волны и частотой. Уравнение (2.2) имеет бесконечное число корней, кратность которых с ростом F возрастает, его решение в большинстве случаев возможно лишь численными методами. Характерный вид дисперсионных кривых для продольных волн при $\nu=0,33$ показан на рис. 2.3.

Выделяя в области низких частот продольную волну нулевого порядка, легко видеть, что она обладает минимальной дисперсией (зависимостью скорости звука от частоты), является единственным типом продольных волн в этой области и имеет максимальную скорость распространения. Эти качества позволяют эффективно подавлять паразитные сигналы. Простота возбуждения в них акустических колебаний, малое затухание, компактность и технологичность изготовления звукопроводов малого сечения способствует широкому применению продольных волн нулевого порядка в волноводных датчиках для диагностики оборудования ЯЭУ.

Предельное значение скорости волн нулевого порядка можно получить из дисперсионного соотношения (2.2), положив в нем $\sin a \ll 1$; $\cos a \ll 1$, что соответствует $F \rightarrow 0$. Прделав необходимые преобразования, получаем

$$\alpha^2 \beta^2 \gamma^2 - \beta^2 \gamma^2 - 4\alpha^2 \gamma^2 = 0. \quad (2.3)$$

Подставив в (2.3) соотношения для постоянных Ламе, получим

$$\lambda + \mu = \frac{2\nu}{1-\nu} E; \quad \mu = \frac{2(1-\nu)}{1+2\nu} E, \quad (2.4)$$

где E – модуль Юнга; ν – модуль Пуассона.

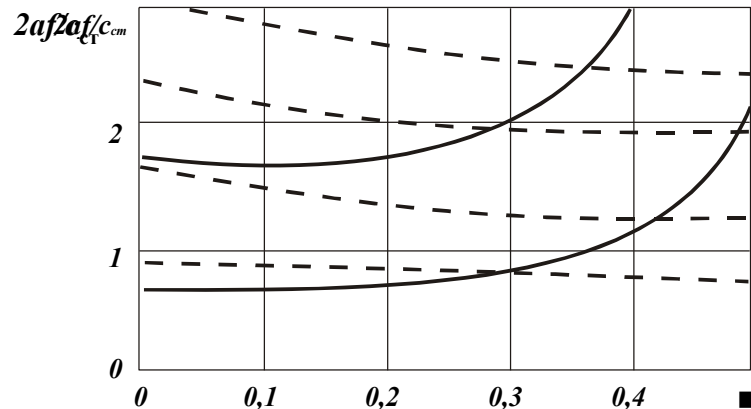


Рис. 2.4. Зависимость частот записания продольных волн в цилиндрических волноводах от коэффициента Пуассона

Нетрудно получить

$$\gamma = \frac{\omega^2 \rho}{E}, \quad (2.5)$$

откуда непосредственно следует фазовая скорость продольных волн в стержне

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = c_{ст}. \quad (2.6)$$

Полученное предельное значение скорости в волноводе совпадает со значением групповой скорости в стержнях (стержневой скоростью).

У продольных волн первого порядка и выше существуют частоты среза, ниже которых их распространение прекращается. При этом нормальные волны вырождаются и колебательный процесс быстро затухает

вблизи места возбуждения. Выбор спектра зондирующих импульсов с учетом этого фактора позволяет исключить возникновение паразитных сигналов, связанных с возбуждением продольных волн высших порядков. На рис. 2.4 представлены расчетные зависимости частот запираения от коэффициента Пуассона.

Особенностью крутильных волн является наличие только одной компоненты смещения U_z . Дисперсионное уравнение крутильных волн имеет вид

$$2J_1(\beta a) J_0(\beta a J_0(\beta a)) = 0. \quad (2.7)$$

Оно определяет бесконечный ряд корней, задаваемый соотношением $\partial \mathcal{L}_p a = R_p$. Первые четыре значения R_p равны 0; 5,136; 8,417; 11,620. При $\partial \mathcal{L}_p a = 0$ компоненты смещения записываются в виде

$$U_z = B \exp(j \gamma z) \exp(i \omega t). \quad (2.8)$$

Это решение описывает крутильную волну нулевого порядка, не обладающую дисперсией, скорость ее распространения равна c .

Крутильные нормальные волны более высоких порядков имеют дисперсию, а постоянная распространения γ_p связана с круговой частотой соотношением

$$R_p^2 = \left(\frac{\omega}{c a} \right)^2 - \gamma_p^2. \quad (2.9)$$

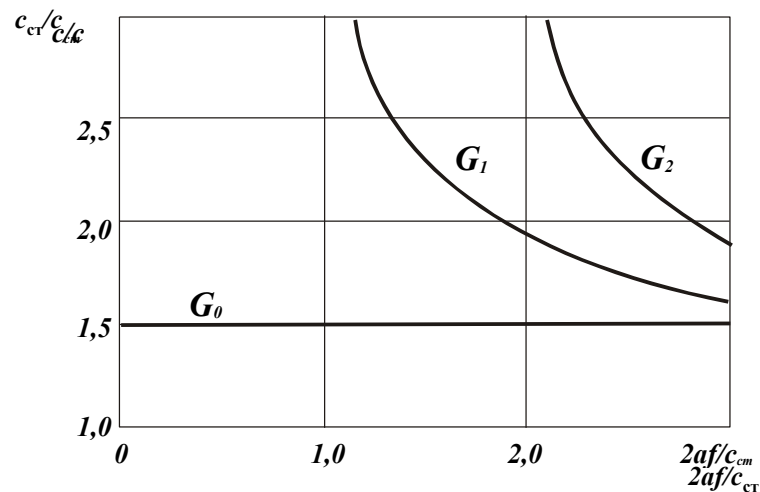


Рис. 2.5. Дисперсионные кривые крутильных волн в цилиндрических волноводах

Из (2.9) нетрудно получить взаимосвязь между фазовой скоростью крутильных волн высших порядков и частотой:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{1 - \frac{R_p^2}{R_p^2 + \tau_2^2}}}. \quad (2.10)$$

Из условия запираания волновода $\gamma_p = 0$ находится взаимосвязь между диаметром волновода и граничной частотой:

$$R_p = \frac{c}{\pi f_{\Gamma p}} \sqrt{1 - \frac{R_p^2}{R_p^2 + \tau_2^2}}. \quad (2.11)$$

Характерный вид дисперсионных кривых для крутильных волн показан на рис. 2.5.

При распространении крутильных волн по волноводу радиальная компонента деформации равна нулю, поэтому излучение звука в окружающую среду не происходит, следовательно, потери энергии звуковой волны вследствие излучения отсутствуют. Это свойство

крутильных волн можно использовать в случае передачи сигналов по длинным незащищенным волноводам, погруженным в теплоноситель при условии его низкой сдвиговой вязкости.

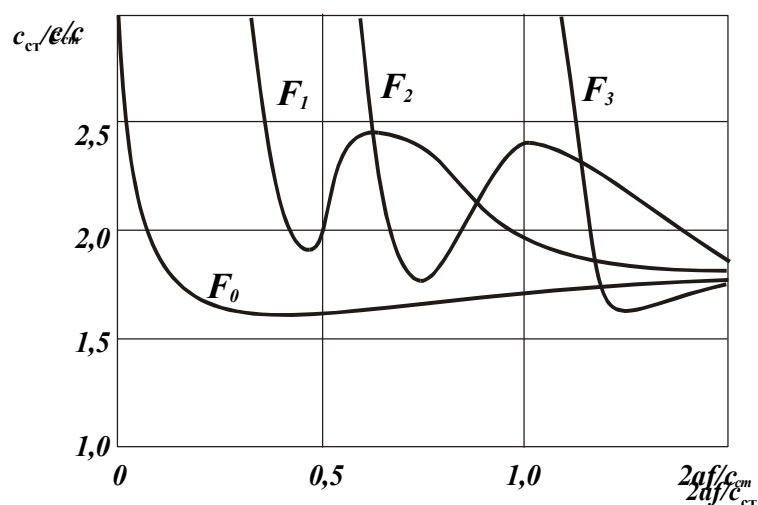


Рис. 2.6. Дисперсионные кривые изгибных волн в цилиндрических волноводах

Дисперсионное уравнение, описывающее распространение изгибных волн по цилиндрическим волноводам, весьма громоздко и его можно получить, используя материалы. Характерный вид дисперсионных кривых при $\nu=0,33$ показан на рис. 2.6.

Легко видеть, что изгибная волна нулевого порядка имеет нулевую частоту среза, при которой скорость распространения волны обращается в нуль. Плавное падение скорости звука при уменьшении частоты позволяет выбирать требуемое время задержки распространения импульсов ультразвука в чувствительном элементе датчика, например, для обеспечения разделения сигналов во времени. Однако большая дисперсия ультразвука в этой области частот ограничивает применение таких волноводов.

Групповая скорость распространения изгибных волн нулевого порядка в цилиндрах в низкочастотной области ($f \rightarrow 0$) равна

$$c = \sqrt{\frac{E}{4\rho}} \sqrt{a^2 \omega^2} = \sqrt{\frac{E}{4\rho}} \frac{a \omega}{2}. \quad (2.12)$$

Фазовая скорость равна половине групповой.

Для цилиндрических волноводов изгибных волн общего решения движения в виде конечной системы функций не существует [74]. В

низкочастотной области, отвечающей практическому применению акустических систем диагностики теплоносителя, в тех случаях, когда форма сечения волновода близка к квадратной, закономерности распространения нормальных волн практически не отличаются от соответствующих зависимостей, полученных для цилиндрических волноводов. Величину поправочных коэффициентов, корректирующих значимые для расчета параметров системы данные, можно получить экспериментально.

В случае применения в качестве волноводов полос пользуются теорией, описывающей волновые процессы в бесконечной пластине, которая удовлетворительно показывает процесс передачи колебаний, если ширина волновода много больше длины волны или его края покрыты поглотителем. Нормальные волны в пластинах, плоскость колебаний которых перпендикулярна плоскости пластины и параллельна направлению распространения, есть волны Лэмба.

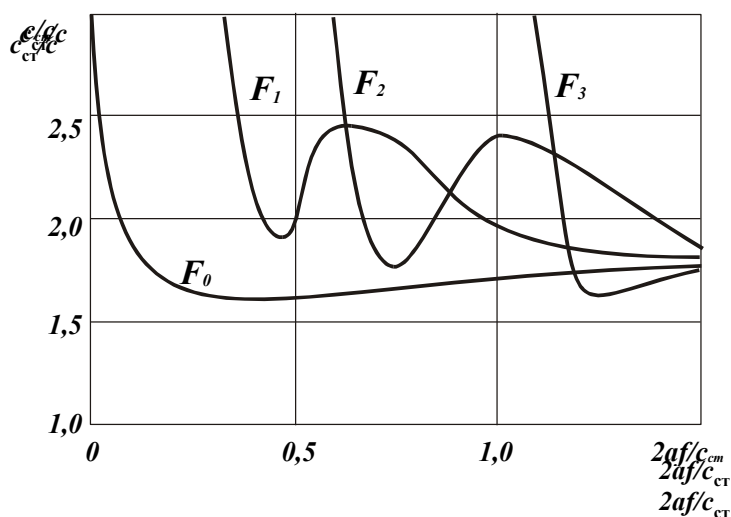


Рис. 2.7. Дисперсионные кривые продольных и изгибных волн в пластине толщиной 0,3 мм при модуле Пуассона 0,35:
 L_0, L_1 – продольные волны; F_0, F_1 – изгибные волны

Поведение дисперсионных кривых волн Лэмба аналогично поведению продольных и изгибных волн в стержнях (рис. 2.7).

При малых толщинах в пластине существуют две волны нулевого порядка. В продольной волне преобладает компонента смещений направленная вдоль пути распространения, а величина смещений, перпендикулярных поверхности волновода, в c/\sqrt{h} раз меньше. Скорость продольной волны в пластине

$$c \approx c_l \sqrt{1 - \frac{E}{\rho v^2}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{1 - \frac{1}{v^2}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left(1 - \frac{1}{2v^2} \right) \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{c_{ct}^2}{v^2} \right). \quad (2.12)$$

Фазовая скорость изгибных волн нулевого порядка существенно зависит от частоты:

$$c \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{1 - \frac{h^2}{3\rho v^2}} \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left(1 - \frac{h^2}{6\rho v^2} \right) \approx \sqrt{\frac{E}{\rho}} \left(1 - \frac{h^2 \omega^2 c_{ct}^2}{6\rho v^2} \right). \quad (2.13)$$

Групповая скорость в пластине, как и в случае стержня, равна удвоенному значению фазовой скорости. Нормальные волны в цилиндрах и пластинах порядка выше нулевого появляются лишь при критических значениях h/c_l , когда поперечный размер волновода становится близким к длине волны. При докритических толщинах пластины волны высших порядков быстро затухают. Это свойство волновых процессов можно использовать в волноводах связи для подавления паразитных сигналов.

2.2.3. Влияние технологических факторов на распространение волн нулевого порядка в волноводах связи

Распространение акустических волн по волноводу сопровождается колебательной деформацией его отдельных участков. Возникающие при этом потери энергии обусловлены в основном внутренним трением, теплопроводностью, а также релаксационными процессами. Зависимость затухания продольных и крутильных волн от частоты в области низких ультразвуковых частот (до 2-3 МГц) носит линейный характер:

$$\alpha = bf, \quad (2.14)$$

где b – коэффициент пропорциональности.

Затухание изгибных волн практически не зависит от частоты.

Существенное влияние на процесс затухания ультразвуковых волн в металле оказывает его кристаллическая структура. Отжиг волновода из стали 0X18H10T в печи при температуре 600-700 °С снимает внутренние напряжения, вследствие чего затухание уменьшается в несколько раз (рис.

2.8). Причем диаметр волновода в диапазоне 0,5–1,5 мм на коэффициент затухания продольных волн практически не сказывается.

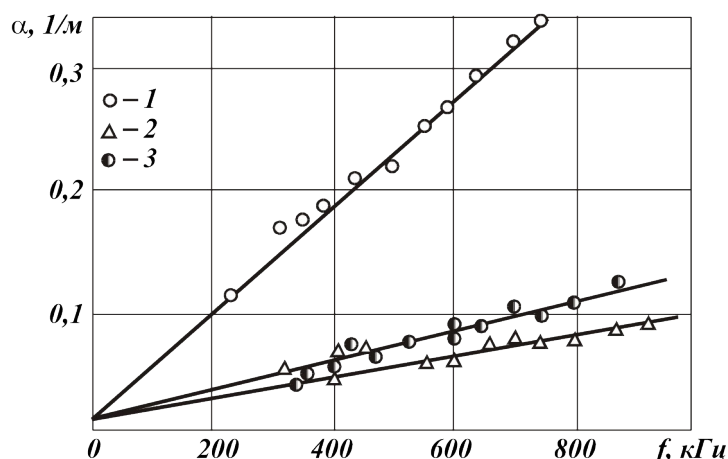


Рис. 2.8. Зависимость затухания продольной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе диаметром 0,8 мм из стали 0X18H10T от частоты

Эмпирическая формула, описывающая зависимость затухания продольной и крутильной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе из стали 0X18H10T при нормальной температуре, имеет вид

$$\alpha \approx 1,0 \cdot 10^{-4} f, \quad (2.15)$$

где $[f] = \text{кГц}$, $[\alpha] = 1/\text{м}$. Коэффициент затухания изгибных волн нулевого порядка не зависит от частоты и равен $(0,06–0,15) 1/\text{м}$.

При нагревании затухание всех видов волн возрастает практически линейно до температуры $300–350^\circ\text{C}$, дальнейшее повышение температур ведет к более существенному увеличению затухания (рис. 2.9, рис. 2.10).

В частности, эмпирические соотношения, описывающие затухание продольных волн в диапазоне температур до 600°C , имеют вид

$$\alpha \approx 1,28 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-6} t \quad \text{при } t=20–320^\circ\text{C};$$

$$\alpha \approx 10^{-4} (1 + 0,57 t^2 \cdot 10^{-7}) f \quad \text{при } t=320–600^\circ\text{C}; \quad (2.16)$$

$[f] = \Gamma_{\text{ц}}; [t] = \text{°C}.$

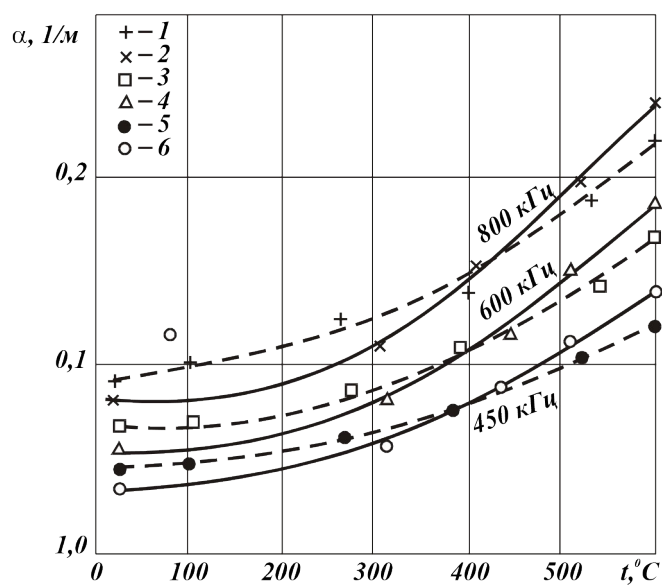


Рис. 2.9. Зависимость затухания продольных волн нулевого порядка в цилиндрическом волноводе от температуры
(Диаметр проволоки: 1, 3, 5 – 0,5 мм; 2, 4, 6 – 0,8 мм)

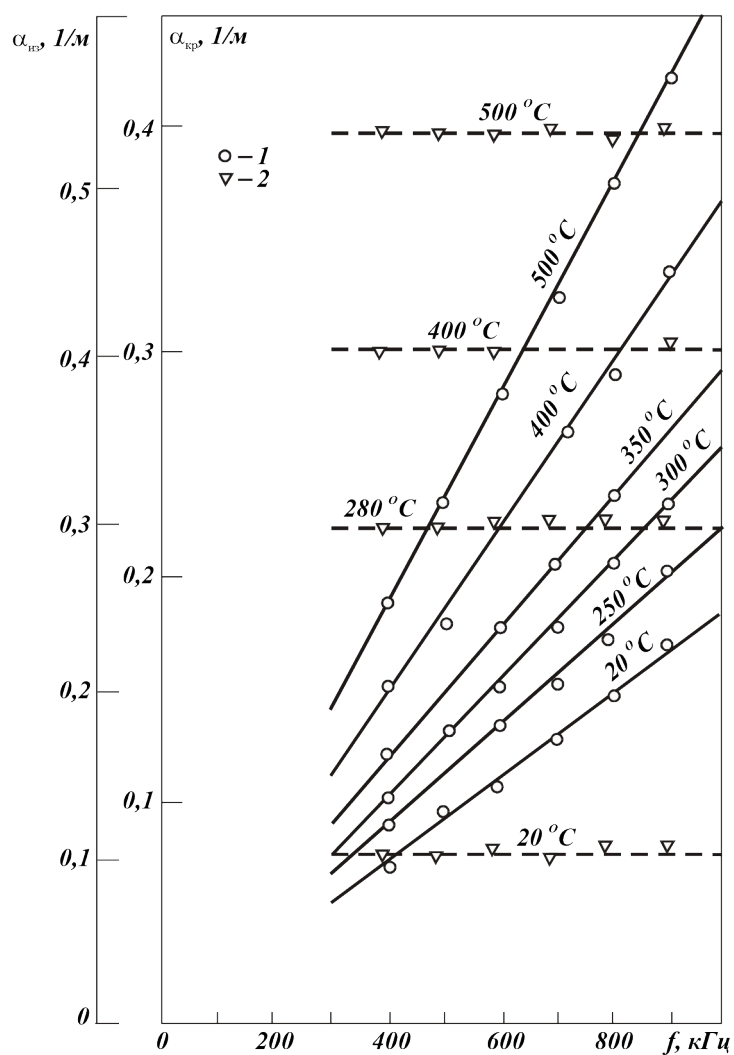


Рис. 2.10. Зависимость затухания изгибных и крутильных волн нулевого порядка в цилиндрическом волноводе от частоты:
 1 – изгибные волны; 2 – крутильные волны

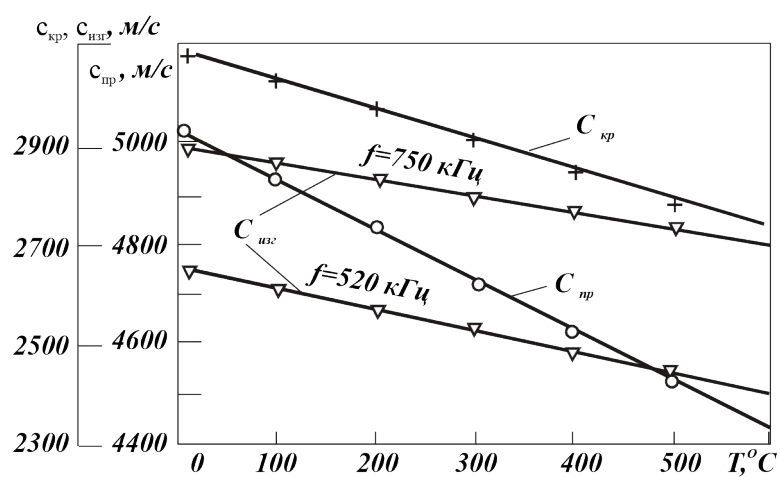


Рис. 2.11. Зависимость скорости звука в цилиндрических волноводах от температуры

Другим эффектом, связанным с нагревом волновода, является практически линейное уменьшение скорости нулевых волн при повышении температуры (рис. 2.11). При этом скорость может меняться почти на 10% в температурном интервале до 500 °С.

2.2.4. Подвеска волноводов и их защита от внешних факторов

Необходимость введения подвески в волноводную линию связи возникает, если длина волновода превышает 1-2 м, или в случае особых требований по вибростойкости датчика. Предложенные технические решения подвески волновода связи в датчике системы контроля ЯЭУ основаны на использовании поддерживающих волновод элементов в виде пружин, штифтов или втулок с неметаллическим наполнителем [49] или изготовления волновода заодно с подвеской.

В первом случае обеспечивается передача по волноводу любой нормальной ультразвуковой волны, во втором – существующие технические решения позволяют применять только волноводы изгибных волн. Следует также учитывать, что в ультразвуковых системах диагностики теплоносителя чаще всего, используются продольные волны с частотой 300–1000 кГц, ограничивающие эффективный диаметр волновода величиной 0,8–2,0 мм.

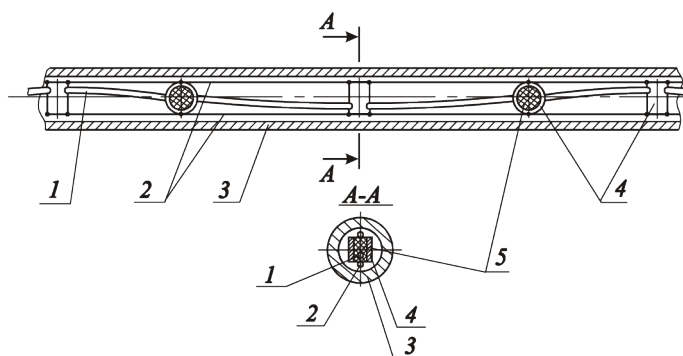


Рис. 2.12. Конструкция волноводной линии связи с подвеской из полых втулок:

1 – волновод; 2 – несущие проволоки; 3 – трубка; 4 – втулки;
5 – теплостойкая резина

В волноводных датчиках с линией связи длиной до 15–20 м и волноводом продольных волн удовлетворительные результаты обеспечивает следующая конструкция [49]. Цилиндрический волновод диаметром 0,8 мм подвергается предварительному отжигу, размещается по

спирали в подвеске, изготовленной из полых втулок диаметром $4 \diamond 0,4$ мм с запрессованными в них теплостойкими резиновыми пробками, и помещается в герметичную трубку диаметром $8 \diamond 1$ мм (рис. 2.12). Втулки дистанционируются с шагом 200 мм при помощи двух несущих проволок диаметром 0,8 мм. Спиральная укладка волновода осуществляется смещением относительно оси симметрии отверстий для прохода волновода во втулках и поворотом каждой последующей втулки относительно предыдущей на 90° , такое решение обеспечивает компенсацию растягивающих напряжений в волноводе при гibaх и термокачках, а также вибростойкость датчика в работе. Затухание, вносимое подвеской в волновод на частоте 500 кГц, составляет 0,5–1,0 дБ/м, полное затухание в линии связи 1,0–1,5 дБ/м.

Другая конструкция волноводной линии имеет подвеску, изготовленную из трубки диаметром $5 \diamond 0,5$ мм с запрессованными в нее пробки из теплостойкой резины (рис. 2.13). Пробки установлены в трубку через специальные пазы в ней с шагом 200 мм и зафиксированы деформированием стенки трубки. Волновод размещен внутри трубки по спирали, аналогично предыдущей конструкции.

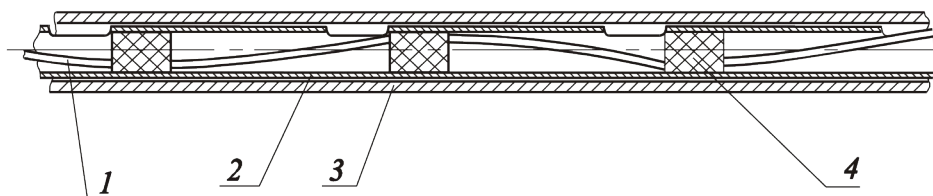


Рис. 2.13. Конструкция волноводной линии связи с трубчатой подвеской:

1 – волновод; 2 – трубчатая подвеска; 3 – трубка; 4 – теплостойкая резина

Рассмотренные волноводные линии связи могут быть использованы также для передачи крутильных волн. Они обладают высокой гибкостью, что позволяет помещать датчик в контролируемую точку оборудования по направляющей трубе с радиусом гiba до 0,8 м. Это качество особенно важно для обеспечения исключения прострелов реакторного излучения через канал для установки датчика.

Для подвески волновода изгибных волн прямоугольного сечения применяют пружину, обвитую вокруг волновода (рис. 2.14). Колебания волновода изгибных волн имеют ярко выраженную анизотропию и при устройстве линий связи на изгибных волнах необходимо исключить

поджим элементов подвески к волноводу в направлении плоскости колебаний.

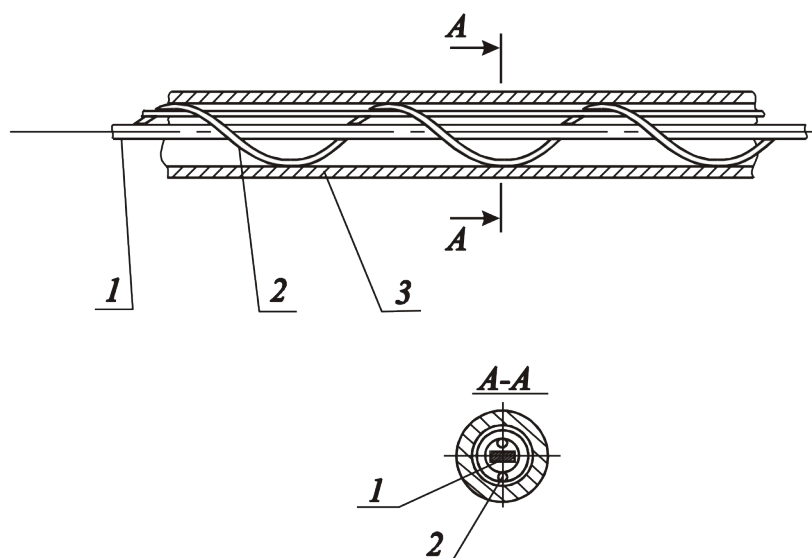


Рис. 2.14. Конструкция волноводной линии связи с волноводом изгибных волн прямоугольного сечения:
 1 – волновод; 2 – пружинная подвеска; 3 – защитная трубка

Это нетрудно обеспечить для плоского (ленточного) волновода. Сохранение гибкости линии связи с ленточным волноводом достигается скручиванием его вокруг оси симметрии с шагом, много большим длины волн.

Волноводные линии связи на изгибных волнах могут быть изготовлены методами обработки на металлорежущих станках или с использованием специального проката (рис. 2.15). В таких конструкциях достигается весьма высокая механическая прочность системы. Датчики, содержащие волноводные линии с волноводами, изготовленными как единое целое с подвеской и защитной трубкой, предназначены, в первую очередь, для применения в оборудовании транспортных ЯЭУ. На рис 2.15, а, б показаны конструкции волноводных линий изготовленные методом фигурного проката. На рис. 2.15, в, г, д – приведены конструкции, в которых волноводы связи изготовлены фрезерованием тонкостенной трубки или стержня. Они фактически являются подвеской волновода и помещаются в защитную трубку. При необходимости подвеска и трубка соединяются штифтами. В конструкции на рис. 2.15, д изгибные колебания совершает только верхняя часть ребра, в целом же ребро осуществляет

изгибнокрутильные колебания. Дисперсионные характеристики волн в этом случае качественно не отличаются от изгибных.

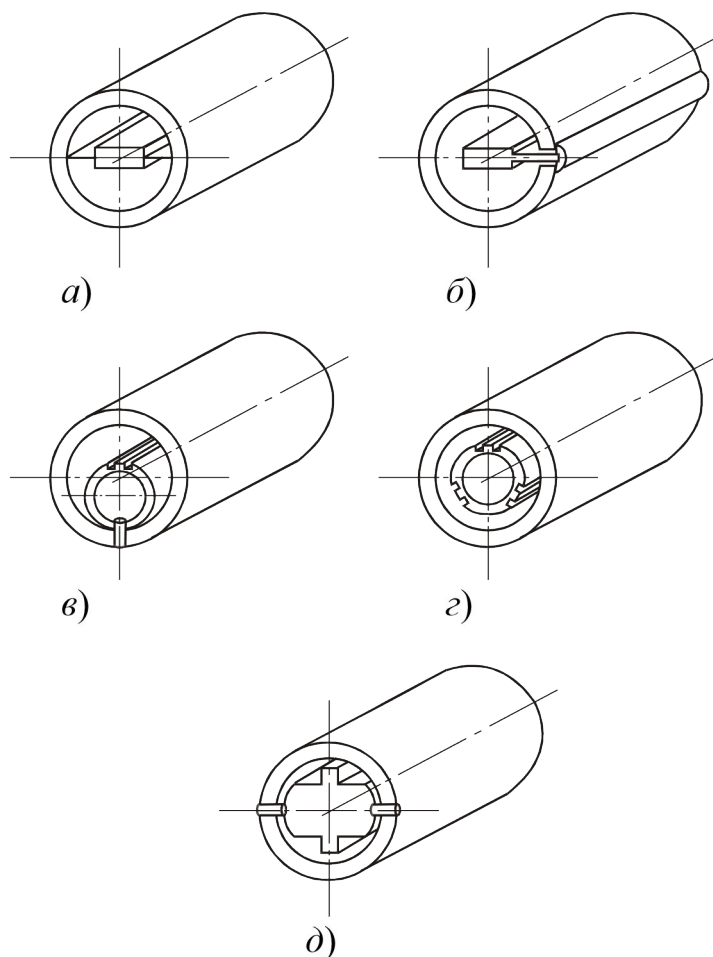


Рис. 2.15. Конструкции волноводных линий связи, изготовленных методом фигурного проката и фрезерованием

2.2.5. Герметизация и акустическое согласование волноводов связи

Для обеспечения работоспособности датчика внутри энергооборудования в нем концы волновода связи должны быть согласованы с чувствительным элементом и преобразователем, а волновод в подвеске загерметизирован внутри несущей трубки. Необходимо учитывать влияние температурных факторов на характеристики согласующих элементов.

Эффективными согласующими и герметизирующими устройствами являются конические соединительные элементы, позволяющие осуществлять присоединение волноводов продольных волн [3]. Соединительное устройство в виде двойного конуса по образующей приваривается к концу несущей трубки, а вершинами соединяется с волноводами (рис. 2.16, *а*).

Результаты экспериментальных исследований по изучению АЧХ коэффициентов прохождения и отражения ультразвуковых волн через такое соединение при вариации его геометрических размеров приведены на рис. 2.17.

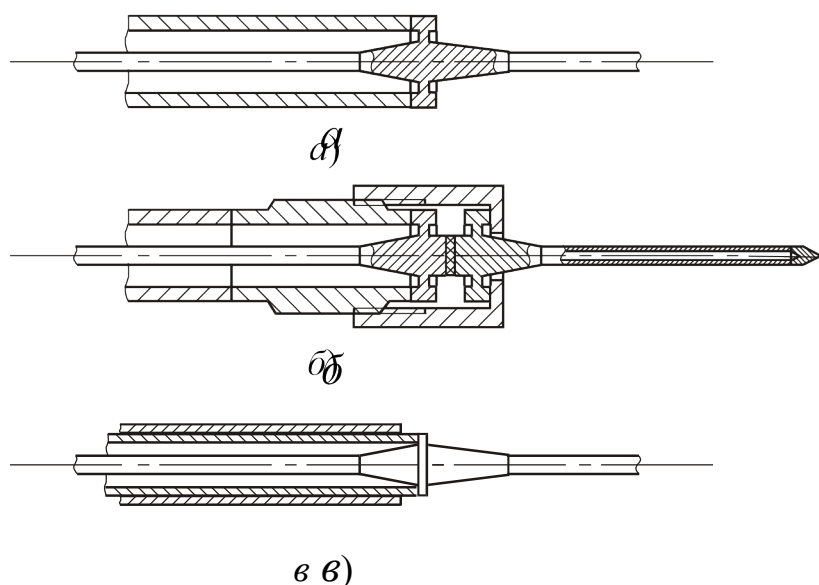


Рис. 2.16. Конструкции узлов герметизации и соединения волноводов продольных волн:

а, в – неразъемные соединения волноводов;
б – разъемное соединение волновода с чувствительным элементом

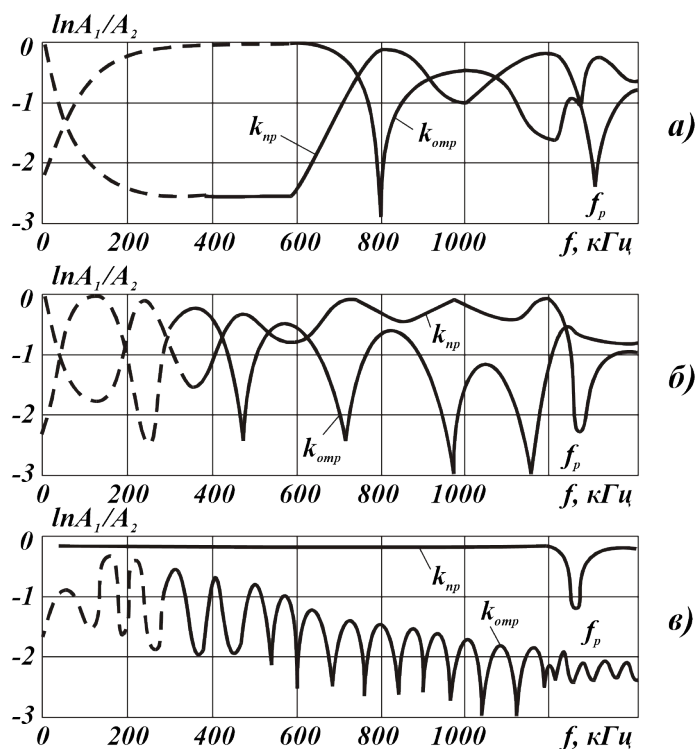


Рис. 2.17. АЧХ характеристики коэффициентов прохождения и отражения ультразвука через соединительное устройство волноводов в виде двойного конуса:

$a - 60^\circ$; $b - 30^\circ$; $v - 10^\circ$; максимальный диаметр 3 мм

Частоты резонанса определяются высотой конуса. Видно, что с уменьшением углов раствора конуса сглаживается АЧХ коэффициента прохождения ультразвука через соединение, а его значение возрастает.

При угле раствора 10° и менее коэффициент прохождения практически равен 1,0.

Одновременно возрастает изрезанность АЧХ коэффициента отражения, а его среднее значение уменьшается. Нагрев конуса, выполненного из стали, ведет к понижению частот резонансов с относительной скоростью $2 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, что необходимо учитывать при использовании рабочей частоты вблизи радиального резонанса. Радиальный резонанс конуса с максимальным диаметром 3,0 мм находится на частоте 1250–1300 кГц и определяется по характерному провалу на АЧХ коэффициента прохождения ультразвука. Частота резонанса связана с максимальным диаметром конуса зависимостью

$$f_{\text{р}} = \frac{2,05 E_2}{\rho} \sqrt{\frac{2,05 c_{\text{ст}2}}{\pi d}} (2,14) \frac{f_{\text{р}}}{\pi d} \sqrt{\frac{2,05 c_{\text{ст}2}}{\pi d}} \quad \pi d$$

Соединение двойного конуса с трубкой выполняется через дисковую мембрану и кольцо (рис. 2.16). Резкие переходы конус-мембрана-кольцо сводят к минимуму утечку сигнала в защитную трубку. Толщину мембраны выбирают из условия прочности, и при разности давлений на ее сторонах до 20,0 МПа она равна 0,5–0,8 мм. Для исключения возникновения изгибных резонансных колебаний мембраны в рабочей полосе частот ее ширина должна быть ограничена величиной $0,1\text{--}0,3d$.

Если необходимо иметь разъемное соединение линии связи с преобразователем или чувствительным элементом, то двойной конус выполняется разрезным в виде двух простых конических элементов, сопрягаемых основаниями [49]. Герметизация конуса, состыкованного с волноводом связи, с защитной трубкой выполняется аналогично вышеизложенному (рис. 2.16, б). Для улучшения и температурной стабилизации акустического контакта между основаниями конусов устанавливается прокладка из мягкого металла (меди, никеля или алюминия).

Во многих случаях лимитирован диаметр, в котором необходимо герметизировать волновод связи в защитной трубке или ставятся повышенные требования к подавлению паразитных сигналов, проникающих извне к волноводу. Тогда может быть применена конструкция, использующая эффект демпфирования паразитных колебаний в защитной трубке обвивкой из легкого металла (меди) [50] или резиноподобным герметиком (рис. 2.16, в). В ней конус буртиком приваривается к тонкостенной трубке-капилляру, вершиной присоединяется к волноводу. Поверхность капилляра покрывается демпфером. Увеличивая длину покрытия, можно достигать практически сколь угодно большого затухания волн, распространяющихся по капилляру, чем обеспечивается акустическая изоляция узла герметизации волновода от помех. Например, обвивка медным проводом подавляет помеху на 1400 дБ/м на частоте 400 кГц. При необходимости на основании конуса устанавливается дисковый пьезоэлемент, т. е. формируется электропреобразователь датчика.

Соединительные элементы на основе конуса (рис. 2.16, а, б) практически не пропускают изгибные волны и могут быть использованы как фильтры, подавляющие паразитные изгибные колебания в волноводах продольных волн.

Герметизация волноводов изгибных и крутильных волн выполняется при помощи двухступенчатого цилиндрического элемента (рис. 2.18). Тонкостенная часть цилиндра лазерной сваркой присоединяется к волноводу, а утолщенная – к защитной трубке.

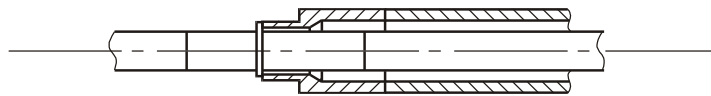


Рис. 2.18. Конструкция узла герметизации волновода изгибных волн

Для исключения возникновения паразитных резонансов в рабочем диапазоне частот длину тонкостенной части цилиндра следует ограничить величиной

$$h \ll \frac{c_{\text{изг}}}{4f}, \quad (2.15)$$

где $c_{\text{изг}}$ – скорость изгибных волн в тонкостенном цилиндре.

Согласование волноводов связи с волноводными чувствительными элементами обеспечивается равенством их сечений в месте соединения.

2.3. Принципы построения волноводных чувствительных элементов датчиков контроля теплоносителя ЯЭУ

2.3.1. Назначение чувствительных элементов

В зависимости от поставленной задачи чувствительный элемент является акустическим согласующим элементом между волноводом связи и контролируемым объемом теплоносителя либо устройством, помещенным в измеряемую «точку» потока, акустические характеристики которого функционально зависят от контролируемого параметра. В каждом из этих случаев необходимо знание закономерностей влияния параметров теплоносителя на акустические характеристики чувствительного элемента.

Традиционно используемые в качестве чувствительных элементов датчиков мембрана, рупор, торец стержня имеют ограниченное применение

в приборах для ядерной энергетики вследствие затруднений при размещении в затесненном объеме и из-за трудностей согласования с преобразователем и теплоносителем. Перечисленные узлы относятся к категории сосредоточенных излучателей (приемников). Существенно большими возможностями обладают волноводные чувствительные элементы, которые являются распределенными по длине излучателями (приемниками). Выбором длины волноводного чувствительного элемента можно регулировать акустическую связь его с контролируемой средой, а небольшой поперечный размер позволяет размещать в весьма затесненных условиях, например, в межтвэльном пространстве. Легко также решается задача акустического согласования с волноводом связи.

Волноводный чувствительный элемент, изготовленный из основного конструкционного материала, весьма устойчив как к воздействию реакторного излучения, так и к высоким температурам и давлению. Так же как и волноводы связи, волноводные чувствительные элементы могут быть изготовлены в виде жесткой конструкции, что весьма важно в датчиках контроля для транспортных ЯЭУ.

Волноводные чувствительные элементы могут выступать в роли излучателя (приемника) ультразвука или пробником в потоке теплоносителя, во втором случае параметры теплоносителя определяются по изменению затухания ультразвука, времени распространения импульса, фазовому сдвигу и другим характеристикам чувствительного элемента, погруженного в контролируемый объем теплоносителя.

2.3.2. Влияние контакта волновода с жидкостью на распространение в нем ультразвука

Дисперсионное соотношение для цилиндрического волновода, совершающего продольные колебания в невязкой жидкости, имеет вид [3]

$$\begin{aligned}
 & \frac{2\alpha_1 (\beta_{12}^2 - \gamma_{12}^2) J_1(\alpha_1 a) J_1(\beta_1 a) - (\beta_{12}^2 - \gamma_{12}^2) J_0(\alpha_1 a) J_1(\beta_1 a)}{a} \\
 & \quad - \rho_m \omega k_2 \frac{H_{10}^2}{k a} \frac{J_1(\alpha_1 a) J_1(\beta_1 a)}{J_0(\alpha_1 a) J_1(\beta_1 a)} = 0, \quad (2.16)
 \end{aligned}$$

$$2 \sqrt{\omega^2 - \gamma_1^2} \quad 2 \quad 2 \sqrt{\omega^2 - \gamma_1^2} \quad 2$$

где $\alpha_1 = \sqrt{\omega^2 - \gamma_1^2}$; $\beta_1 = \sqrt{\omega^2 - \gamma_1^2}$; $\gamma_1 = \omega/c_1$ -

постоянная распространения волн в цилиндре, погруженном в жидкость;

$k_m^2 = \omega^2/c_m^2$ - постоянная распространения волн по поверхности волновода;

$k_m = \omega/c_m$ - постоянная распространения волн в жидкости; c_m - скорость звука

в жидкости; H_0, H_1 - функции Ханкеля второго рода нулевого и первого

порядка; a - радиус волновода; ρ_m - плотность жидкости.

Отличие полученного соотношения от дисперсионного уравнения Похгаммера (2.2) заключается в появлении дополнительного слагаемого.

В случае тонких волноводов $\mathfrak{D}_1 a \ll 1$, $\mathfrak{Q}_1 a \ll 1$, используя асимптотическое разложение для функций Бесселя при малом аргументе ($J_0(z) \approx 1$, $J_1(z) \approx z/2$), получаем:

$$\alpha_{12}(\beta_{12} - \gamma_{12}) \approx (\beta_{12} - \gamma_{12})^2 \approx \rho_m \omega^2 a^2 \left[H_0^2(ka) - 2 \right] (\beta_{12} - \gamma_{12}) \alpha_{12} \approx 2k_m H_1^2(ka) \quad (2.17)$$

$$\approx 4\gamma_{12}\alpha_{21} \approx 0.$$

Корни дисперсионных уравнений (2.16), (2.17) γ_{01} являются комплексными. Действительная часть дает фазовую скорость, мнимая - амплитудный коэффициент затухания. Для определения фазовой скорости и коэффициента затухания используем приближенный метод, в котором в качестве нулевого приближения возьмем решение для волновода со свободными границами ($\rho_m = 0$).

Полагаем $\gamma_{01} = \gamma_0 + j\delta$ ($|\delta| \ll \gamma_0$), где $\gamma_0 = \omega/c$ - корни дисперсионного уравнения нулевого приближения.

$$j\delta \approx j\alpha, \quad (2.18)$$

где α - поправка к постоянной распространения; \mathfrak{D} - коэффициент затухания.

Используя разложение (с учетом соотношений между \mathfrak{D}_1 , \mathfrak{Q}_1 , γ_{01}) можно записать $\gamma_1^2 \approx \gamma^2 \approx 2\gamma\delta$; $\alpha_1^2 \approx \alpha^2 \approx 2\gamma\delta$; $\beta_1^2 \approx \beta^2 \approx 2\gamma\delta$, (2.19)

$$J_1^2 \pi ka J_{12}^2 ka J_{12}^2 N_{12}^2 ka J_{12}^2$$

Вид функций $b(ka)$ и $d(ka)$ приведен на рис. 2.19.

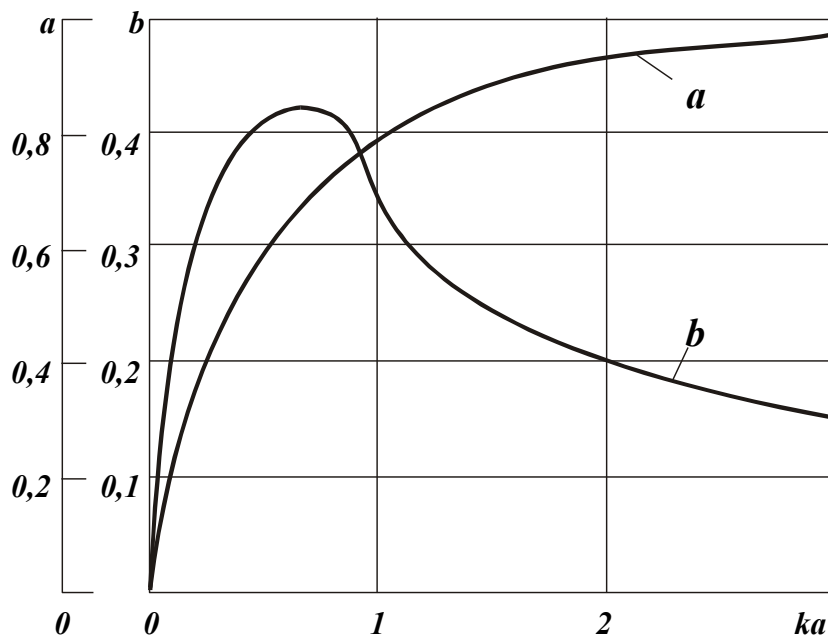


Рис. 2.19. Зависимость функций a и b от параметра ka

Поведение величины η при больших и малых значениях параметра $a \ll k$ можно исследовать, рассмотрев асимптоты отношения $H_0(ka)/H_1(ka)$.

При $ak \ll 1$ [81]:

$$H_0(ka) \approx \frac{1}{\pi} \ln \frac{2}{k a}, \quad (2.24)$$

$$H_1(ka) \approx \frac{1}{2} \pi ka.$$

Поэтому с учетом выражения для постоянной распространения γ_0 в стержне можно записать

$$\eta \approx \frac{a_2 \omega_3 v_2}{E c_{ст}} \ln \frac{1}{j \pi \frac{a}{2}}. \quad (2.25)$$

Отсюда следует, что воздействие теплоносителя на волноводный чувствительный элемент продольных волн малого диаметра заключается в эффектах поглощения ультразвука и уменьшения скорости звука в нем.

Уменьшение амплитуды ультразвуковой волны в волноводе длиной l определяется формулой

$$U = U_0 \exp \left(-\alpha l \right) = U_0 \exp \left(- \frac{\pi a^2 \omega^3 v^2}{2 E c_{\text{ст}} \rho_m l} \right). \quad (2.26)$$

→

Поправка к скорости продольных волн

$$\Delta c_{\text{пр}} = \frac{a^2 \omega^2 v^2 c_{\text{ст}}}{E} \ln \frac{\omega a}{c_{\text{ст}}}. \quad (2.27)$$

Отметим, что указанные величины линейно зависят от плотности теплоносителя, окружающего чувствительный элемент.

Оценка абсолютных значений U/U_0 и $\Delta c_{\text{пр}}$ в практически реализуемом случае погружения чувствительного элемента из стали диаметром

1 мм и длиной 1 м в воду на частоте 50 кГц дает величины $U/U_0 = 0,36 \cdot 10^{-4}$, $\Delta c_{\text{пр}} = 0,01$ м/с.

Измерение таких небольших величин представляет сложную задачу, поэтому практически более интересно поведение Δc при $ka \gg 1$. Для этого случая [51]

$$H_0(ka) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi ka}} \exp \left(j \left(ka - \frac{\pi}{4} \right) \right), \quad (2.28)$$

$$H_1(ka) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi ka}} \exp \left(j \left(ka - \frac{3\pi}{4} \right) \right),$$

поэтому

$$\Delta c_{\text{пр}} \approx j \delta \frac{a \omega^2 v^2 \rho_m \gamma}{E k} + \frac{a \omega^2 v^2 \rho c}{E \sqrt{c_{\text{ст}}^2 - c_m^2}} j$$

$$j \frac{2.2 m C_m}{E c_{ст}} \quad (2.29) \quad a \omega \nu \rho$$

Затухание ультразвука в волноводе длиной l в теплоносителе описывается выражением

$$U = U_0 \exp \left(-\alpha l \right) \quad (2.30)$$

В отличие от первого случая здесь отсутствует поправка к фазовой скорости $\frac{\omega}{c}$. Видно, что коэффициент затухания ультразвуковых продольных волн в волноводе, погруженном в жидкость, пропорционален его радиусу, акустическому волновому сопротивлению окружающей среды (так как $c_{ст}^2 \gg c_m^2$) и квадрату частоты.

Расчет ослабления ультразвука в волноводном чувствительном элементе из стали в воде диаметром 1 мм длиной 1 м на частоте 500 кГц дает величину $U/U_0 = 3,8$, что на пять порядков больше ранее полученного значения.

Таким образом, практическое применение волновода продольных волн в качестве чувствительного элемента целесообразно на высоких частотах. При этом должен использоваться эффект затухания ультразвука, вызванный излучением ультразвука в жидкую среду теплоносителя.

Для исследования влияния теплоносителя на распространение изгибных волн нулевого порядка в погруженном цилиндрическом волноводе воспользуемся уравнением движения, полученным в работе [3],

$$m \omega^2 = E I \gamma_1^4 + \rho_m \pi a k^2 \omega^2 < H_{11}^H \overline{k a k a} \quad (2.31)$$

где $m = \rho_m a^2$ - линейная масса волновода; $I = \pi a^4 / 4$ - момент инерции относительно нейтральной плоскости; $\gamma_1 = \sqrt{c_1^2 - c_m^2}$ - постоянная распространения изгибных волн в погруженном волноводе; $k_m^2 = \gamma_1^2$; $k_m = \sqrt{c_1^2 - c_m^2}$ - постоянная распространения волн в теплоносителе.

Для свободного волновода $\square_m=0$. Рассматривая этот случай как нулевое приближение, запишем

$$\gamma^4 = \frac{m\omega^2}{4\omega^2} \frac{EI}{c_{ст2}a_2}, \quad (2.32)$$

где $\gamma_0 = \sqrt{c_{изг}}/c_{изг}$ - постоянная распространения изгибных волн в свободном волноводе.

Подставляя последнее равенство в уравнение (2.31), получаем

$$k^4 \gamma_1^4 = \gamma^4 \mu k_m^5, \quad (2.33)$$

$$\mu = \frac{\rho_m \gamma_0^4 H_1^2(ka) J_1^2(ka)}{EI k_m^5} \frac{H_1^2(ka) J_1^2(ka)}{\rho_m \gamma_0^4 H_1^2(ka) J_1^2(ka)}.$$

Решение уравнения (2.33) можно представить в виде степенного ряда относительно γ . Если $\gamma \ll 1$, то можно считать $\gamma_1 = \gamma_0 + \gamma$, где аналогично (2.18), $\gamma = \alpha + j\beta$, $\gamma \ll \gamma_0$.

Подстановка значений γ_1 и γ в соотношение (2.33) дает

$$\gamma^m \gamma H_1^2(ka) J_1^2(ka) = \frac{\rho_m \gamma_0^4 H_1^2(ka) J_1^2(ka)}{4\rho_m \gamma_0^4 H_1^2(ka) J_1^2(ka)}. \quad (2.34)$$

Для дальнейшего анализа рассмотрим поведение функции при различных значениях аргумента. Разделяя действительную и мнимую части функций Ханкеля, можно записать [82] $H_1^2(ka) J_1^2(ka) \ll J_1^2(ka) N_1^2(ka) \ll N_1^2(ka)$

$$\begin{aligned} & \frac{H_1^2(ka) J_1^2(ka)}{J_1^2(ka) N_1^2(ka)} \ll \frac{J_1^2(ka) N_1^2(ka)}{N_1^2(ka)} \\ & \frac{H_1^2(ka) J_1^2(ka)}{J_1^2(ka) N_1^2(ka)} \ll \frac{J_1^2(ka) N_1^2(ka)}{N_1^2(ka)} \\ & \frac{H_1^2(ka) J_1^2(ka)}{J_1^2(ka) N_1^2(ka)} \ll \frac{J_1^2(ka) N_1^2(ka)}{N_1^2(ka)} \end{aligned} \quad (2.35)$$



Рассмотрим поведение изгибной волны при действительной величине

$$ka \sqrt{c^2 - c_{\text{ст}}^2} = 2c\omega_{\text{ст}}a \sqrt{1 - \rho_m^2},$$

т. е. при выполнении условия

$$c_m \sqrt{1 - \rho_m^2} \geq c_{\text{изг}}$$

$$c_m \sqrt{1 - \rho_m^2} \geq c_{\text{изг}}.$$

$$fa \sqrt{1 - \rho_m^2} \geq c_{\text{ст}}$$

В этом случае, как видно из (2.37), поправка к постоянной распространения γ действительное число, то есть влияние теплоносителя на изгибные колебания, распространяющиеся по волноводному чувствительному элементу, носит инерционный характер, затухание отсутствует. Поправка к скорости распространения групповых волн отрицательна и линейно зависит от плотности теплоносителя:

$$2\omega \sqrt{1 - \rho_m^2} = \sqrt{c_{\text{ст}}^2 - c_{\text{изг}}^2} \quad (2.38)$$

$$c_{\text{изг}} \sqrt{1 - \rho_m^2} \geq c_{\text{ст}}$$

γ

Мнимая часть γ в соотношении (2.37) также отрицательная и незначительная по абсолютной величине по сравнению с действительной частью. Это свидетельствует о том, что амплитуда волны несколько возрастает за счет уменьшения ее длины.

Оценка абсолютного значения $c_{\text{изг}}/c_{\text{ст}}$ в практически реализуемом случае применения чувствительного элемента из стали диаметром 0,4 мм на частоте 400 кГц в воде дает величину

$$\frac{c_{\text{изг}}}{c_{\text{ст}}} \approx 0.032.$$

$$c_{\text{изг}} \quad 4\rho$$

Такое существенное изменение скорости легко поддается измерению с приемлемой точностью.

При $c_{\text{изг}} \ll c_m \ll 1$ $4\rho \ll \rho_m$ влияние жидкости на изгибные колебания \rightarrow

волновода носит исключительно инерционный характер, амплитуда волны не меняется.

И, наконец, при $c_{\text{изг}} \ll c_m \ll 1$ $4\rho \ll \rho_m$ изгибные волны претерпевают как

затухание, так и дисперсию звука. Постоянная распространения k – мнимая величина, и излучение звука в среду отсутствует.

Таким образом, волноводный чувствительный элемент на низких частотах не может использоваться как излучатель звука в теплоноситель, но весьма эффективен в качестве пробного элемента, чувствительного к плотности омывающей его среды.

В другом случае, при $ka \gg 1$, имеем

$$H_{11} \approx ka \frac{j}{H_1 \approx ka} \quad (2.39)$$

Откуда следует

$$\frac{j \alpha j}{4\rho a \sqrt{k_m^2 - \gamma_k^2}} \frac{\rho_m}{j} \frac{\rho_m c_m}{2\rho a \sqrt{2\omega a c_{\text{ст}}^2 + 4c_m^2}}.$$

Если, кроме того, выполняется условие $fa \gg c_m$, то окончательно получаем

$$j \rho_m c_m. \quad (2.40)$$

$$4\rho a \sqrt{\pi f a c_{\text{ст}}}$$

То есть в этом случае погружение волноводного чувствительного элемента в теплоноситель приводит к затуханию в нем колебаний вследствие излучения звука. Ослабление амплитуды изгибной волны при распространении по стержню длиной l за счет влияния окружающей его жидкости

$$\xi = \xi_0 \exp \left(- \sqrt{4\rho a^3 \pi^2 f^2 c_{\text{ст}}^2} l \right)$$

(2.41) →

Рассматривая случай применения чувствительного элемента из стали диаметром 2 мм длиной 100 мм на частоте 400 кГц в воде, получаем $\xi/\xi_0=6,8$. Как видим, потери довольно велики, что свидетельствует об эффективном излучении волн в воду. Такой чувствительный элемент может быть применен как пробный (чувствительный) элемент, так и в качестве излучателя.

Влияние контакта с жидкостью на распространение продольных и изгибных волн в пластине изучено в [83, 84]. Дисперсионное уравнение, описывающее распространение симметричных волн в неограниченной пластине, находящейся в жидкости, имеет вид

$$\frac{th \gamma_1 h}{th \alpha_1 h} \left(\frac{4\gamma_1^2 \alpha_1 \beta_1}{\gamma_1^2 - \beta_1^2} \right) = \frac{1}{\rho_m c_m^4 \gamma_1^2 - \beta_1^2} \left(\sqrt{\frac{\omega^2}{c_m^2} - \gamma_1^2} - \rho_m \omega^4 \alpha_1 \right) th \beta_1 h$$

(2.42)

где $2h$ - толщина пластины, остальные обозначения сохранены ранее принятыми.

Оно отличается от уравнения Рэлея-Лэмба для продольных волн наличием мнимого слагаемого, которое обращается в нуль при $\beta_m=0$. Решение уравнения (2.42) для случая $h \neq 0$ дает нулевую поправку к фазовой скорости. Постоянная затухания равна

$$E(1-\sqrt{c_m})^m \rho v^m c_{\text{III}}^m v \sqrt{c_m} E(h(\omega) \rho v^m c)^m v c_{\text{III}}, \quad (2.43)$$

где $c_{пл}^2 = \frac{\rho}{1 + \frac{E}{v_2^2}}$ - скорость продольных волн в пластине.

Приближенное выражение для постоянной затухания изгибной волны в пластине при $kh \gg 1$ может быть представлено в виде γ_j

$$\rho_m c_m \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\rho_m c_m} \right) = \frac{1}{\rho_m c_m} \frac{d}{dt} \left(\rho_m c_m \right) \quad (2.44)$$

Эти соотношения качественно не отличаются от выражений, описывающих поведение цилиндрических волноводных элементов в жидкости, поэтому выбор формы чувствительного элемента в датчике может быть полностью основан на конструктивных факторах.

Теоретические выводы были проверены экспериментально. Поскольку наиболее распространенным теплоносителем в настоящее время является вода, скорость звука в которой уменьшается при увеличении давления и температуры, измерения характеристик нормальных волн нулевого порядка в погруженном в жидкость волноводе были выполнены с использованием следующих эталонных жидкостей: гексан, ацетон, вода, хлороформ и др. Их физические характеристики приведены в табл. 2.1. Измерялась зависимость затухания продольных и изгибных волн в цилиндрическом волноводном элементе, погруженном в эталонную жидкость, от частоты. Материал волновода сталь 12Х18Н10Т.

Таблица 2.1

Физические свойства эталонных жидкостей

Эталонная жидкость	ρ_m , кг/м ³	c_m , м/с	$\rho_m c_m$, 10 ⁴ кг/м ² с
Гексан	654	1083	70,8
Пентан	621	1008	62,6
Ацетон	792	1192	94,4
Бромистый этил	1428	892	127,0
Хлороформ	1490	1005	149,7
Дистиллированная вода	1000	1497	149,7
Бензол	878	1326	116,0

На рис. 2.21 приведены расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента затухания продольной волны нулевого порядка от частоты в погруженном в жидкость волноводе диаметром 0,5; 0,8 и 1,0 мм.

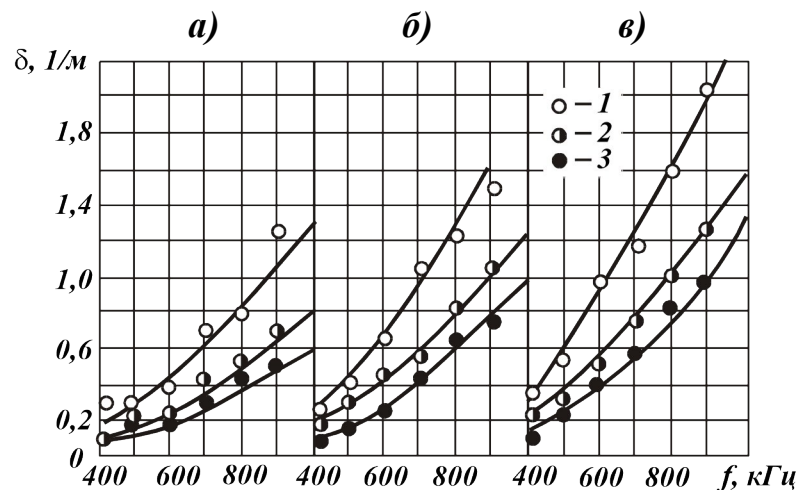


Рис. 2.21. Зависимость коэффициента затухания продольных волн в стальной цилиндрической проволоке, погруженной в жидкость, от частоты: диаметр проволоки: а – 0,5 мм; б – 0,8 мм; в – 1,0 мм; среда: 1 – вода; 2 – ацетон; 3 – гексан

Расчеты были выполнены по формуле

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{a \omega^2 \rho_m c_m \nu^2}{E c_{\text{ст}}}, \quad (2.45)$$

где $\omega = 2\pi f$, а значения физических величин были приняты следующими: $\nu = 0,3$; $E = 20,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; $c_{\text{ст}} = 5000 \text{ м/с}$.

На рис. 2.22 приведены зависимости коэффициента затухания от волнового акустического сопротивления жидкости. Расхождение экспериментальных и теоретических значений не превышает погрешности эксперимента ($\pm 5\%$).

Полученные данные позволили получить эмпирическую формулу для расчета затухания продольной волны нулевого порядка в стальном волноводе диаметром 0,5–1,0 мм в диапазоне частот 300–900 кГц, вызванного погружением его в жидкость с волноводным акустическим сопротивлением до $150 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^2\text{с}$ и вязкостью не более 10^{-3} Нс/м^2 :

$$\delta_{\text{пр}} = \rho_m c_m f^2 \cdot 8,94 \cdot 6,34 d \cdot 10^{13}, \quad (2.46)$$

где d – диаметр проволоки, мм; $[\rho_m] = \text{кг/м}^3$; $[c_m] = \text{м/с}$; $[f] = \text{кГц}$.

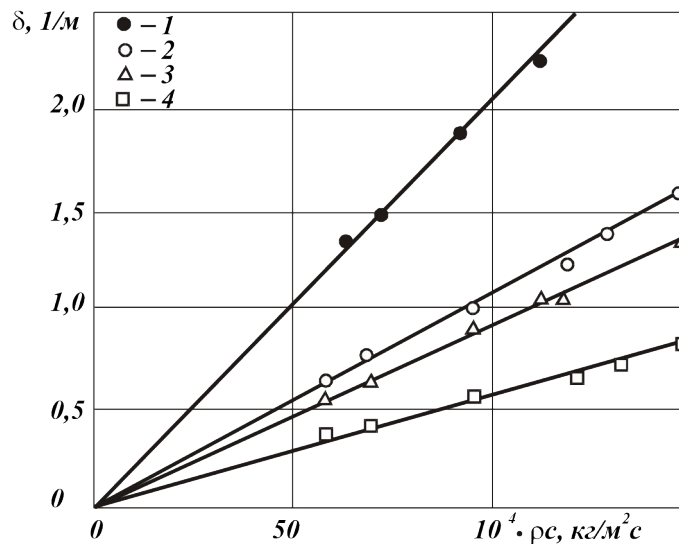


Рис. 2.22. Зависимость затухания продольных волн в проволоке от акустического волнового сопротивления окружающей ее жидкости:

1 – капилляр: 1,0 \diamond 0,15 мм; диаметр проволоки: 2 – 1,0 мм;
3 – 0,8 мм; 4 – 0,5 мм

Для оценки влияния вязкости на коэффициент затухания продольных волн проводились измерения ослабления ультразвука в волноводе, погруженном в существенно вязкую жидкость – глицерин (динамическая вязкость при нормальных условиях 1,5 Нс/м²). Результаты измерений приведены на рис. 2.23.

Затухание ультразвука складывается из потерь за счет излучения – $\alpha_{\text{пр}}$ и вязкостных потерь $\alpha_{\text{вяз}}$:

$$\alpha_0 = \alpha_{\text{пр}} + \alpha_{\text{вяз}} \quad (2.47)$$

Потери на излучение можно оценить по формуле (2.46) по известным физическим характеристикам глицерина. Вязкостные потери пропорциональны квадратному корню из величины вязкости. Отсюда путем пересчета можно оценить влияние вязкостных потерь на коэффициент затухания ультразвука в волноводе, погруженном, например, в воду. Эта оценка дает следующие значения вязкостных потерь в стальном волноводе диаметром 1 мм в воде: при нормальных условиях 400 кГц – 12%, 600 кГц – 6%. 800 кГц – 3,5%, на линии насыщения при давлении 5 МПа 400 кГц – 4%, 600 кГц – 2%, 800 кГц – 1%

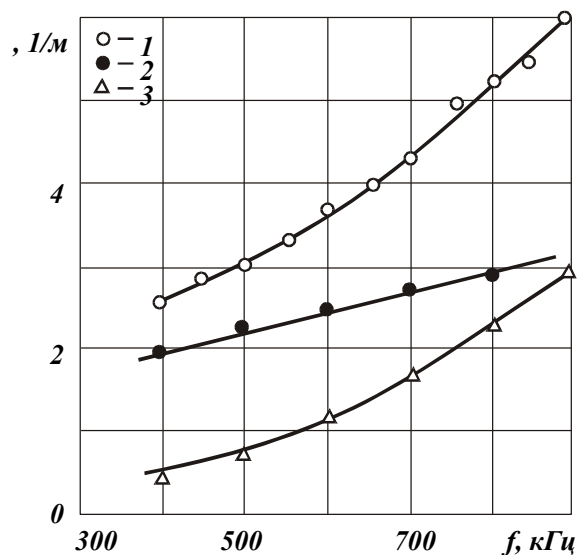


Рис. 2.23. Влияние вязкости среды на затухание ультразвука в проволоке диаметром 0,8 мм:

1 – полное затухание; 2 – затухание, обусловленное вязкостью среды;
3 – затухание, вызванное излучением звука в среду

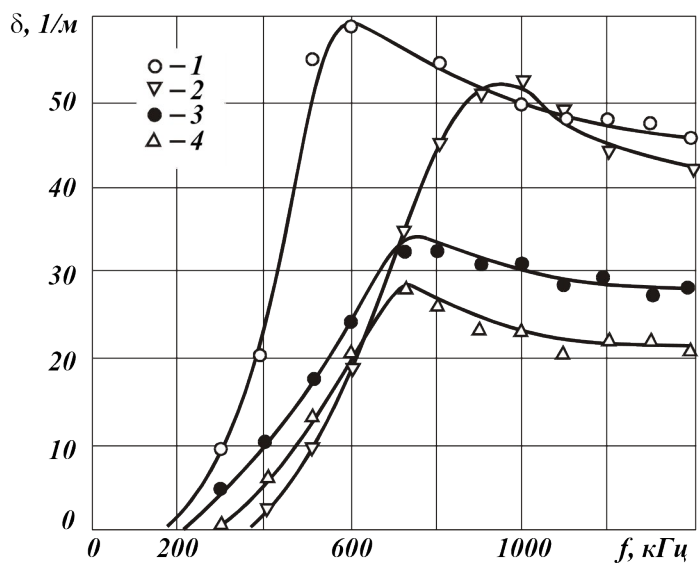


Рис. 2.24. Зависимость затухания изгибной волны нулевого порядка в цилиндрическом волноводе, погруженном в жидкость: 1 – хлороформ; 2 – вода; 3 – ацетон; 4 – гексан

Вычисление коэффициента затухания изгибной волны нулевого порядка в погруженном в жидкость цилиндрическом волноводе было выполнено по формуле

$$\delta = \frac{\rho_m \gamma}{4\rho a k} \quad (2.48)$$

где приняты значения физических величин: $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³; $a = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м; $c_{ст} = 5000$ м/с; g – выбиралось по графику рис. 2.20.

Результаты вычислений представлены на рис. 2.24. Там же даны экспериментальные значения коэффициента затухания. Расхождение расчетных и экспериментальных значений коэффициента затухания в области низких частот объясняется влиянием потерь за счет вязкости.

2.3.3. Особенности построения волноводных чувствительных элементов

Как указывалось, чувствительный элемент датчика может быть использован в качестве пробника, помещенного в поток теплоносителя, акустические характеристики которого зависят от измеряемого параметра (или группы параметров), либо в виде излучателя (приемника) ультразвука в теплоноситель. Во втором случае определяются акустические характеристики теплоносителя, связанные с контролируемым параметром.

Применение волноводного чувствительного элемента как пробника позволяет использовать в качестве измеряемых параметров: затухание продольных или изгибных волн; изменение времени распространения импульса; изменение спектра импульсов, проходящих по волноводу. Такое его применение особенно эффективно в акустически непрозрачных средах, в первую очередь, для контроля двухфазных потоков. На практике можно использовать не только абсолютное изменение указанных величин, но и их малое отклонение от среднего, анализируя шумы, их различные статистические характеристики. В настоящее время волноводные чувствительные элементы применяются в датчиках паросодержания, температуры, скорости и уровня теплоносителя.

Особенностью чувствительных элементов датчиков паросодержания является их, как правило, небольшой размер. Диаметр трубопровода на испытательных стендах обычно находится в пределах 20–100 мм. Диаметр канала для размещения чувствительного элемента на выходе ТВС в реакторе обычно не превышает 200–300 мм. Поэтому в датчиках, основанных на измерении затухания ультразвука в пробнике, целесообразно применять изгибные волны, причем в них должно выполняться условие $f \ll a \ll c_{ст}$, то есть такой чувствительный элемент

должен иметь сравнительно большой диаметр и работать на высоких частотах. Например, можно выбрать $d = 2a = 2$ мм; $f = 400$ кГц.

Чувствительные элементы, в которых используются изгибные волны, могут иметь вид балок, колец, профилированных стержней. В последнем случае достигается изменение чувствительности по длине, что позволяет учесть геометрические особенности канала с теплоносителем для получения средних по диаметру значений паросодержания. На рис. 2.25, а приведена конфигурация чувствительного элемента датчика среднего паросодержания для контроля теплоносителя в трубе диаметром 40 мм. В нем волновод связи приварен к средней части профилированных стержней, имеющих среднее сечение $1,2 \times 0,5$ мм и соединенных крестообразно. Вариант чувствительного элемента в виде кольца из проволоки 0,8 мм показан на рис. 2.25, б. Диаметр кольца 16 мм. Он может применяться как индикатор жидкой фазы в заданной «точке» реактора или парогенератора.

При использовании продольных волн для увеличения чувствительности датчика целесообразно в качестве чувствительного элемента применять тонкостенные трубки-капилляры и работать на повышенной частоте [48]. Выигрыш в чувствительности пропорционален уменьшению сечения капилляра по сравнению с сечением стержня того же диаметра: $a_2 \omega_2 \rho^m c^m v_2$

$$\delta \square \text{телефон} a_2 \square r_{\text{вн}2} \text{Ⓢ} Ec_{\text{ст}}, \quad (2.49)$$

где $r_{\text{вн}}$ - радиус отверстия в капилляре.

Длину капилляра обычно выбирают не менее 80–100 мм и при необходимости выгибают U-образно (рис. 2.26, а).

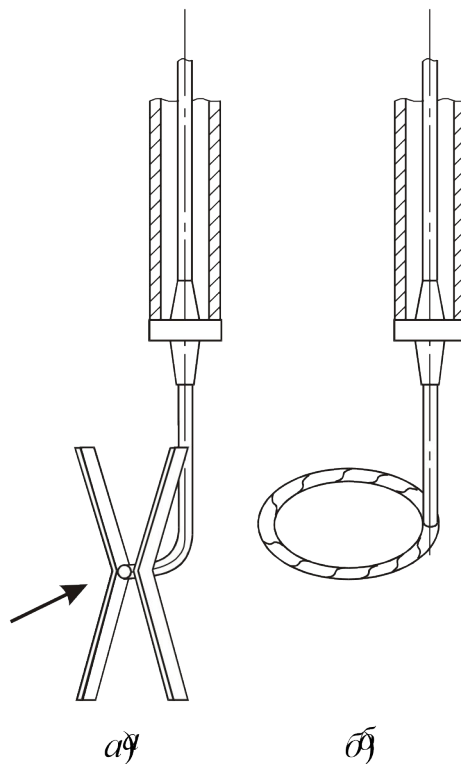


Рис. 2.25. Конструкции чувствительных элементов датчиков, использующих изгибные колебания:
а – крестообразная; *б* – кольцевая

При фиксированных конструктивных параметрах датчик с такими чувствительными элементами измеряет волновое акустическое сопротивление теплоносителя ($\rho_m c_m$), поэтому для определения плотности теплоносителя ρ_m необходима информация о скорости звука в нем. Методические вопросы, касающиеся этого, рассмотрены в следующей главе.

Весьма эффективным в датчиках паросодержания является чувствительный элемент изгибных волн, работающий на низких частотах [86]. Если выбрать конструктивные элементы чувствительного элемента так,

$$c_{\text{изг}}^m$$

чтобы выполнялось условие $\frac{af}{c_{\text{изг}}} \ll \pi$, то влияние жидкой фазы теплоносителя на волновод будет носить исключительно инерционный характер, и плотность теплоносителя можно определять по соотношению

$$\rho_m = \frac{4P}{c_{\text{изг}}^2} \quad (2.50)$$

где $c_{\text{изг}}$ – скорость изгибных волн в свободном волноводе.

При небольших отклонениях скорости звука в теплоносителе в большую сторону амплитуда волны будет слегка уменьшаться, а в меньшую – возрастать.

При этом

$$\frac{\rho^m c^m}{4\rho c_{\text{изг}}} \quad (2.51)$$

Таким образом, для определения плотности теплоносителя целесообразно измерять непосредственно величину $\rho^m c^m / c_{\text{изг}}$.

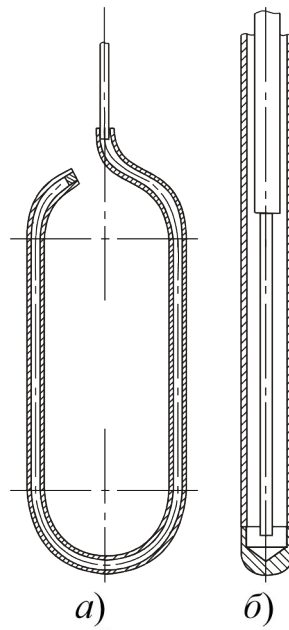


Рис. 2.26. Конструкции чувствительных элементов датчиков, использующих изгибные колебания:

a – капиллярная; *б* – кольцевая

Для измерения температуры применяются чувствительные элементы продольных волн в герметичных защитных чехлах, предохраняющих их от демпфирующего воздействия теплоносителя (рис. 2.26, б). Хотя, повидимому, на низких частотах такие чехлы необязательны ввиду весьма малых потерь амплитуды сигнала. Применение продольных волн обусловлено их низкой дисперсией, что позволяет передавать короткие широкополосные импульсные сигналы и надежно определять время распространения импульсов в чувствительном элементе. При этом температура определяется по скорости звука продольных волн.

Длина чувствительных элементов в датчиках температуры выбирается в зависимости от требуемого пространственного усреднения и обычно составляет 50–200 мм. В датчиках уровнемеров используют чувствительные элементы продольных и изгибных волн, работающих по принципу измерения затухания ультразвука, в зависимости от степени погружения в жидкую фазу теплоносителя.

Используя продольные волны, можно изготовить датчики с чувствительным элементом из проволоки, охватывающие диапазон изменения уровня 2–3 м. Для повышения надежности получаемых данных в ряде разработок на поверхности чувствительного элемента наносят искусственные дефекты в виде, например, канавок с шагом 150–200 мм, которые служат отражателями ультразвуковых импульсов (реперов), и по ним можно контролировать работу аппаратуры и получать дополнительную информацию

(рис. 2.27, а).

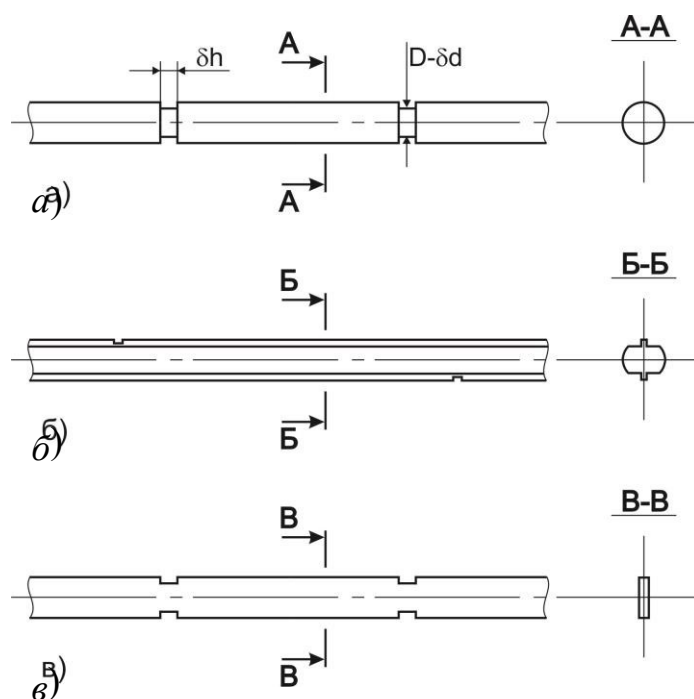


Рис. 2.27. Конструкции чувствительных элементов с искусственными дефектами–отражателями: а – в виде канавок; б, в – фрезерованные

Ввиду существенно большего затухания волн в чувствительных элементах на изгибных колебаниях их выполняют секционированными. Секции раздвигают по высоте, охватывая необходимый диапазон изменения уровня. В этом случае для увеличения прочности конструкции и надежности работы эффективны фрезерованные чувствительные

элементы в виде гребней или полос (рис. 2.27, б). При этом автоматически решаются вопросы их крепления. При использовании волновода крутильных волн эффективны полосковые чувствительные элементы (рис. 2.27, в). Крутильные полосы возбуждают на ее гранях противофазные изгибные колебания, используемые в качестве источника информации в системе.

В качестве излучателя (приемника) наиболее эффективны волноводы изгибных волн, обеспечивающие практически полную отдачу энергии в теплоноситель (воду, натрий) при длине погружения всего 50–100 мм. На основе волновода изгибных волн можно создавать излучающие (принимающие) чувствительные элементы как помещаемые в поток теплоносителя внутри оборудования, так и устанавливаемые на поверхности сосудов высокого давления или трубопроводах.

Основное применение такие чувствительные элементы находят в датчиках расходомеров, систем контроля за аварийными процессами в ЯЭУ и диагностики двухфазных потоков в экспериментах по безопасности, а также в других случаях, где требуется дистанционное наблюдение за процессами. Условием работы волновода изгибных волн в качестве излучателя является превышение скорости звука в теплоносителе $c_{изг} > c_m$, что достигается выполнением условия

$$af \geq \frac{c_m^2}{c_{изг}^2} \quad (2.52)$$

Поле излучения чувствительного на изгибных волнах, в среде имеет листообразную диаграмму направленности, угол наклона на которой к оси волновода определяется соотношением (рис. 2.28). $c_m \cos \alpha$.

(2.53) $c_{изг}$

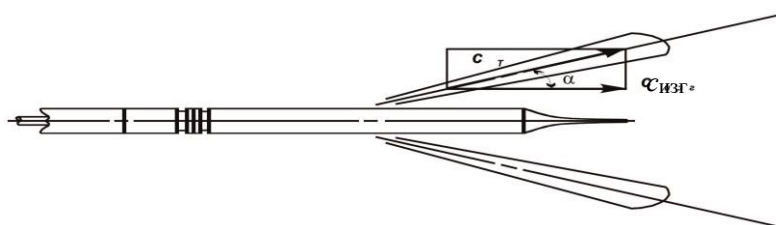


Рис. 2.28. Диаграмма направленности чувствительного элемента изгибных волн

В плоскости волновода ширина диаграммы направленности 10_{-20}^{\oplus} . При размещении такого излучателя в потоке теплоносителя для обеспечения однонаправленности излучения чувствительный элемент выполняют встроенным в стенку трубчатого зонда, заполненного воздухом (рис. 2.29).

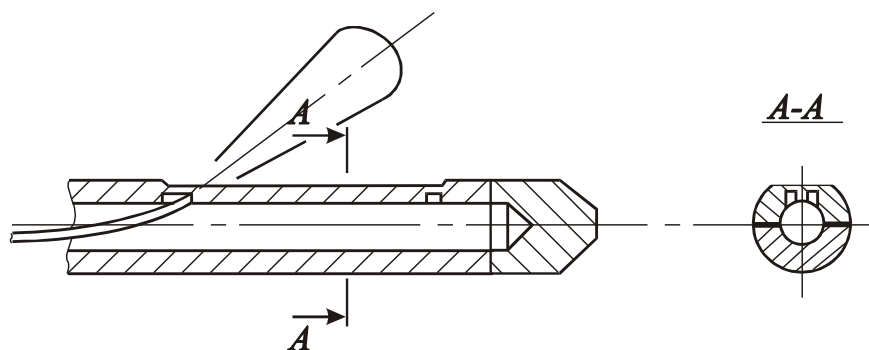


Рис. 2.29. Чувствительный элемент на изгибных волнах, встроенный в стенку трубчатого зонда

В нем тыльная сторона волновода находится в контакте с акустически легкой газовой средой и практически не излучает. Поток акустической энергии уходит в омывающий зонд жидкий теплоноситель. Для сужения диаграммы направленности можно рекомендовать параллельную установку двух излучателей, работающих синхронно.

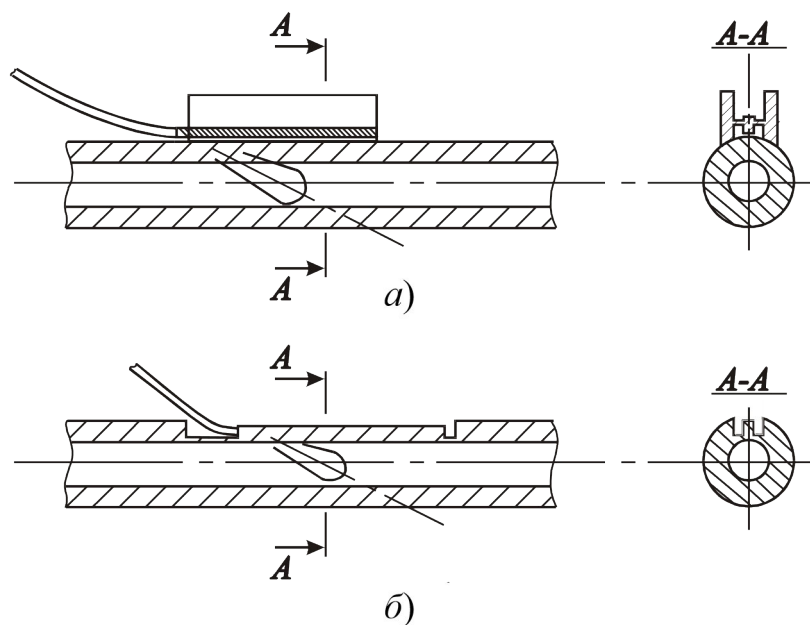


Рис. 2.30. Конструкция чувствительного элемента на изгибных волнах, размещенного на внешней поверхности трубы:

a – цельнофрезерованный, съемный; *б* – выфрезерованный
на поверхности трубопровода

Основной проблемой использования чувствительного элемента на изгибных волнах, размещаемого на внешней поверхности оборудования, является обеспечение акустического контакта со стенкой, а также уменьшение утечки акустической энергии поверхностными волнами. Для ее решения чувствительный элемент выполняется цельнофрезерованным совместно с демпферами (рис. 2.30, *a*). Контакт обеспечивается притиранием чувствительного элемента по месту установки и применением металлической прокладки из мягкого металла (меди, алюминия и т. п.). Такой датчик формирует в теплоносителе акустический луч с диаграммой направленности, аналогичной приведенной на рис. 2. 28.

Лучшие результаты обеспечивает чувствительный элемент, выфрезерованный на поверхности трубопровода (рис. 2.30, *б*). Однако такая конструкция требует принятия специальных мер по обеспечению прочностных характеристик трубы. Коэффициент передачи чувствительного элемента $k_{ч.э}$ определяется исходя из того, какой параметр контролируется, и принципа его измерения. Поэтому конкретные способы его определения рассматриваются в последующих главах совместно с практическими конструкциями приборов контроля и диагностики теплоносителя.

2.4. Акустические преобразователи волноводного датчика

2.4.1. Особенности преобразователя в составе волноводного датчика

В волноводных датчиках проблема температурной устойчивости электроакустического преобразователя решается его размещением в зоне с температурой, обычно не превышающей 100[±]С. Это позволяет применять типовые конструкционные материалы, значительно упростить технологию изготовления и удешевить преобразователь.

Разработка и освоение промышленностью высокоэффективных и устойчивых к внешним воздействиям пьезоактивных материалов привели к тому, что в настоящее время в большинстве нашедших практическое

применение акустических преобразователей используется пьезоэффект либо магнитострикция.

Представляется, что в волноводных датчиках систем контроля теплоносителя пьезоэлектрические преобразователи, как правило, перспективней магнитострикционных. На сравнительно высоких ультразвуковых частотах (свыше 200 кГц) изготовление деталей миниатюрных магнитострикторов встречает известные затруднения, магнитострикционные преобразователи менее стойки к вибрационным воздействиям, что существенно в транспортных установках, кроме того, имеют пониженную чувствительность и требуют применения ряда дефицитных материалов.

Пьезоматериалы выпускаются промышленностью в виде пьезокерамики, которая устойчива к воздействию влаги, изменению температуры в достаточно широком интервале и обладает высокими механическими свойствами.

Из большого числа известных в настоящее время пьезоматериалов наиболее широко применяются синтетические пьезоэлектрики на основе систем цирконата-титаната свинца $Pb(ZrTi)O_3$. Отдельные их марки отличаются химическим составом и обозначаются ЦТС и соответствующими цифрами. Кристаллическая структура керамики ЦТС относится к гексагональной системе, класс симметрии 6 mm. Пьезоэлектрические свойства керамики ЦТС меняются незначительно при изменении температуры от 0 до 100 $^{\circ}$ C. Характеристики пьезокерамики описываются линейной зависимостью от логарифма времени, поэтому предпочтительней применение предварительно «состаренной» керамики. Основные свойства пьезокерамики типа ЦТС приведены в [3].

При разработке конструкций преобразователей нами была использована широко распространенная пьезокерамика ЦТС-19 (ГОСТ 13927-80 [88]). У этого материала коэффициент электромеханической связи, характеризующий эффективность электромеханического преобразования, достигает 0,60, точка Кюри – 290 $^{\circ}$ C, пьезомодули $d_{31}=100 \times 10^{-12}$ К/Н, $d_{33}=200$ К/Н.

До настоящего времени в литературе практически отсутствуют теоретические работы, посвященные рассмотрению процессов в пьезопреобразователе в составе волноводного датчика. Фактически нет материалов по конструированию таких преобразователей. Поэтому нами были поставлены и проведены экспериментальные исследования по

отработке и изучению основных закономерностей в преобразователях продольных и изгибных волн, отчасти представленные в работе [3].

2.4.2. Конструкции и основные характеристики преобразователей продольных волн

Простейшая конструкция пьезокерамического акустического преобразователя продольных волн схематично изображена на рис. 2.31, *а*. На волноводе 1 закреплен пьезоэлемент 2, выполненный в виде цилиндрического столбика, в этом случае его высота является единственным размером, определяющим собственную частоту колебаний преобразователя. В области, где $df/c_{ст} \approx 0,2-0,3$ отношение диаметра преобразователя к высоте приближается к единице, частотный коэффициент становится также функцией этого отношения.

Для уменьшения импеданса преобразователя целесообразно применение тонких дисковых пьезоэлементов (рис. 2.31, *б*). В этом случае эквивалентная высота пьезоэлемента увеличивается за счет крепления к его верхней обкладке металлического диска – накладки 3. Последняя конструкция в области низких частот работает как акселерометр и к ней применимы расчетные соотношения, в которых элементы датчика рассматриваются как точечные [89]. Для работы в области частот выше 300–400 кГц во избежание сильной дисперсии сигнала следует применять волноводы диаметром порядка 1 мм. Изготовление и крепление пьезоэлементов столь малого диаметра – сложная задача. Поэтому согласование пьезоэлемента большего диаметра с волноводом осуществляется коническим концентратором (рис. 2.31, *в*).

В волноводных датчиках контроля теплоносителя выбирается режим работы, при котором длина ультразвуковой волны в волноводе значительно больше его диаметра. Это связано, с одной стороны, с требованием расширить диапазон рабочих частот, снизить потери и дисперсионные эффекты и тем самым обеспечить передачу более коротких импульсов и, с другой – получить компактную, гибкую конструкцию, которую без серьезных затруднений можно было бы установить в затесненных условиях ЯЭУ. Поэтому является предпочтительным применение тонких волноводов, в качестве которых используется проволока, с

преобразователем в виде системы пьезоэлемент – согласующий элемент – волновод
(рис. 2.31, в).

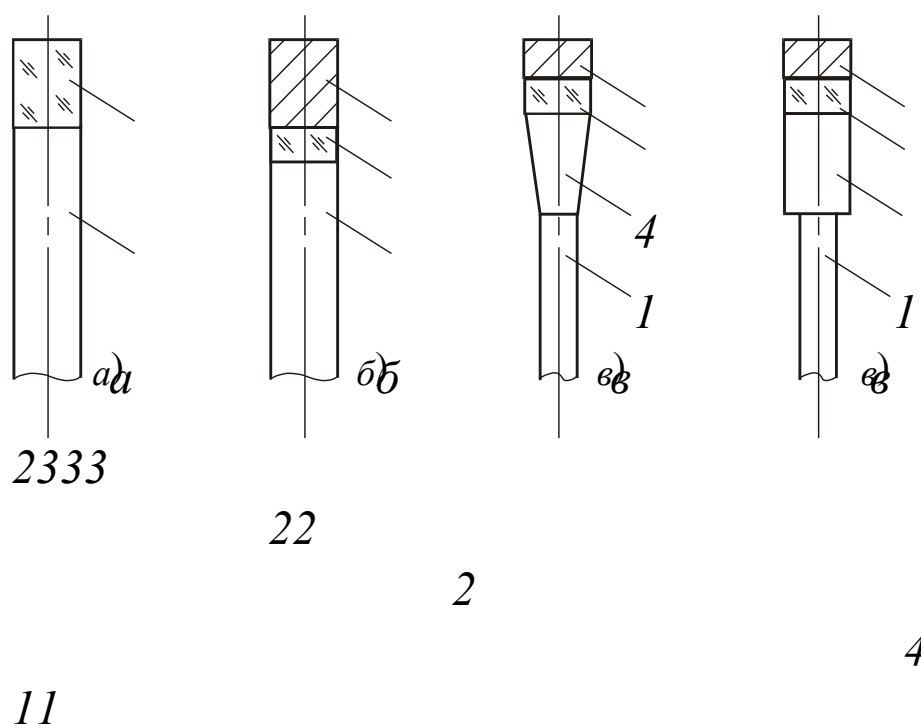


Рис. 2.31. Конструкция пьезопреобразователя продольных волн для волноводных датчиков:

1 – волновод; *2* – пьезоэлемент; *3* – накладка; *4* – согласующий элемент

Эффективная работа преобразователя, состоящего из перечисленных конструктивных элементов, достигается лишь при высоком уровне акустической взаимосвязи между ними, то есть необходимым компонентом работы датчика является хороший акустический контакт между пьезоэлементом, накладкой, концентратором и волноводом. Это исключает изолированное рассмотрение колебательных процессов в составляющих систему элементах. Необходим анализ работы преобразователя в целом. Однако общее математическое решение задачи о колебаниях упругого тела конечных размеров даже простой геометрической формы с учетом граничных условий, пьезоэффекта и свойств составляющих тело

материалов пока отсутствует. На практике стремятся максимально упростить геометрию преобразователя, чтобы стали возможными хотя бы приближенные расчеты колебательных процессов в нем как одномерном теле, учитывая (по возможности) эффекты, связанные с наличием еще двух измерений, при помощи поправок.

Из рассмотрения уравнений колебаний тела методом разложения по собственным функциям получается выражение для смещений при вынужденных колебаниях общего вида без учета потерь [56]:

$$U = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\Phi_m}{\omega_m^2 - \omega^2} E_m \exp(j\omega t), \quad (2.54)$$

где E_m – функция координат, выражающая собственную форму колебаний в парциальной волне; ω_m – собственная частота; Φ_m – весовой коэффициент, выражающий долю парциальной волны.

Сравнение АЧХ макетов датчиков со спектрами отражения и прохождения продольных волн через цилиндрические вставки в волновод показало, что при одинаковых размерах цилиндров-вставок и цилиндра преобразователя наблюдается совпадение их резонансных частот (рис. 2.33). Поэтому результаты анализа продольных колебаний цилиндров можно использовать при анализе АЧХ датчика.

Поскольку нагрузкой преобразователя с акустической стороны является волновод, а рассматриваемая система отвечает случаю возбуждения и приема только одного типа волн, то можно считать $E_m=1$. Таким образом, задача сводится к отысканию распределения собственных частот системы и их амплитуды в заданном частотном диапазоне.

Для анализа процессов в пьезоэлектрическом преобразователе (рис. 2.31, в) были поставлены и проведены экспериментальные исследования, в результате которых получены и интерпретированы АЧХ датчиков в режиме излучения-приема продольных волн в волновод. Опыты проводились вначале на макетах преобразователей, в которых в качестве согласующих элементов применялись тела простейшей геометрии – цилиндры (рис. 2.31, г). Для уменьшения влияния пьезоэлемента на АЧХ колебаний цилиндров его высота была выбрана минимальной – 0,15 мм, материал ЦТС-19. Высота накладки – 0,1 мм, диаметры цилиндров – 3 мм,

волновода – 0,8 мм, материал – сталь 0X18H10T. Акустический контакт между деталями преобразователя во всех экспериментах, результаты которых представлены в настоящем параграфе, обеспечивался при помощи эпоксидной смолы без добавления отвердителя. АЧХ макетов датчиков при вариации высоты цилиндров приведены на рис. 2.32.

Отметим следующие их особенности:

- ясно выраженные резонансы лежат ниже частоты радиальных резонансов цилиндров (1300 кГц);
- плотность резонансов возрастает при приближении к частоте радиального резонанса;
- амплитуда резонансных максимумов уменьшается при стремлении частоты к нулю и радиальному резонансу;
- на частоте ⌚ 990 кГц, независимо от высоты цилиндра, наблюдается провал в АЧХ

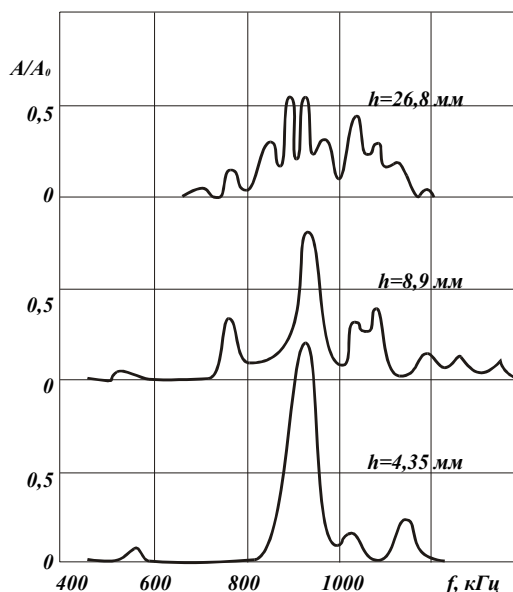


Рис. 2.32. АЧХ датчиков с цилиндрическим согласующим элементом

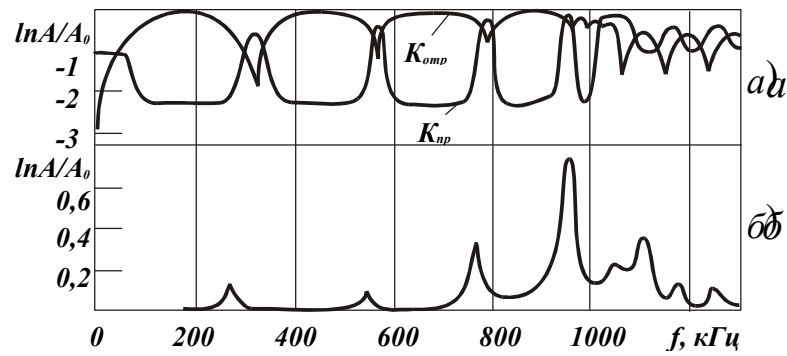


Рис. 2.33. АЧХ коэффициентов отражения и прохождения продольных волн через цилиндрическую вставку высотой 9 мм на волноводе (а) и АЧХ датчика с цилиндрическим согласующим элементом (б)

Резонансные частоты продольно колеблющегося цилиндра определяются решением уравнения

$$f_n = \frac{nc}{2h}, \quad (2.55)$$

где n – номер гармоники; h – высота цилиндра; c – скорость продольных волн в цилиндре.

Скорость продольных волн в цилиндре является функцией частоты и зависит от его диаметра.

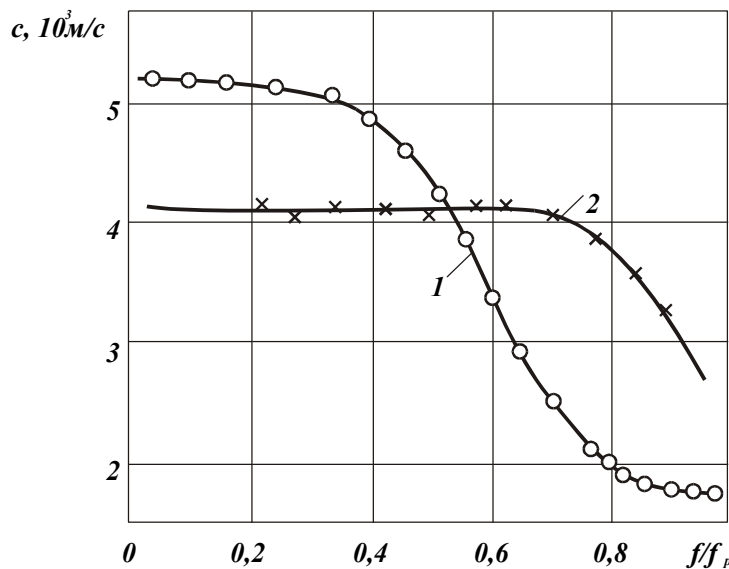


Рис. 2.34. Зависимость скорости продольных волн в цилиндрической вставке в виде двойного конуса 2 от частоты f_p (частота радиального резонанса)

При приближении f_n к частоте радиального резонанса скорость продольных волн меняется (уменьшается, если высота цилиндра больше

его диаметра), что ведет к сгущению резонансных максимумов на АЧХ датчика. Экспериментально полученная скорость продольных волн в цилиндрах конечной длины (рис. 2.34) удовлетворительно совпадает с дисперсионной кривой продольной волны нулевого порядка в бесконечном стержне (рис. 2.35, нижняя кривая) в области частот ниже 950 кГц.

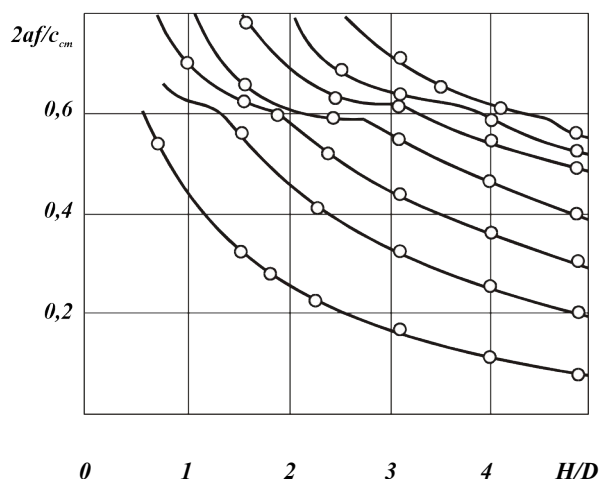


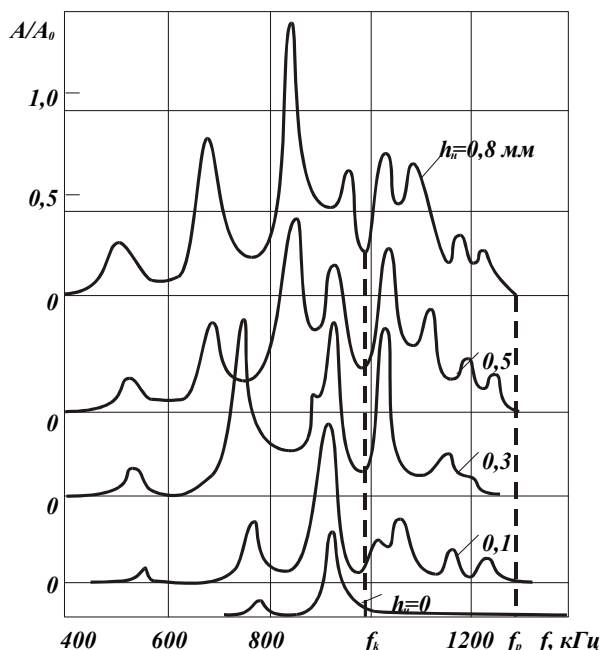
Рис. 2.35. Дисперсионные кривые продольных волн в цилиндре в функции отношения его высоты к диаметру

Анализ структуры спектра собственных частот цилиндров в функции отношения высоты к диаметру указывает на сгущение спектров собственных частот в области частот, отвечающих соотношению $2af/c_{ст}=0,6$ (рис. 2.35). Система гипербол, представляющая продольные колебания цилиндра около 950-1000 кГц вырождается из-за появления нового вида колебаний, отсутствующих при колебаниях бесконечного цилиндра, краевых колебаний. Краевые колебания, характеризующиеся интенсивным движением круговых образующих торцев цилиндров, были идентифицированы пробным демпфированием нижней части цилиндра преобразователя, которое приводило к существенному изменению АЧХ датчика около 1000 кГц. Возникновением краевых колебаний объясняется провал в АЧХ датчика на частоте 990 кГц – энергия возбуждения расходуется на развитие колебательного процесса на торце цилиндра.

Приблизительно оценить первую резонансную частоту краевых колебаний высокого стального цилиндра можно по формуле

$$f_k = \frac{1.88c}{\pi d} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.56)$$

при вариации высоты накладки.



**Рис. 2.36. АЧХ преобразователей с цилиндрическими
согласующими элементами диаметром 3 мм и высотой 9 мм
при вариации высоты накладки**

Увеличение толщины накладки ведет к росту амплитуды резонансных максимумов при одновременном уменьшении их частоты. Кроме того, смена накладки толщиной 0,1 мм на 0,3 мм вызывает появление новых резонансов на частотах 800–1200 кГц, амплитуда которых растет с увеличением толщины накладки. При этом часть резонансных максимумов исчезает. Наблюдаемое явление объясняется следующим. Цилиндр, нагруженный на волновод существенно меньшего сечения, ведет себя как полуволновый резонатор. Его резонансные частоты даются выражением (2.55). Продольные резонансы цилиндра с закрепленным на нем тонким пьезоэлементом приближенно описываются уравнением

$$\begin{array}{c}
 \nearrow \uparrow h^{n.\mathfrak{z}} \quad \underline{h} \quad \underline{h^k} \square \checkmark \\
 f_{n1} \boxtimes \searrow \Downarrow 2 \downarrow \nwarrow c_{n.\mathfrak{z}} \quad \text{☎}_{f_{n1}} \textcircled{0} \text{☐} \text{☐} \quad c \quad \text{☎}_{f_{n1}} \textcircled{0} \text{☐} \text{☐} \quad c \quad \text{☎}_{f_{n1}} \textcircled{0} \text{☐} \text{☐} \quad \times \text{☐} \checkmark, \\
 (2.57)
 \end{array}$$

где h , $h_{n.э}$ – высота цилиндра и пьезоэлемента; $c_{n.э}(f)$, $c_k(f)$ – стержневая скорость волн в пьезоэлементе и контактных слоях.

Установка на тыльную сторону пьезоэлемента накладки высотой h_n дополнительно понижает частоты продольного резонанса до величины

$$\frac{h_{n.э}}{h} \approx \frac{h^k}{h^n} \quad (2.58)$$

$$f_{n2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_{n.э}} + \frac{1}{c_k} \right) \quad c_n$$

$$f_{n2} \approx \frac{1}{2} \left(\frac{1}{c_{n.э}} + \frac{1}{c_k} \right) \quad c_n$$

$$\frac{h_{n.э}}{h} \approx \frac{h^k}{h^n}$$

где $c_n(f)$ – стержневая скорость волн в накладке.

Дополнительные резонансы в системе на высоких частотах могут быть вызваны отражением волн от границ пьезоэлемента с цилиндром и накладкой.

Таким образом, на низких частотах колебательный процесс определяется продольными колебаниями преобразователя, при которых диаметр согласующего элемента может не приниматься во внимание. Распределение резонансных частот находится в соответствии с теорией продольных колебаний стержней. С увеличением частоты скорость продольных волн в стержне уменьшается, и число резонансов на единичном частотном интервале увеличивается. В области краевого резонанса на нижнем торце цилиндра происходит запираание преобразователя – нормальные волны вырождаются в нераспространяющиеся моды колебаний. При дальнейшем увеличении частоты вплоть до частоты радиального резонанса число резонансов на единичном частотном интервале меняется незначительно (рис. 2.36). Максимальная колебательная активность преобразователя наблюдается в области частот, примыкающей снизу к частоте первого радиального резонанса, что можно объяснить высоким значением пьезомодуля d_{31} керамики ЦТС и механической податливостью преобразователя радиальным деформациям. Увеличение толщины накладки смещает максимум колебательной активности вниз по частоте.

Конические согласующие элементы в пьезопреобразователях (рис. 2.31, в), в отличие от цилиндрических, не имеют ярко выраженной границы

в месте их соединения с волноводом. Внутренняя обратная связь, возникающая при переотражениях продольных волн от концов согласующих элементов, резко уменьшается, что ведет к сглаживанию соответствующих резонансных максимумов на АЧХ датчика. Основным размером, выступающим в качестве источника резонансных колебаний, становится радиус пьезоэлемента, наклейки и торца согласующего элемента. На рис. 2.37 приведены АЧХ преобразователей с тонким пьезоэлементом (0,15 мм) при вариации угла раствора конуса.

Здесь имеет место один резонансный максимум на частоте, близкой к частоте радиального резонанса пьезодиска, соединенного с конусом как пассивной массой. Добавление тонкой наклейки на свободную поверхность пьезоэлемента приводит к возникновению добавочных резонансов выше и ниже частоты радиального резонанса пьезоэлемента и понижению его радиальной частоты (рис. 2.38). Высокочастотный резонанс связан с радиальными колебаниями наклейки, а низкочастотный – с появлением резонанса колебаний по длине. С увеличением толщины наклейки увеличивается резонансная активность в низкочастотной области.

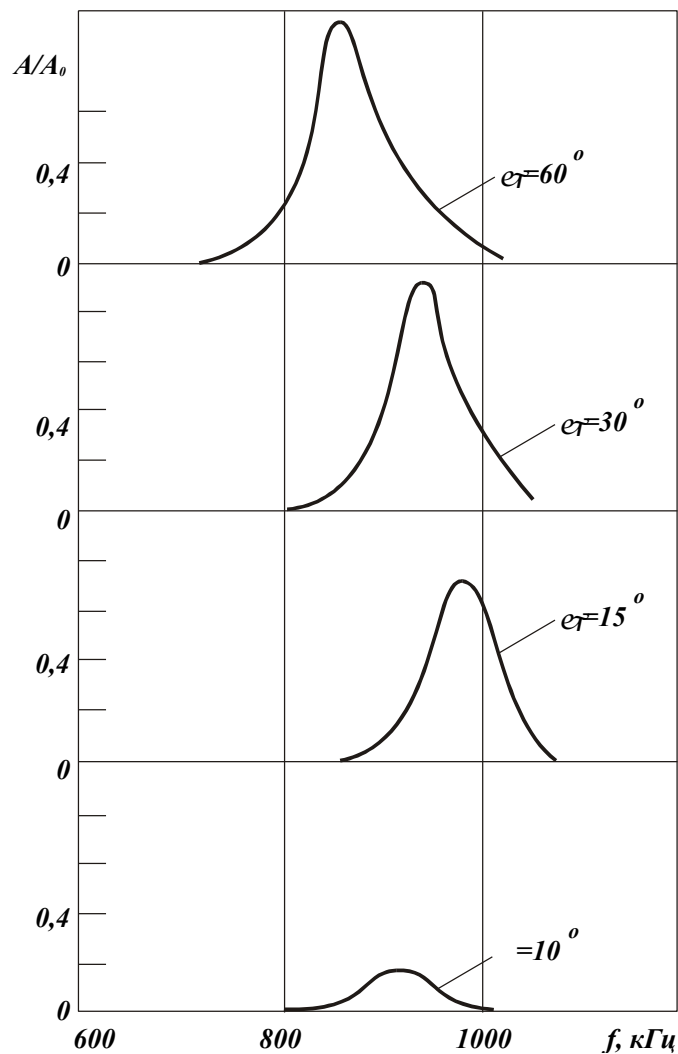


Рис. 2.37. АЧХ преобразователей с коническим согласующим элементом при вариации угла раствора конуса (диаметр основания конуса 3 мм)

На рис. 2.39 приведены АЧХ преобразователей с пьезоэлементом толщиной 0,8 мм. На них резонансы концентрируются ниже частоты радиального резонанса, а при $\epsilon\tau=10^\circ$ просматриваются сглаженные продольные резонансы. Сравнивая рис. 2.38 и рис. 2.39, можно заключить, что управлять АЧХ преобразователя продольных волн можно как изменением толщины пьезоэлемента, так и толщины накладки. При этом их увеличение смещает колебательную активность по частоте вниз.

Для оценки частот резонанса, связанных с колебаниями конуса по длине, необходимо учитывать характер изменения скорости звука продольных волн в конусе (рис. 2.34).

Сопоставляя результаты измерений колебаний дисковых преобразователей продольных волн на основе пьезокерамики ЦТС с

цилиндрическими и коническими согласующими элементами, отметим следующее. Колебательная активность преобразователей с тонкими пьезоэлементами максимальна в области частот, прилегающей снизу к частоте первого радиального резонанса. С ростом толщины пьезоэлемента и накладки максимум активности смещается по частоте вниз.

Для оценок резонансных частот, связанных с колебаниями по длине, можно использовать теорию колебаний длинных стержней с учетом характера изменения скорости звука при изменении частоты. АЧХ преобразователей с коническим согласующим элементом существенно более сглажены и при определенных сочетаниях конструктивных параметров могут быть как моночастотными, так и широкополосными.

Конкретный вид АЧХ датчика в некоторых пределах зависит также от свойств материалов, связывающих пьезоэлемент с согласующим элементом и накладкой, качества соединения его с волноводом, конструкции токосъемника и акустического контакта с окружающими деталями. Поэтому точный расчет АЧХ в настоящее время, по-видимому, невозможен. Оценки характеристик датчиков для целей диагностики с достаточной для практики точностью можно проводить с учетом изложенных данных. Акустические преобразователи с коническими согласующими элементами на основе пьезокерамики ЦТС-19 имеют коэффициент передачи на частоте резонанса 0,3-0,1.

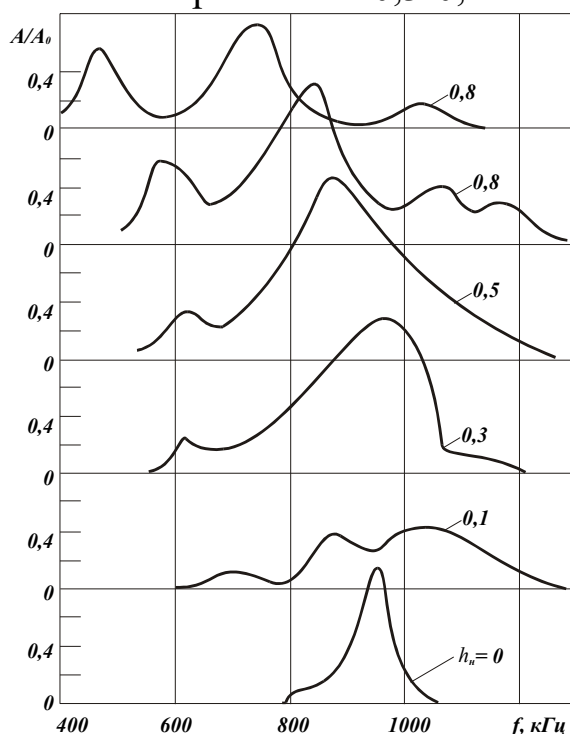


Рис. 2.38. АЧХ преобразователей с коническим согласующим элементом при вариации высоты накладки (диаметр основания конуса 3 мм, угол раствора 10°)

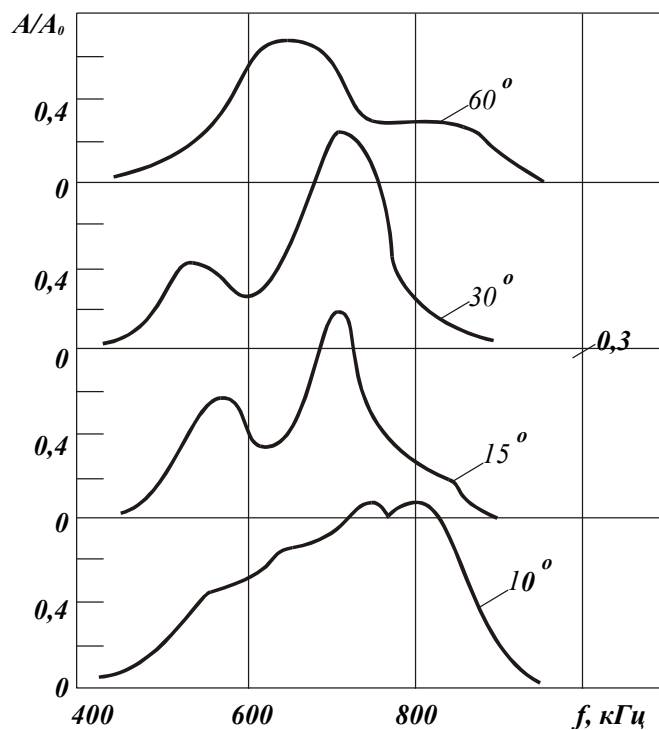


Рис. 2.39. АЧХ преобразователей с коническим согласующим элементом и пьезоэлементом высотой 0,8 мм и диаметром 3 мм при вариации угла раствора конуса

2.4.3. Конструкции и основные характеристики преобразователей изгибных и крутильных волн

Генерация изгибных волн в волноводе основана на приложении колебательного давления в направлении, перпендикулярном его оси. Для этой цели могут быть применены преобразователи на основе пьезоактивных материалов с различной геометрией или использовано прямое преобразование продольных колебаний одного волновода в изгибное колебание другого. Второе направление будет рассмотрено в параграфе 2.4.4.

На рис. 2.40, а приведена конструкция преобразователя изгибных волн для полоскового волновода, в котором используется толщинная мода колебаний пьезопластины [57]. Гребенчатая конструкция контактной поверхности преобразователя обеспечивает перпендикулярное оси волновода движение его участков длиной $\lambda/2$. При этом эффективно возбуждается изгибная волна заданной частоты. Демпфирование свободного конца волновода подавляет отраженную волну, обеспечивая уменьшение переходных искажений. Практически такая конструкция применяется на высоких частотах 2-3 МГц. В более низкочастотной области лучшие результаты получаются с дисковыми пьезоэлементами (рис. 2.40, б, в).

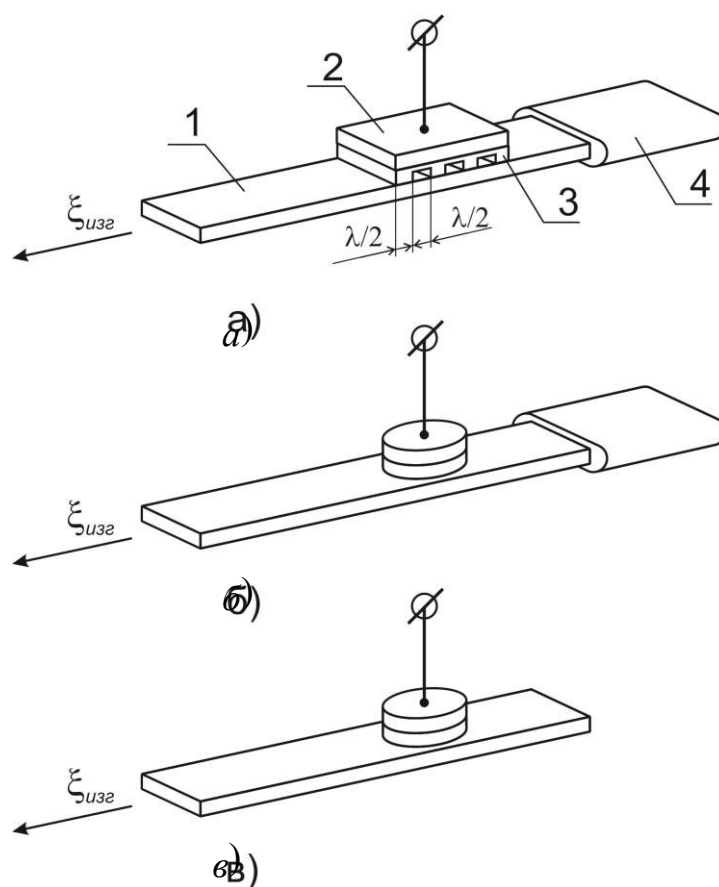


Рис. 2.40. Конструкции преобразователей изгибных волн:

а – в виде гребня; б – дисковая с демпфером; в – дисковая без демпфера

Резонансные характеристики такой системы задаются высотой пьезоэлемента и металлической накладки, устанавливаемой на его тыльной стороне, а также расстоянием пьезоэлемента от свободного конца волновода в конструкции рис. 2.40, в. Определяющими являются продольные колебания системы пьезоэлемент – накладка.

Характерный вид АЧХ преобразователя изгибных волн (рис. 2.40, б) с пьезокерамикой ЦТС–19 приведен на рис. 2.41.

В нем использовался волновод прямоугольного сечения $2,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ и пьезоэлемент диаметром 2,5 мм высотой 0,9 мм и накладки такого же диаметра. Максимальную активность имеет низкочастотный резонанс, положение которого на частотной оси можно определить по формуле

$$f_0 \approx \frac{1}{2h_n} \sqrt{c_n^2 - c_k^2}, \quad (2.59)$$

где $h_{n.э}$, h_n , h_k – высота пьезоэлемента, накладки и контактного слоя между ними, соответственно; $c_{n.э}$, c_n , c_k – стержневая скорость в пьезоэлементе, накладке и контактном слое.

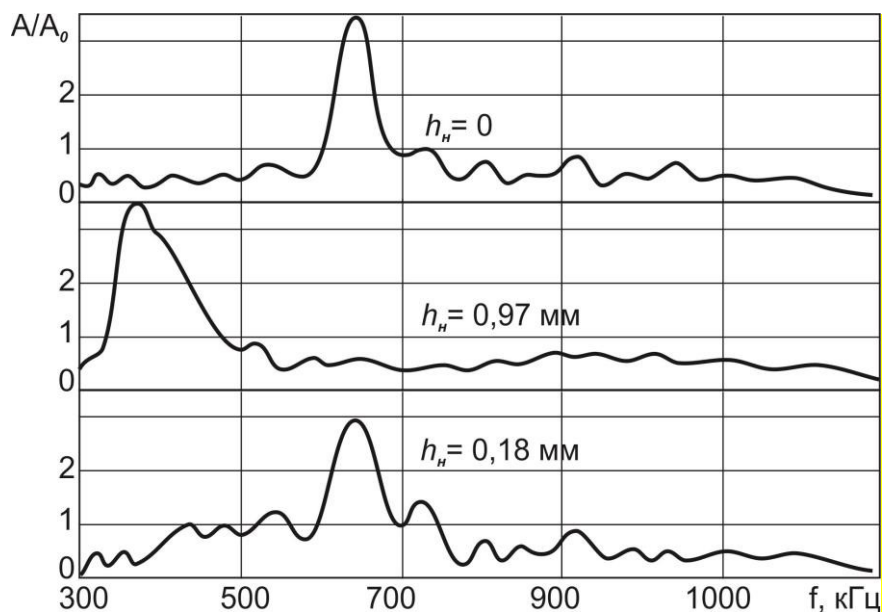


Рис. 2.41. АЧХ преобразователя изгибных волн:

h_n – высота накладки

Коэффициент передачи преобразователя лежит в пределах 0,15–0,30 с тенденцией к уменьшению при увеличении высоты накладки свыше 0,5 мм. Относительная ширина полосы пропускания преобразователя 0,10–0,15 на уровне 0,5.

Заметно более высокий коэффициент передачи имеют преобразователи, у которых пьезоэлемент расположен вблизи конца волновода (рис. 2.40, в). Однако резонансные свойства такой системы становятся также функцией толщины волновода и расстояния от конца волновода до пьезоэлемента, что усложняет выбор геометрических размеров и настройку преобразователя.

На рис. 2.42 приведены АЧХ преобразователя изгибных волн с волноводом прямоугольного сечения $2,5 \times 1,5$ мм из стали 0Х18Н10Т, пьезоэлементом высотой 0,9 мм и накладкой из стали 0Х18Н10Т высотой 0,27 мм. Диаметр пьезоэлемента и накладки 2,2 мм. Варьировалось расстояние от края пьезоэлемента до свободного конца волновода.

Скорость изгибных волн в этом волноводе на частоте 400 кГц равна 3000 м/с. Получаем, что максимальное расширение полосы пропускания такого преобразователя достигается при его размещении на расстоянии примерно $\lambda/2$ от конца волновода до оси пьезоэлемента. Причем АЧХ преобразователя расширяется в сторону высоких частот.

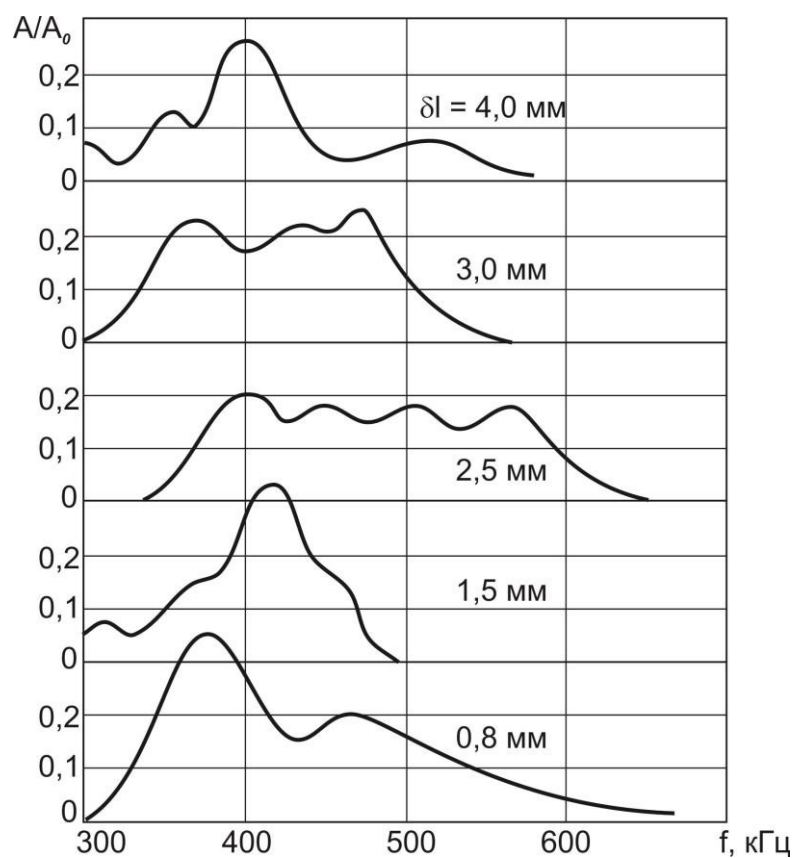


Рис. 2.42. АЧХ преобразователя с волноводом изгибных волн

Коэффициент передачи рассмотренного преобразователя может достигать 0,4–0,5. Относительная ширина полосы пропускания находится, как правило, в пределах 0,3–0,4. Для ее расширения целесообразно покрывать систему пьезоэлемент–накладка резиноподобным герметиком, что также защищает ее от внешних воздействий. При этом резонансная частота преобразователя уменьшается на 5–7%, коэффициент передачи падает на 15–25%, а полоса пропускания увеличивается на 20–30%. Эта операция существенно сглаживает переходные процессы в преобразователе.

Для возбуждения крутильных волн в цилиндрическом волноводе необходимо создать деформацию кручения. В пьезокерамике с однонаправленной поляризацией такой вид деформации реализовать невозможно, поэтому применяют более сложные системы электродов. Например, используя свойство керамики ЦТС деформироваться со сдвигом при приложении электрического поля перпендикулярно вектору поляризации

(модуль $d_{15} \neq 0$), разработаны преобразователи крутильных волн в форме полых цилиндров (рис. 2.43).

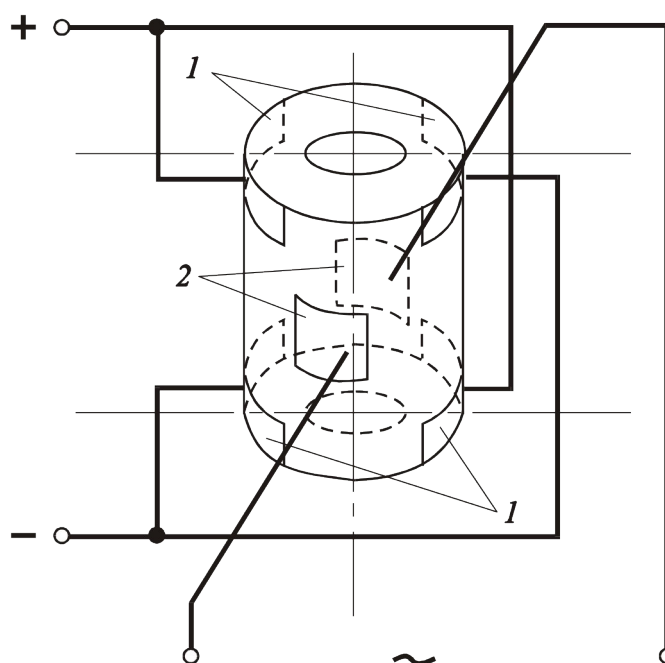


Рис. 2.43. Пьезопреобразователь крутильных волн:

1 – поляризующие электроды; *2* – рабочие электроды

Цилиндры пьезокерамики поляризуются двумя парами электродов, нанесенных на цилиндрическую поверхность вблизи торцев. В дальнейшем эти электроды не используются, а крутильные колебания возбуждаются с помощью двух электродов, расположенных на диаметрально противоположных сторонах цилиндра [48].

2.4.4. Расширение функциональных возможностей преобразователей

Ограниченные возможности размещения датчиков внутри оборудования ЯЭУ в ряде случаев затрудняют применение волноводных линий изгибных и крутильных волн. В то же время, исходя из поставленной задачи, целесообразно, например, использовать чувствительный элемент на изгибных волнах. Для решения этой задачи можно использовать конструкции, позволяющие проводить взаимные преобразования типа колебаний в волноводах, в том числе в экстремальных и затесненных условиях

Эффективным узлом преобразования продольных волн в изгибные является взаимно перпендикулярное соединение двух волноводов (рис. 2.44, *а, б*). При симметричной конструкции возбуждение паразитных типов волн не наблюдается в широком диапазоне частот (400–900 кГц) при диаметре волноводов около 1 мм. Подбором сечения волноводов и площади стыка удастся обеспечить снижения амплитуды отраженной от места стыка продольной волны до 20–30% амплитуды падающей волны. В качестве поглотителя можно использовать обвивку свободного конца волновода тонкой мягкой проволокой. В несимметричной конструкции высокое качество преобразования удастся получить лишь в узком диапазоне частот, который определяется резонансными явлениями в свободном кончике волновода изгибных волн.

Эффективный преобразователь крутильных волн может быть изготовлен на базе пары преобразователей продольных волн или с использованием одного преобразователя, снабженного парой волноводов (рис. 2.45). В первом случае для нормальной работы преобразователя крутильных волн необходимо иметь два идентичных преобразователя продольных волн и обеспечить их работу в противофазе. Во втором – необходимо выполнение условия равенства длин разветвленных участков

волноводов. Для снижения реверберационных помех не следует выбирать длину разветвленных участков слишком малой, а умеренное их демпфирование существенно улучшает качество передачи импульсных сигналов.

Во избежание возникновения паразитных колебаний и резонансов поперечные размеры волноводов и их свободных концов желательно уменьшить. Это позволяет расширить рабочий диапазон частот датчиков изгибных волн в высокочастотную область.

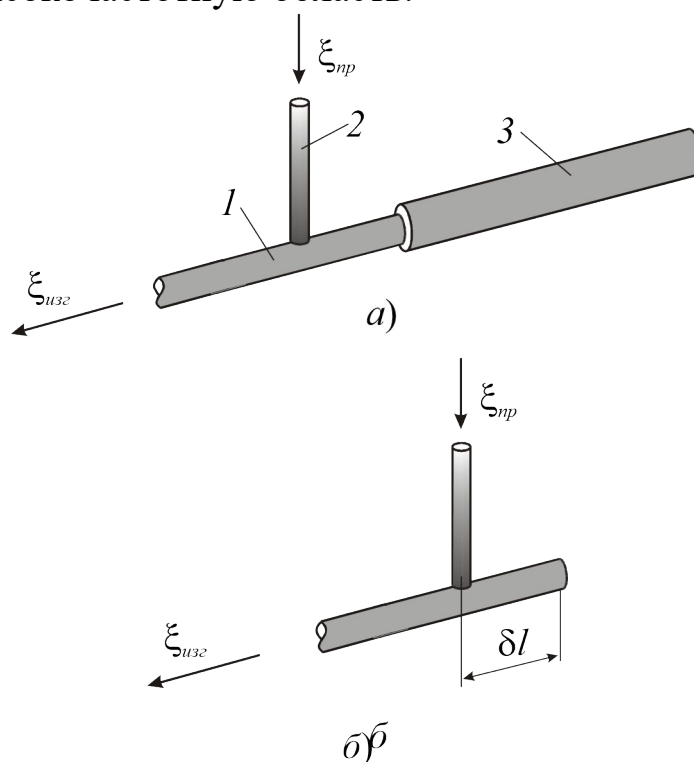


Рис. 2.44. Узлы преобразователей продольных волн в изгибные:
a – симметричная конструкция; *б* – несимметричная конструкция
 1 – волновод изгибных волн; 2 – волновод продольных волн; 3 – демпфер

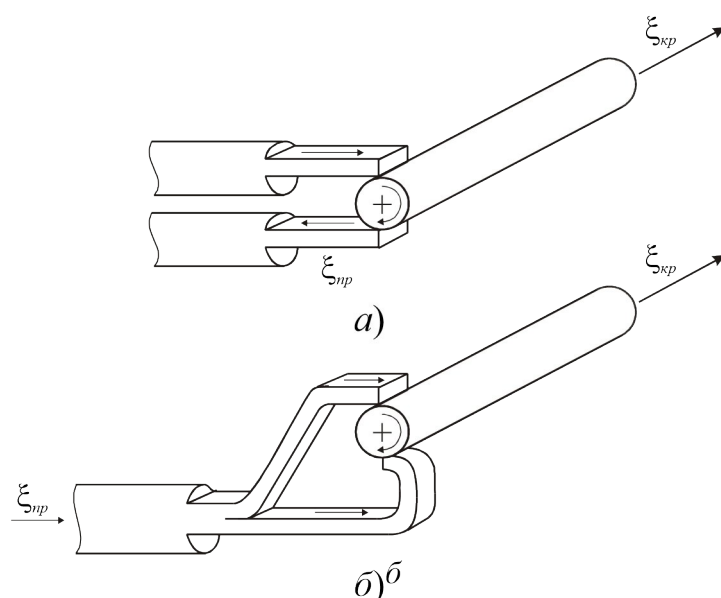


Рис. 2.45. Узлы преобразователей продольных волн в крутильные с двумя (а) и одним (б) волноводами продольных волн

2.5. Особенности вторичной аппаратуры активных волноводных систем контроля теплоносителя ЯЭУ

Важной частью системы акустического контроля является вторичная электронная аппаратура. Без совершенной аппаратуры для излучения, приема и обработки ультразвуковых сигналов не могут быть реализованы высокие потенциальные возможности, которыми обладают волноводные датчики. В настоящее время промышленностью практически не выпускаются приборы (кроме осциллографов), пригодные для использования хотя бы в виде функциональных блоков в акустических системах контроля. Это заставляет разработчиков такой техники самим искать эффективные схемные решения, отработывая их в опытных образцах аппаратуры. При этом следует учитывать ряд особенностей, связанных с конструкцией волноводных датчиков и методикой измерений.

В датчиках для внутриреакторных измерений, работающих в импульсном режиме, существенна проблема обеспечения стабильности настройки строб-импульса на принимаемые сигналы, отраженные от чувствительного элемента или окружающего его теплоносителя. Вследствие температурных изменений из-за вариации скорости звука в волноводе меняется временная задержка распространения сигналов,

достигающая 50–100 мкс. Поэтому необходима автоматика слежения за временем задержки принимаемых импульсов, обеспечивающая соответствующую автоподстройку положения строб - импульса. При этом в ряде случаев целесообразно введение автоподстройки усиления принимаемых сигналов (АРУ), позволяющей поддерживать их оптимальный уровень.

Весьма важной является проблема обеспечения помехоустойчивости сигнала, транспортируемого по электрической линии связи иногда длиной до 200 м. Особенно актуально это при использовании акустических систем диагностики на стендах по отработке элементов ЯЭУ с электрообогревом. Для решения этой задачи используются согласующие дифференциальные трансформаторы, линии связи в виде витой пары, стробирование сигнала во времени.

Вторичная аппаратура систем контроля должна обладать также высоким быстродействием, поскольку частотный диапазон применяемых сигналов распространяется до 10 МГц. При работе в импульсном режиме излучение–прием во избежание потери информации необходимо промежуточное хранение данных или их накопление между циклами измерений.

Ввиду «многопараметричности» ультразвукового сигнала и желательности получения максимальной информации о процессах целесообразно введение в аппаратуру блоков, позволяющих измерять не один, а несколько параметров, проводить предварительную обработку данных и в нормированном виде передавать дальше для использования.

3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ

3.1. Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ ЛИНЕЙНЫХ ЗВЕНЬЕВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Работа содержит расчетно-экспериментальный анализ динамических свойств и передаточных функций типовых звеньев систем автоматического управления.

Целью работы является изучение динамических свойств и передаточных функций типовых звеньев системы автоматического регулирования. Изучение электронных аналогов реальных объектов.

Основы теории

Система автоматического регулирования (САР) – совокупность элементов, предназначенная для поддержания заданной величины в определённых пределах.

САР состоит из объекта регулирования и автоматического регулятора.

Общепринятый подход при изучении динамических свойств САР заключается в определении изменения выходного сигнала при стандартных входных воздействиях. Различают временной и частотный анализ.

В случае временного анализа в качестве стандартных входных воздействий выбирают сигналы в виде:

- прямоугольного импульса (причем его длительность выбирают много меньшей характерных длительностей процессов в исследуемой

системе), выходной сигнал называют – **импульсной характеристикой** системы;

- единичного скачка (ступеньки, толчка); выходной сигнал называют – **переходной характеристикой** системы; ⌚ линейной функции.

В случае частотного анализа стандартное воздействие – синусоидальный сигнал. Результатом анализа являются получение амплитудночастотной и фазо-частотной характеристик системы (АЧХ и ФЧХ). **Амплитудно-частотная характеристика** – это зависимость коэффициента усиления системы от частоты, **ФЧХ** – это зависимость фазового сдвига синусоидального сигнала между входом и выходом системы от частоты.

Регулируемый объект в общем случае сложен, поэтому его разбивают на простые составляющие элементы – звенья. Звеном системы называют ее элемент или часть, обладающую определенными свойствами в динамическом отношении. Физическая основа звена не играет определяющей роли.

Простейшими типовыми звеньями САР являются: усилительное, интегрирующее, апериодическое, колебательное, дифференцирующее и запаздывающее.

В инженерной практике для упрощения анализа и расчетов пользуются символическим языком, описывающим реальные звенья, составляющие объект регулирования – передаточными функциями. **Передаточная функция** определяется как отношение образа выходного воздействия к образу входного воздействия.

Пусть между входным воздействием X и выходным сигналом Y имеется линейная взаимосвязь, которая в общем случае описывается уравнением

$$\begin{array}{c}
 \longrightarrow \boxed{\text{Звено}} \longrightarrow \begin{array}{ccc} X & Y & n \\ m & d^k X & d^k Y \end{array} \\
 \nwarrow \quad \quad \quad \nwarrow \\
 0 a_k \frac{d^k}{dt^k} \quad 0 b_k \frac{d^k}{dt^k} . \quad (3.1)
 \end{array}$$

Рис. 3.1. Передаточная функция

Выполнив над обеими частями этого уравнения преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях, получим:

$$\begin{aligned} Y(s) &= \sum_{k=0}^n a_k s^k X(s) = \sum_{k=0}^m b_k s^k X(s), \\ Y(s) &= D(s) X(s) = K(s) X(s), \end{aligned}$$

откуда

$$Y(s) = \frac{K(s)}{D(s)} X(s). \quad (3.2)$$

Величину $Z(s) = \frac{K(s)}{D(s)}$ называют передаточной функцией, $D(s)$

а $D(s) = \sum_{k=0}^n a_k s^k$ - характеристическим многочленом.

Таким образом, выходная величина Y определяется соотношением

$$Y(s) = X(s) Z(s). \quad (3.3)$$

Поэтому $Y(s)$ можно трактовать как отклик звена на входное воздействие вида $X(s)$, причем $Y(s)$ получается простым умножением образа входного воздействия на передаточную функцию звена.

Электронное аналоговое моделирование производится с применением операционных усилителей. На функциональных схемах усилитель изображают в виде треугольника. Усилитель имеет два входа (прямой и инвертирующий) и один выход.

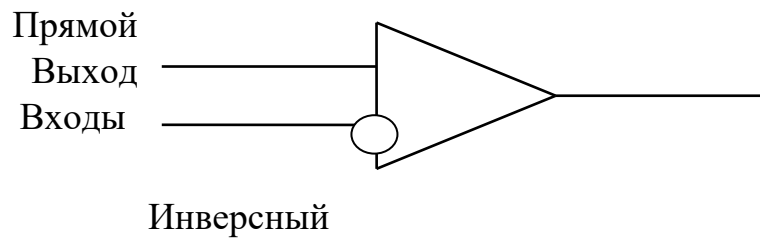


Рис. 3.2. Схема усилителя

Характеризуется дифференциальным коэффициентом усиления (K_d), входным ($R_{вх}$) и выходным ($R_{вых}$) сопротивлениями, а также АЧХ и ФЧХ. Идеальный усилитель имеет бесконечное усиление K_d , бесконечное входное сопротивление $R_{вх}$, нулевое выходное сопротивление $R_{вых}$, линейные АЧХ и ФЧХ.

В настоящее время разработаны и используются усилители с параметрами – $K_d=10^6 - 10^8$, $R_{вх}=10^{13}$ Ом, $R_{вых}=1$ Ом. С АЧХ и ФЧХ линейными в диапазоне частот от 0 до 50 000 100 Гц.

Типовые звенья САР

Усилительное звено

Описывается уравнением: $Y=k X$. Передаточная функция $Z(S)=k$.

Моделируется схемой (рис. 3.3)

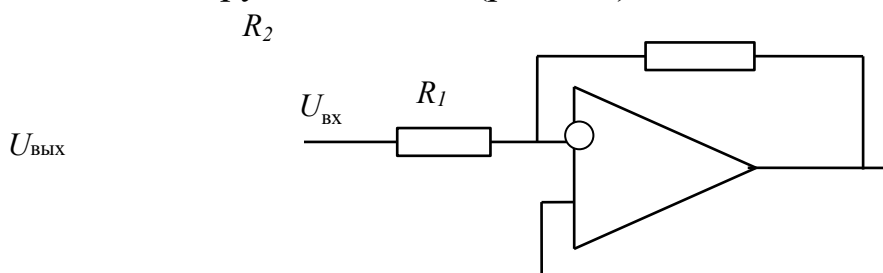


Рис. 3.3. Усилительное звено

Для этой схемы справедливо $k = \frac{R_2}{R_1}$.

Интегрирующее звено

Описывается уравнением $T \frac{dY}{dt} = X$.

Передаточная функция $Z(S) = \frac{1}{TS}$

Моделируется схемой (рис. 3.4)

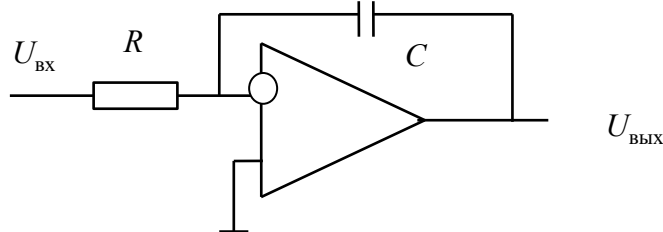


Рис. 3.4. Интегрирующее звено

Для этой схемы справедливо $T=RC$.

Апериодическое звено

Описывается уравнением $T \frac{dY}{dt} + Y = kX$.

Передаточная функция $Z(S) = \frac{k}{TS + 1}$

Моделируется схемой (рис. 3.5)

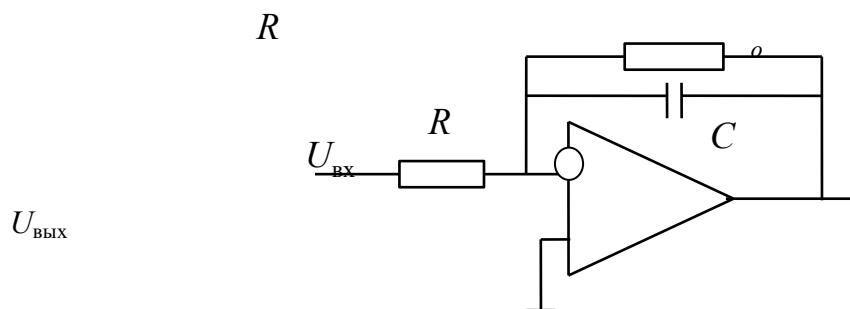


Рис. 3.5. Апериодическое звено

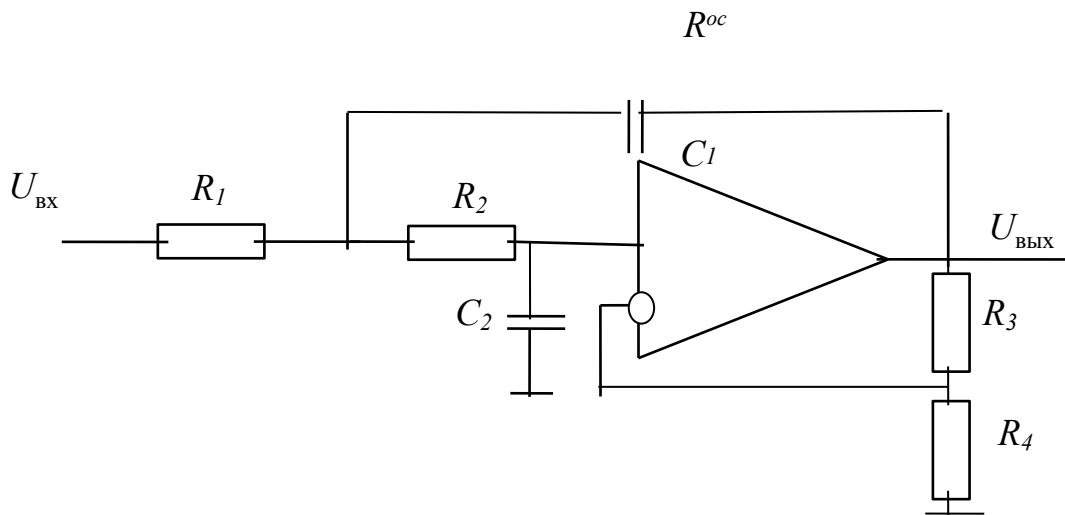


Рис. 3.6. Колебательное звено

$$\frac{1}{R} \geq 1 \quad 1 \quad 1 \quad R \varepsilon$$

Колебательное звено

Описывается уравнением $T_2 \frac{d^2 Y}{dt^2} + T_1 \frac{dY}{dt} = kX$.

Передаточная функция $Z(S) = \frac{k}{T_2 S^2 + T_1 S + 1}$.

Моделируется схемой (рис. 3.6).

Для этой схемы справедливо $T_1 = R_1 C_1 R_2 C_2$, $T_2 = R_1 C_1$, $k = \frac{R_2 C_1}{R_2 C_2 R^3}$.



$$T_2 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}; \quad k = \frac{R^3}{R_4}.$$

Дифференцирующее звено

Описывается уравнением $Y = T \frac{dX}{dt}$.

Передаточная функция $Z(S) = TS$. Моделируется схемой (рис. 3.7).

Для этой схемы справедливо $T = R$, C , k .

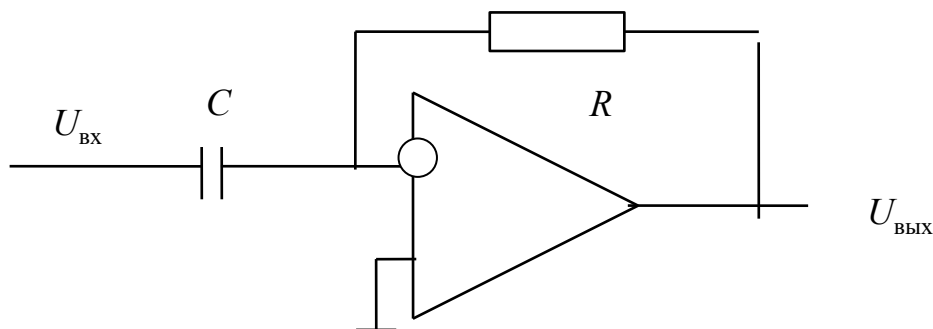


Рис. 3.7. Дифференцирующее звено

Для этой схемы справедливо $T = RC$.

Запаздывающее звено

Реализует функцию задержки входного сигнала на заданное время t . Моделируется, например, при помощи магнитофона вариацией скорости движения ленты или численными методами (в данной работе не рассматриваются).

Передаточная функция звена $Z(S) = \exp(-tS)$.

Таким образом, передаточные функции для типовых звеньев таковы:

- | | |
|--------------------------|--|
| ⌚ усилительное звено | $Z(S) = k;$ |
| ⌚ интегрирующее звено | $Z(S) = \frac{1}{TS};$ |
| ⌚ апериодическое звено | $Z(S) = \frac{k}{TS + 1};$ |
| ⌚ колебательное звено | $Z(S) = \frac{k}{T_1^2 S^2 + 2T_1 T_2 S + T_2^2};$ |
| ⌚ дифференцирующее звено | $Z(S) = TS;$ |
| ⌚ запаздывающее звено | $Z(S) = \exp(-tS).$ |

Анализ динамических свойств апериодического звена

Пусть объект управления задан передаточной функцией, имеющей вид апериодического звена $Z(S) = 1/(TS+1)$.

Вначале рассмотрим переходную характеристику объекта управления. **Переходная характеристика** – это реакция системы на скачкообразное входное воздействие.

Входное воздействие

1) во временной области

$$X(t) = 0 \quad \text{при } t < 0,$$

$$X(t) = X_0 \quad \text{при } t \geq 0.$$

2) в Лапласовской области $X(t) = X_0 / S$.

Поскольку передаточная функция объекта управления $Z(S) = 1/(TS+1)$, то сигнал на выходе объекта управления имеет вид $Y(S) = Z(S)X(S) = X_0 / S(TS+1)$.

Для получения явного вида функции выполним обратное преобразование Лапласа, воспользовавшись формулой Жордана.

Характеристическое уравнение $D(S) = S(TS+1) = 0$. Его корни $S_1 = 0$; $S_2 = -1/T$.

Подстановка найденных корней в производную dD/dS дает $D'(S_1) = 0$;

$$D'(S_2) = -1/T.$$

Обратное преобразование Лапласа имеет вид

$$Y(t) = X_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right)$$

$$X_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \right).$$



Графический вид переходной характеристики апериодического звена представлен на рис. 3.8.

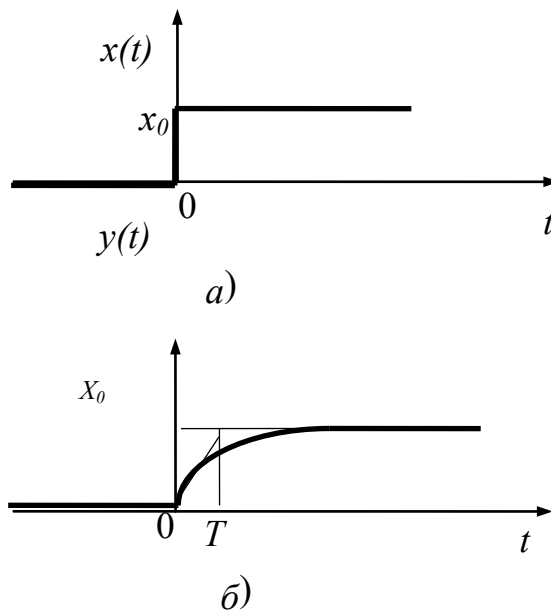


Рис. 3.8. Переходная характеристика аperiodического звена:

a – входной сигнал; *б* – выходной сигнал

Теперь найдем АЧХ и ФЧХ исследуемого звена (АЧХ – коэффициент усиления звена от частоты, ФЧХ – фазовый сдвиг гармонического сигнала между входом и выходом в функции частоты). Для этого в пере-

1 даточной функции $Z(S)$ _____

произведем замену S на $j\omega$ и разделим

$$TS \equiv 1$$

полученную дробь на действительную и мнимую части путем умножения числителя и знаменателя на комплексно сопряженный знаменатель. В результате получим

$$Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega T + 1} = \frac{1}{j\omega T + 1} \cdot \frac{1 - j\omega T}{1 - j\omega T} = \frac{1 - j\omega T}{1 + \omega^2 T^2}$$

Далее находим АЧХ $|Z(j\omega)| = \sqrt{\frac{1}{1 + \omega^2 T^2}}$ 2,

и ФЧХ $\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}}{\text{Re}} = \arctg \frac{-\omega T}{1}$

Вид функции АЧХ и ФЧХ приведен на рис. 3.9.

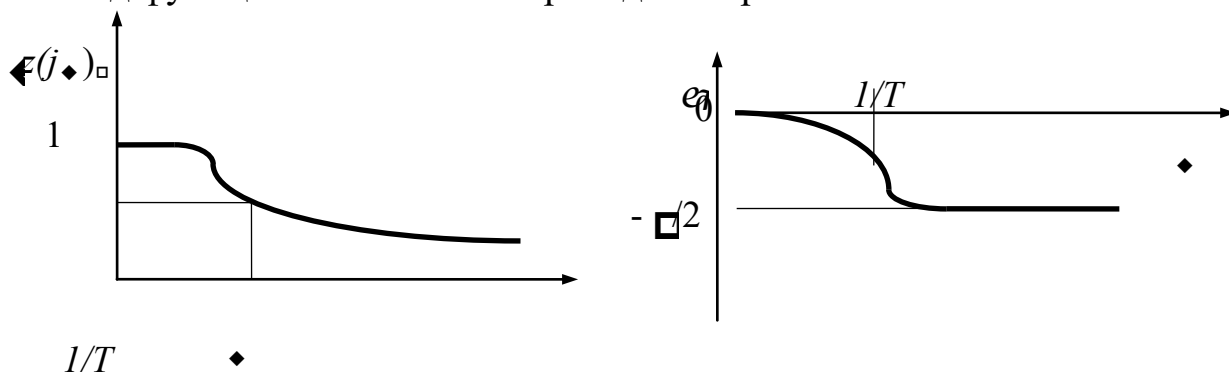


Рис. 3.9. Переходная характеристика аperiodического звена

Порядок выполнения работы

Для моделирования обратных связей используется электронный стенд, в состав которого входят: планшет, блок питания и электроннолучевой осциллограф (индикатор).

Перед началом работы у преподавателя или учебного мастера получить задание с указанием вида звеньев, подлежащих изучению.

Включение аппаратуры и последовательность выполнения работы

1. Включить блок питания переводом тумблера **Сеть** в верхнее положение.
2. Включить осциллограф (для этого тумблер **Сеть** перевести в верхнее положение).
3. Предварительно ручки управления на осциллографе установить в следующие положения:
⌚ **Развертка 50 мкс/дел;** ⌚
Усиление 2 В/дел.
4. Добиться синхронизации луча осциллографа (устойчивого изображения осциллограммы) ручками **Стабилизация** и **Уровень**.

5. Переключатели на планшете установить в следующие положения:

- **Работа** 1;
- **Блок сигналов** ↑;
- **Звено** подключить исследуемое звено.

6. Ручками \star , ω и **Развертка** выбрать удобное для наблюдения изображение переходной характеристики системы, после чего зарисовать полученную осциллограмму.

7. Переключатели на планшете установить в следующие положения:

- **Работа** 1;
- **Блок сигналов** $\sin \diamond t$;
- **Частота**
последовательно 1, 2,
3,...

8. Ручками \star , ω и **Развертка** выбрать удобное для наблюдения изображение входного и выходного синусоидальных сигналов.

9. Измерить период сигналов на всех частотах и записать результат в таблицу.

10. Записать амплитуды входного и выходного сигналов, а также их фазовый сдвиг на всех частотах.

11. Переключателем **Звено** подключить следующее исследуемое звено и повторить пп. 5-10 этого раздела.

Обработка результатов измерений

1. Построить переходные характеристики, АЧХ и ФЧХ исследованных звеньев.

2. По переходным характеристикам рассчитать постоянные времени и коэффициенты усиления.

Оформление отчета

1. Отчет оформить на листах писчей бумаги формата А4.

2. Отчет должен содержать следующие основные части:

- формулировку цели работы;
- графический материал с результатами измерений, а именно переходные характеристики, АЧХ и ФЧХ исследованных систем;
- расчет постоянных времени систем;
- расчет и построение АЧХ и ФЧХ систем, используя найденные

по переходным характеристикам постоянные времени и константы; ⌚ выводы о проделанной работе.

3. Графические материалы выполнить вручную. Они должны содержать ясно читаемые оси и деления, размерности используемых величин, измеренные точки и кривые, необходимые пояснения и т. д.

Контрольные вопросы

1. Назовите типовые звенья САР, их назначение. Принцип действия электронных аналогов.

2. Что такое передаточная функция звена, АЧХ и ФЧХ?

3. Что называется временным и частотным анализом звена? 4. Что такое характеристическое уравнение?

Измерение АЧХ и ФЧХ системы при помощи осциллографа

На рис.3.10 приведен характерный вид синусоидальных сигналов на входе и выходе системы.

1. Определяем частоту сигнала как величину, обратную периоду, $f = 1/T_0$ ($T_0 = 2\pi/f$).

2. Коэффициент усиления на этой частоте есть отношение — $A_{\text{ВЫХ}}/A_{\text{ВХ}}$

3. Фазовый сдвиг находится по формуле $\varphi = 360 \frac{\tau_x}{T}$.
4. Отрицательным фазовый сдвиг считается, если выходной сигнал отстает от входного.
5. Для измерений используется правая часть сигналов, где завершены переходные процессы, вызванные включением генератора синусоидального сигнала.

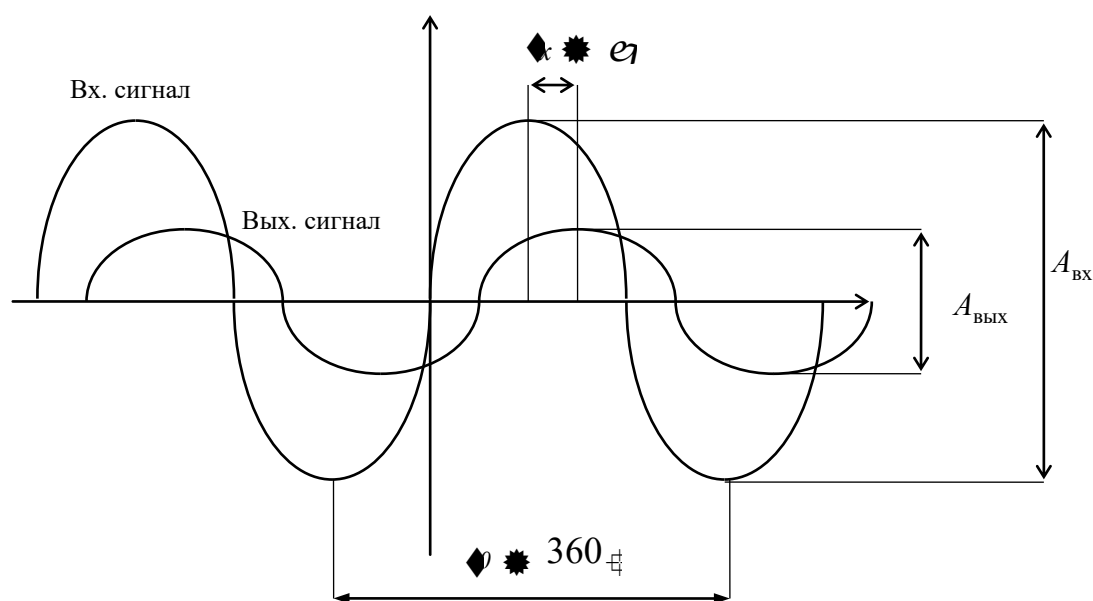


Рис. 3.10. Сигналы на входе и выходе системы

3.2. Лабораторная работа 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Работа содержит расчетно-экспериментальный анализ влияния обратной связи на поведение и устойчивость работы систем автоматического управления.

Целью работы является изучение влияния обратной связи на поведение и устойчивость работы систем автоматического управления (САУ).

Основы теории

Обратная связь играет главную роль в осуществлении систем автоматического регулирования. Смысл обратной связи заключается в подаче части выходного сигнала на вход объекта управления после той или иной его обработки. На практике в большинстве случаев используют системы автоматического управления с обратной связью, работающей по принципу компенсации возмущения (рис. 3.11).

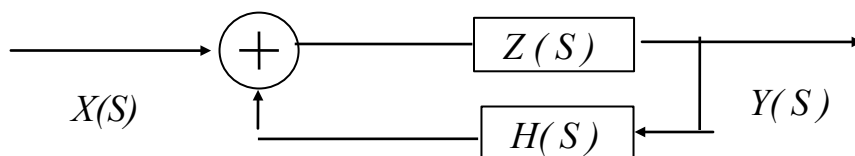


Рис. 3.11. Функциональная схема включения обратной связи в системе управления:

$Z(S)$ – передаточная функция объекта управления; $H(S)$ – передаточная функция обратной связи; S – переменная Лапласа

Передаточная функция системы (рис.3.11) записывается в виде $Z(S)$

$$W(S) = \frac{Z(S)}{1 + Z(S)H(S)} . \quad (3.4)$$

Различают **жесткую и гибкую обратные связи**. При жесткой $H(S) = K$, при гибкой – $H(S)$ является функцией S .

Системы, подлежащие управлению, могут быть устойчивыми, неустойчивыми и неопределенными. **Система устойчива**, если после прекращения входного воздействия ее выходная величина возвращается в

состояние, определенное статической характеристикой системы. **Неустойчивой система** является, если после прекращения входного воздействия ее выходная величина совершает незатухающие колебания (колебательная неустойчивость), или неограниченно возрастает (экспоненциальная неустойчивость). **Неопределенной система** является в случае, если после прекращения входного воздействия выходная величина фиксируется на достигнутом уровне.

Для ответа на вопрос об устойчивости системы регулирования необходимо аналитически исследовать корни характеристического многочлена $D(S)$ (знаменателя передаточной функции, которая имеет вид рациональной дроби), путем решения уравнения

$$D(S) = a_0 + a_1 S + a_2 S^2 + \dots + a_n S^n = 0. \quad (3.5)$$

Для систем с обратной связью

$$D(S) = 1 + Z(S) \cdot H(S) = 0. \quad (3.6)$$

Система устойчива, если все действительные части корней этого уравнения отрицательны, т. е. справедливо $\sigma_k < 0$ в $S_k = \sigma_k + j \omega_k$. Если мнимая часть хотя бы одного корня уравнения (3.5) не нулевая, то выходная величина может совершать колебательные движения. Часто поиск корней уравнения (3.5) затруднен, поэтому для оценки устойчивости системы управления используют **критерии устойчивости**. Например, применяют алгебраический критерий Рауса-Гурвица, который свидетельствует, что система устойчива, если в характеристическом уравнении (3.5) все коэффициенты a_0, a_1, \dots, a_n положительны.

Кроме того, при степени полинома $D(S)$ больше двух накладываются дополнительные условия, в частности, при $n = 3$ необходимо, чтобы $a_1 a_2 > a_0 a_3$, а при $n = 4$ - $a_1 a_2 a_3 - a_4 a_1^2 - a_0 a_3^2 > 0$.

Анализ системы автоматического управления с жесткой обратной связью

Пусть объект управления задан передаточной функцией, имеющей вид интегрирующего звена $Z(S) = 1/TS$, а передаточная функция звена обратной связи - $H(S) = K$ (рис. 3.12).

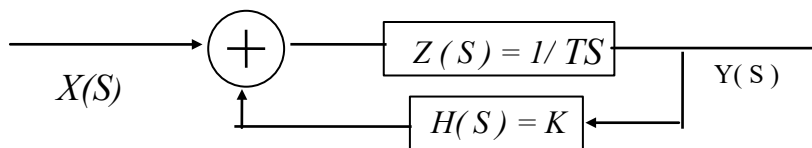


Рис. 3.12. Функциональная схема системы управления с жесткой обратной связью

Вначале рассмотрим переходную характеристику объекта управления с отключенной обратной связью (**переходная характеристика** – это реакция системы на скачкообразное входное воздействие).

Входное воздействие во временной области записывается так:

$$X(t) = 0 \quad \text{при } t < 0, \quad X(t) = X_0 \quad \text{при } t \geq 0,$$

в Лапласовской области $X(S) = X_0 / S$.

Поскольку передаточная функция объекта управления $Z(S) = 1/TS$, то выходная величина $Y(S) = Z(S)X(S) = X_0 / TS$.² Обратное преобразование дает $Y(t) = X_0 t / T$, то есть выходная величина есть линейная функция. Передаточная функция системы с обратной связью

$$W(S) = \frac{Z(S)}{1 + H(S)Z(S)} = \frac{1/TS}{1 + K/TS} = \frac{1}{TS + K}.$$

Как видим, это передаточная функция апериодического звена, постоянная времени которого равна T/K , а коэффициент усиления в установившемся режиме $1/K$.

Выходная величина записывается следующим образом:

$$Y(S) = W(S)X(S) = \frac{X_0}{S(TS + K)} = \frac{X_0}{K} \left(\frac{1}{S} - \frac{T}{TS + K} \right).$$

Обратное преобразование Лапласа

$$Y(t) = \frac{X_0}{K} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T/K}\right) \right).$$

Графический вид переходных характеристик представлен на рис. 3.13.

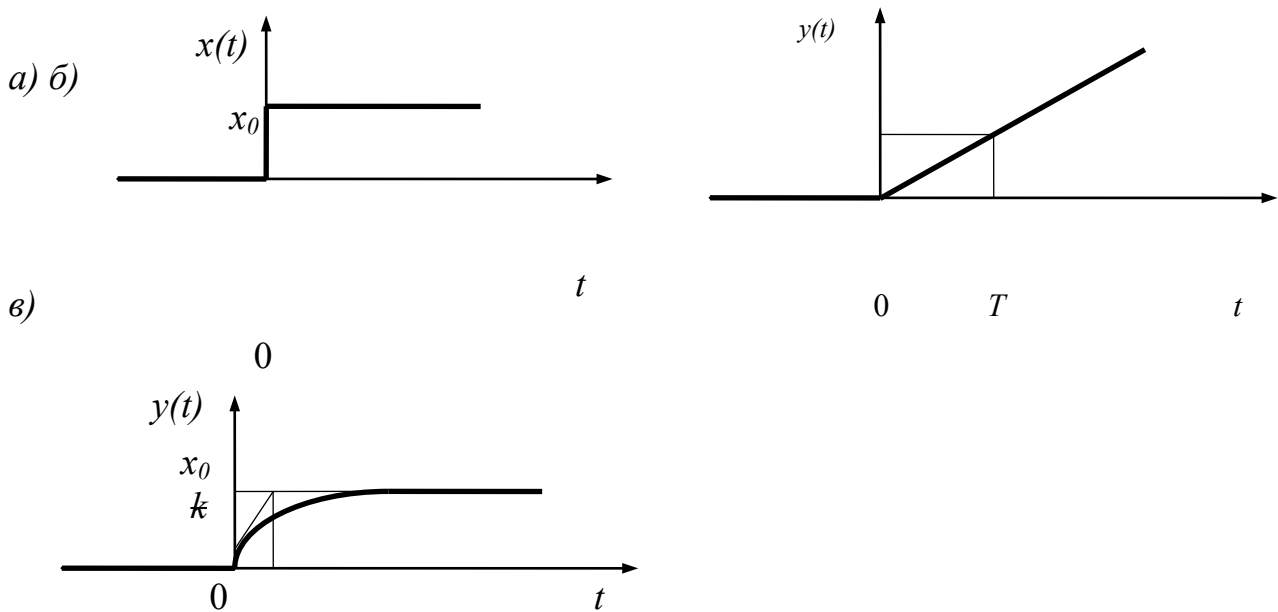


Рис. 3.13. Переходные характеристики систем:

a – входной сигнал; *б* – без обратной связи; *в* – с обратной связью

Найдем АЧХ и ФЧХ исследуемого объекта. Вначале вычислим АЧХ и ФЧХ объекта управления без обратной связи. Для этого в передаточной

функции $Z(S)$ — произведем замену S на $j\omega$ и разделим полученную дробь на действительную и мнимую части:

$$Z(j\omega) = \frac{1}{j\omega T} = \frac{1}{T\omega} j$$

Далее находим:

$$\bullet \text{ АЧХ } |Z(j\omega)| = \frac{1}{T\omega} ;$$

- [illegible]

11

K	\underline{TS}
-----	------------------

1 

K

$Tj\omega$

1 1 1 K 1

получаем $W(S) \sqsubseteq K \triangleleft 1 \sqsubseteq Tj \omega \triangleleft 1 \sqsubseteq Tj \omega \sqsubseteq K \downarrow \uparrow 1 \sqsubseteq \leftarrow \triangleright T \omega \triangleright \triangleright \square \square \leftarrow \nwarrow \downarrow 1 \sqsubseteq j \rightarrow \leftarrow \triangleright _ TK \omega \triangleright \triangleright \square \square \times$.

$$K \quad K \quad \downarrow \leftarrow \rightarrow K \quad \hookrightarrow \quad \times \square$$

$$|j\omega| = \frac{1}{K\sqrt{1 + \left(\frac{T\omega}{K}\right)^2}} \sqrt{K^2 + TS^2}.$$
$$Z$$

$$\Phi^{\Psi X} - e^{\tau \omega} \arctg \frac{TK\omega}{x}.$$

140

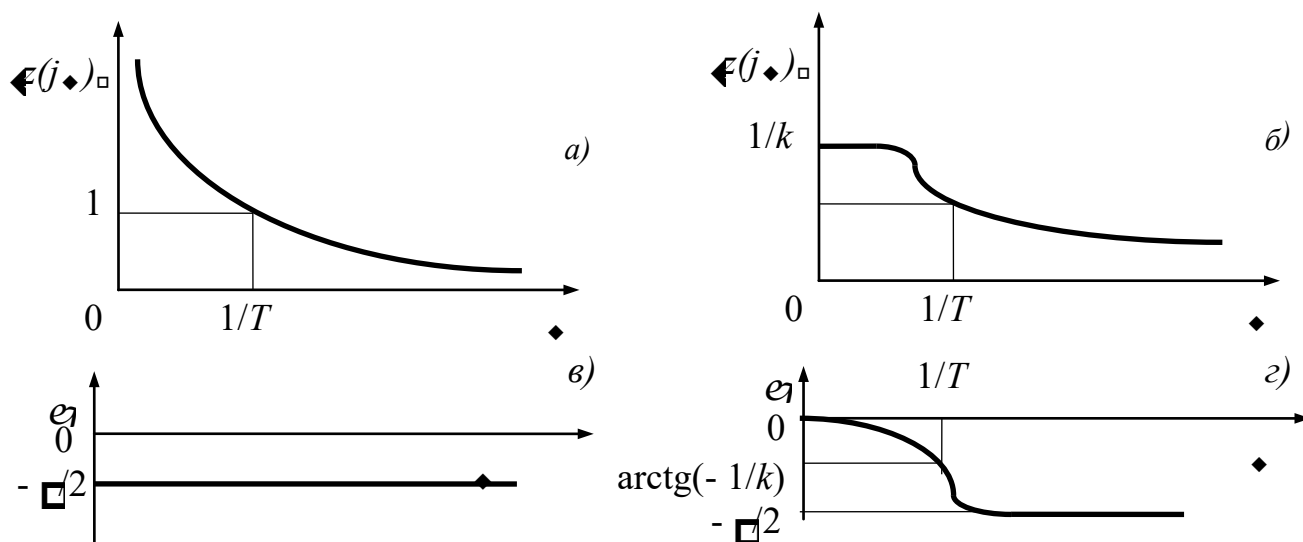


Рис. 3.14. АЧХ (а, б) и ФЧХ (в, г) характеристики систем:
а, б - без обратной связи; в, г - с обратной связью

Порядок выполнения работы

Для моделирования систем с обратными связями используется электронный стенд, в состав которого входят: планшет, блок питания и электронно-лучевой осциллограф (индикатор).

Перед началом работы у преподавателя или учебного мастера получить задание с указанием вида обратной связи системы, подлежащей изучению.

Включение аппаратуры и последовательность выполнения работы

1. Включить блок питания переводом тумблера **Сеть** в верхнее положение.
2. Включить осциллограф (для этого тумблер **Сеть** переводим в верхнее положение).

3. Ручки управления на осциллографе установить в следующие положения:

⌚ **Развертка** 50 O/s/дел.

⌚ **Усиление** 2 В/дел.

4. Добиться синхронизации луча осциллографа (устойчивого изображения осциллограммы) ручками **Стабилизация** и **Уровень**.

5. Переключатели на планшете установить в следующие положения:

- **Работа** 2;
- **Блок сигналов** \uparrow ; ⌚
Обратная связь ОТКЛ.

6. Ручками \star , ω и **Развертка** выбрать удобное для наблюдения изображение переходной характеристики системы, после чего зарисовать полученную осциллограмму.

7. Включить переключатель **Обратная связь**, установить заданные преподавателем вид и величину обратной связи и действовать согласно п.6.

8. Переключатели на планшете установить в следующие положения:

- **Работа** 2;
- **Блок сигналов** $\sin \blacklozenge t$; ⌚
Обратная связь ОТКЛ.
- **Частота** -
последовательно 1, 2,
3,...

9. Ручками \star , ω и **Развертка** выбрать удобное для наблюдения изображение входного и выходного синусоидальных сигналов.

10. Измерить период синусоидальных сигналов на всех частотах и записать результат в таблицу.

11. Записать амплитуды входного и выходного сигналов, а также их фазовый сдвиг на всех частотах.

12. Включить переключатель **Обратная связь**, установить заданные преподавателем вид и величину обратной связи и действовать согласно п.11.

Обработка результатов измерений

1. Построить переходные характеристики системы без обратной связи и с включенной обратной связью.

2. Построить АЧХ и ФЧХ системы без обратной связи и с включенной обратной связью.

Оформление отчета

1. Отчет оформить на листах писчей бумаги формата А4.

2. Отчет должен содержать следующие основные части:

- формулировку цели работы;
 - графический материал с результатами измерений, а именно переходные характеристики, АЧХ и ФЧХ исследованных систем;
 - расчет постоянной времени системы без обратной связи по ее переходной характеристике;
 - расчет и построение АЧХ и ФЧХ системы без обратной связи, используя найденную постоянную времени;
 - расчет постоянной времени и коэффициента передачи системы с обратной связью по ее переходной характеристике;
 - расчет и построение АЧХ и ФЧХ системы с обратной связью, используя найденные постоянную времени и коэффициент передачи; ⌚
- выводы о проделанной работе.

3. Графические материалы выполнить вручную. Они должны содержать ясно читаемые оси и деления, размерность используемых величин, измеренные точки и кривые, необходимые пояснения и т. д.

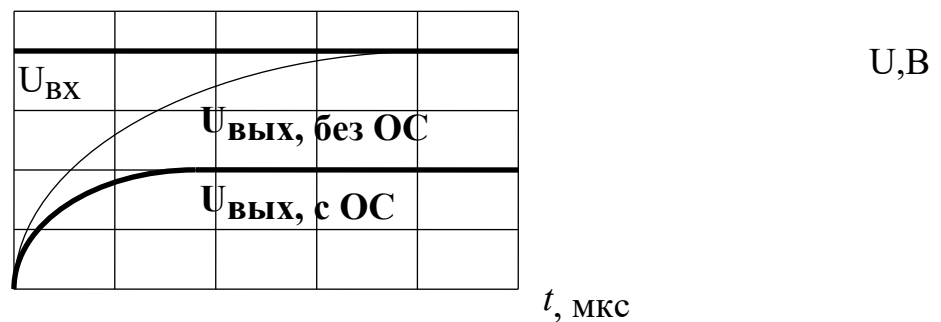
Контрольные вопросы

1. Какие виды обратных связей Вы знаете?

2. Назовите критерии устойчивости систем с обратной связью.
3. Что такое характеристическое уравнение?
4. В каком случае система с положительной обратной связью сохраняет устойчивость?
5. Почему при анализе устойчивости системы исследуют корни характеристического уравнения?

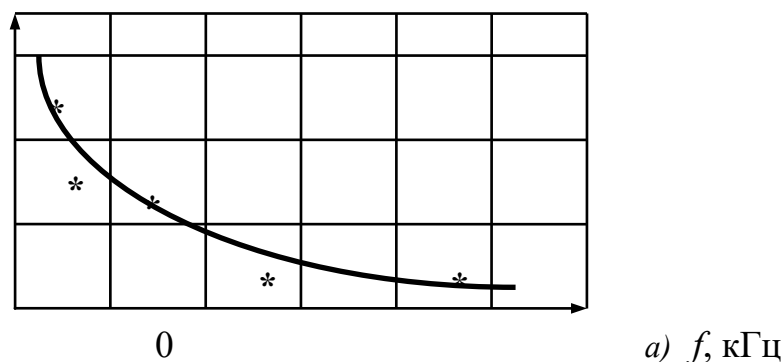
Измерение АЧХ и ФЧХ системы при помощи осциллографа
 Измерение АЧХ и ФЧХ системы при помощи осциллографа (см. соответствующий пункт).

Переходные характеристики системы, АЧХ и ФЧХ системы с обратной связью и без обратной связи

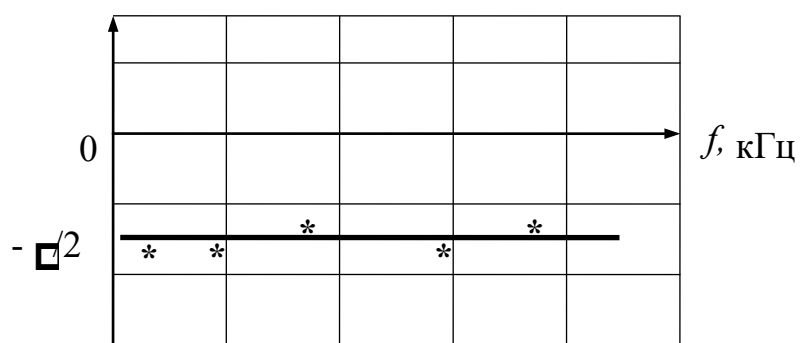


0
 Рис. 3.15. Переходные характеристики системы с включенной обратной связью и без нее

$A_{\text{вых}} / A_{\text{вх}}$



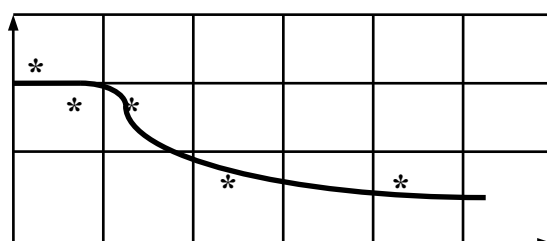
$\epsilon\tau$, град



б)

Рис.3.16. АЧХ (а) и ФЧХ (б) характеристики системы без обратной связи

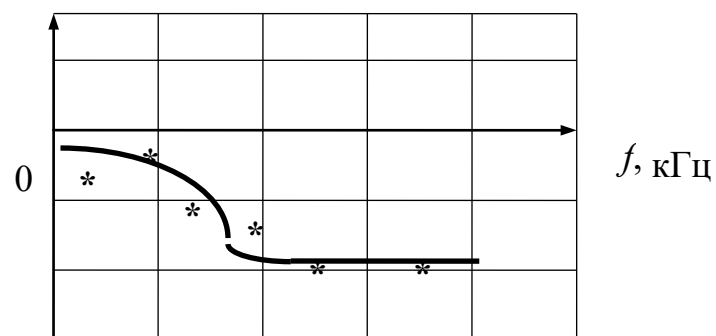
$A_{вых} / A_{вх}$



$f, \text{кГц}$

0 а)

$\varphi, \text{град}$



$-\pi/2$

б)

Рис. 3.17. АЧХ (а) и ФЧХ (б) характеристики системы с включенной обратной связью

3.3. Лабораторная работа 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТОЧЕЧНОГО РЕАКТОРА

Приведены уравнения кинетики точечного реактора, выведена его передаточная функция. Рассмотрена методика проведения исследований динамических свойств модели реактора без обратной связи и с ней.

Целью работы является изучение динамических свойств точечного ядерного реактора нулевой мощности и влияния внешней обратной связи на его поведение и устойчивость.

Основные уравнения. Вывод передаточной функции

Точечным называется реактор, в котором пренебрегают пространственным распределением нейтронной плотности. Реактором **нулевой мощности** является реактор, находящийся в тепловом равновесии с окружающей средой, в связи с чем в нем отсутствуют внутренние обратные связи, обусловленные мощностными и температурными эффектами реактивности.

В общем виде уравнения кинетики такого реактора с учётом шести групп запаздывающих нейтронов записывают следующим образом:

$$\frac{dn}{dt} = \rho - \beta + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i - q, \quad \frac{dc_i}{dt} = -\beta \lambda_i n_i - \lambda_i c_i + q_i, \quad (3.7)$$

где n – плотность нейтронов ($1/\text{м}^3$); ρ – реактивность; l – время жизни мгновенных нейтронов (с); q – мощность источника нейтронов ($1/\text{м}^3\text{с}$); β – эффективная доля запаздывающих нейтронов; β_i – доля запаздывающих нейтронов i -й группы; c_i – концентрация ядер-излучателей запаздывающих нейтронов i -й группы ($1/\text{м}^3$); λ_i – постоянная распада ядеризлучателей запаздывающих нейтронов i -й группы ($1/\text{с}$).

Уравнения кинетики значительно упрощаются, если вместо шести выбрать одну **эффективную** группу запаздывающих нейтронов, используя ρ и β вычисленные с использованием формул

$$\rho = \sum_i \beta_i \rho_i \text{ и } \rho = \sum_i \beta_i \rho_i.$$

При этом уравнения (3.7) без учета источника нейтронов преобразуются до уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \rho - \beta \\ \frac{d\lambda}{dt} &= -\lambda + \frac{\beta}{l} \\ \frac{dc}{dt} &= -\lambda c - n \end{aligned} \quad (3.8)$$

Определим в реакторе как объекте управления в качестве входной величины **реактивность**, а в качестве выходной – **нейтронную плотность** и выведем его передаточную функцию.

Уравнения (3.7),(3.8) являются нелинейными (с формальной точки зрения содержат произведение λn), то есть определяют реактор как нелинейный объект управления. Для получения передаточной функции необходимо линеаризовать уравнение (3.8), для чего произведем замену переменных: $n = n_0 + \Delta n$; $c = c_0 + \Delta c$; $\lambda = \lambda_0 + \Delta \lambda$, где Δn , Δc , $\Delta \lambda$ – малые отклонения n , c , λ от стационарных значений- n_0 , c_0 , λ_0 .

В равновесных условиях производные по времени равны нулю, поэтому $c_0 = \lambda_0 n_0 / l$, кроме того, очевидно $\lambda_0 = 0$.

Подставив эти соотношения в уравнение (3.8) и пренебрегая переменными второго порядка малости, получим

$$\frac{d\Delta n}{dt} = \Delta \rho - \beta \Delta \lambda, \quad \frac{d\Delta \lambda}{dt} = -\Delta \lambda + \frac{\beta}{l} \Delta \rho, \quad \frac{d\Delta c}{dt} = -\Delta \lambda c_0 - n_0 \Delta \lambda. \quad (3.9)$$

$$-\delta c \approx \beta \delta n - \lambda \delta c \Leftrightarrow \frac{d}{dt} l$$

Выполнив преобразование Лапласа над уравнениями (3.9), найдем передаточную функцию реактора по реактивности как отношение образа малого отклонения нормированной нейтронной плотности к малому отклонению реактивности:

$$G(s) = \frac{\delta n_0(s)}{\delta \rho(s)} = \frac{\beta s}{s^2 - \beta s + \lambda} \quad (3.10)$$

Построение модели реактора по его передаточной функции

Для формирования модели точечного реактора нулевой мощности выполним разложение его передаточной функции (3.10) на функциональные элементы, представляющие собой элементарные звенья (усилительные, интегрирующие, апериодические и т.д.):

$$G(s) = \frac{\beta l}{s^2 - \beta s + \lambda} = \frac{1}{s} \frac{\beta l}{s - \beta} \frac{\lambda}{s - \lambda} = T_1 T_2 s (T_1 T_2 s - 1) \quad (3.11)$$

где $T_1 = 1/\beta$; а $T_2 = l/(\beta l + \lambda) \approx l/\lambda$, (поскольку $\beta l \gg \lambda$).

Разложив формулу (3.11) на слагаемые, получим

$$G(s) = \frac{1}{\beta} \frac{1}{T_2 s - 1} \frac{1}{T_3 s - 1} \frac{1}{T_2 s - 1}, \quad (3.12)$$

где $T_3 = \lambda/\beta$.

Таким образом, легко видеть, что электронная модель реактора состоит из двух параллельных цепей, замыкающихся на общем сумматоре. Первая цепь содержит последовательно соединенные усилительное и апериодическое звенья и описывает динамику мгновенных нейтронов, вторая – состоит из последовательно соединенных интегрирующего и апериодического звеньев и отражает поведение запаздывающих нейтронов. Эта модель используется в учебном планшете данной лабораторной работы.

Переходная характеристика реактора

Поведение реакторной системы (изменение нейтронной плотности), описываемой передаточной функцией (3.10), при воздействии на нее скачка реактивности амплитудой $\Delta \rho$ в функции s записывается в виде:

$$\frac{\delta n(s)}{n_0} = \frac{\Delta \rho}{\Delta \rho} \frac{1}{s(l + \beta/(s - \lambda))}, \quad (3.13)$$

где $\Delta \rho/s$ – преобразование Лапласа ступенчатого скачка реактивности амплитудой $\Delta \rho$.

Перепишем это уравнение в виде

$$\frac{\delta n(s)}{n_0} = \frac{\Delta \rho}{\Delta \rho} \frac{s - \lambda}{s^2(s - \lambda + \beta/l)}. \quad (3.14)$$

Выполним обратное преобразование Лапласа соотношения (3.14) и получим временную зависимость нормированной нейтронной плотности от времени

$$\frac{\delta n(t)}{n_0} = \frac{\Delta \rho}{\Delta \rho} \frac{\beta}{\beta} [1 - \lambda t \exp(-\lambda t) - \exp(-\beta t/l)]. \quad (3.15)$$

Учитывая, что для малых аргументов $1 + x = \exp x$ (разложение в ряд Тейлора), получим

$$n(t) \approx n_0 [\exp(\lambda \Delta \rho t) - \Delta \rho \exp(-\beta t/l)]. \quad (3.16)$$

Первый компонент суммы описывает динамический процесс изменения нейтронной плотности, обусловленный запаздывающими нейтронами, второй – вызван влиянием мгновенных нейтронов и называется скачком на мгновенных нейтронах.

АЧХ и ФЧХ характеристики реактора

АЧХ и ФЧХ позволяет предсказывать поведение реактора при воздействии на него гармонического возмущения. Эти характеристики реактора получают из передаточной функции (3.10) заменой лапласовской переменной s на $j\omega$:

$$G(j\omega) = \frac{1}{l j \omega + \beta j \omega / (j \omega + \lambda)}. \quad (3.17)$$

АЧХ реактора – это модуль $G(j\omega)$:

$$|G(j\omega)| = \frac{\sqrt{Re^2 + Im^2}}{\omega l \sqrt{\omega^2 + (\beta/l)^2}}. \quad (3.18)$$

ФЧХ записывается так:

$$\theta = \arctg \frac{Im}{Re} = \arctg \left(\frac{\omega^2 - \lambda\beta/l}{\omega\beta/l} \right). \quad (3.19)$$

Порядок выполнения работы

Для моделирования системы используется электронный стенд, в состав которого входят: планшет, блок питания и электронно-лучевой осциллограф (индикатор).

Перед началом работы у преподавателя или учебного мастера получить задание с указанием величины обратной связи системы.

Включение аппаратуры и последовательность выполнения работы

1. Включить блок питания переводом тумблера **Сеть** в верхнее положение.

2. Включить осциллограф (для этого тумблер **Сеть** переводим в верхнее положение).

3. Ручки управления на осциллографе установить в следующие положения:

⌚ **Развертка** 50 O/s/дел ;

⌚ **Усиление** 2 В/дел.

4. Добиться синхронизации луча осциллографа (устойчивого изображения осциллограммы) ручками **Стабилизация** и **Уровень**.

5. Переключатели на планшете установить в следующие положения:

- **Работа** 3;
- **Блок сигналов** ↑;
- **Обратная связь** ОТКЛ.

6. Ручками \star , Ω и **Развертка** выбрать удобное для наблюдения изображение переходной характеристики реактора, после чего зарисовать полученную осциллограмму.

7. Блок сигналов перевести в положение $\sin \blacklozenge t$.

8. Ручку **Частота** устанавливать последовательно в положения 1, 2, 3,...

9. Измерить период синусоидальных сигналов на всех частотах и записать результаты в таблицу.

10. Записать амплитуды входного и выходного сигналов, а также их фазовый сдвиг на всех частотах.

11. Включить переключатель **Обратная связь**, установить заданную преподавателем или учебным мастером величину обратной связи и действовать согласно п. 6 - 10.

Обработка результатов измерений

1. Построить переходные характеристики модели реактора без обратной связи.
2. По переходной характеристике вычислить постоянные времени и константы, получить ее аналитическое описание.
3. Построить переходные характеристики модели реактора с включенной обратной связью.
4. По переходной характеристике вычислить коэффициент усиления цепи обратной связи.
5. Построить АЧХ и ФЧХ модели реактора без обратной связи и с включенной обратной связью.

Оформление отчета

1. Отчет оформить на листах писчей бумаги формата А4.
2. Отчет должен содержать следующие основные части:
 - формулировку цели работы;
 - графический материал с результатами измерений, а именно, переходные характеристики, АЧХ и ФЧХ исследованных систем;
 - расчет постоянных времени системы без обратной связи по ее переходной характеристике;
 - расчет и построение АЧХ системы без обратной связи, используя найденные постоянные времени и константы;
 - расчет коэффициента передачи цепи обратной связи по переходной характеристике системы с обратной связью; ⌚ выводы о проделанной работе.
3. Графические материалы выполнить вручную. Они должны содержать ясно читаемые оси и деления, размерность используемых величин, измеренные точки и кривые, необходимые пояснения и т. д.

Контрольные вопросы

1. Что такое точечный реактор нулевой мощности?

2. Покажите переходные характеристики точечного реактора нулевой мощности, полученные при точном расчете по уравнению (3.8) и с помощью передаточной функции. Поясните причины различия.

3. Как выглядят АЧХ точечного реактора нулевой мощности без обратной связи и с включенной отрицательной обратной связью? Объясните различия.

Измерение АЧХ и ФЧХ системы при помощи осциллографа

Измерение АЧХ и ФЧХ системы при помощи осциллографа
(см. соответствующий пункт).

3.4. Лабораторная работа 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕАКТОРА И КАЛИБРОВКА СТЕРЖНЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ

Целью работы является изучение методов определения критического состояния реактора, способов градуировки стержней автоматического регулирования (АР) и компенсирующих решеток (КР), используемых при регулировании мощности ядерной энергетической установки (ЯЭУ) типа ВВЭР; приобретение навыков управления моделью ЯЭУ; изучение статических и динамических характеристик реактора нулевой мощности; овладение практическими навыками градуировки стержней.

Основы теории

Уравнения кинетики

Уравнения кинетики ядерного реактора с учетом одной усредненной группы запаздывающих нейтронов записываются в следующем виде:

$$\frac{dn}{dt} = \rho n - \lambda n + q, \quad \frac{dc}{dt} = \beta n - c, \quad (3.20)$$

где n - плотность нейтронов, $1/\text{м}^3$; ρ - реактивность; l - время жизни мгновенных нейтронов, с; q - мощность источника нейтронов, $1/\text{м}^3\text{с}$; c - суммарная концентрация источников запаздывающих нейтронов, $1/\text{м}^3$; β - эффективная доля запаздывающих нейтронов; λ - средняя постоянная распада эквивалентной группы запаздывающих нейтронов, определяемая как

$$\lambda = \frac{\sum \beta_i}{\sum l_i} \text{ 1/с.}$$

Плотность нейтронов

Плотность нейтронов в реакторе, выведенном из равновесного состояния скачком реактивности ρ при отсутствии источника, описывается выражением

$$n(t) = \frac{\beta}{\beta - \rho} n_0 \exp\left(\frac{\rho}{\beta} t\right) + \frac{\rho}{\beta - \rho} n_0 \exp\left(-\lambda t\right). \quad (3.21)$$

$$n(t) = \frac{\beta}{\beta - \rho} n_0 \exp\left(\frac{\rho}{\beta} t\right) + \frac{\rho}{\beta - \rho} n_0 \exp\left(-\lambda t\right) \rightarrow l \rightarrow$$

С течением времени вклад второго экспоненциального члена этого соотношения становится пренебрежимо малым, так как для регулирующих стержней в энергетических реакторах $\rho \ll \beta$. Поэтому

$$n(t) \approx \frac{\beta}{\beta - \rho} n_0 \exp\left(\frac{\rho}{\beta} t\right). \quad (3.22)$$

Метод обратного умножения

Этот метод используется для определения критического положения регулирующего стержня без доведения реактора до критического состояния. Исходное состояние реактор подкритичен.

Если $k_{эфф} < 1$, то реактор обладает отрицательной реактивностью и при отсутствии источника нейтронов в активной зоне величина нейтронного потока в реакторе равна нулю. Если же в реактор поместить источник нейтронов, то нейтронный поток будет стремиться к некоторому значению.

Из уравнений (3.20) в установившемся режиме работы реактора, когда производные по времени - $\frac{dn}{dt} = 0$ и $\frac{dc}{dt} = 0$ (то есть для статического состояния реактора) следует

$$\rho = \beta - \frac{\lambda c}{\lambda c + q} \approx \beta - \frac{\lambda c}{q} \approx 0, \quad (3.23) \quad n = lq. \text{ откуда } -l n \approx \lambda c \approx 0.$$

$$\frac{1}{n} = \frac{l}{\lambda c + q} \approx \frac{l}{q} \quad (3.24)$$

Уравнение (3.24) показывает наличие однозначной зависимости между реактивностью подкритического реактора и величиной установившегося значения нейтронного потока. Это позволяет последовательным изменением реактивности (то есть степени подкритичности реактора), осуществляемого за счет изменения положения органов регулирования или добавления топлива, определить критическую массу или положение стержня управления, не доводя реактор до критического состояния.

Согласно этому методу строят график зависимости обратной мощности $1/n$ от положения регулирующих стержней или количества топлива, который получают экспериментально. В процессе эксперимента поглощающий стержень постепенно выводят из активной зоны небольшими шагами с промежуточной выдержкой на каждой ступени для достижения равновесного стационарного состояния нейтронного поля. Процесс останавливают, не доводя реактор до критического состояния.

Затем строят график зависимости обратной мощности $1/\rho$ от координаты стержня H (рис. 3.18). Для идеального реактора этот график будет прямой линией. Экстраполяция прямой до пересечения с осью абсцисс и дает искомое критическое положение поглощающего стержня $H_{кр}$.

На практике этот метод используется также для определения критической загрузки реактора. Критическое положение стержней, определенное по указанной методике, носит название положения холодной критичности.

Метод стреляющего источника

Целью эксперимента является определение степени подкритичности реактора. Исходное состояние \square реактор подкритичен, используется источник нейтронов. Метод основан на определении изменения плотности нейтронов, обусловленного быстрым удалением из активной зоны реактора источника нейтронов.

Рассмотрим процессы, происходящие в реакторе. В стационарном состоянии источник нейтронов обеспечивает концентрацию плотности нейтронов в активной зоне n_0 . В момент времени $t = 0$ источник нейтронов удаляется из реактора. Плотность мгновенных нейтронов быстро (скачком) уменьшается (рис. 3.19).

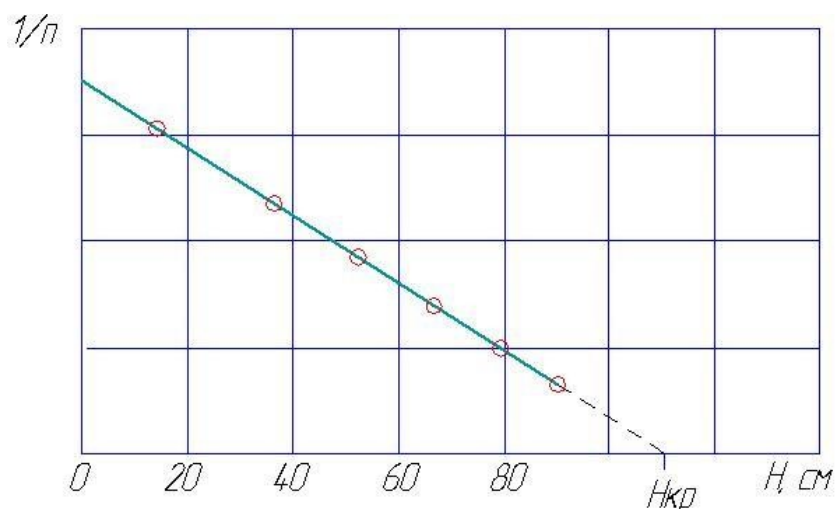


Рис. 3.18. График зависимости обратной мощности $1/\rho$ от положения регулирующего стержня H

Скорость этого процесса определяется временем жизни мгновенных нейтронов, которое для реактора на тепловых нейтронах равно 10^{-3} с. За

счет этого общая плотность нейтронов также быстро уменьшается до значения n_1 .

Затем скорость спада нейтронной плотности определяется временем жизни запаздывающих нейтронов ($1/\lambda \approx 52$ с!), поэтому уменьшается значительно медленнее. Уровень мощности n_1 можно условно считать квазистатическим.

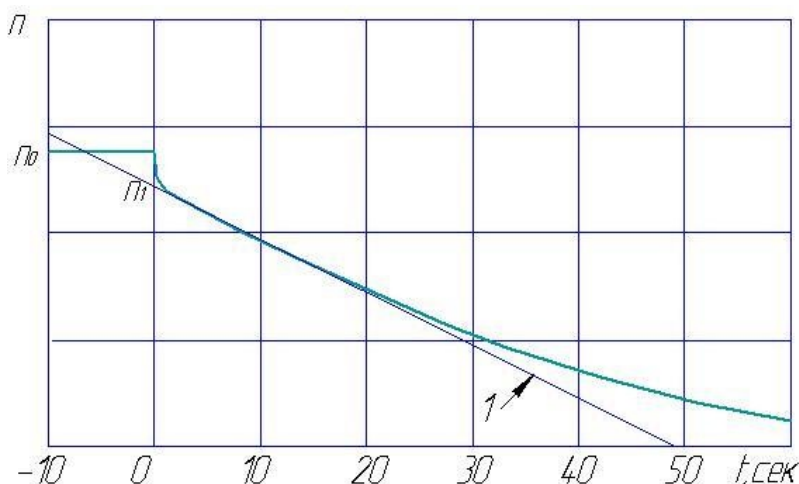




Рис. 3.19. Кривая изменения плотности нейтронов во времени после извлечения источника нейтронов из активной зоны

Реактивность реакторной системы в долях β можно определить по величине этого быстрого уменьшения нейтронной плотности от стационарного значения n_0 до квазистатического n_1 по формуле

$$\rho/\beta = n_1/n_0 - 1. \quad (3.25)$$

5. Метод сброса стержня

Цель эксперимента  определение веса стержня. Метод основан на определении изменения плотности нейтронов, обусловленного быстрым введением в критическую активную зону реактора стержня управления (вводом отрицательной реактивности). Исходное состояние  реактор критичен.

Процессы в реакторе аналогичны рассмотренным в методе стреляющего источника.



В стационарном состоянии плотность нейтронов равна n_0 . В момент времени $t = 0$ стержень управления вводится в реактор с максимально возможной скоростью. Вследствие быстрого исчезновения мгновенных нейтронов общая их плотность вначале скачком уменьшается до значения

n_1 , затем скорость спада нейтронной плотности, обусловленная влиянием запаздывающих нейтронов (время жизни которых значительно больше времени жизни мгновенных нейтронов), существенно уменьшается (рис. 3.19). Получившаяся в результате реактивность системы, также рассчитывается по формуле (3.25).

При известной величине перемещения стержня управления ΔH его вес можно определить по соотношению:

$$M = (\rho/\beta) / \Delta H. \quad (3.26)$$

Метод установившегося периода

Цель эксперимента  калибровка измерителя периода реактора (периодомера), определение веса стержня управления, оценка постоянной распада источников – предшественников запаздывающих нейтронов. Метод основан на определении изменения плотности нейтронов, обусловленного подъемом из критической активной зоны реактора стержня управления (вводом положительной реактивности). Исходное состояние  реактор критичен.

Рассмотрим процессы, происходящие в реакторе. В стационарном состоянии плотность нейтронов равна n_0 . В момент времени $t = 0$ стержень управления поднимается вверх на величину ΔH . Вследствие ввода положительной реактивности, плотность нейтронов вначале быстро увеличивается до значения n_1 , наблюдается скачок на мгновенных нейтронах (рис.3.20;1). Дальнейший рост нейтронной плотности происходит значительно медленнее, поскольку обусловлен влиянием запаздывающих нейтронов с большим временем жизни. Этот постепенный разгон реактора описывается формулой

$$n(t) = n_0 \exp(t/T_p), \quad (3.27)$$

где T_p – установившийся период реактора (или период реактора).

Отметим, что период реактора это время, за которое его мощность меняется в e раз.

Величину введенной реактивности ρ/β определяют по формуле (3.25), вес стержня M – по соотношению (3.26).

Период реактора находят экспериментально по графику изменения мощности (рис. 3.20, 2). Для вычисления периода можно использовать соотношение, вытекающее из соотношения (3.27)

$$T_p \approx \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{n_2}{n_1} \right),$$

$$(3.28) \quad \frac{2}{1}$$

где n_1 и n_2 - значения нейтронной плотности в моменты времени t_1 и t_2 , соответственно.

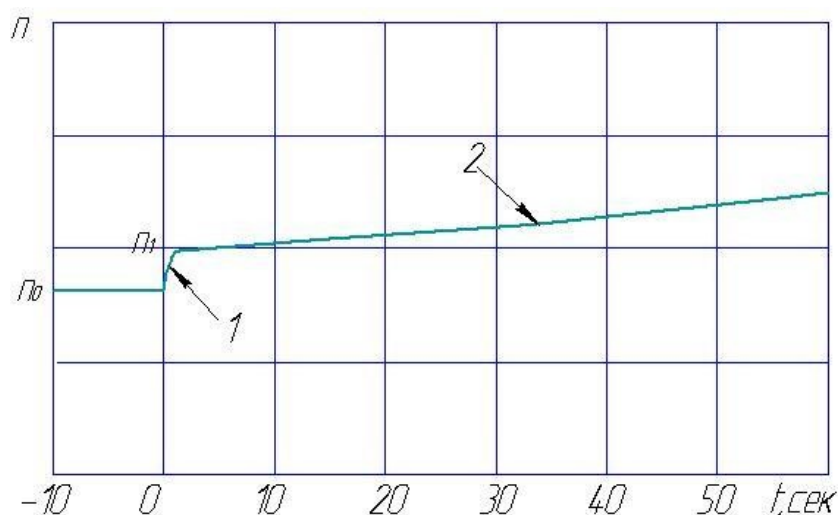


Рис. 3.20. Изменение плотности нейтронов во времени при вводе положительной реактивности

Поскольку также

$$\frac{\beta - \rho}{\lambda \rho}$$

$$(3.29)$$

$$T_p \approx \frac{1}{\lambda},$$

и учитывая, что $\rho \ll \beta$, постоянную распада источников – предшественников запаздывающих нейтронов можно определить по формуле

$$1$$

$$(3.30)$$

$$\lambda \odot \text{ ————— } \\ \Downarrow \rho \nearrow \\ \longleftrightarrow \beta \rightleftharpoons T_p$$

Описание лабораторной установки

Для выполнения работы используется стенд, представляющий собой электронную модель двухконтурной ЯЭУ. Стенд включает: модель точечного реактора нулевой мощности, воспроизводящую динамические характеристики реактора с учетом одной усредненной группы запаздывающих нейтронов; модель второго контура; элементы мощностной и температурной обратных связей; средства индикации и управления.

Техника безопасности

Перед началом работы студент обязан убедиться в наличии и исправности заземления лабораторной установки. При отсутствии или неисправности заземления необходимо сообщить об этом инженеру.

При выполнении работы запрещается:

- самостоятельно включать и выключать приборы, не входящие в состав установки:
- оставлять без присмотра включенное оборудование;
- самостоятельно устранять любые неисправности, обнаруженные в процессе выполнения работы.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы у преподавателя или инженера получить исходные данные по заданию:

- положение стрелки указателя **Величина, обратная мощности** для выполнения опытов по методам «стреляющий источник» и «сброс стержня»;
- исходную мощность реактора для выполнения опытов по методу «асимптотический период».

2. Подготовка стенда к работе.

2.1. Включить стенд переводом тумблера **Вкл** в верхнее положение;

2.2. Вывести стержень АЗ в крайнее верхнее положение. Для этого, убедившись во включении лампочки **Готовность** на мнемосхеме, нажать кнопку **Взвод**. Наблюдая по индикатору поднятие стержня, добиться включения лампочки верхнего концевого выключателя.

2.3. Переключатели **Мощность источника нейтронов**, **Температурный коэффициент реактивности** и **Мощностной коэффициент реактивности** поставить в положение **Выкл**. Отключить автоматический регулятор мощности.

Метод обратного умножения

- установить переключатель **Мощность источника нейтронов** в положение № 1 (в активную зону введен источник нейтронов мощностью №1);
- нажимая кнопку **Вверх** АР, поднять стержень АР на 100 см, положение стержня высвечивается на указателе положения АР;

- нажимая кнопку. **Вверх** КР, поднять стержень КР на 75 см, положение стержня высвечивается на указателе положения КР;
- по прибору **Обратный период** следить за изменением периода реактора;
- для завершения переходных процессов подождать около 4-5 мин, пока не установится период реактора $T_{\text{кр}}$;
- записать показание прибора **Величина, обратная мощности**;
- поднять стержень КР на 10 см, выдержать 4 мин, записать показания прибора **Величина, обратная мощности**;
- повторить замеры еще 3-4 раза, результаты измерений занести в таблицу;
- построить график зависимости обратной мощности от координаты стержня КР;
- экстраполируя полученную кривую до оси абсцисс, определить положение стержня КР – Нкр, при котором реактор станет критическим;
- изменить положение стержня АР по заданию преподавателя и повторить опыты для нового положения стержня АР.

Метод стреляющего источника

- ввести в активную зону источник нейтронов, для чего переключатель **Мощность источника нейтронов** доставить в положение № 1;
- поднять стержень АР на высоту 100-120см;
- перемещая стержень КР, добиться того, чтобы стрелка прибора

Величина, обратная мощности реактора оказалась на середине шкалы. Поработать на этом уровне не менее 3 мин;

- записать показания прибора – $1/n_0$;
- в момент времени $t = 0$ выключить источник нейтронов

зоны пе-
реводом переключателя **Мощность источника нейтронов** в положение **0**;

- через равные промежутки времени с интервалом не более трех секунд записывать показания прибора **Величина, обратная мощности**, выполнить не менее пяти замеров;

- полученные результаты занести в таблицу;
- повторить опыт еще не менее двух раз;
- построить график зависимости плотности нейтронов от времени;

- экстраполировать начальный участок полученной кривой к моменту времени $t = 0$ (см. рис.3.19, *1*) и найти значение нейтронной плотности n_1 ;

- определить реактивность системы по формуле (3.25).

Метод сброса стержня

- вывести источник нейтронов из активной зоны, для чего пере-
ключатель **Мощность источника нейтронов** доставить в положение **0**;

- поднять стержень АР на высоту 100-120 см;
- перемещая стержень КР, добиться того, чтобы стрелка прибора

Величина, обратная мощности реактора оказалась на середине шкалы, а период реактора $T_{уст} = \infty$. Поработать на этом уровне не менее 3 мин;

- записать показания прибора – $1/n_0$;
- в момент времени $t = 0$ опустить стержень КР на 10 см;
- через равные промежутки времени с интервалом не более трех секунд записывать показания прибора **Величина, обратная мощности**, выполнить не менее пяти замеров;

- полученные результаты занести в таблицу;

- повторить опыт еще не менее двух раз;
- построить график зависимости плотности нейтронов от времени;
- экстраполировать начальный участок полученной кривой к моменту времени $t = 0$ (см. рис.3.19, 1) и найти значение нейтронной плотности n_1 ;
- определить величину введенной реактивности по формуле (3.25);
- определить вес стержня КР по формуле (3.26);
- вернуться в исходное состояние стабильной мощности;
- записать показания прибора – $1/n_0$;
- в момент времени $t = 0$ опустить стержень АР на 10см;
- повторить опыты для этого случая не менее трех раз;
- определить вес стержня АР по формуле (3.26);

Метод установившегося периода (определение величины λ):

- включить встроенный в лабораторный стенд автоматический потенциометр в режим регистрации тепловой мощности реактора;
- вывести реактор в установившееся состояние при мощности, заданной преподавателем;
- выдержать в течение 3 мин и записать значение установившейся мощности;
- в момент времени $t = 0$ перевести реактор в надкритическое состояние перемещением стержня АР вверх на 30 см;
- записывать показания прибора с шагом 10с, не менее

20 значений;

- построить зависимость мощности от времени;
- определить введенную реактивность, используя известный вес стержня из опыта по методу сброса стержня;
- определить период реактора по формуле (3.28);
- определить постоянную распада источников – предшественников запаздывающих нейтронов.

Требования к отчету

1. Отчет оформляется на листах формата А4 каждым студентом самостоятельно.

2. Отчет должен включать следующие основные части:

- титульный лист;
 - формулировку цели работы;
 - построенные экспериментальные зависимости;
 - расчеты искомых величин;
 - графический материал по результатам измерений
- выполнить вручную. Он должны содержать ясно читаемые оси и деления, \odot размерности используемых величин, измеренные точки и кривые, необходимые пояснения и т.д.; \odot выводы с четкими пояснениями полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Объясните в уравнении кинетики, что обозначают величины ρ , β , λ , l , c , каков их физический смысл и размерность, какие примерные значения они могут иметь?

2. Запишите уравнение кинетики без учета и с учетом запаздывающих нейтронов.

3. Что такое эффективность стержня регулирования, в каких единицах она измеряется?

4. Объясните, как получают уравнение (3.25) для расчета реактивности реакторной системы?

5. Что такое квазистационарный уровень нейтронной плотности? Через какой промежуток времени он достигается?

6. Что такое период реактора?

7. Почему не допускается вносить в реактор реактивность, превышающую величину β ?

8. В чем разница между статическими и динамическими методами калибровки стержней?

Рекомендуемая литература к лабораторным работам 1-4

1. Гейлер, Л.Б. Введение в теорию автоматического регулирования / Л.Б. Гейлер. – Минск, 1967.
2. Клюев, А.С. Автоматическое регулирование / А.С. Клюев. - М., 1973.
3. Титце, Ч. Полупроводниковая схемотехника / Ч. Титце, К. Шенк. - М., 1983.
4. Пискунов, Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисление / Н.С. Пискунов. - М., 1985.
5. Горбачевич, Е.Д. Аналоговое моделирование систем управления / Е.Д. Горбачевич, Ф.Ф. Левинзон. - М., 1984.

3.5. Лабораторная работа 5

ИЗУЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХКОНТУРНОЙ ЯЭУ

Целью работы является изучение основных статических программ, используемых при регулировании мощности ядерной энергетической установки (ЯЭУ) типа ВВЭР; получение представления о мощностном коэффициенте реактивности реактора и умение экспериментально определять его знак и величину; приобретение навыков управления моделью ЯЭУ.

Основы теории

Статическая программа регулирования ЯЭУ

Статической программой регулирования ЯЭУ называется желаемая зависимость основных параметров установки (расхода, температуры, давления) от её мощности в установившихся режимах. Выбор программы производится на основании анализа физических, конструктивных, технико-экономических особенностей установки, режимов её работы в энергосистеме и других факторов.

На всех современных блоках ВВЭР расход теплоносителя первого контура G не регулируется. Обычно блоки работают с постоянными расходами при изменении мощности в широких пределах. Рассмотрим программы регулирования при постоянном расходе по первому контуру.

Программа с постоянной средней температурой в первом контуре

Согласно этой программе, средняя температура теплоносителя в реакторе поддерживается постоянной ($T_{\text{ср}} = \text{const}$) (рис. 3.21).

Поскольку с ростом мощности реактора N подогрев теплоносителя в нем увеличивается, а средняя температура теплоносителя $T_{\text{ср}}$ поддерживается постоянной, то температура на выходе реактора должна расти, а на входе соответственно уменьшаться согласно соотношению

$$N = C_p G (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (3.31)$$

где C_p – средняя массовая теплоемкость теплоносителя; $T_{\text{вых}}$, $T_{\text{вх}}$ – температура теплоносителя на выходе и входе реактора, соответственно.

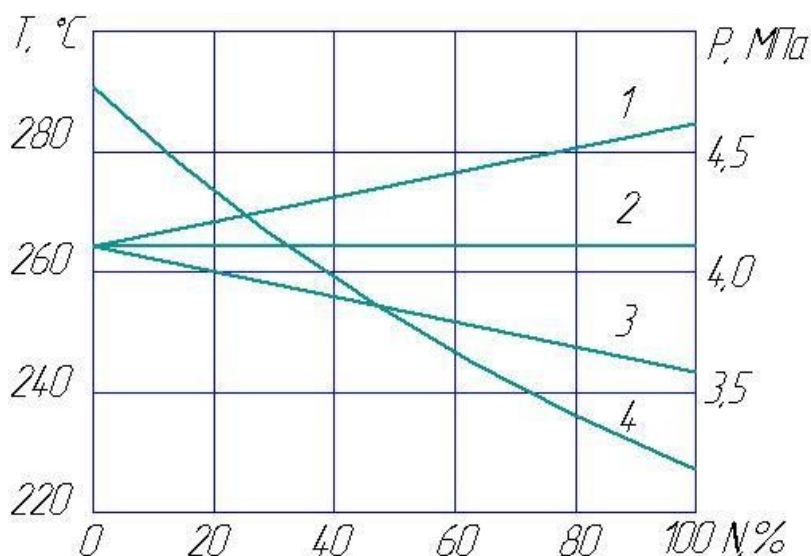


Рис. 3.21. Статическая программа регулирования ЯЭУ с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура:
1,2,3 – температура теплоносителя первого контура на выходе, средняя и входе в реактор, соответственно; *4* – давление пара во втором контуре

Тепловая энергия, передаваемая от первого контура ко второму, определяется формулой

$$Q=\alpha F(T_{\text{ср}}-T_{\text{п}}), \quad (3.32)$$

где α – эффективный коэффициент теплопередачи от теплоносителя первого контура ко второму в парогенераторе; F – площадь теплообменной поверхности парогенератора; $T_{\text{п}}$ – температура пара во втором контуре.

При фиксированной площади теплообмена F , практически неизменном эффективном коэффициенте теплопередачи α и постоянной средней температуре теплоносителя первого контура $T_{\text{ср}}$, обеспечение требуемого теплосъема из реактора может быть достигнуто только за счет уменьшения параметров пара во втором контуре $T_{\text{п}}$ (то есть за счет увеличения температурного напора на теплообменной поверхности парогенератора - $T_{\text{ср}}-T_{\text{п}}$). Отметим, что поскольку температура пара на выходе парогенератора ВВЭР практически равно температуре насыщения при заданном давлении, уменьшение температуры пара практически сводится к уменьшению его давления P .

Эта программа наиболее благоприятна для первого контура, так как в этом случае для изменения мощности реактора требуется внести наименьшую реактивность, обеспечиваются стабильные температурные условия для первого контура, что повышает надёжность работы его оборудования. Кроме того, объём теплоносителя первого контура меняется незначительно, а это облегчает работу систем компенсации объёма и регулирования реактора.

Недостаток программы в необходимости повышения давления второго контура при понижении мощности, что утяжеляет оборудование второго контура. При этом термический КПД цикла остаётся низким на всех мощностях, так как на номинальной мощности давление пара, поступающего на турбину, ниже допустимого по условиям работы второго контура. На пониженной мощности, когда давление пара велико, КПД цикла также низок из-за значительного перепада давления на регулирующих клапанах, что, кроме того, увеличивает их износ.

Программа с постоянным давлением во втором контуре

Согласно этой программе, давление пара в парогенераторе поддерживается постоянным ($P = \text{const}$) (рис. 3.22).

Регулирование для обеспечения теплосъема из активной зоны реактора (то есть поддержания необходимого температурного напора на теплообменной поверхности парогенератора) достигается увеличением температуры теплоносителя на выходе из реактора. Так же увеличивается средняя температура теплоносителя в активной зоне.

Эта программа позволяет при том же расчётном давлении пара поддерживать его значение повышенным и в номинальном режиме и, тем самым, повысить термический КПД блока. Поскольку давление P и температура $T_{\text{п}}$ пара во втором контуре постоянны, его оборудование практически не накладывает ограничений на скорость изменения мощности N реактора.

Недостатком программы с постоянным давлением является существенное изменение температуры на выходе реактора при колебаниях нагрузки (приблизительно быстрее, чем по программе с постоянной средней температурой), что ограничивает манёвренные возможности блока. Кроме того, необходима большая эффективность органов регулирования реактора для компенсации температурного коэффициента реактивности.

Одновременно повышаются требования к системе компенсации объёма.

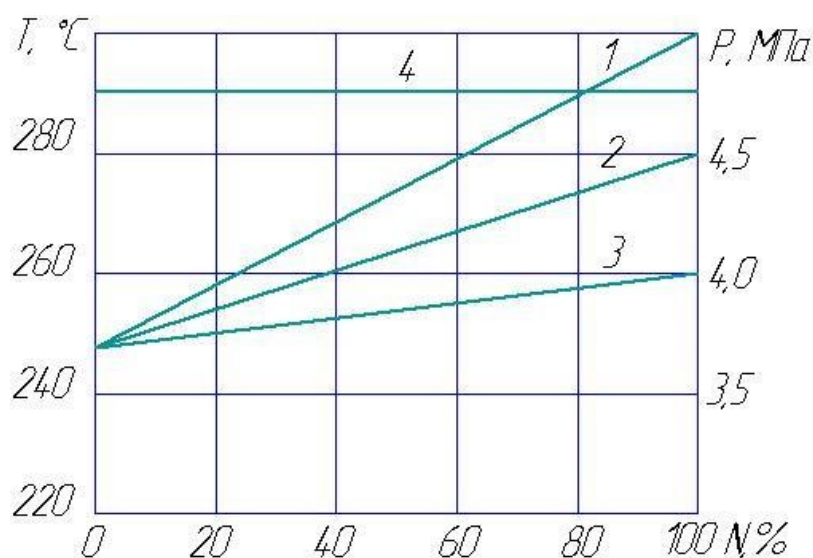


Рис. 3.22. Статическая программа регулирования ЯЭУ с постоянным давлением пара во втором контуре:

1, 2, 3 – температура теплоносителя первого контура на выходе, средняя и входе в реактор соответственно;
4 – давление пара во втором контуре

Стремление преодолеть указанные недостатки привело к разработке компромиссных программ. Одна из них приведена на рис. 3.23. В этой программе с ростом мощности средняя температура теплоносителя первого контура увеличивается, но медленнее, чем по программе с постоянным давлением пара во втором контуре.

Давление пара также уменьшается, но медленнее, чем по программе с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура. При этом облегчаются условия работы первого и второго контура.

Другим примером компромиссной программы является такая, в которой на малых мощностях блок работает по программе $P = \text{const}$, а при больших – $T_{\text{ср}} = \text{const}$ (рис. 3.24).

Мощность, при которой совершается переход с одной программы на другую, зависит от предельно допускаемого давления в парогенераторах и от ожидаемого диапазона частотных снижений нагрузки. Преимущество программы рис. 3.24 перед программой рис. 3.23 заключается в том, что вблизи номинальной мощности первый контур работает по оптимальной для себя программе $T_{\text{ср}} = \text{const}$.

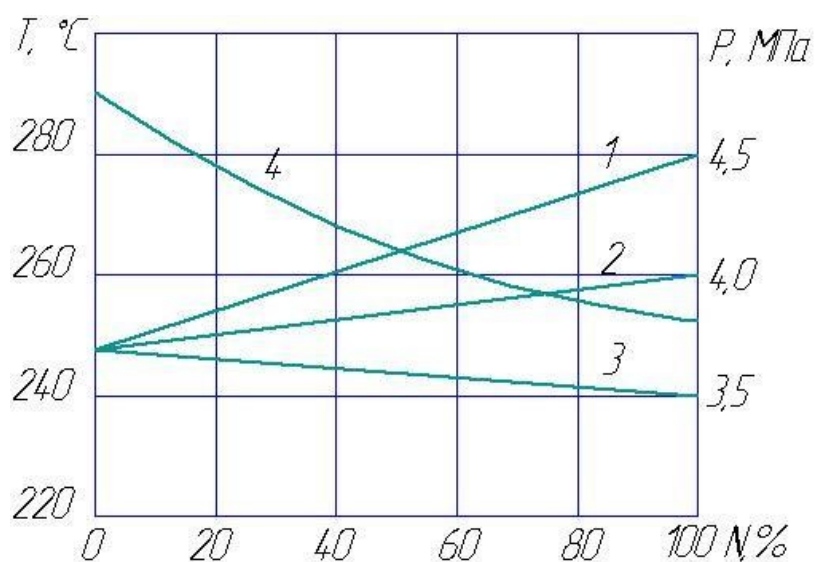


Рис. 3.23. Компромиссная программа регулирования ЯЭУ

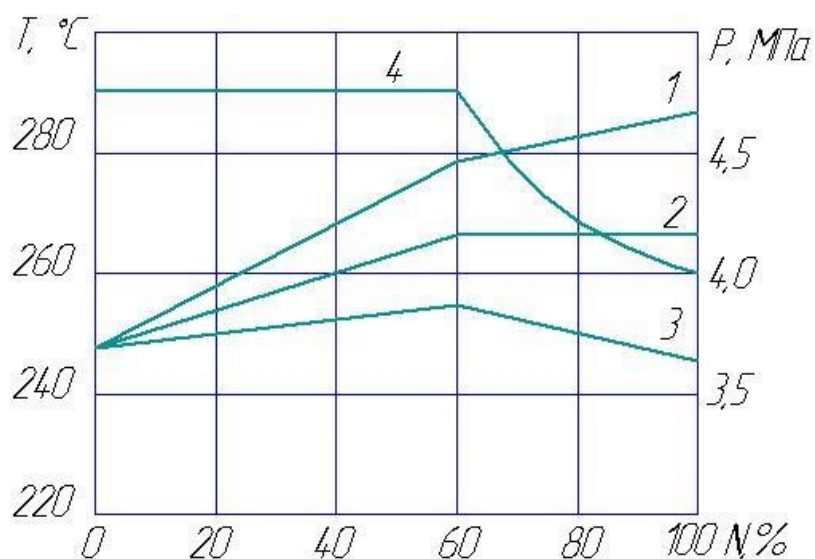


Рис. 3.24. Программа регулирования ЯЭУ, при которых на малых мощностях блок работает по программе с постоянным давлением пара во втором контуре, а при больших – с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура.
(Переключение программы происходит на 60% мощности)

Температурный и мощностной коэффициенты реактивности

В реакторе, находящемся на достаточно высоком уровне мощности, в процессе цепной реакции деления происходит разогрев элементов активной зоны, из-за чего изменяется плотность и нейтронно-физические характеристики ее компонент: топлива, теплоносителя и всех конструкционных материалов внутри. В результате этого меняется их поглощающая и замедляющая способности и, как следствие, изменяется коэффициент размножения нейтронов в активной зоне, то есть меняется реактивность системы. Изменение реактивности, в свою очередь, приводит к изменению мощности реактора, возникает внутренняя обратная связь.

Таким образом, вносимая из-за теплового воздействия реактивность, вызывает изменение нейтронной плотности, которая в зависимости от знака реактивности может возрастать или уменьшаться. Это явление называют температурным эффектом или обратной связью по температуре. Наличие обратной связи существенно изменяет динамические свойства реакторной системы, поэтому ей уделяют достаточно много внимания.

Для количественной оценки эффекта обратной связи по температуре вводится понятие температурного коэффициента реактивности по заданной компоненте активной зоны. В качестве таких компонент используют средние температуры теплоносителя, топлива, замедлителя. Например, коэффициент реактивности по температуре топлива определяется как отношение приращения реактивности $\delta\rho$ к приращению температуры топлива δT_T :

$$\alpha_T = \delta\rho / \delta T_T. \quad (3.33)$$

В реакторе, работающем на энергетическом уровне мощности, при изменении мощности (нейтронной плотности) меняется температура всех компонент активной зоны. Это изменение неодинаково для различных компонент и имеет разное запаздывание во времени. Наиболее сильным и быстродействующим температурным эффектом является изменение температуры топлива. Поэтому при анализе именно его учитывают в первую очередь. Такая явная взаимосвязь между вариацией мощности, температурой топлива и реактивностью называется *мощностным эффектом реактивности*. Действие мощностного эффекта реактивности осуществляется через температурный эффект!

Количественно мощностной коэффициент реактивности определяется как отношение приращения реактивности, вызванного изменением мощности реактора на величину δN :

$$\alpha_m = N_0 \delta \rho / \delta N, \quad (3.34)$$

где N_0 – стационарный уровень мощности реактора.

Для обеспечения устойчивости необходимо, чтобы мощностной коэффициент реактивности был отрицательным (то есть увеличение мощности реактора должно приводить к снижению коэффициента размножения нейтронов). В противоположном случае рост мощности будет приводить к вводу положительной реактивности и разгону реактора, что может привести к аварии.

Физический смысл мощностного коэффициента реактивности α_m можно проинтерпретировать следующим образом.

Для перевода реактора (имеющего отрицательный мощностной эффект реактивности) с одной равновесной мощности N_0 на другую N_1 вносят реактивность величиной $\delta \rho$, например, перемещением стержня управления. При этом мощность реактора будет изменяться со знаком, совпадающим с внесенной реактивностью. Изменение мощности сопровождается выработкой внутренней реактивности, которая при отрицательном значении α_m будет иметь знак, противоположный внесенной реактивности, и постепенно скомпенсирует ее. По достижении нового уровня мощности реактивность реактора вновь будет равна нулю. Определив полученное изменение мощности, величину мощностного коэффициента реактивности находят по формуле (3.34), где

$$\delta N = N_1 - N_0. \quad (3.35)$$

Описание лабораторной установки

Для выполнения работы используется стенд, представляющий собой электронную модель двухконтурной ЯЭУ. Стенд включает в себя модель точечного реактора нулевой мощности, модель второго контура, элементы мощностной и температурной обратных связей, средства индикации и управления.

Техника безопасности

Перед началом работы студент обязан убедиться в наличии и исправности заземления лабораторной установки. При отсутствии или неисправности заземления необходимо сообщить об этом инженеру.

При выполнении работы запрещается:

- самостоятельно включать и выключать приборы, не входящие в состав установки;
- оставлять без присмотра включенное оборудование;
- самостоятельно устранять любые неисправности, обнаруженные в процессе выполнения работы.

Порядок выполнения работы

1. Перед началом работы у преподавателя или инженера получить исходные данные по заданию:

- среднюю температуру первого контура, которую следует поддерживать при выполнении программы с постоянной температурой первого контура;
- давление пара во втором контуре, которое следует поддерживать при выполнении программы с постоянным давлением во втором контуре;
- положение переключателей мощностной и температурной обратных связей для выполнения части работы по определению коэффициента реактивности.

2. Подготовка стенда к работе.

2.1. Включить стенд переводом тумблера **Вкл** в верхнее положение;

2.2. Вывести стержень активной зоны в крайнее верхнее положение. Для этого, убедившись во включении лампочки **Готовность** на мнемосхеме, нажать кнопку **Взвод**. Наблюдая по

индикатору поднятие стержня, добиться включения лампочки верхнего концевого выключателя.

2.3. Переключатели **Мощность источника нейтронов**, **Температурный коэффициент реактивности** и **Мощностной коэффициент реактивности** поставить в положение **Выкл.** Отключить автоматический регулятор мощности. Включить самописец в режиме измерения мощности.

2.4. Установить расход питательной воды около 15% от номинального (номинальный расход около 530 кг/с).

2.5. Установить стержень АР в положение 240-250см.

2.6. Поднимая стержень КР и наблюдая за прибором **Обратный период**, установить период разгона реактора 3с. После достижения температуры теплоносителя на выходе из реактора 300⁰С опустить стержень АР до установления периода разгона равным бесконечности.

Изучение статических характеристик ЯЭУ

3.1. Установить тепловую мощность реактора 50МВт, манипулируя стержнем АР. Установить среднюю температуру теплоносителя в реакторе равной заданной преподавателем согласно п. 1., манипулируя расходом питательной воды. Записать в таблицу основные теплотехнические параметры реактора: давление пара во втором контуре, расход питательной воды, температуры теплоносителя на входе и выходе реактора.

3.2. Повторить п. 3.1. при тепловой мощности реактора от 100 до 400 МВт с шагом 50 МВт, поддерживая заданную среднюю температуру теплоносителя реактора.

3.3. Установить тепловую мощность реактора 50 МВт, манипулируя стержнем АР. Установить давление пара во втором

контуре реактора заданное преподавателем согласно п. 3.1, манипулируя расходом питательной воды. Записать в таблицу основные теплотехнические параметры реактора: расход питательной воды, температуры теплоносителя на входе и выходе реактора.

3.4. Повторить п. 3.3. при тепловой мощности реактора от 100 до 400 МВт с шагом 50 МВт, поддерживая заданное давление пара во втором контуре реактора.

3.5. Построить графики изменения теплофизических параметров ЯЭУ в зависимости от мощности при постоянной средней температуре теплоносителя в первом контуре и при постоянном давлении пара во втором контуре.

3.6. Объяснить полученные результаты.

Определение коэффициентов реактивности

Определить знак и величину температурного (мощностного) коэффициента реактивности, согласно исходным данным, заданным преподавателем. Для этого:

- установить тумблеры ТКР и МКР в положения, заданные преподавателем;
- вывести ЯЭУ на стационарный уровень тепловой мощности 200МВт, манипулируя стержнями КР и добиваясь положения стержня АР на уровне 120-140см. Температуру теплоносителя на выходе из активной зоны поддерживать на уровне - 300⁰С, регулируя расход питательной воды. Записать положение стержней АР и КР для этого состояния;
- увеличить мощность ЯЭУ до 250 МВт, манипулируя стержнем АР. Температуру теплоносителя на выходе из активной зоны поддерживать на уровне - 300⁰С. При этом положение КР не менять. Записать положение АР для этого состояния;
- вернуть ЯЭУ на стационарный уровень тепловой мощности 200МВт. Повысить температуру теплоносителя на выходе из активной

зоны – 350°C , не меняя положение КР, записать положение АР для этого состояния;

- построить графики изменения параметров установки от времени, поясняющие происходящие процессы;
- объяснить полученный результат и рассчитать температурный и мощностной коэффициенты реактивности (вес стержня АР взять из результатов выполнения лабораторной работы № 3.4).

Требования к отчету

1. Отчет оформляется на листах формата А4 каждым студентом самостоятельно.

2. Отчет должен включать следующие основные части:

- титульный лист;
- формулировку цели работы;
- построенные статистические характеристики программ регулирования ЯЭУ;
- методику расчета знака и величины коэффициента реактивности;
- графический материал по результатам измерений, выполненным вручную. Он должны содержать ясно читаемые оси и деления, размерности используемых величин, измеренные точки и кривые, необходимые пояснения и т.д.;
- выводы с четкими пояснениями полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Что такое «вес» и эффективность стержня?
2. Что такое период реактора?
3. Что понимается под температурным и мощностным коэффициентами реактивности? Какова размерность этих коэффициентов?

4. В чем состоит сущность физических явлений, приводящих к появлению температурной обратной связи?

5. Почему изменение расхода питательной воды второго контура приводит к изменению нейтронного потока в реакторе?

7. Какой должна быть зависимость критического положения управляющих стержней от уровня мощности в реакторе с отрицательным и положительным температурными коэффициентами.

8. Как будут меняться плотность нейтронов, температура на входе и выходе из реактора, средняя температура активной зоны при отключении ГЦН первого контура, если реактор имеет отрицательный температурный коэффициент?

9. Что такое программа регулирования ЯЭУ? Какие программы Вы знаете? Чем обусловлен выбор программ?

10. Как будут зависеть температура теплоносителя на входе и выходе реактора, средняя температура в реакторе, давление и температура пара от мощности при следующих условиях работы установки:

а) расход по первому контуру и средняя температура в реакторе постоянны;

б) расход по первому контуру меняется, давление пара во втором контуре постоянно.

Таблица 3.1

Таблица теплофизических параметров ЯЭУ

№ опыта	N , МВт	$T_{\text{ВЫХ}},$ °C	$T_{\text{ВХ}},$ °C	$\Delta T,$ °C	$T_{\text{ср}},$ °C	$P_{2к},$ МПа	$G_{2к},$ кг/с	Положение стержня АР, см	Положение стержня КР, см
1									
2									
3									
...									
n									

Рекомендуемая литература к лабораторной работе 5

1. **Мельников, В.И.** Динамические процессы при регулировании ЯЭУ / В.И. Мельников. – Горький, 1987.
2. **Климов, А.Н.** Ядерная физика и ядерные реакторы /А.Н. Климов.
- М. : Атомиздат, 1971.
3. **Владимиров, В.И.** Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов / В.И. Владимиров. - М. : Энергоиздат, 1981.
4. Динамические режимы работы судовых ядерных энергетических установок. - Л. : Судостроение, 1971.
5. **Дементьев, Б.А.** Кинетика и регулирование ядерных реакторов / Б.А. Дементьев. - М. : Атомиздат, 1973.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сорокин, Ю. Н.** Ультразвуковые методы неразрушающего контроля изделий. Некоторые тенденции развития / Ю. Н. Сорокин // Метрология и измерительная техника : Итоги науки и техники. – М. : ВИНТИ. 1979. Т. 4. С. 253-290.
2. **Баранов, В. М.** Ультразвуковые измерения в атомной технике / В. М. Баранов. - М. : Атомиздат, 1975. - 263 с.
3. **Мельников, В. И.** Акустические методы диагностики двухфазных теплоносителей ЯЭУ / В. И. Мельников, Г. Б. Усынин. - М. : Энергоатомиздат, 1987. - 261 с.
4. **Трофимов, Н. А.** Измерение параметров теплофизических процессов в ядерной энергетике / Н. А. Трофимов, В. В. Лаппо. - М. : Атомиздат, 1979. - 224 с.
5. **Bell, J. F. W.** A solid acoustic thermometer // Ultrasonics. - 1969. - №1. - P. 39-42.
6. **Fathimani, A. A.** A new resonant thermometer for nuclear reactor applications /A. A. Fathimani, J. F. W. Bell // J. Phys. - E. : Sei. Instrum. – 1978. - Т. 2. - P. 588-596.

7. **Tasman, H. A.** Nuclear application of ultrasonic thermometry // Ultrason Symp. Proc., New Orleans, New York. - 1979. - № 4. - P. 380-383.
8. **Field, M. E.** Development of ultrasonic thermometry for application in LMFBFR safety research // Ultrason. Symp. Proc., Dallas, Tex. Nov 14-16, 1984. - New York, 1984. V. 1. - P. 450-455.
9. **Arave, A. E.** A high-temperature ultra-sonic thermometer for in-reactor fuel rod centerline temperature measurements /A. E. Arave, J. A. Christenson, F. E. Pamko // Trans. Amer. Nucl. Sol. – 1972. - Т. 15. - № 2. - P. 766.
10. **Лысиков, Б. В.** Термометрия и расходомерия ядерных реакторов / Б. В. Лысиков, В. К. Прозоров. - М. : Энергоатомиздат, 1985. - 118 с.
11. **Бобровников, Г. Н.** Бесконтактные расходомеры / Г. Н. Бобровников, Б. М. Новожилов, В. Г. Сарафонов. - М. : Машиностроение, 1985. - 128 с.
12. **Бражников, Н. И.** Ультразвуковые импульсные методы контроля расхода жидкостей / Н. И. Бражников, И. Н. Каневский // Ультразвуковая техника. 1968. - № 2. - С. 34-39.
13. **Киясбейли, А. Ш.** Частотно-временные расходомеры и счетчики / А. Ш. Киясбейли, А. М. Измайлов, В. М. Гуревич. - М. : Машиностроение. 1984. - 127 с.
14. **Coulthard, J.** Crjss-correlation flow measurement - a history and the state of the art // Meas. and contr. - 1983. - V. 16. - № 6. - P. 214-218.
15. Датчики параметров теплоносителей ядерных реакторов. АИНФ 155 (06). - М. : ЦНИИ атоминформ, 1973. - 107 с.
16. **Vak, D.** Ultrasonic flow meter fits pipe sizes // Des. News. – 1986. - V. 42. - № 23. - P. 100-101.
17. Ультразвук. Маленькая энциклопедия ; под ред. И . П. Голяминой. - М. : Сов. энциклопедия. 1979. - 400 с.
18. **Бабилов, О. И.** Контроль уровня с помощью ультразвука / О. И. Бабилов. - Л. : Энергия, 1971. - 79 с.

19. **Lynnworth, L. C.** Liquid level measurements using longitudinal, shear, extensional and torsional waves // Ultrason Symp. Proc., New Orleans. - New York, / 1979. - P. 376-379.
20. **Трофимов, А. И.** Пьезоэлектрические измерительные преобразователи в атомной технике / А. И. Трофимов. - М. : Энергоатомиздат, 1983. - 65 с.
21. **Гаврилов, А. Р.** Содержание свободного газа в жидкости и акустические методы его измерения // Акустический журнал. - 1969. - Т. 15. - № 3. - С. 321-333.
22. **Лепендин, Л. Ф.** Акустика / Л. Ф. Лепендин. - М. : Высш. шк., 1978. - 448 с.
23. **А. с. 618674 СССР.** Способ определения концентрации газа в жидкости / И. С. Кольцова, Л. О. Крымский, И. Е. Покровская, И. Г. Михайлов // Б. И. 1978, № 29.
24. **Остервечель, Г.** Об измерении объемов маленьких газовых пузырьков и расходов газов акустическим методом // Приборы для научных исследований. – 1980. - № 2. - С. 44-48.
25. **Левновский, О. Л.** Структура навигационных течений / О. Л. Левновский. - Л. : Судостроение, 1978.
26. **Winterton, R. H.** Boiling noise detection // J. Brit Nucl Energy Soc. – 1973. - V. 12. - № 4. - P. 459-462.
27. **Мельников, В. И.** Диагностика двухфазных потоков методом акустического зондирования // Промышленная теплотехника. - 1981. - Т. 3. - № 2. - С. 110-116.
28. **Махин, В. А.** Оценка точности измерения паросодержания методом акустического зондирования / В. А. Махин, В. И. Мельников, В. А. Шатров // Промышленная теплотехника. - 1981. - Т. 3. - № 4. - С. 83-86.
29. **Winterton, R. H.** Boiling noise detection // J. Brit Nucl Energy Soc. – 1973. - V. 12. - № 4. - P. 459-462.
30. **Мельников, В. И.** Разработка метода акустического зондирования для измерения паросодержания в элементах ЯЭУ. Дисс. ... канд. техн. наук // Горький : НГТУ, 1981. – С. 500

- 31.** Использование акустического зонда для определения паросодержания и дисперсности фаз в высокотемпературном двухфазном потоке / Мельников В. И. [и др.]. Деп. Техника, технология, экономика, 1982. Вып. 27. – С. 20.
- 32.** Результаты испытания акустического датчика паросодержания / Ю. С. Тренин [и др.] // Вопросы теплофизики ядерных реакторов. - М. : Атомиздат, 1977. Вып. 6. - С. 57-60.
- 33.** А. с. № 1116582. СССР. Устройство для измерения среднего объемного паросодержания среды / В. И. Мельников, В. Н. Хохлов, В. А. Маслов // Б. И., 1984, № 36.
- 34.** Разработка и исследование акустического метода измерения паросодержания на выходе ТВС реакторов АСТ / В. И. Мельников [и др.] // Атомная энергия. - 1986. - Т. 61. Вып. 1. - С. 27-30.
- 35.** Бутенко, В. И. Установка для измерения концентрации газовых фаз в потоке жидкости / В. И. Бутенко, Е. С. Чистяков // Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках. – Харьков : Харьковский авиационный институт, 1978. Вып. 1. - С. 92-96.
- 36.** А. с. 901895. СССР. Устройство для диагностики двухфазного потока / В. И. Мельников, В. А. Махин, Н. Ф. Дзятко. Б. И., 1982, № 4.
- 37.** Баранов, В. М. Об измерении геометрических и динамических характеристик газообразного пузырька в жидкости ультразвуковым методом / В. М. Баранов, И. Н. Васильев, Ю. С. Трелин // Труды IV Всесоюзной акустической конф. - М., 1968. - С. 3-4.
- 38.** Duffey, R. B. An ultrasonic technique for measuring the transient movements of a liquid-vapor interface / R. B. Duffey, R. S. Hall // J. Sci Instr. 1969. - V. 2. Ser. 2. - P. 193-194.
- 39.** Об одном способе выделения газовых пузырьков в жидкости / В. А. Зверев [и др.] // ИСТФ. - 1980. - Т. 50. - № 7. - С. 1544-1545.
- 40.** Усынин, Г. Б. Реакторы на быстрых нейтронах / Г. Б. Усынин, Е. Б. Кусмарцев. - М. : Энергоатомиздат, 1985. - 228 с.
- 41.** Scarton, H. A. A review of the acoustic detection of boiling in nuclear reactors / H. A. Scarton, J. E. McDonald // Noise and Engin. Winter Annu. Meet. ASME. - Atlanta, 1977. - P. 109-123.

- 42. Рехин, Е. И.** Акустический контроль АЭС / Е. И. Рехин, В.Р. Ржевкин // Аналитический обзор АИНФ. - М. : ЦНИИ атоминформ, 1978. - 56 с.
- 43. Winderden, R. H.** Boiling noise detection // Brit. nucl. Energy Soc. - 1973. - V. 12. - № 4. - P. 459-462.
- 44. Югай, В. С.** Исследование акустических эффектов при течи воды в натрий / В. С. Югай, Р. Ф. Масагутов, Ф. А. Козлов // Атомная энергия. - 1983. - Т. 54. - Вып. 3. - С. 170-173.
- 45. Кебадзе, Б. В.** О надежности обнаружения кипения натрия с помощью корреляции акустических и нейтронных шумов / Б. В. Кебадзе, К. А. Александров // Атомная энергия. - 1979. - Т. 47. - Вып. 3. - С. 197-198.
- 46. Фу, К.** Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. - М. : Наука, 1971. - 255 с.
- 47.** Распознавание «образа» кипения теплоносителя в энергетических установках / Е. Ф. Ратников [и др.] // Изв. вузов. Сер. Энергетика, 1981. № 2. - С. 23-27.
- 48.** Эксперименты по вскипанию натрия в реакторе БОР-60 / В. А. Афанасьев [и др.] // Атомная энергия. - 1977. - Т. 45. - Вып. 5. - С. 338-342.
- 49. Hans, R.** Development of magnetostrictive and piezoelectric high-temperature-resistant sensor-condition for reliable reactor diagnosis / R. Hans, J. Podgorski // Nuclear Power Plant Contr. and Instrum. 1978. Proc. Int. Symp. Connes. 1978. V. 2. - P. 421-438.
- 50. Баранов, В. М.** Акустикоэмиссионные приборы ядерной энергетики / В. М. Баранов, К. И. Молодцов. - М. : Атомиздат, 1980. - 144 с.
- 51.** Методы и приборы ультразвуковых исследований // Физическая акустика: [пер. с англ.] ; под ред. У. Мэзона. - М. : Мир. - 1966. Т. 1. Ч. А. - 592 с.
- 52. Гринченко, В. Т.** Гармонические колебания и волны в упругих телах / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. - Киев: Наукова думка, 1981. - 284 с.
- 53. Мельников, В. И.** Ультразвуковой датчик акустического контроля ЯЭУ / В. И. Мельников, В. Н. Хохлов, А. В. Дунцев // Атомная энергия. - 1987. Т. 63. - Вып. 2. - С. 130-132.

- 54. Корн, Г.** Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. - М. : Наука, 1973. - 831 с.
- 55. Тюлин, В. И.** Введение в теорию излучения и рассеивания звука / В. И. Тюлин. - М. : Наука, 1976. - 254 с.
- 56. Лямеv, Л. М.** Отражение звука тонкими пластинами и оболочками в жидкости / Л. М. Лямеv. - М. : Изд. АН СССР, 1955. - 73с.
- 57. Меркулов, Л. Г.** Затухание нормальных волн в пластинах, находящихся в жидкости // Акустический журнал. – 1964. - Т. 10. - Вып. 2. - С. 206-210. **58. Климов, А.Н.** Ядерная физика и ядерные реакторы /А.Н. Климов. - М. : Атомиздат, 1971.
- 59. Владимиров, В.И.** Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов / В.И. Владимиров. - М. : Энергоиздат, 1981.
- 60.** Динамические режимы работы судовых ядерных энергетических установок. - Л. : Судостроение, 1971.
- 61. Дементьев, Б.А.** Кинетика и регулирование ядерных реакторов / Б.А. Дементьев. - М. : Атомиздат, 1973.
- 62. Гейлер, Л.Б.** Введение в теорию автоматического регулирования / Л.Б. Гейлер. – Минск, 1967.
- 63. Титце, Ч.** Полупроводниковая схемотехника / Ч. Титце, К. Шенк. - М., 1983.
- 64. Пискунов, Н.С.** Дифференциальное и интегральное исчисление / Н.С. Пискунов. - М., 1985.
- 65. Горбачевич, Е.Д.** Аналоговое моделирование систем управления / Е.Д. Горбачевич, Ф.Ф. Левинзон. - М., 1984.
- 66. Ключев, А.С.** Автоматическое регулирование / А.С. Ключев. - М., 1973.

**МЕЛЬНИКОВ ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ
ИВАНОВ ВАДИМ ВЛАДИМИРОВИЧ
ТАРАСОВА НАТАЛЬЯ ПАВЛОВНА**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО
СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ И
МЕТОДАМ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**Редактор Т.В. Третьякова
Компьютерный набор и верстка Н.П. Тарасова**

Подписано в печать 23.07.2015. Формат 60x84¹/16. Бумага офсетная. Печать
офсетная. Усл. печ. л. 10. Тираж 550 экз. Заказ .

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия: 603950,

Н.Новгород, ул. Минина, 24.