

**Н.И. Бражников, В.А. Белевитин,
Е.В. Бражникова**

**АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
СВОЙСТВ СРЕД В ТЕХНИКЕ**

Министерство образования и науки РФ
Государственное образовательное учреждения
высшего профессионального образования
«Челябинский государственный педагогический университет»

**Н. И. Бражников, В.А. Белевитин,
Е.В. Бражникова**

**АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
СВОЙСТВ СРЕД В ТЕХНИКЕ**

Монография

Челябинск
2011

УДК 620.179; 621.034.4-8
Б87

Бражников, Н.И. Акустические преобразователи сред в технике / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова; под науч. ред. Н.И. Бражникова. – Челябинск : Изд-во ЧГПУ, 2011. – 206 с.

ISBN 978-5-85716-806-6

В монографии представлены основы конструирования акустических преобразователей свойств (*АПС*) технологических сред промышленных производств (в машиностроении и металлургии, авиатехнологии, горной, нефтехимической и нефтедобывающей отраслях промышленности). Многогранность задач, возлагаемых на ультразвуковые методы и системы контроля физико-химических свойств веществ, обусловила значительное разнообразие измерительных *АПС* сред. Приводится описание, технические характеристики входящих в *АПС* сред пьезо-преобразователей из кварца, керамики титаната бария, цирконата-титаната свинца и др. Конструкционные параметры и виды используемых ультразвуковых волн в *АПС* сред технологических процессов определяются, в основном, физико-химическими параметрами контролируемых сред и видами производств. Описания *АПС* сред и методов контроля иллюстрируются их применением в разработках толщиномеров металлопроката, концентрато- и расходомеров: нефтепродуктов, растворов и пульп в флотации и выщелачивании.

Монография предназначена для инженерно-технических работников машиностроительной, металлургической, химической, энергетической и других отраслей промышленности, исследовательских и проектно-конструкторских организаций, полезна для студентов высших учебных заведений и колледжей, специализирующихся по направлениям «Машиностроение», «Приборы и устройства контроля веществ, материалов и изделий», «Физико-технический контроль и автоматизация производственных процессов», «Металлургия», «Металлургические машины и оборудование» и др.

Рецензенты: кафедра «Физико-технический контроль производства»
Московского государственного горного университета,
доктор педагогических наук, профессор П.В. Зуев

© Бражников Н. И., Белевитин В. А., Бражникова Е. В., 2011 г.

© Челябинский государственный педагогический университет, 2011 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
ВВЕДЕНИЕ	9
ГЛАВА 1. ПРОМЫШЛЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ФЛОТАЦИИ. ВЕЛОСИМЕТРИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ	
1.1. Абсорбционная флотация	18
1.1.1. Флотация.....	18
1.1.2. Основные виды флотационных процессов.....	18
1.1.3. Флотационные реагенты	21
1.1.4. Флотационные машины.....	23
1.1.5. Ультразвуковая селективная флотация пирита и халькопирита	24
1.2. Экстрагирование.....	26
1.3. Подземное выщелачивание руд	28
1.3.1. Схемы подземного выщелачивания	28
1.3.2. Системы подземного выщелачивания	30
1.4. Импульсно-фазовые методы контроля	33
1.5. Ультразвуковая велосиметрия углей и нефтепродуктов	39
1.5.1. Изверженные и осадочные породы	39
1.5.2. Ископаемые угли.....	40
1.5.3. Нефть и нефтепродукты	42
Библиографический список к главе 1	43
ГЛАВА 2. КОНТАКТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СВОЙСТВ СРЕД. КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ В ЭКСТРАКЦИИ САМАРИЯ И ГАДОЛИНИЯ.	
2.1. Контактные АПС твердых сред	47
2.1.1. Основные особенности преобразователей.....	47
2.1.2. Преобразователи без преломления волны и с ним	48
2.1.3. АПС сред на основе волн Дж. Рэлея и Г. Лэмба	50
2.2. Контактные АПС жидкостей и газов.....	51
2.2.1. Конструктивные особенности преобразователей	51
2.2.2. Преобразователи без преломления волны	52
2.2.3. Поверхностно- и нормально-волновые АПС сред.....	54
2.3. Ультразвуковая реверберация в АПС жидкостей и твердых сред	57

2.4. Экстракция в гидрометаллургии	64
2.4.1. Жидкостная экстракция	64
2.4.2. Экстрагенты.....	66
2.4.3. Экстракторная система.....	67
2.5. Контроль экстракции нитратов самария и гадолиния и упругих модулей.....	68
2.5.1. Метод совмещения информативного эхо-импульса с его отражением.....	68
2.5.2. Импульсная система для велосиметрических исследований лантаноидов.....	73
2.5.3. Концентрационные зависимости велосиметрии нитратов самария и гадолиния.....	76
2.5.4. Импедансы и упругие модули лантаноидов Gd, Jt, La, Sm.	80
Библиографический список к главе 2	82

ГЛАВА 3. БЕСКОНТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ.

УЛЬТРАЗВУК В ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ МЕДИ ИЗ ХАЛЬКОЗИНА

3.1. Применение преобразователей в технике	87
3.2. Слоино-граничное прохождение волн.....	88
3.2.1. Суперпозиционная система уравнений.....	88
3.2.2. Пересечение слойной границы продольной волной.....	94
3.2.3. Слоинное отражение – прохождение поперечной волны.....	97
3.3. Бесконтактные АПС твердых сред.....	100
3.3.1. Преобразователи без УЗ-преломления волны и с ним	100
3.3.2. Поверхностно- и нормально-волновые АПС сред.....	102
3.4. Бесконтактные АПС жидкостей и газов	104
3.4.1. АПС жидкостей и газов без преломления волны и с ним	105
3.4.2. Поверхностно-волновый АПС жидкостей Дж. Рэля – Н. Бражникова	111
3.5. Отражение ультразвуковой волны в АПС сред.....	113
3.5.1. Отражение от материального слоя	113
3.5.2. Излучение – прием УЗ-волн пьезоэлементом без протекторов и с ними	115
3.6. Выщелачивание меди из халькозина ультразвуком	119
3.6.1. Халькофильные элементы.....	119
3.6.2. Халькозин	120
3.6.3. Ультразвуковая интенсификация выщелачивания халькозина.....	120
3.6.4. Нормально-волновый контроль Н. Бражникова уровня жидкости в гидрометаллургии	123

3.6.5. Дисперсия и зарождение нормальных волн	128
Библиографический список к главе 3	133
ГЛАВА 4. ВРЕМЯ-АМПЛИТУДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АПС.	
УЛЬТРАЗВУК В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕДИ	
4.1. Измерительные преобразователи без УЗ-преломления	139
4.1.1. Время распространения волны, коэффициент прозрачности АПС сред.....	140
4.1.2. Ослабление волны, акустическая реверберация	141
4.2. УЗ-преобразователи с одним преломлением волны между ПЭИ (ПЭП) и контролируемой средой.....	143
4.2.1. Лучевая акустика АПС сред.....	143
4.2.2. Границы раздела сред.....	151
4.2.3. Прозрачность бесконтактных АПС сред	153
4.2.4. Затухание. Угол излучения. Диаметр пьезоэлемента	156
4.3. Лучевое распространение волны в гидрометаллургических расходомерах.....	158
4.4. Плавка и рафинирование меди.....	162
4.4.1. Сырье и применение	162
4.4.2. Подготовка руд к плавке	164
4.4.3. Плавка на штейн.....	166
4.4.4. Конвертирование медного штейна.....	177
4.4.5. Огневое рафинирование	179
4.4.6. Электролитическое рафинирование.....	181
4.5. Контактный УЗ-контроль толщины листопроката меди и цветных сплавов	182
Библиографический список к главе 4	187
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	199
ПРИЛОЖЕНИЕ	202

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов (УЗКР ТП) широко применяется в различных отраслях промышленности. В данной монографии системно рассмотрены как основная составляющая часть УЗКР ТП акустические преобразователи свойств (АПС) технологических сред.

Крупным этапом в развитии промышленного использования ультразвукового контроля стали применения методов: бесконтактного (относительно контролируемой технологической среды) просвечивания гидротока и движущейся в воздухе технологической твердой среды (прокатываемых листов, полос и фольги, в частности) с определением поверхностной плотности и толщины среды (слоя, покрытия) по степени его аэроакустической прозрачности и методов «звнящей стенки», в котором источником информации о физических свойствах, технологическом давлении и уровне жидкости служит стенка гидроёмкости (трубопровода) при возбуждении в ней мод симметричной и антисимметричной, нормальных, продольно-поверхностной, рэлеевской поверхностной или наклонно распространяющейся поперечной ультразвуковых волн. Впервые в мире эти методы открыл, исследовал и применил основатель УЗКР ТП – выдающийся ученый и конструктор Н. Бражников, автор ряда монографий, свыше 200 научных статей и 187 изобретений, в том числе 4-х именных авторских свидетельств, патентов СССР и Российской Федерации и 38 патентов Великобритании, Германии, Италии, США, Японии, Франции, Швейцарии и других стран.

Монографию написали основатель УЗКР ТП Н.И. Бражников и известные в научном мире своими публикациями в данной области его последователи д-р техн. наук В.А. Белевтин и канд. техн. наук Е.В. Бражникова.

Во введении кратко рассмотрены основные научные направления УЗКР ТП в различных отраслях промышленности, каждое из которых сопровождается библиографическими ссылками на первоисточники и на вклад в указанные направления акустических научных школ России и ряда стран мира.

Глава 1 излагает технологические процессы абсорбционной флотации, экстрагирования и подземного выщелачивания металлосодержащих руд и концентратов; воздействия ультразвуковых колебаний на селективную флотацию пирита и халькопирита в гидрометаллургии; результаты УЗ-контроля упругих свойств ископаемых углей, нефти и нефтепродуктов; описание импульсно-фазовой установки для велосиметрического УЗ-контроля.

В главах 2 и 3 представлены элементы конструирования контактных и бесконтактных акустических измерительных преобразователей свойств технологических сред (плотность, концентрация, давление, скорость аэро- и гидротоков, толщина и структура полуфабрикатов цветных металлов – проката и пр.) в информативное изменение параметров ультразвука (фаза, частота, амплитуда, время распространения) с применением объемной, поверхностной Дж. Рэлея, нормальных волн Г. Лэмба и Н. Бражникова. Приводятся расчетные аналитические выражения: прохождения и отражения волны на границах звукопровод – контролируемая среда, сред, разделенных твердым слоем; возникающей в преобразователе реверберации; особенности конструирования измерительных преобразователей при использовании поверхностной и нормальных волн, дисперсионные характеристики и зарождение нормальных волн.

Главы 2 и 3 завершаются рассмотрением: жидкостной экстракции в редкометаллическом производстве; воздействием мощного ультразвука на выщелачивание меди из халькозина; ультразвуковым контролем концентрации нитратов лантаноидов (самария и гадолиния) и бесконтактным нормально-волновым

контролем Н. Бражникова уровня жидкостей в металлургии и энергетике.

В главе 4 изложены: информативные параметры акустических измерительных преобразователей без и с преломлением ультразвуковой волны между контролируемой средой и излучателем (приемником): времени распространения, коэффициента акустической прозрачности преобразователя, степени реверберации и лучевое распространение волны в гидromеталлургическом расходомере. Рассмотрены ключевые аспекты плавки и рафинирования меди, контактный ультразвуковой импульсный толщиномер проката меди и цветных металлов и сплавов.

В целом книга – важное научное издание, раскрывающее тесные взаимосвязи между физическими свойствами жидких, газообразных и твердых сред (веществ) и их акустическими характеристиками с метрологически-промышленным использованием этих взаимосвязей. Она представляет большой интерес для инженерно-технических работников авиационной, машиностроительной, металлургической, химической, энергетической и других отраслей промышленности, исследовательских и проектно-конструкторских организаций, полезна преподавателям, аспирантам и студентам вузов и колледжей, специализирующимся по направлениям «Машиностроение», «Приборы и устройства контроля веществ, материалов и изделий», «Физико-технический контроль и автоматизация производственных процессов», «Металлургия», «Металлургические машины и оборудование».

Д-р техн. наук А.И. Вольхин

ВВЕДЕНИЕ

Первым в мире в 1928 г. высказал и позже осуществил идею использовать ультразвуковые колебания в дефектоскопии металлов и сплавов выдающийся российский физик С.Я. Соколов [1]. От этой идеи в последующем был совершен переход [2–4] к созданию новой области акустической техники – *ультразвуковому контролю и регулированию технологических процессов* (УЗКР ТП), общие вопросы теории и метрологии которой рассмотрены в [4–11].

Ультразвук широко используется в металлургии, теплоэнергетике, горной, нефтехимической и других отраслях промышленности:

- в скоростемерах потока жидких и газообразных сред – фазовым [4–6; 10], импульсно-фазовым [5;10; 12–13], время-импульсным [14–16], частотно-импульсным [17–18] и частотно-фазовым [11; 19–20] методами;

- при измерении массотеплообмена, объемного и массового расхода жидкостей [10, 21–26];

- в системах контроля концентрации, плотности и температуры пульп, бинарных и многокомпонентных растворов [8; 27–31];

- в приборах измерения давления, расстояний, уровня различных сред [10; 32–35];

- в системах контроля толщины, поверхностной плотности [36–38], качества материалов [8; 39–42];

- при автоматическом регулировании технологических процессов и дозировании сред [43–46].

Значительным шагом в развитии ультразвуковой (УЗ) техники контроля параметров технологических потоков стало применение впервые предложенных Н. Бражниковым методов:

- бесконтактного акустического просвечивания: *гидропотоков* с нахождением их скорости, физических свойств и расхода по акустической разности встречного распространения волн [4–

6; 13; 33] и технологического *твердого слоя в воздухе* с определением по степени акустической прозрачности его поверхностной плотности и толщины [38; 46–49];

• «*звонящей стенки*», акустическим источником информации о контролируемой технологической среде в котором является стенка технологической гидроемкости при возбуждении в ней мод симметричной или антисимметричной нормальных односторонне демпфированных [26; 45; 50–54], поверхностной [55] волн, наклонно распространяющихся поперечных колебаний и эхо-импульсной реверберации [56–58].

Указанной новой области акустической науки и техники посвящен выпускаемый издательством «Теплотехник» под научной редакцией основателя УЗКР ТП Н. Бражникова четырехтомный научно-технический справочник «Ультразвуковой контроль».

Монография вобрала в себя результаты работ ее авторов и исследователей и разработчиков акустических научных школ многих стран. К ним относятся:

в России: специалисты *НТК СЦМА* – Биргер Г.И., Казинцев В.А., Кондрашов Л.А., Шавыкина Н.С.; *ВНИИ ТВЧ* – Михалев Б.Е., Химунин А.С.; *ГИРЕДМЕТ* – Каневский И.Н., Тарелкин А.К.; *ИГД* – Курьянова Е.И.; *ЛГУ* – Михайлов И.Г., Феофанов Г.Н.; *ЛЭТИ* – Соколов С.Я., Бабилов О.И., Яковлев Л.А.; *МГИ* – Ямщиков В.С.; *МГИРЭА* – Бражников А.И., Иванов Е.Л., Лавлинская Е.Н.; *МИСуС* – Агранат Б.А., Хавский Н.Н.; *МОПИ* – Ноздрев В.Ф.; *НИАТ* – Крылова Э.Д.; *НИИ ИС* – Клюев В.В., Королев М.В., *НИИ ТП* – Журавлев Л.И., Шафрановская З.М.; *ПСЗ* – Оганесов А.С.; *СКБ ТНА* – Полянский А.А., Рохлин В.Б.; *ТРТИ* – Дюдин Б.В., Колмаков В.А., Лепендин Л.Ф., Меркулов Л.Г., *ЮУрГУ* – Гуревич С.Ю;

в США – Берлинкур Д., Велковитц У., Гринспан М., Керран Д., Критц Дж., Мэзон У., Пирс Г., Уильямс Дж., Чигг К.;

в Белоруссии – Крылович В.И., Солонухин А.Д., Шашков А.Г.;

в Болгарии – Ангелов Г., Миховски М.;
в Германии – Гидеман Е., Рюттен О., Швайгер М.;
в Великобритании – Лэмб Г., Рэлей Дж., Спроуль Д.;
в Грузии – Джапаридзе И.Т., Якобишвили А.З.;
в Литве – Илгунас В., Кундротас К., Рукас И., Сукацкас В;
в Украине – Здоренко В.Г., Ногин И.С.;
во Франции – Бикар П., Ланжевен П.;
в Японии – Мацуо С., Номото О.

При использовании их трудов и достижений в справочнике даны соответствующие ссылки. Наименования вышеуказанных предприятий и организаций приведены в Приложении.

Главы сопровождаются подробным описанием и техническими характеристиками достигнутых практических результатов.

Приведенная в конце каждой из глав литература содержит значительное число ранее не публиковавшихся, вследствие ноу-хау и патентования, источников.

Введение, гл. 1 написана В.А. Белевитиным; гл. 2 – Н.И. Бражниковым и В.А. Белевитиным; гл. 3 Н.И. Бражниковым; гл. 4 – Е.В. Бражниковой и В.А. Белевитиным.

Авторы монографии выражают искреннюю признательность рецензентам, сотрудникам Ассоциации разработчиков акустических систем контроля и акустических научных школ России, Белоруссии, Грузии, Литвы, Украины и будут благодарны всем, кто пришлет отзывы, замечания и пожелания по содержанию настоящего издания по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69. Заказы на настоящее издание принимаются по тому же адресу.

Библиографический список к Введению

1. **Соколов, С.Я.** Устройство для испытания материалов / С.Я. Соколов // Авт. св-во № 23246. – МКИ G01N 29/04. – 1928.
2. **Бражников, Н.И.** Разработка прибора для дефектоскопии прессы-уляжины в латунных и бронзовых прутках / Н.И. Бражников // Отчет НИР 22-6-11. – М.: СКБ ЦМА, 1956.
3. **Белевитин, В.А.** От идеи применения ультразвука в дефектоскопии к созданию и внедрению контроля и регулирования технологических процессов – творческий путь выдающегося ученого Н.И. Бражникова / В.А. Белевитин и др. // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 11. – С. 65-66.
4. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер агрессивных жидкостей и пульп. Часть 2 / Н.И. Бражников // Отчет НИР 22-11-2. – М.: СКБ ЦМА, 1958.
5. **Бражников, Н.И.** Способ ввода волны в расходомере с жидкостным звукопроводом / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 151053 от 2.07.1960. – БИ.– 1962. – № 20.
6. **Woloshin, I.** Ultrasonic flowmeters by N.I. Birger and N.I. Brazhnikov / I. Woloshin // Ultrasonics. – 1965. – № 4. – P. 115.
7. **Бражников, Н.И.** Акустическая лабораторная установка для прецизионного измерения скорости ультразвука и коэффициента затухания в жид-костях и твердых телах / Н.И. Бражников. – М.: ЦИТЭИН, 1961.
8. **Бражников, Н.И.** УЗ-методы / Н.И. Бражников. – М. : Энергия, 1965.
9. **Бражников, Н.И.** Теоретический анализ ультразвуковых расходомеров / Н.И. Бражников // Измерительная техника. – 1966. – № 8. – С. 57–62.
10. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковая фазометрия / Н.И. Бражников. – М. : Энергия, 1968.
11. **Крылович, В.И.** УЗ-частотно-фазовые методы исследования и неразрушающего контроля / под ред. А.Г. Шашкова. – Минск : Наука и техника, 1985.
12. **Alexandrov, A.M.** Appareochio ultrasonico per la misurazione dello spesso-re di oggetti con pareti sottili / A.M. Alexandrov и др. // Ital. Pat. № 904394, 1970.
13. **Бражников, А.И.** Об ультразвуковом контроле скорости потока жид-кости без расстыковки трубопровода по методу Н.И. Бражникова. / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников // Ии-женерно физический журнал. – 2006. – Т. 79. – № 2. – С.131–138.

14. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 206846. – БИ.– 1967. – № 1.
15. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковые импульсные методы контроля расхода жидкостей / Н.И. Бражников, И.Н. Каневский // Ультразвуковая техника. – 1968. – Т. 2. – С. 34–39.
16. **Бражников, А.И.** Бесконтактный одноканальный время-импульсный расходомер / А.И. Бражников и др. // Измерительная техника. Метрология. – 2004. – № 11. – С. 16–25.
17. **Бражников, Н.И.** Изыскание возможности измерения расхода суспензии полипропилена в полипропилене ультразвуковым методом / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 49-11. – М.: СКБ ЦМА, 1965.
18. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер / Н.И. Бражников, А.А. Иванов, А.С. Оганесов // Авт. св-во № 300876. – БИ.– 1971. – № 13.
19. **Fischbacher, R.T.** Ultrasonic Flow Measurement for Industrial Purposes / R.T. Fischbacher // Automation Progress. – 1960. – V.5. – № 2. – P. 40–42, 56–57.
20. **Бражников, Н.И.** Способ измерения скорости потока жидкости с по-мощью ультразвука / Н.И. Бражников, В.А. Колмаков. // Авт. св-во № 301178. – БИ.– 1971. – № 14.
21. **Бражников, Н.И.** Некоторые вопросы конструирования датчиков УЗ-расходомеров / Н.И. Бражников // Докл. IX Межвуз. науч. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1961.
22. **Александров, А.М.** Ультразвуковой расходомер для нефти / А.М. Александров, Н.И. Бражников, А.А. Полянский // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М.: 1969. – Вып. 8. – С. 17–18.
23. **Бражников, Н.И.** Разработка и исследование опытных образцов УЗ-приборов контроля расхода и давления жидкости в гидравлических системах / Н.И. Бражников и др. // Тр. ГОСНИИ ГА. – М.: 1973. – Вып. 88. – С. 66–90.
24. **Kanevsky, I.N.** Verfahrene zum messen des durchflüssen von flüssigen Medium und Einrichtungen zu dessen realisierung / I.N. Kanevsky и др. // Deutch. Pat. № 2128750. – Int.Cl. G01F 1/00. – 1973.
25. **Бражников, Н.И.** Устройство для автоматического контроля мас-сотеплопереноса жидких сред / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 493720. –БИ. – 1975. – № 44.
26. **Бражников, Н.И.** Устройство для автоматического контроля мас-сы жидкости в резервуаре / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 524124. БИ.– 1976. – № 28.

27. **Бражников, Н.И.** Измерение концентрации гидрометаллургических растворов по скорости ультразвука / Н.И. Бражников и др. // Отчет НИР 500-11-1. – М.: СКБ ЦМА, 1958.
28. **Авербух, М.А.** Устройство для контроля концентрации компонентов в многокомпонентных растворах / М.А. Авербух и др. // Авт. св-во № 301557. – БИ. – 1971. – № 14.
29. **Бражников, Н.И.** Акустический способ контроля физических свойств жидких сред / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 321689. – БИ. – 1971. – № 21.
30. **Кондрашов, Л.А.** Устройство для автоматического измерения скорости ультразвука в жидкостях и пробоотборной линии / Л.А. Кондрашов и др. // Пат. РФ № 1552016. – МКИ G01N 29/00. – 1994.
31. **Бражников, А.И.** УЗ-спектральный метод Н.И. Бражникова технологического контроля концентрации электролита / А.И. Бражников и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 3. – С. 54–56.
32. **Бражников, Н.И.** Устройство для измерения параметров жидких сред / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // Авт. св-во № 308299. – БИ. – 1971. – № 21.
33. **Brazhnikov, N.I.** Method and apparatus for controlling pressure in pipelines / N.I. Brazhnikov, E.D. Krylova // USA Pat. № 3977232. – Int.Cl. G01E 11/00. – 1976.
34. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой локатор для измерения линейных размеров горных выработок / Н.И. Бражников, В.И. Иванов, В.С. Ямщиков // Авт. св-во № №264308. – БИ. – 1970. – № 11.
35. **Горбатов, А.А.** Акустические методы и средства измерения расстояний в воздушной среде / А.А. Горбатов, Г.Е. Рудашевский. – М.: Энергия, 1973.
36. **Balaian, R.D.** Acoustic gauge for measuring the thickness articles / R.D. Balaian и др. // Brit. Pat. № 1307243. – Int. Cl. G01B 17 / 00. – 1973.
37. **Королев, М.В.** Эхоимпульсные толщиномеры / М.В. Королев. – М.: Машиностроение, 1980.
38. **Бражников, Н.И.** Импульсный метод контроля поверхностной плотности фольгопроката по степени его аэроакустической прозрачности / Н.И. Бражников, А.И. Бражников // Производство проката. – 2003. – № 8. – С. 41.
39. **Бражников, Н.И.** Выявление прессутяжки с помощью прибора УЗД-37 / Н.И. Бражников, И.А. Крым // Техн. бюл. з-да «Красный Выборжец». – Л., 1958. – № 1. – С. 14–17.

40. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1976.
41. **Крауткремер, Й.** Ультразвуковой контроль материалов / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер // пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991.
42. **Белевитин, В.А.** Ультразвуковой контроль качества кованных валов / В.А. Белевитин, Н.И. Бражников // Сталь. – 2000. – № 4. – С. 47–48.
43. **Бражников, Н.И.** Система управления процессом прокатки тонколистового материала / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 535124. – БИ. – 1976. – №42.
44. **Бражников, Н.И.** Датчик регулятора толщины в фольгопрокатном стане / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 639179. – БИ.– 1978. – № 47.
45. **Бражников, Н.И.** Формирователь сигналов управления дозированием / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 843196. – БИ.– 1981. – № 24.
46. **Бражников, А.И.** Применение бесконтактного ультразвукового метода Н.И. Бражникова для САРТ прокатываемых полос / Н.И. Бражников и др. // Современные технологии и материаловедение. – Магнитогорск: МГМИ. – 2004. – Вып. 2. – С. 38–43.
47. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой способ Н.И. Бражникова измерения толщины материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 308607 от 2.07.1968. – БИ.– 1978. – №37.
48. **Бражников, Н.И.** Акустический бесконтактный способ контроля толщины листовых материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 479406 от 16.09.1968. – БИ.– 1978. – №37.
49. **Brazhnikov N.I.** Method for checking of sheet materials by using acoustic os-cillation and device for effecting same / N.I. Brazhnikov // USA Pat. 4117732, 1976.
50. **Бражников, Н.И.** Способ УЗ-дискретной сигнализации уровня сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 333410 от 14.04.1970. – БИ.– 1972. – № 11.
51. **Бражников, Н.И.** Способ Н.И. Бражникова контроля физических параметров жидкостей / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 425098. – БИ.– 1974. – № 15.
52. **Brazhnikov, N.I.** Method and device controlling gas-liquid or liquid-liquid interdice in monolayer reservoirs / N.I. Brazhnikov // Brit. Pat. 1555549, Int. Cl. G01B 17/00, 1977.
53. **Бражников, Н.И.** Бесконтактный уровнемер Н. Бражникова / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 418737. – БИ.– 1974. – № 9.

54. **Белевитин, В.А.** Бесконтактный автоматический контроль уровня жидкости по ультразвуковому методу Н.И. Бражникова с применением антисимметричной нормальной волны / В.А. Белевитин и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 10. – С. 37–40.
55. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой измеритель уровня жидкости в резервуарах / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 1435943. – БИ.– 1988. – № 41.
56. **Бражников, Н.И.** Способ сигнализации уровня жидких сред, например флотореагентов / Н.И. Бражников, В.Л. Забелин, В.С. Ямщиков // Авт. св-во № 450962. – БИ.– 1975. – № 1.
57. **Бражников, Н.И.** Способ контроля физических параметров жидкостей / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 1377715 от 21.06.1976. – БИ.– 1988. – № 9.
58. **Бражников, Н.И.** Амплитудно-фазовые соотношения в акустических полях ультразвуковых измерительных систем // Инженерно-физический журнал – 1969. – Т. 19. – №1. – С. 129–132.
59. **Эскин, Г.И.** Ультразвуковая обработка расплава в процессах фасонного и непрерывного литья легких сплавов / Г.И. Эскин. – М.: Машиностроение, 1979.

Глава 1

ПРОМЫШЛЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ФЛОТАЦИИ. ВЕЛОСИМЕТРИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Ультразвуковые методы и системы применяются в экспериментальных исследованиях технологических процессов, заводском экспресс-анализе [1–11] и в непрерывном автоматическом контроле технологических потоков [12–41].

К важнейшим, из применяемых в промышленности, относятся технологические процессы абсорбционной флотации, жидкостной экстракции в гидрометаллургии, экстрагирования твердых сред и подземного выщелачивания, обогащения самых различных веществ, в том числе органического происхождения (нефть, битумы, смолы, каучук, семена), продуктов текстильной промышленности (волокна, красители), животного происхождения (извлечение протеинового молока, обезжиривание животных тканей, удаление различных бактерий – туберкулезных бацилл Коха и других), очистки промышленных отходов и хозяйственно-фекальных сточных вод.

За последние годы российские ученые, успешно решив некоторые теоретические и практические задачи, наметили пути использования УЗ-методов автоматического контроля плотности, концентрации и расхода разнообразных технологических сред (пульпы, растворы и т.д.), интенсификации технологических процессов флотации, экстракции, экстрагирования, выщелачивания и обогащения.

Гидрометаллургические методы комплексной переработки руд цветных, редких и радиоактивных металлов в течение последних десятилетий весьма интенсивно развивались и совершенствовались. Особенно важным является необычайное расширение запасов бедного по содержанию и сложному составу минерального сырья. Вовлечение этого сырья в сферу

промышленного использования стало возможным вследствие применения методов гидрометаллургии, основанных на использовании новых химических реагентов (растворителей, окислителей, катализаторов, экстрагентов), усовершенствованной аппаратуры и разнообразных методов и средств интенсификации гидрометаллургических процессов. Одно из направлений, по которым ведутся исследования в области интенсификации гидрометаллургических процессов, это применение *ультразвука*.

1.1. Абсорбционная флотация

1.1.1. Флотация

Флотация – технологический процесс разделения мелких частиц, например минералов, в водной суспензии (пульпе) или растворе. Она основана на избирательной концентрации (абсорбции) частиц на границах раздела фаз в соответствии с их поверхностной активностью или смачиваемостью. Гидрофобные (плохо смачиваемые водой) частицы закрепляются на границе раздела фаз (обычно газа и воды) и отделяются от гидрофильных (хорошо смачиваемых водой) частиц.

Применяется абсорбционная флотация в качестве одного из основных методов обогащения полезных ископаемых. Помимо металлургической, горноперерабатывающей отраслей промышленности, флотация используется в пищевой, химической и нефтехимической отраслях для очистки промышленных стоков, ускорения оттаивания, выделения твердых взвесей и эмульгирования веществ. Применяется также для очистки воды от органических веществ (нефти, масел), бактерий и тонкодисперсных осадков, солей.

1.1.2. Основные виды флотации

Основные виды флотационных процессов представлены на рис. 1.1.

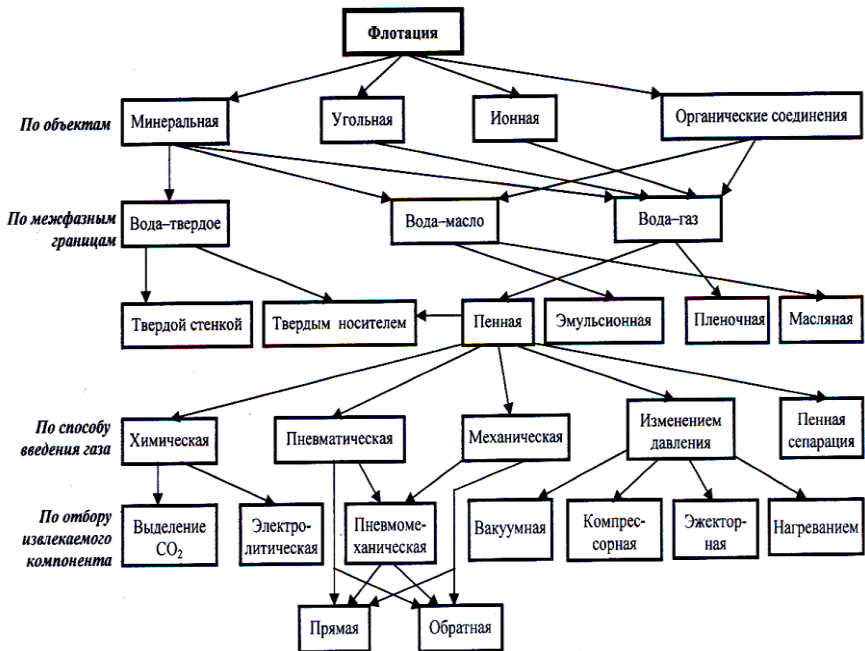


Рис. 1.1. Классификация флотационных процессов

По типу межфазной границы первой была реализована масляная флотация (на рис. 1.1: вода – масло). Для ее осуществления измельченная руда перемешивается с маслом и водой, при этом сульфидные минералы смачиваются маслом, всплывают вместе с ним и снимаются с поверхности воды, а породы (кварц, полевые шпаты и др.) тонут в воде. Позже этот вид был усовершенствован: масло диспергировалось до эмульсионного состояния, что позволяло извлекать тонкие шламы, например марганцевых руд.

Способность тонких гидрофобных частиц удерживаться на поверхности воды, в то время как гидрофильные тонут в ней, была использована для создания пленочной флотации. Последняя не имела большого практического применения, но явилась прообразом пенной флотации (на рис. 1.1: вода – газ).

В процессе пенной флотации обработанные реагентами частицы выносятся на поверхность воды пузырьками воздуха, образуя пенный слой, устойчивость которого регулируется добавлением пенообразователей.

Для образования пузырьков применяют различные методы:

- образование углекислого газа за счет химической реакции;
- выделение газа из раствора при пониженном давлении;
- энергичное перемешивание пульпы (механический);
- пропускание воздуха сквозь мелкие отверстия (пневматический).

Тонкодисперсные пузырьки из растворов получают также при электролитическом разложении воды с образованием газообразных кислорода и водорода (электрофлотация). Разнообразные способы образования газовых пузырьков и комбинации этих способов соответствуют различным типам флотационных машин. Соединение камер флотационных машин в определенной последовательности с направлением потоков пенных и камерных продуктов на перефлотацию, домельчение, очистку или контрольную флотацию составляет технологическую схему, которая позволяет получать концентрат требуемого

качества при заданном извлечении полезного компонента. Концентрат может быть получен *пенным* (пенная флотация) или *камерным* продуктом (обратная флотация, которой подвергается пустая порода).

Перед пенной флотацией производят измельчение руды до крупности 0,5–1 мм в случае природно-гидрофобных неметаллических ископаемых с небольшой плотностью (сера, уголь, тальк) и до 0,1–0,2 мм для руд металлов. Образование флотационных агрегатов (частиц и пузырьков воздуха) – *аэрофлюков* происходит при столкновении минералов с пузырьками воздуха, вводимого в пульпу. Для создания и усиления разницы в гидратированности разделяемых минералов и придания пене достаточной устойчивости к пульпе добавляются флотационные реагенты. Затем пульпа поступает во флотационные машины.

1.1.3. Флотационные реагенты

Флотационные реагенты (*ФлР*) представляют собой вещества, добавляемые в пульпу при флотации для регулирования взаимодействия частиц с *пузырьками* газа, химических реакций и физико-химических процессов в *жидкой фазе*, на границах раздела фаз и в *пенном* слое с целью создания условий *селективного* разделения минералов.

В соответствии с функциональным назначением *ФлР* разделяют на:

- *собиратели* (коллекторы);
- *пенообразователи* (вспениватели);
- *регуляторы* (модификаторы).

По химическому составу *ФлР* бывают органические (главным образом собиратели и пенообразователи) и неорганические (в основном регуляторы). Те и другие могут быть ионогенными (то есть хорошо растворимыми) и неионогенными.

Регуляторы применяются для повышения избирательности закрепления собирателей на поверхности определенных

минералов, увеличения прочности этого закрепления, снижения расхода собирателя и изменения характера пенообразования.

Когда регулятор действует непосредственно на поверхность минерала, способствуя лучшему закреплению на нем собирателя и активируя флотацию, он называется активатором. Например, добавление сульфита натрия сульфидизирует поверхность оксидных минералов цветных металлов и позволяет закрепиться на них молекулам ксантогената. Регулятор, затрудняющий взаимодействие минерала с собирателем, называется подавителем или депрессором. В частности, жидкое стекло предотвращает закрепление мыл на силикатных минералах, подавляя их флотацию; известь и циамиды *подавляют флотацию пирита*.

Кроме активаторов и подавителей имеются реагенты, которые носят название регуляторов. Они придают среде определенную щелочность и кислотность, выступая в качестве регуляторов среды. Регуляторы, разобшающие (пентизирующие) частицы микронных размеров (тонких шламов), например силикат натрия, уменьшая их отрицательное действие на флотацию, называются реагентами-пентизаторами. Они чаще всего, являются неорганическими соединениями, реже используются органические регуляторы (карбоксилметилцеллюлоза и др.).

Действие $\Phi ЛР$ зависит от природного состава поверхности минералов, щелочности и кислотности среды, температуры пульпы (для жирных кислот и их солей) и других факторов.

При флотации применяют определенный ассортимент реагентов и порядок их подачи, что составляет основу флотационного режима. Обычно в пульпу добавляют регулятор(ы), затем собиратель, впоследствии пенообразователь. При этом выдерживается оптимальное время контакта пульпы с каждым реагентом. Расходы $\Phi ЛР$ при флотации невелики и составляют, как правило, от нескольких грамм до единиц килограмм на 1 тонну руды.

1.1.4. Флотационные машины

Флотационные машины (*ФлМ*) служат для разделения взвешенных в жидкости относительно мелких твердых частиц (или выделения из жидкости) по способности прилипать к вводимым в суспензию газовым пузырькам. В *ФлМ* осуществляется аэрация и суспензирование пульпы; селективная минерализация воздушных пузырьков; создание зоны пенного слоя; разделение пенного и камерного продуктов; сгущение флотопульп, формование и сушка концентрата.

Различия в конструкциях *ФлМ*, в основном, определяются способом аэрации пульпы. По этой характеристике *ФлМ* подразделяются на 4 группы: 1) механическая (перемешивание пульпы, засасывание и диспергирование воздуха осуществляется импеллером); 2) пневмомеханическая (воздух подается из воздуходувки, диспергирование и перемешивание пульпы выполняется импеллером); 3) пневматическая – машины первой сепарации; 4) колонные, аэролифтные (перемешивание и аэрация пульпы сжатым воздухом через аэраторы различных конструкций).

Кроме этих типов следует выделить *ФлМ*: 1) вакуумные и компрессионные (аэрация обеспечивается выделением растворенных газов из пульпы); 2) электрофлотационные (аэрация жидкости пузырьками, выделяющимися при электролизе); 3) центробежные и со струйным аэрированием жидкости.

Регулирование параметров *ФлМ* для достижения оптимальных показателей разделения при изменении характеристик сырья осуществляют изменением количества воздуха, подаваемого в камеру, толщины пенного слоя, уровня пульпы, производительности импеллера, площади окна в межкамерной перегородке.

Пневматические машины имеют ряд преимуществ перед механическими и пневмомеханическими: высокая производительность, низкие металло- и энергоемкость, небольшие капитальные затраты. Конструктивные отличия: простота, компактность, отсутствие вращающихся в абразивной среде узлов.

Основное распространение получили *ФлМ* пенной сепарации и колонные. В *колонных* ФлМ исходная пульпа после агитации с реагентами подается в среднюю или верхнюю часть колонны (ниже пенного слоя) и встречается с восходящим потоком воздушных пузырьков, вводимых в нижнюю часть колонны. Объем камер колонных *ФлМ* от 5 до 125 м³. Селективность флотации в колоннах выше вследствие противотока пульпы и воздуха и из-за большего использования процессов вторичной минерализации в пенном слое. Это позволяет получать более высококачественные концентраты, снижать расход депрессоров.

1.1.5. Ультразвуковая интенсификация флотации пирита и халькопирита

Для расширения области применения схем коллективной флотации руд цветных металлов с последующей селекцией поликонцентратов на мономинеральные продукты большое значение приобретает разработка новых методов разрушения реагентных покрытий на поверхности минеральных частиц. Как известно, получение коллективных концентратов в большинстве случаев несложно, в то время как последующее разделение этих концентратов представляет значительные затруднения.

Повышенная устойчивость и плотность адсорбционных слоев реагентов-собирателей, образующихся в процессе коллективной флотации на поверхности различных минералов, нивелируют их флотационные свойства, поэтому перед последующей селекцией необходима деструкция и удаление покрытий собирателей с поверхности минеральных частиц.

Ассортимент применяемых в настоящее время способов разрушения и удаления тех или иных реагентных покрытий с поверхности минералов достаточно ограничен. Следует отметить, что существующие для этого методы не всегда эффективны применительно к отдельным рудам и минеральным комплексам и часто не обеспечивают необходимых технологических

показателей. *Ультразвуковые (УЗ)* колебания обладают рядом преимуществ в интенсификации разрушения реагентных покрытий и поэтому их применение перспективно для деструкции покрытий собирателей с поверхности минеральных частиц.

В гидрометаллургии широко распространено УЗ-излучение в жидкую среду магнитострикционным преобразователем, в котором используются резонансные изгибные колебания диафрагмы, частота которых совпадает с резонансной частотой магнитостриктора [28]. Преобразователи этого типа ПМС-38, например, выгодно отличаются от преобразователей с ненастроенной диафрагмой равномерным распределением амплитуд смещения на поверхности излучения, высокой интенсивностью и отсутствием *ограничения размеров излучающей поверхности*. Они наиболее удобны для УЗ-обработки гидрометаллургических пульп.

Преобразователь типа ПМС-38 работает на частоте 18 *кГц*. Его потребляемая мощность 4 *кВт*, напряжение питания 440 *в*, размеры диафрагмы 226×538 *мм*. Преобразователь выполнен в погружном варианте, но может также встраиваться в дно или стенки гидроемкости *ФЛМ*.

Зависимость флотационного извлечения (в %) халькопирита от времени (в *мин.*) ультразвукового воздействия показана на графике 2 на рис. 1.2.

Из зависимостей, полученных А. Кочемасовой [28], следует, что ультразвук оказывает эффективное влияние на процесс селекции минеральных комплексов. Изучение влияния ультразвука на разделение концентратов пирита и халькопирита [28] показывает, что ультразвуковая обработка пирита в течение 40 *мин* полностью разрушает на его поверхности адсорбционные слои флотореагентов, тогда как на халькопирит за это же время ультразвук практически не оказывает влияния.

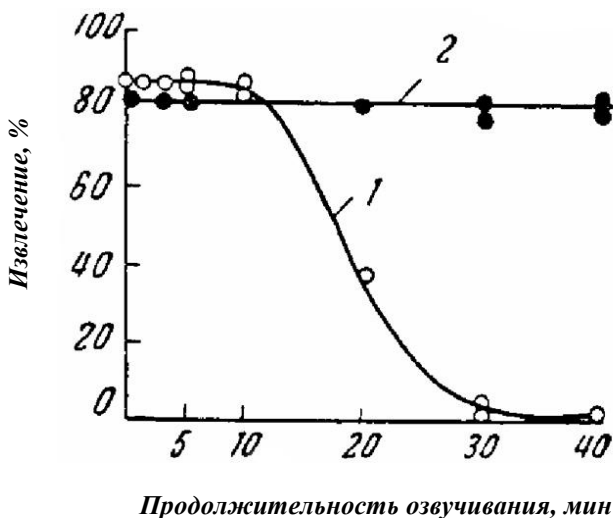


Рис. 1.2. Воздействие ультразвука на флотацию пирита и халькопирита: 1 – пирит; 2 – халькопирит

Воздействие ультразвука на концентраты минералов в водной среде, полученные флотацией, означает, что в результате обработки ультразвуком происходит удаление реагентных покрытий с поверхности минеральных частиц пирита, отчего изменяется гидрофобность поверхности данного минерала, а значит и его флотационные свойства. Это обеспечивает высокую степень селективности во флотации.

1.2. Экстрагирование

Экстрагирование (ЭС) представляет собой извлечение одного или нескольких компонентов из твердых тел с помощью избирательных растворителей-экстрагентов. Экстрагирование подчиняется законам массообмена. Движущая сила процесса – разность между концентрациями растворенного вещества в

жидкости, находящейся в порах твердого тела и в основной массе экстрагента.

Механизм процесса ЭС состоит из:

- проникновения экстрагента в поры твердого материала, растворения целевого компонента;
- перенос экстрагируемого вещества из глубины твердой частицы к поверхности раздела фаз (молекулярная диффузия);
- перенос вещества от поверхности раздела фаз в объем экстрагента (конвективная диффузия).

Скорость экстрагирования определяется движущей силой процесса, суммарным сопротивлением на всех стадиях, соотношением масс экстрагента и жидкости в твердой фазе (гидромодулем). При этом одни и те же факторы могут оказывать на процесс и положительное, и отрицательное действие. Так, при дроблении, увеличивающем поверхность контакта фаз, оптимальная степень измельчения твердого материала лимитируется трудностью разделения фаз после процесса экстрагирования, высокими энергетическими затратами на дробление и ухудшением гидродинамических условий у поверхности раздела фаз.

При увеличении гидромодуля возрастает движущая сила экстрагирования, но одновременно затрудняется и удорожается последующее выделение целевого компонента.

Перемешивание (механическое, с использованием псевдооживления и др.) ускоряет конвективную диффузию, но не влияет на скорость молекулярной диффузии и может уменьшить движущую силу процесса.

Экстрагент должен легко регенерироваться, быть селективным, сравнительно дешевым. Таким требованиям отвечают вода, этанол, бензин, бензол, четыреххлористый углерод CCl_4 , ацетон, растворы кислот, солей и щелочей.

На эффективность экстрагирования влияет способ подготовки сырья (измельчение либо гранулирование), обеспечивающий необходимую форму, размеры и дисперсный состав частиц, а также увлажнение, термохимическая и другие виды

обработки, улучшающие диффузные и механические свойства твердого материала.

Рассматриваемый процесс осуществляется в вышеописанных аппаратах ЭС. Он может проводиться в неподвижном слое твердого материала, движущемся или псевдосжиженном слое.

Экстрагирование из твердого тела применяют:

– для извлечения соединений редких металлов, урана из руд;

– для разложения веществ из пористых продуктов спекания;

– в производствах глинозема (окись алюминия Al_2O_3), двуокиси кремния SiO_2 и других катализаторов;

– для образования пористых структур путем добавления и последующего извлечения растворимого вещества с последующей фиксацией структуры.

1.3. Подземное выщелачивание руд

1.3.1. Схемы подземного выщелачивания

Подземное выщелачивание (*ПВц*) представляет собой способ разработки рудных месторождений избирательным переводом полезного компонента в жидкую фазу в недрах с последующей переработкой металлсодержащих (продукционных) растворов.

Подземное выщелачивание находит все большее применение для добычи руд радиоактивных и цветных металлов: титана, ванадия, марганца, железа, кобальта, никеля, цинка, селена, молибдена, золота и др. Оно позволяет полнее использовать недра за счет вовлечения в производство бедных руд, добыча и переработка которых традиционными способами нерентабельна.

При этом металл извлекается путем ионного обмена в процессе управляемого движения реагента через массив с

естественной проницаемостью предварительно разрушенной различными методами или замагазинированной руды.

Главными условиями успешного применения *ПВиц* являются следующие:

– присутствие полезного компонента в соединениях, растворимых минеральными или органическими кислотами, щелочами, растворами солей;

– достаточная естественная водопроницаемость руд или возможность ее создания искусственным путем, благоприятные горно-технические и гидрогеологические условия, позволяющие осуществить подачу реагента к руде и откачку продукционных растворов;

– возможность эффективного извлечения полезных компонентов из продуктивных растворов.

По режиму движения реагента выделяют три гидродинамические схемы *ПВиц*: фильтрационную, инфильтрационную и пульсационно-статическую (возможны комбинации этих схем в условиях одного добычного блока).

Фильтрационная схема основана на использовании постоянного и периодически функционирующего фильтрационного потока реагента, заполняющего все трещины и открытые поры руд (пустоты в замагазинированной руде), движущегося за счет разности напоров у растворотоподающих (закачных) и раствороприемных (откачных, дренажных) устройств (горных выработок или скважин).

Инфильтрационная схема основана на использовании инфильтрационного потока реагента, движение которого по руде происходит под действием сил гравитации от оросительных устройств к дренажным (когда раствор не заполняет полностью пустоты в руде).

Пульсационно-статическая схема заключается в периодическом затоплении выщелачивающим реагентом руд с естественной и искусственно созданной водопроницаемостью,

камер с замагазинированной рудой, очистных пространств с последующим выпуском продукционных растворов.

Предприятие *ПВиц* состоит из добычного, трубопроводного и перерабатывающего комплексов. Принципиальная технологическая схема цепи аппаратов предприятия не зависит от применяемой системы разработки, под которой понимают согласованную совокупность устройств и выработок, проведенных в определенном порядке во времени и пространстве для управляемого химико-технологического процесса перевода металла из руды в раствор и выдачи продукционного раствора для извлечения металла.

1.3.2. Системы подземного выщелачивания

В зависимости от способа вскрытия залежей выделяют скважинные, шахтные, комбинированные системы *ПВиц*.

Скважинные системы. В этих системах вскрытие, подготовку месторождений и извлечение полезных компонентов в раствор осуществляют через скважины, пробуренные с поверхности. Этими системами разрабатываются месторождения урана, приуроченные к обводненным осадочным породам. Ведутся экспериментальные работы для внедрения их на месторождениях золота, марганца, железа и др. В зависимости от фильтрационных свойств руд различают скважинные системы *ПВиц* металлов из руд с:

– естественной проницаемостью (коэффициент фильтрации $K_{\phi}=0,5-10$ м/сутки);

– искусственной проницаемостью (коэффициент фильтрации $K_{\phi}=0,01-0,5$ м/сутки);

– магазинированием руд ($K_{\phi}<0,01$ м/сутки и $K_{\phi}>10$ м/сутки).

Наибольшее распространение получили скважинные системы *ПВиц* металлов из руд с естественной проницаемостью; разрабатывают месторождения, не требующие предварительной подготовки руд (создание искусственной трещиноватости, проведение гидроразрыва пород и пр.). При этом применяют

площадное (ячеистое) и линейное расположение скважин. Расстояние между скважинами 15–50 м, глубина разработки до 500 м и более.

Процесс выщелачивания осуществляют в основном напорным фильтрационным потоком реагента, движущимся по рудоносному водопроницаемому пласту от закачных скважин к откачным. При этом соблюдают баланс закачиваемых и откачиваемых растворов ($\sum Q_3 = \sum Q_0$). В этом случае система работает в стационарном режиме фильтрации, обеспечивается максимальная локализация зоны циркуляции растворов, минимизация из разубоживания, потерь реагента за счет растекания, исключаются осложнения в работе раствороподъемных устройств.

Выщелачивание металла из несвязных песчаных руд осуществляют при низких гидравлических градиентах ($l < 1$) для того, чтобы исключить суффозию и механическую кольматацию призабойных зон скважин.

Для интенсификации извлечения металлов широко используют реверсирование потока (при этом скважины должны быть конструктивно взаимозаменяемыми). При растворах, обладающих коррозионными свойствами, для обсадки скважин применяют трубы из кислотостойких материалов (например, полиэтилена).

Для месторождений, залегающих в особо сложных горно-технических условиях, скважинные системы *ПВц* являются пока единственно возможными системами рентабельной разработки. Достоинство их в том, что полностью исключается присутствие людей под землей.

Шахтные системы. При использовании шахтных систем *ПВц* вскрытие, подготовку месторождений и извлечение полезных компонентов в раствор осуществляют с помощью горных выработок. В зависимости от фильтрационных свойств выделяют шахтные системы *ПВц* металлов из руд:

1) с естественной проницаемостью (коэффициент фильтрации $K_f = 0,05 - 10$ м/сутки);

- 2) с искусственной проницаемостью ($K_{\phi}=0,005-0,05$ м/сутки);
- 3) замаганизированных ($K_{\phi} < 0,005$ м/сутки и $K_{\phi} > 10$ м/сутки).

Режимы движения выщелачивающего реагента и конструктивное оформление шахтных систем зависят от физико-механических свойств рудоносных и вмещающих пород, мощности и морфологии рудных тел, наличия водоупоров в кровле и почве рудоносных пород и других факторов.

На практике применяют все три вышеотмеченные гидродинамические схемы. Шахтные системы *ПВиц* отличаются большим разнообразием, они позволяют вести управляемый процесс извлечения металлов на месторождениях различных генетических типов из руд с естественной водопроницаемостью и из руд, разрушенных различными методами или отбитых и замаганизированных на месте залегания. Эти системы применяют при разработке глубокозалегающих месторождений, представленных слабопроницаемыми или практически водонепроницаемыми рудами. При этом в производство вовлекаются большие запасы забалансовых руд, разработка которых традиционными способами нерентабельна.

При применении шахтных систем исключается массовое сдвигание руд и вмещающих пород, полностью отсутствует обрушение или оседание дневной поверхности над зонами выработки. Это объясняется тем, что отбойку руд, как правило, ведут в зажатой среде с коэффициентом разрыхления $K_{\text{РАЗ}} = 1,1-1,2$.

Комбинированные системы. Выделяют комбинированные системы двух классов:

- 1) из элементов скважинных и шахтных систем *ПВиц*;
- 2) из элементов традиционных систем разработки и шахтных систем.

Первые предусматривают разработку месторождений с подачей реагента к руде по скважинам, пробуренным с поверхности, и приемом продукционных растворов в горные выработки. Такие системы применяют на месторождениях, где технически трудно или нерационально откачивать продукционные

растворы через скважины (при большой глубине пьезометрического уровня подземных вод, в условиях осушенных пород и пр.). В зависимости от конкретных условий дренажные горные выработки могут быть пройдены по почве выше или ниже рудного пласта.

Системы второго класса применяют при разработке:

– залежей, которые в пределах одного блока представлены рудами разных технологических сортов, например карбонатными и силикатными, требующими при *ПВц* использования различных реагентов;

– пластов руд, контрастных по содержанию металла (балансовыми и забалансовыми);

– пластов руд с контрастными фильтрационными свойствами, требующими разной предварительной горной подготовки к *ПВц*.

Залежи в пределах блока разрабатывают в два этапа: вначале очистная выемка руды одного сорта, затем выщелачивание руды другого сорта. Такая последовательность обеспечивает при очистной выемке нормальные условия труда для горнорабочих и устойчивость рудного массива.

В зависимости от конкретных условий в комбинированных системах могут быть применены все три гидродинамические схемы. Комбинированные системы разработки позволяют полнее использовать недра и снижать себестоимость продукции.

Для интенсификации процесса *ПВц* в зависимости от производственных условий дополнительно применяют различные методы: химические (окислители, поверхностно-активные вещества), бактериальные, физические (электромагнитные поля, повышение напора и температуры растворов, гидроразрыв пород, встряхивающие взрывы, вакуумирование) и их комбинирование.

1.4. Импульсно-фазовые методы контроля

Импульсно-фазовые методы (*ИФМ*) контроля технологических сред [1, 5, 41] первым применил Н. Бражников в 1957 г.

ИФМ подразделяются на:

- 1) компенсационный с акустической задержкой эталонного УЗ-импульса;
- 2) компенсационный с электрической задержкой эталонного УЗ-импульса;
- 3) резонансный;
- 4) совмещения во времени принимаемого импульса с его отражениями.

ИФМ применили для исследования: флотореагентов, электролизных растворов – Н. Бражников [1; 5; 41]; металлов и различных полимеров – Дж. Уильямс, Дж. Лэмб, Н. Бражников, В. Марголин, П. Голубь, И. Перепечко [42–44]; горнообогатительных производств – Н. Бражников, В. Карбачинский, В. Копьев, В. Ямщиков [45–46]; нефти и нефтепродуктов в магистральных трубопроводах и авиагидросистемах – А. Александров, Н. Бражников, А. Полянский, Э. Крылова, В. Сапожников [47–48].

Компенсационный ИФМ с акустической задержкой. Функциональная схема измерителя скорости ультразвуковых колебаний приведена на рис. 1.3, а диаграммы напряжений – на рис. 1.4.

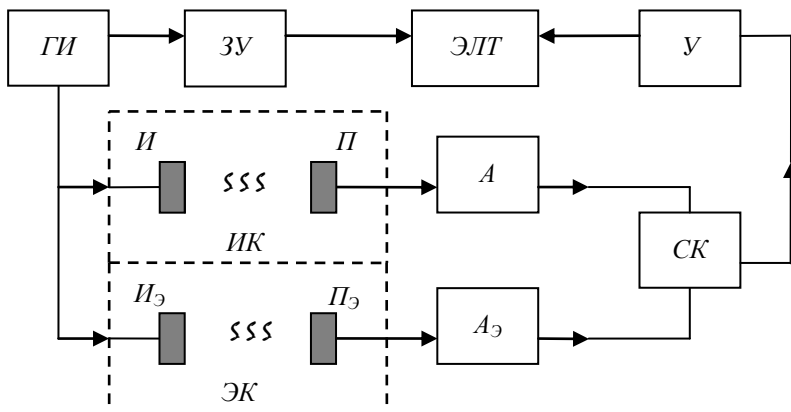


Рис. 1.3. Функциональная схема измерителя скорости ультразвука импульсно-фазовым методом (*ИФМ*) типа УЗИХ с акустической задержкой эталонного импульса

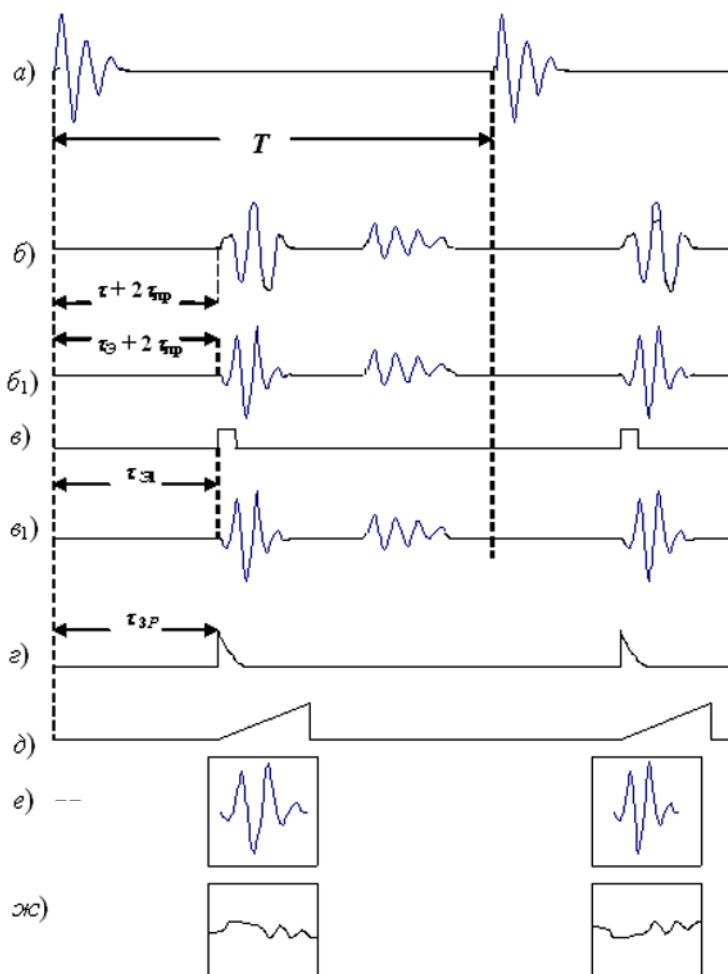


Рис. 1.4. Импульсные диаграммы электрических сигналов блоков измерителя скорости ультразвука ИФМ с акустической (эпюра б1) и электрической (эпюра в) задержкой эталонного импульса при компенсационном (эпюра ж) и резонансном (эпюра е) способах индикации совмещения измерительного и эталонного импульсов

Импульсный генератор $ГИ$ короткими импульсами (рис. 1.4, a) возбуждает излучатели I и I_3 измерительного канала $ИК$ и эталонного канала $ЭК$. Одновременно запускается задерживающее устройство $ЗУ$, выходные импульсы которого (рис. 1.4 $в$ и $г$) запускают развертывающее устройство $РУ$, вырабатывающее пилообразное напряжение задержанной на время $\tau_{зр}$ развертки (рис. 1.4, $д$) в электронно-лучевой трубке $ЭЛТ$.

Период T следования импульсов $ГИ$ выбран таким, чтобы многократные отражения в $ИК$ и $ЭК$ (рис. 1.4 $б$ и $б_1$) закончились к следующему моменту излучения.

Принятые импульсы однократного прохождения с временами $\tau + 2\tau_{пр}$ – на приемнике $П$ $ИК$ и $\tau_{31} = \tau_3 + 2\tau_{пр}$ – на приемнике $П_3$ $ЭК$ выравнивают по амплитудам первого полуцикла их $ВЧ$ заполнения посредством аттенуаторов A и A_3 , и они поступают в смесительный каскад $СК$.

Картина векторного сложения импульсов (рис. 1.4 эюры $б_1$ и $б$) в противофазе и фиксация момента совпадения их во времени (рис. 1.4 $ж$) по минимуму разности амплитуд первого полуцикла наблюдается на $ЭЛТ$, куда с $СК$ через усилитель $У$ подается результирующий импульс.

Выравнивание времен импульсов $П$ и $П_3$ обычно производят изменением акустической базы l_3 в $ЭК$. С учетом симметрии протекторов $ПП$ в $ИК$ и $ЭК$ скорость ультразвука c в контролируемой среде определяется выражением:

$$c = \frac{c_3 l}{l_3 - 2c_3 \tau_k}, \quad (1.1)$$

где $\tau_k = 0$ для и жидких и газообразных сред.

Чувствительность компенсационного $ИФМ$ метода высока, составляя $\leq 0,0001$ мкс на частоте $УЗ$ -колебаний 5 МГц.

Прямой отсчет скорости ультразвука в $м/с$ для жидких и газообразных сред дает согласно [49] способ переменной базы l в $ИК$ при постоянстве акустической базы l_3 в $ЭК$ (или при использовании в нем стабильной электрической задержки). По

этому способу для беспротекторного ИК в режиме приема импульса прямого прохождения (рис. 1.4, б) задержка $\tau_{\text{Э}} = l_{\text{Э}}/c_{\text{Э}}$ в беспротекторном ЭК устанавливается кратной 10^{-n} , где n – целое число. Для ИК в эхо-режиме (когда излучение и последующий прием эхо-сигнала от O в исследуемой среде производится одним и тем же ПП) задержка $\tau_{\text{Э}}$ устанавливается кратной $2 \cdot 10^{-n}$. Измерение базы l в ИК (и, следовательно, скорости ультразвука) обеспечивается микрометрическим устройством в ИК или лазерно-оптическим дальномером.

Компенсационный ИФМ с электрической задержкой. Эталонный канал ЭК (рис. 1.3) по данному методу заменяется на последовательно включенные блоки плавной БПЗ и ступенчатой БЗ электрической задержки. В последнем, задержанный на время $\tau_{\text{Э1}}$ (рис. 1.4, в) короткий импульс запускает вспомогательный генератор колоколообразных импульсов с заполнением УЗ-частоты f (рис. 1.4, в₁), по фронту первого полуцикла, совпадающий с задержанным импульсом. Блок БПЗ имеет калиброванную шкалу регулятора задержки $\tau_{\text{ОЭ}}$ с диапазоном, равным 0–1.1 временной ступени (равной например 2 мкс) в блоке БЗ.

Таким образом, суммарная электрическая задержка

$$\tau_{\text{Э1}} = \tau_{\text{ОЭ}} + \tau_{\text{Э}}, \quad (1.2)$$

где $\tau_{\text{Э}}$ – задержка в БЗ.

После настройки режима взаимной компенсации первого полуцикла импульсов (рис. 1.4 ж) – регулировкой электрической задержки, ведется расчет скорости c УЗ-волны по формуле

$$c = \frac{l}{\tau_{\text{ОЭ}} + \tau_{\text{Э}} - 2\tau_{\text{ПП}} - 2\tau_{\text{К}}}. \quad (1.3)$$

Время прохождения УЗ-импульса через контактный слой толщиной $h_{\text{к}}$ (для твердых КС) рассчитывают по известной скорости $c_{\text{к}}$ ультразвука в контактной жидкости. Погрешность компенсационных ИФМ на частоте 5 МГц для среднего $\tau = 20$ мкс можно снизить до 0,001%.

Резонансный ИФМ. Метод отличается от компенсационного синфазным смешиванием в смесительном каскаде СК импульсов P и P_3 (рис. 1.4 б и б₁). Момент совмещения импульсов при плавной регулировке времени поступления одного из них в СК наблюдают по максимуму огибающей результирующего импульса (рис. 1.4 е). Расчет скорости ультразвука c производят при акустической задержке в эталонном канале ЭК по (1.1) и при электрической задержке в ЭК – по (1.3). Чувствительность данного метода на порядок ниже компенсационного ИФМ. На частоте 5 МГц при среднем $\tau = 50$ мкс погрешность измерений не $> 0,005\%$.

ИФМ совмещения во времени принимаемого импульса с его отражениями. Метод подробно описан в [5; 25; 149].

Генератор ГИ со стабильным периодом T запускается задающим генератором ЗГ и вырабатывает короткие ВЧ-импульсы с несущей частотой f . Импульс ГИ возбуждает ПЭИ акустического измерительного канала ИК. Через время $\tau + 2\tau_{\text{пр}}$ на ПЭ приемника П поступает импульс однократного прохождения, где τ , $\tau_{\text{пр}}$ – время прохождения соответственно через исследуемую среду и протекторы. После отражения от П и затем И через промежуток времени 2τ он снова поступит на П в виде отраженного импульса, но уже в последующем периоде излучения–приема. Так как периоды излучения следуют один за другим с интервалом $T = \text{const.}$, то синфазное совмещение на приемнике П, начиная со 2-го периода, с импульсом однократного прохождения двукратно отраженного импульса предыдущего периода излучения имеет место при регулировании времени распространения $t = 2\ell/c$ в исследуемой среде до величины, равной половине периода T посылки УЗ-импульса. Картина совмещения наблюдается на короткой развертке.

Чувствительность совмещения импульсов зависит от частоты и соотношения амплитуд импульсов, которые определяются затуханием в контролируемой среде и коэффициентами отражения излучателя и приемника. Чем больше частота и коэффициенты отражения и чем меньше затухание, тем чувствительнее данный метод.

1.5. Ультразвуковая велосиметрия углей и нефтепродуктов

1.5.1. Изверженные и осадочные породы

Согласно экспериментальным данным распространение ультразвуковых ($УЗ$) волн в горных породах имеет ряд особенностей. Так скорость c_l продольной ультразвуковой волны в зависимости от давления p в образцах изверженных горных пород – диорите, лабрадоре и сиените, а также в образцах осадочной породы – доломите (рис. 1.5) находятся в диапазоне 3900–6300 м/сек.

В слоистом шифере скорости продольной c_l и c_t волн имеют большее (примерно на 1% для c_l и на 3% для c_t) при распространении параллельно слоистости. Песчаники, взятые на разных глубинах, имеют почти одинаковые плотности, но скорости ультразвука в них резко отличаются, как и модули их упругости.

Для решения различных вопросов при подземных работах в шахтах и рудниках Д. Хьюз, Дж. Кросс [32], Д. Хьюз, Г. Джонс [33], М. Воларович и Е. Баюк [34] исследовали $УЗ$ -методом зависимость упругих свойств горных пород от давления.

При изменении давления от атмосферного до 500 кг/см^2 скорость c_l продольной волны, как видно из рис. 1.5, резко возрастает, а при дальнейшем повышении давления ($> 500 \text{ кг/см}^2$) наблюдается замедление ее роста.

Наибольший рост скорости ультразвука от приложенного давления имеет место у образцов сиенита; оно составляет $\sim 0,04\%$ на 1 кг/см^2 приложенного давления p . Для доломита эта величина составляет $0,015\%$, т.е. почти в 2,7 раза ниже.

При проведении исследований М. Воларович и Е. Баюк не измеряли скорость c_t поперечных волн. Расчет показывает, что для доломита относительное изменение скорости c_t поперечной волны на 1 кг/см^2 приложенного давления p составляет ту же величину, что и для продольной волны.

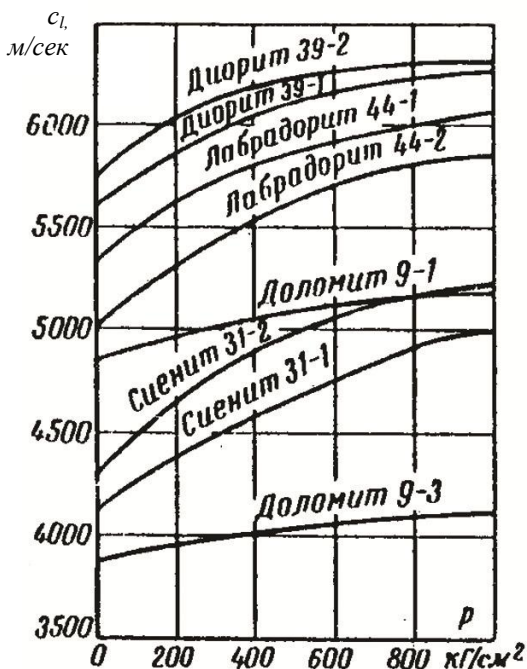


Рис. 1.5. Зависимость скорости c_1 продольной V_3 -волны от давления p в образцах изверженных горных пород и в доломите

1.5.2. Ископаемые угли

Для изучения внутреннего строения углей, знание которого необходимо при проведении геологоразведки, а также для исследования процессов, происходящих при технологической переработке углей, широко применяется ультразвуковой метод.

Как известно, каменные угли в зависимости от природного метаморфизма подразделяют на три группы: 1) низкометаморфизованные: газовые и длиннопламенные сорта; 2) среднеметаморфизованные: коксовые, паровично-жирные и паровично-спекающиеся сорта; 3) высокометаморфизованные: антрациты и тощие сорта.

Замыкает эти группы по степени метаморфизма графит органического происхождения.

Исследования распространения ультразвука в большом количестве ископаемых углей различных месторождений России и стран СНГ провели А. Матвеев и Е. Мартынов [35].

Усредненные значения скоростей c_{\parallel} продольных волн по их данным приведены в табл. 1.1, из которой видно, что скорость c_{\parallel} вдоль слоистости всегда выше скорости c_{\perp} перпендикулярно слоистости. Это означает, что каменный уголь, как и ряд других горных пород, обладает упругой анизотропией. Причем в сравнении, например с шифером, в угле это явление более выражено.

Исследования скорости ультразвука в зависимости от степени метаморфизма и минерало-органического состава углей выполнено в работах [36–38].

Таблица 1.1

Скорости продольной U_3 -волны, распространяющейся параллельно слоистости c_{\parallel} и перпендикулярно c_{\perp} ей, в углях некоторых месторождений России и стран СНГ

Марки угля	Месторождение	c_{\parallel} , м/с	c_{\perp} , м/с
Газовый	Донбасс	1780	–
	Львовско-Волынский бассейн	1910	1380
	Среднее	1870	1380
	Донбасс	2000	1230
Длиннопламенный	Кизеловский бассейн	2630	2410
Коксовый	Донбасс	1540	1500
Первично-жирный	Донбасс	1290	1090
Антрацит	Донбасс	2520	2150
Бурый	Подмосковный бассейн	1540	–
Лигнит	Ангрен, Ср. Азия	2020	1770
Сапропелит	Иркутский бассейн,		
	Черемхово	2710	1780
Кукерсит	Эстония	2190	1450

1.5.3. Нефть и нефтепродукты

Скорость ультразвука c в природной нефти некоторых отечественных месторождений исследовалась в СКБ ЦМА Н. Бражниковым [1; 5] и в институте Гипровостокнефть В. Астраханкиным, Н. Назаровым и Г. Герченко [39]. Результаты измерений скорости ультразвука c для температуры $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены в табл. 1.2.

В нефтях, исследованных в СКБ ЦМА, использовалась прецизионная установка типа УЗИХ, выполненная по методу и схеме [1], описанных выше в п. 1.4 данной главы.

Таблица 1.2

Скорость ультразвука и ее температурный коэффициент в нефти российских месторождений

Месторождение, тип	$c, \text{ м/с}$	$b, \text{ м}(\text{ }^{\circ}\text{C})^{-1}$	Исследователи
Девонское (проба 1)	1334,8	-3,97	[1; 5]
Дмитриевское	1347	-3,00	[39]
Мухановское	1365	-3,07	[39]
Мухановское (проба 1)	1352,1	-3,94	[1; 5]
Мухановское (проба 2)	1356,6	-3,96	[1; 5]
Капотневское (проба 1)	1373,2	-4,09	[1; 5]
Капотневское (проба 2)	1379,7	-3,88	[1; 5]
Хилковское	1359	-3,05	[39]
Чубовское	1368	-2,9	[39]
Восточно-Черковское	1352	-3,1	[39]

Исследованная на УЗИХ нефть имеет разницу в температурных коэффициентах, что объясняется существенным изменением состава нефти.

Ряд топливных нефтепродуктов исследовался в СКБ ЦМА [1; 5] и в ЦКБ УВУ [40]. Экспериментальные данные этих исследований приведены в табл. 1.3. Скорость ультразвука изменяется в топливных нефтепродуктах от 1081,4 до 1367,6 м/с, а температурный коэффициент b – незначительно от -3,90

до $-4,15 \text{ м(с } ^\circ\text{C)}^{-1}$. Видно четкое разграничение разных типов нефтепродуктов по скорости ультразвука; минимальное значение скорости имеют легкие сорта топлива (бензины А-66, А-72, А-76), максимальное – тяжелые сорта (дизельное топливо «Летнее», «Зимнее»).

Таблица 1.3

Скорость ультразвука и ее температурный коэффициент
в нефти российских месторождений

Месторождение, тип	t , $^\circ\text{C}$	c , м/с	b , $\text{м(с } ^\circ\text{C)}^{-1}$	Исследо ватели
Автотопливо ТС-61	19,0	1274	–	[40]
Автобензин А-72	19,6	1158	–	[40]
Автобензин А-76	20,0	1162,7	-4,14	[5]
Автобензин А-66	20,0	1081,4	-4,00	[5]
Бензин А-76 (этилированный)	19,6	1162	–	[40]
Дизельное «Л»	18,8	1364	–	[40]
Дизельное «Летнее» (проба 97)	20,0	1357,1	-4,15	[5]
Дизельное «Летнее» (проба 540)	20,0	1367,6	-3,90	[5]
Дизельное «Зимнее» (проба 108)	20,0	1331,5	-3,91	[5]

Библиографический список к главе 1

1. **Бражников, Н.И.** Установка для прецизионного измерения УЗ-характеристик жидких и твердых тел / Н.И. Бражников // Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. – М.: ЦИНТИЭП, 1960. – С. 28–37.
2. **Трелин, Ю.С.** Измерение скорости ультразвука в расплавленных щелочных металлах / Ю.С. Трелин, И.Н. Васильев, В.В. Рошупкин // Атомная энергия. – 1960. – Т. 9. – № 5. – С. 410–411.
3. **Воронов, Ф.Ф.** Аппаратура высокого давления для ультразвуковых исследований до 10 кат / Ф.Ф. Воронов, Л.Ф. Верещагин // Приборы и техника эксперимента. – 1960. – № 6. – С. 104–106.
4. **Астраханкин, В.А.** К вопросу об измерении скорости распространения ультразвука в нефти Поволжья / В.А. Астраханкин, Н.Н. Назаров, Г.В. Герченко // Применение ультраакустики к исследованию веществ. – М.: МОПИ. – 1961. – Вып. 14. – С. 77–80.

5. **Бражников, Н.И.** УЗ-методы / Н.И. Бражников. – М.: Энергия, 1965.
6. **Бражников, Н.И.** Исследование преломления и отражения акустической волны на границе твердых сред в приборах автоматического контроля параметров жидких продуктов / Н.И. Бражников // Тр. ВНИКИ ЦМА, М.: 1978. – Вып. 1 (13). – С. 88–101.
7. **Крылова, Э.Д.** Методы и средства экспресс-контроля расходов жидкостей / Э.Д. Крылова и др. // Авиационная промышленность. – 1970. – № 5.
8. **Меркулов, Л.Г.** Методика экспресс-анализа свойств образцов малых размеров / Л.Г. Меркулов, В.А. Третьяков // Вопросы методики и техники ультразвуковой спектроскопии. – Каунас, 1973. – С. 75–78.
9. **Ботаки, А.А.** Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. / А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Шарко. – М., 1983.
10. **Крылович, В.И.** Ультразвуковые частотно-фазовые методы исследования и неразрушающего контроля / В.И. Крылович; под ред. А.Г. Шашкова. – Минск : Наука и техника, 1985.
11. **Иванушкин, Е.С.** Оценка механических свойств высокопрочного чугуна в отливках ультразвуковым методом / Е.С. Иванушкин // Литейное производство. – 1988. – № 8. – С. 11–12.
12. **Бражников, Н.И.** Способ ввода волны в расходомере с жидкостным звукопроводом / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 151053. – БИ.– 1962. – № 2.
13. **Биргер, Г.И.** Ультразвуковые расходомеры / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников. М. : Металлургия, 1964.
14. **Бражников, Н.И.** УЗ-способ Н.И. Бражникова измерения толщины материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 308607. – БИ.– 1978. – № 37.
15. **Бражников, Н.И.** Способ Н.И. Бражникова контроля физических параметров жидкостей. / Н.И. Бражников. // Авт. св-во № 425098 от 18.05.1970. – БИ.–1974. – № 15.
16. **Бражников, Н.И.** Способ УЗ-дискретной сигнализации уровня сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 333410 от 14.04.1970. – БИ.– 1972. – № 11.
17. **Alexandrov, A.M.** Appareochio ultrasoniko per la misurazione dello spessore di oggetti con pareti sottili /A.M. Alexandrov // Ital. Pat. № 904394. – 1970.
18. **Бражников, Н.И.** Устройство для автоматического контроля массотеплопереноса жидких сред / Н.И. Бражников [и др.] // Авт. св-во № 493720. – БИ.– 1975. – № 44.
19. **Brazhnikov, N.I.** Method and apparatus for controlling pressure in pipelines / N.I. Brazhnikov, E.D. Krylova // USA Pat. 3977232. – Int.Cl. G01E 11/00. – 1976.

20. **Бражников, Н.И.** Бесконтактный УЗ-уровнемер Н.И. Бражникова / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 418737. – БИ. – 1974. – № 9.
21. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1976.
22. **Brazhnikov, N.I.** Method for checking of sheet materials by using acoustic oscillation / N.I. Brazhnikov // USA Pat. № 4117732. – 1976.
23. **Бражников Н.И.** Датчик регулятора толщины в фольгопрокатном стане / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 639179. – БИ. – 1978. – № 47.
24. **Белевитин, В.А.** Ультразвуковой бесконтактный контроль поверхностной плотности фольги способом Н.И. Бражникова / В.А. Белевитин [и др.] // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 10. – С. 35–37.
25. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин, А.И. Бражников – М.: Теплотехник, 2008. – 256 с.
26. **Стригин, И.А.** Основы металлургии. Т. 6. / И.А. Стригин [и др.] // Средства и системы управления в металлургии. – М.: Металлургия, 1973.
27. **Лисенко, В.Г.** Оборудование промышленных предприятий. Том 1. / В.Г. Лисенко [и др.]. – М., Теплотехник. 2008.
28. **Агранат, Б.А.** Ультразвук в гидрометаллургии / Б.А. Агранат. – М.: Металлургия, 1969.
29. Разработка системы управления ректификацией хлоридов *Nb* и *Ta* / Отчет НИР А-132. – М. : Гиредмет, 1975.
30. Разработка принципов построения систем контроля и управления процессом жидкостной экстракции с применением средств вычислительной техники. Отчет НИР А-138. – М. : Гиредмет, 1976.
31. **Тарелкин А.К.** Исследование зависимости скорости ультразвука от концентрации и температуры растворов нитратов лантаноидов / А.К. Тарелкин // Цветные металлы. – 1976. – № 2. – С. 58–60.
32. **Hughes, D.S.** Elastic wave velocities in rocks at high pressures and temperatures. / D.S. Hughes, J.H. Cross. – Geophysics. – 1951. – V. 16. – P. 577.
33. **Hughes, D.S.** Elastic wave velocities in sedimentary rocks / D.S. Hughes, H.J. Jones. – Trans. Amer. Geophys. Union. – 1951. – V. 32. – P. 173.
34. **Воларович, М.И.** Исследование упругих свойств образцов горных пород при всесторонних давлениях до 1000 кг/см^2 / М.И. Воларович, Е.И. Баюк // Применение ультразвуки к исследованию вещества: сб. ст. – М.: МОПИ, 1960.– Вып. 11. – С. 147–154.
35. **Матвеев, А.К.** Скорость распространения продольных УЗ-волн в ископаемых углях / А.К. Матвеев и др. // Применение ультразвуки к исследованию вещества: сб. ст. – М.: МОПИ, 1958. – Вып. 7. – С. 135–141.
36. **Матвеев, А.К.** Акустическая анизотропия ископаемых углей на различных стадиях метаморфизма / А.К. Матвеев, Е.Г. Мартынов // Применение ультразвуки к исследованию вещества: сб. ст. – М.: МОПИ, 1960. – Вып. 10. – С. 147–156.

37. **Матвеев, А.К.** Распространение ультразвука в углях и осадочных породах / А.К. Матвеев, Е.Г. Мартынов // Применение ультразвука к исследованию вещества: сб. ст. – М.: МОПИ, 1961. – Вып. 14. – С. 11–19.
38. **Матвеев, А.К.** Применение УЗ-метода для исследования свойств и строения ископаемых углей различных типов метаморфизма / А.К. Матвеев, Е.Г. Мартынов // Применение ультразвука к исследованию вещества: сб. ст. – М.: МОПИ, 1961. – Вып. 12. – С. 97–111.
39. **Астраханкин, В.А.** К вопросу об измерении УЗ-скорости в нефти Поволжья / В.А. Астраханкин и др. // Применение ультразвука к исследованию вещества: сб. ст. – М.: МОПИ, 1961. – Вып. 14. – С. 77.
40. **Бабилов, О.И.** Ультразвуковой контроль физико-химических процессов / О.И. Бабилов. – Л.: ЛДНП, 1962.
41. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой концентратомер цинкового электролита / Н.И. Бражников // Отчет НИР 681-11-1. – М.: СКБ ЦМА, 1959.
42. **Williams, J.** On the measurement of ultrasonic velocity in solids. / J. Williams, J. Lamb // Journ. Acoust. Soc. Amer. – 1958. – V. 30. – № 4. – P. 308.
43. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковые характеристики материалов звукопроводов / Н.И. Бражников, В.С. Марголин // Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. – М.: ЦИНТИЭП. – 1960. – С. 38–45.
44. **Голубь, П.Д.** Установка для измерения скорости ультразвука в твердых телах в интервале температур 210–290°K / П.Д. Голубь, И.И. Перепечко // Вопросы ультразвуковой спектроскопии. – Каунас, 1973. – С. 49.
45. **Бражников, Н.И.** Импульсно-фазовый метод непосредственного отсчета скорости ультразвука в жидкостях / Н.И. Бражников [и др.] // Аннот. докл. 14 научно-техн. и метод. конф. – Таганрог: ТРТИ, 1968. – С. 57.
46. **Бражников, Н.И.** Импульсно-фазовый метод отсчета скорости звука в жидкостях / Н.И. Бражников [и др.]. // Прикладная акустика. – Таганрог: ТРТИ. – 1970. – Вып. 21. – С. 165–172.
47. **Александров, А.М.** Акустические характеристики нефтей и нефтепродуктов. / А.М. Александров, Н.И. Бражников, А.А. Полянский. // Транспорт и хранение нефтепродуктов. ЦНИИ Нефтехим. – 1969. – Вып. 9. – С. 20.
48. **Крылова, Э.Д.** Методы и средства экспресс-контроля расходов жидкостей / Э.Д. Крылова, Н.И. Бражников, В.М. Сапожников // Авиационная промышленность. Приложение № 5. 1970.
49. **Бражников, Н.И.** Способ измерения скорости ультразвука в жидкостях и газах / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 243975. – БИ.– 1969. – № 17.

Глава 2

КОНТАКТНЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СВОЙСТВ СРЕД. КОНТРОЛЬ КОНЦЕНТРАЦИИ В ЭКСТРАКЦИИ САМАРИЯ И ГАДОЛИНИЯ

Широкое применение в отраслях промышленности имеет основанный на использовании контактных акустических преобразователей свойств (АПС) сред ультразвуковой контроль: качества, несплошностей [1–20], размеров металлопродукции [13; 21–39], концентрации жидких сред [21; 40–60] и пр.

2.1. Контактные АПС твердых сред

2.1.1. Основные особенности преобразователей

Основные конструкционные особенности модификаций контактных акустических преобразователей [40; 61] твердых сред: вид поверхности контролируемой среды (КС), материал звукопровода (ЗП), число границ раздела сред и преломлений между КС и пьезоэлементом (ПЭ) сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Модификации контактных АПС твердых сред

Тип АПС Вид волны		Без преломления <i>l, t</i>					С преломлением					
							<i>l, t</i>		<i>s</i>		<i>n</i>	
Модификации АПС		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Поверх- ность КС	Плоская	+	+	-	-	-	+	-	+	-	+	-
	Цилиндрич.	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+
Наличие протекторов		-	+	-	+	-	-	-	-	-		
Внешний ЗП	Твердый	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
	Жидкий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Число границ раздела сред между КС и ПЭ		1	2	1	2	2	2	2	1	1	1	1
Число преломлений между КС и ПЭ		-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1

Знаком «+» или «-» в таблице 2.1 отмечено соответственно наличие или отсутствие данной особенности.

2.1.2. Преобразователи без преломления волны и с ним

АПС сред без УЗ-преломления. Схематично вид центрального луча УЗ-волны от пьезоэлектрического излучателя (ПЭИ) к пьезоэлектрическому приемнику (ПЭП) в АПС технологических сред без преломления (модификации 3 и 4) при углах распространения продольной l и поперечной t волн:

$$\theta_{lt} = \theta_{lt} = 0 \quad (2.1)$$

приведен на рис. 2.1, а.

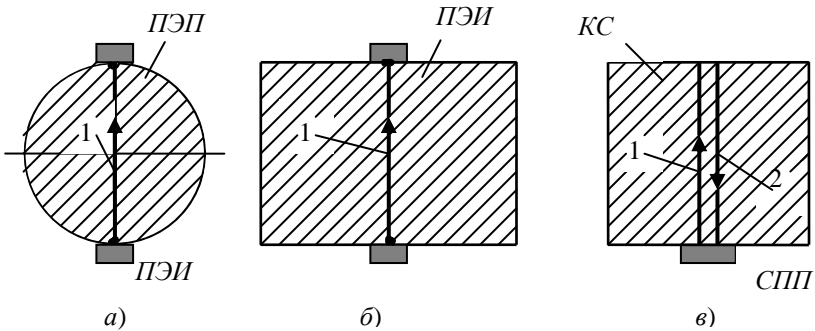


Рис. 2.1. Контактные акустические преобразователи свойств (АПС) твердых сред без преломления

На рис. 2.1, б показан ход УЗ-луча в АПС твердых сред без преломления через плоскую поверхность КС (модификации 1, 2). Как видно из рассмотренных АПС технологических сред УЗ-луч на границах раздела сред не претерпевает преломления.

Использование совмещенного (модификации 1, 2) пьезопреобразователя (СПП) показано на рис. 2.1, в. Он выполняет как функции излучения УЗ-волны 1, так и приема ее отражения 2 в АПС КС.

АПС сред с УЗ-преломлением. Ход ультразвукового луча для цилиндрической твердой КС в преобразователе с преломлением (модификации 6, 7) показан на рис. 2.2, а и б.

Центральный УЗ-луч волны, поступившей от ПЭИ, во внешний ЗП1 входит без преломления. На границе ЗП1 с контролируемой средой излученная волна преломляется, трансформируясь в волну 1. На противоположной границе твердых сред КС-ЗП2 волна 1 испытывает преломление, трансформируясь в ЗП2 в волну 2, идентичную излученной. Трансформированная волна 2 распространяется в ЗП2 к ПЭП по нормали к его приемной поверхности. В случае плоской твердой КС (модификация б) характер распространения УЗ-луча аналогичен ходу луча на рис. 2.2, б.

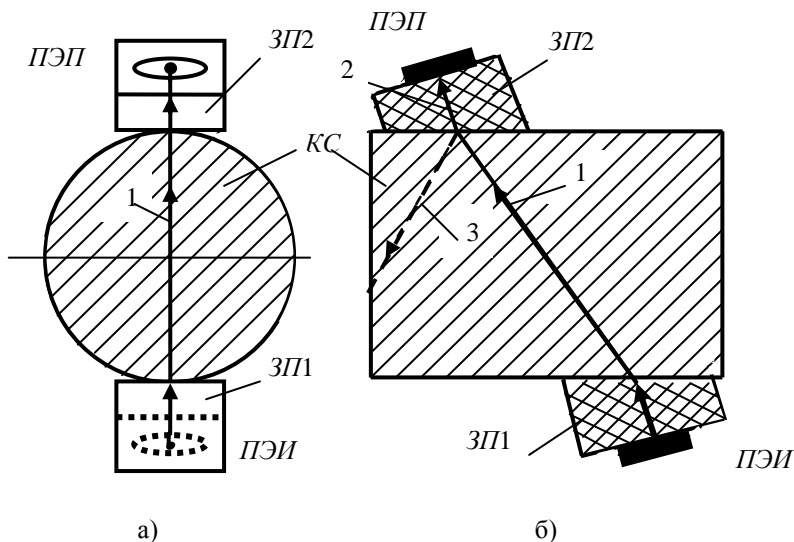


Рис. 2.2. Контактные акустические преобразователи свойств твердых тел с преломлением объемной волны 2

Отраженная волна 3 в АПС сред с преломлением на ПЭП не поступает. Это существенно снижает реверберационный фон в акустическом тракте систем контроля твердых сред с использованием непрерывных и пакетных УЗ-колебаний.

В качестве материала для $ЗП1$ и $ЗП2$ обычно применяют полистирол или оргстекло. В случае $ПЭП$ и $ПЭИ$ поперечных УЗ-колебаний материалом $ЗП$ служат как пластмассы, так и металлы или кварцевое стекло.

2.1.3. АПС сред на основе волн Дж. Рэлея и Г. Лэмба

Схемы контактных АПС твердых сред, выполненных на основе *поверхностной s* волны Дж. Рэлея и слабозатухающих *нормальных n* волнах Г. Лэмба [21], приведены на рис. 2.3.

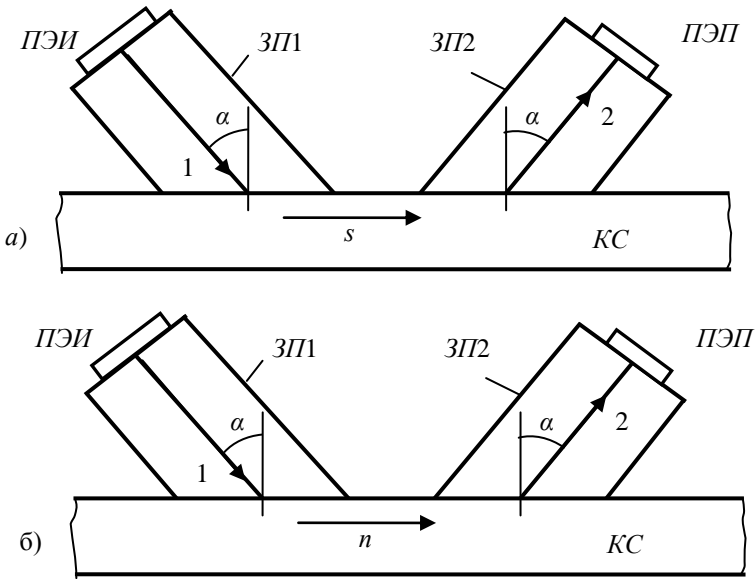


Рис. 2.3. Схемы контактных АПС твердых КС:
 а) на основе поверхностной s волны Дж. Рэлея; б) на основе одной из мод слабозатухающей нормальной n волны Г. Лэмба

Угол α ввода УЗ-волны 1 в КС должен быть таким, чтобы скорость следа этой волны равнялась скорости c_s поверхностной волны:

$$\alpha = \arcsin (c_l/c_s), \quad (2.2)$$

где c_l – скорость объемной продольной УЗ-волны в наклонных звукопроводах ЗП1 и ЗП2.

В АПС сред, выполненных на основе на одной из мод (первой антисимметричной, например) слабозатухающей *нормальной* волны Г. Лэмба (модификации 10, 11 в табл. 2.1), распространение УЗ-колебаний (рис. 2.3, б) аналогично схеме на рис. 2.3, а. Оно отличается лишь трансформацией падающей на КС волны не в поверхностную s , а нормальную n , которая распространяется *во всем объеме твердого слоя* КС параллельно его поверхностям в недеформированной зоне 3 между звукопроводами ЗП1 и ЗП2.

Информативными параметрами в преобразователях рассмотренного типа, выполненных на основе поверхностной волны s Дж. Рэлея или слабозатухающей нормальной n волны Г. Лэмба являются, в основном, амплитуда давления принимаемой волны 2, которая зависит от структуры КС, ее площади и структуры.

Другими, часто применяемыми на практике информативными параметрами, являются фаза принятых УЗ-колебаний и время распространения УЗ-импульса.

2.2. Контактные АПС жидкостей и газов

2.2.1. Конструктивные особенности преобразователей

Модификации различных по конструктивным особенностям контактных преобразователей для жидкостей и газов приведены в таблице 2.2.

Символами l и t обозначены соответственно продольная и поперечная волны, символами s и n – соответственно поверхностная и нормальная волны.

Таблица 2.2

Модификации контактных АПС твердых сред

Тип АПС Вид волны		Без преломления				С преломлением						
		l, t				l, t		s		n		
Модификации АПС		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Поверхность КС	Плоская	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-
	Цилиндрич.	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+
Протекторы		-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+
Внешний ЗП	Твердый	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	-
	Жидкий	-	-	-	-	-	+	+	-	+	-	+
Промежуточный ЗП	Стенка	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Мембрана	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-
	Волновод	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Число границ раздела сред между КС и ПЭ		1	2	1	2	2	3	4	2	3	2	4
Число преломлений между КС и ПЭ		-	-	-	-	1	2	2	1	1	2	2

Наличие или отсутствие той или иной их конструктивной особенности здесь, как и в таблице 2.1 предыдущего параграфа, отмечены знаком “+” или “-”.

2.2.2. Преобразователи без преломления волны

Три схематических варианта акустических измерительных преобразователей *без преломления* продольной l УЗ-волны 1 приведены на рис. 2.4.

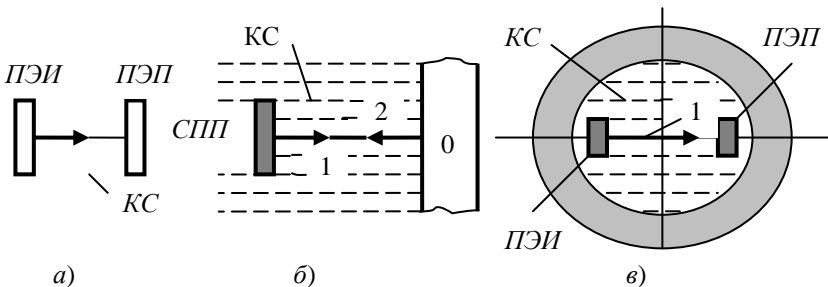


Рис. 2.4. Контактные преобразователи без преломления волны для жидких и газообразных сред

Схема на рис. 2.4, *а* (модификации 1–4) соответствует построению АПС жидкостей и газов с применением продольной l волны 1 для лабораторных УЗ-исследований и экспресс-анализа технологических жидкостей и газов. Такая схема используется также для измерительных акустических преобразователей погружного типа в непрерывном УЗ-контроле свойств технологических сред. Приведенные на рис. 2.4, *б* схемы измерительных акустических преобразователей являются эхо-локационными вариантами предыдущего АПС жидкостей и газов. Здесь 0 – отражатель, 2 – отраженная волна, СПП – совмещенный пьезопреобразователь. Схема на рис. 2.4, *в* (модификация 10) соответствует АПС сред для непрерывного УЗ-контроля жидкостей в закрытых трубопроводах.

Две типичные схемы измерительных АПС жидких и газообразных сред с преломлением волны приведены на рис. 2.5.

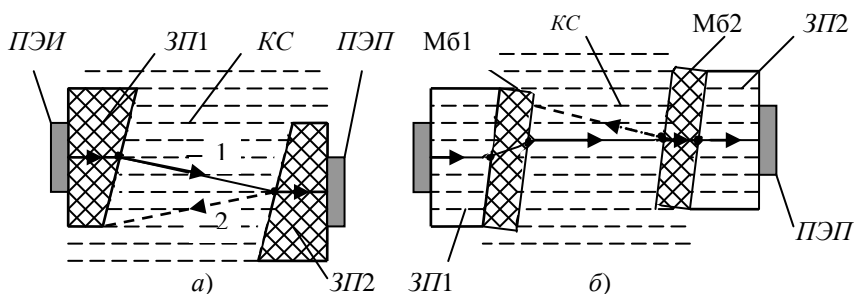


Рис. 2.5. Контактные преобразователи с преломлением объемных волн для жидких сред: ЗП1, ЗП2 – твердые звукопроводы (ЗП) в схеме *а*) и жидкостные ЗП в схеме *б*); Мб1, Мб2 – промежуточные ЗП (мембраны)

Распространение центрального луча УЗ-волны 1 в акустическом измерительном преобразователе с преломлением для жидкостей и газов (рис. 2.5, *а*, модификация 12) аналогично вышеописанному распространению луча в акустическом преобразователе для твердых сред (рис. 2.2, *б*).

Такой вариант, в частности, применяется в *эталонном* акустическом преобразователе в комплекте с акустическим бесконтактным *измерительным* преобразователем с преломлением УЗ-волны. Для этих целей применяется также модификация 7 контактного АПС твердых КС (рис. 2.2, а) с внешними звукопроводами ЗП1 и ЗП2.

2.2.3. Поверхностно- и нормально-волновые АПС сред

Поверхностно-волновой АПС сред. Контактный преобразователь свойств гидрометаллургических жидкостей погружного типа (модификации 8, 9 в табл. 2.2), разработанный на основе поверхностной рэлеевской волны s в Ассоциации АСК [21] приведен на рис. 2.6.

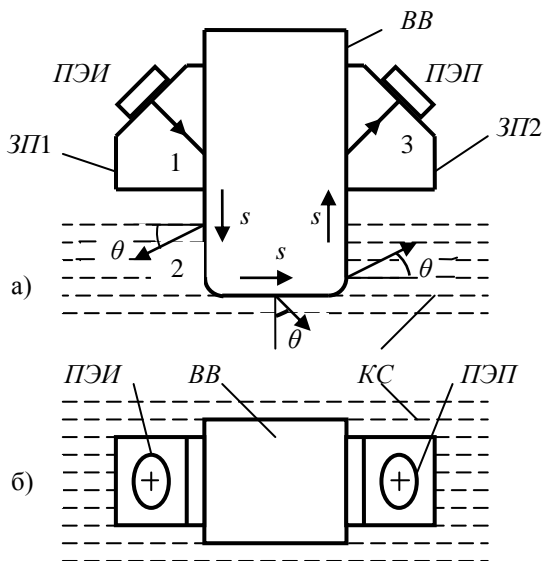


Рис. 2.6. Контактный АПС жидких сред на основе поверхностной волны

Принцип действия измерительного акустического преобразователя заключается в следующем. Объемная волна 1 УЗ-колебаний, излученная ПЭИ в ЗП1 на границе ЗП1–твердотельный волновод ВВ трансформируется в поверхностную волну s Дж. Рэлея. Волна s распространяется по внешней стороне ВВ, огибая его торец, погруженный в контролируемую среду (жидкость) КС.

При соприкосновении ВВ с КС энергия поверхностной УЗ-волны частично переходит (на всем пути ее распространения в контакте с ВВ) в жидкость в виде продольной волны 2 под углом θ , определяемым выражением:

$$\theta = \arcsin (c_{КС} / c_s), \quad (2.3)$$

где $c_{КС}$, c_s – скорости распространения, соответственно, продольной волны в КС и поверхностной в приповерхностном слое ВВ.

Ослабленная по амплитуде УЗ-давления поверхностная волна s , достигнув приемного звукопровода ЗП2, трансформируется в нем в волну 3, аналогичную излученной волне 1. Волна 3 поступает в ПЭП (по нормали к его приемной поверхности) и преобразуется в информативный электрический сигнал ЭС.

Нормально-волновой АПС сред. Схема контактного АПС жидкостей погружного типа (модификации 10, 11 в табл. 2.2), разработанного на основе одной из мод односторонне демпфированной нормальной волны Н. Бражникова, дана на рис. 2.7.

В АПС жидкостей используется загерметизированный крышкой 6 трубчатый тонкостенный ВВ (рис. 2.7) с фокусированием УЗ-колебаний, поступающих из ЗП1 в ВВ под углом относительно нормали к его внешней поверхности. В фокусирующем ЗП1 излученная волна 1 после отражения от его конусной поверхности в виде волны 2 падает на внешнюю цилиндрическую поверхность трубчатого ВВ (волны 1 и 2 могут быть и продольными, и поперечными).

Волна 2 в стенке BB трансформируется в нормальную волну n , частично отходящую в жидкостную KC в виде продольной УЗ-волны 3 под углом θ , определяемым выражением:

$$\theta = \arcsin (c_{KC} / c_n), \quad (2.4)$$

где c_n – скорость распространения нормальной волны Н. Браунникова в стенке трубчатого твердого BB , внешне частично демпфируемой жидкостной KC .

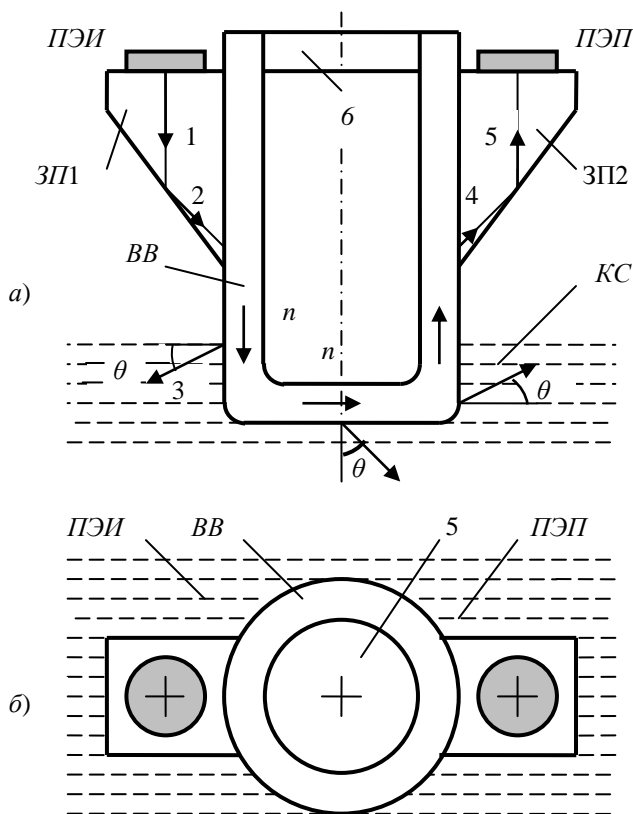


Рис. 2.7. Контактный АПС жидких сред на основе нормальной волны Н. Браунникова

При распространении в стенке соприкасающегося с жидкостной $KС$ $ВВ$ волна n , вследствие оттока $УЗ$ -энергии из $ВВ$ в $KС$, претерпевает значительное амплитудное ослабление и изменение фазы $УЗ$ -колебаний. Достигнув $ЗП2$, нормальная волна n трансформируется в объемную $УЗ$ -волну 4, падающую на конусную поверхность $ЗП2$. После отражения от этой поверхности, волна 5 (аналогичная излученной объемной $УЗ$ -волне 1) поступает в $ПЭП$, вырабатывающий информативный электрический сигнал, несущий информацию о жидкостной $KС$.

2.3. Ультразвуковая реверберация в АПС жидкостей и твердых сред

Объектом ультразвуковых измерений в исследованиях физических свойств вещества обычно является контролируемая среда $KС$ с ограниченным объемом. Линейные размеры «озвучиваемого» пространства $KС$ обычно лишь на два порядка превышают длину ультразвуковой волны.

Данные особенности объекта исследований предъявляют вполне определенные требования к конструированию измерительного акустического преобразователя свойств ($АПС$) сред разрабатываемой системы $УЗ$ -контроля.

Обобщенная схема АПС сред. Схема акустического тракта в акустическом преобразователе сред контролируемых сред приведена на рис. 2.8. Акустический тракт включает в себя: пьезоэлектрические излучатель ($ПЭИ$) и приемник ($ПЭП$), акустически связанные с ними звукопроводы ($ЗП$), стенки ($Ст$) резервуара или магистрального трубопровода (отсутствуют при контроле твердых сред) и контролируемую среду $KС$.

Общие требования, предъявляемые к разрабатываемому $АПС$ контролируемых сред, определяются методом исследования (контроля), видом $KС$ и способом регистрации в конструируемой системе автоматического $УЗ$ -контроля технологических сред.

Способ регистрации зависит от назначения всей УЗ-системы или устройства – для лабораторных, лабораторно-промышленных исследований или для промышленного контроля в системах автоматики.

При исследованиях и УЗ-контроле, основанных на методах измерения *затухания* УЗ-волны с использованием отраженных сигналов, для расширения диапазона измерений затухания волн в КС применяют меры по:

- уменьшению отражаемости волны от ПЭИ и ПЭП;
- одновременному ослаблению влияния отражающих свойств промежуточных сред преобразователя.

Для методов УЗ-контроля, основанных на измерении затухания без использования отраженных сигналов также принимаются меры по ослаблению отражаемости УЗ-волны от ПЭИ, ПЭП и от границ раздела других сред преобразователя (рис. 2.8).

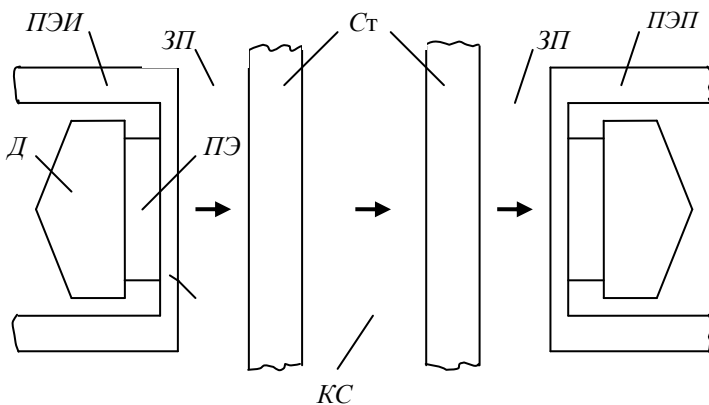


Рис. 2.8. Обобщенная схема АПС сред

В число технологических требований входит механическая, тепловая и химическая стойкость всей конструкции преобразователя в целом и отдельных его элементов, в частности пьезо-

элемента (*ПЭ*). В ряде производств особо ставится задача обеспечения взрывобезопасности конструкций преобразователя. Для промышленных условий в большинстве случаев выдвигается требование бесконтактности измерений.

Основным акустическим требованием при фазовой *УЗ*-контроле физических свойств различных сред по скорости распространения ультразвука (*велосиметрии*) и *УЗ*-контроле сред по затуханию *УЗ*-волн является сведение к минимуму или полное устранение влияния реверберации.

В акустических преобразователях реверберационная волна представляет собой сумму следующих волн, поступающих на приемник *ПЭП*:

- двукратно отраженной волны сначала от плоскости *ПЭП*, а затем от плоскости излучающего *ПЭИ*;

- многократно отраженных волн от внутренней цилиндрической поверхности трубопровода и от внутренних поверхностей внешних *ЗП*, через которые производится ввод *УЗ*-колебаний от излучающего *ПЭ* через протектор *Пр* в *КС* и их выход к *ПЭП* (рис.2.8).

К другим акустическим требованиям относятся:

- сведение к минимуму величины технологического сноса *УЗ*-волны, поступающей на *ПЭП*;

- сведение к минимуму влияния скорости потока жидкости;

- повышение уровня (напряжения) высокочастотных электрических колебаний на *ПЭП*.

Анализ акустических параметров преобразователей может быть произведен методами лучевой акустики, основанной на допущении, что *УЗ*-волны распространяются в виде пучка с плоским фронтом. При этом можно считать, что этот пучок состоит из отдельных параллельных лучей, распространяющихся по законам, аналогичным законам геометрической оптики.

Такое допущение справедливо, если диаметр *ПЭ* на порядок превышает длину излученной *УЗ*-волны, а расстояние между

ПЭИ и *ПЭП* на порядок больше диаметра *ПЭ*. Это условие обычно выполнимо в реальных преобразователях.

Влияние реверберации на велосиметрию. При разработке автоматических систем ультразвукового контроля технологических процессов и сред, основанных на велосиметрических методах, особое внимание уделяется способам борьбы с влиянием многократных отражений в акустических преобразователях. Рассмотрим условия, при которых влияние реверберации не вызывает заметных погрешностей, а также способы ее ослабления.

На приемный *ПЭ*, помимо прямой волны с амплитудой P_d (прошедшей через всю систему измерительного акустического преобразователя), поступает также реверберационная волна с амплитудой P_p , которая содержит составляющую, определяемую объемной реверберацией *ЗП* и промежуточных сред преобразователя, а также дважды отраженную (сначала от *ПЭП* и затем от *ПЭИ*) первичную *УЗ*-волну. Последующие ее отражения можно не учитывать из-за их незначительности по сравнению с двухкратным отражением.

В общем виде влияние реверберационной волны на прямую волну в случае непрерывных синусоидальных колебаний заключается в следующем.

Колебания приемного *ПЭ*, вызванные прямой и реверберационной волнами, могут быть записаны через давления p и p_p в виде формул:

$$p = P \sin(\omega t - \varphi); \quad (2.5)$$

$$p_p = P_p \sin(\omega t - \varphi_p), \quad (2.6)$$

где φ и φ_p – фазы прямой и реверберационной волн соответственно.

Суммарное УЗ-давление p_c составляет величину:

$$p_c = p + p_p = P_c \sin(\omega t - \varphi - \varphi_p), \quad (2.7)$$

где амплитуда суммарного давления P_c (с учетом реверберации волны) и фаза реверберационной волны определяются выражениями:

$$P_c = \sqrt{P^2 + P_p^2 + 2PP_p \cos(\varphi_p - \varphi)}, \quad (2.8)$$

$$\sin \Delta\varphi_p = \frac{P_p}{P} \sin(\varphi_p - \varphi). \quad (2.9)$$

Из выражения (2.9) следует, что реверберационный фазовый сдвиг $\Delta\varphi_p$ волны, поступающей на ПЭП зависит не только от разности фаз реверберационной и прямой волн, но и от соотношения их амплитуд. В то же время амплитуда P_c результирующих колебаний (2.8) определяется в основном амплитудой P давления прямой волны p , в свою очередь определяемой выражением (2.5). Из уравнения (2.9) очевидно неравенство

$$\sin \Delta\varphi_p \leq \frac{P_p}{P}. \quad (2.10)$$

При использовании фазового метода контроля сред (на непрерывных колебаниях) величина реверберационного фазового сдвига $\Delta\varphi_p$ волны не должна превышать 0,5% максимума измеряемой разности фаз колебаний, если погрешность измерений должна быть не более 1% к диапазону измерения.

При обычно выбираемом диапазоне измерений фазы порядка 2 рад величина $\Delta\varphi_p$ не должна превышать $0,01 \text{ рад}$. Следовательно, в АПС сред должно выполняться неравенство:

$$P_p \leq 0,01 P. \quad (2.11)$$

Прямая и отраженные волны. В частотно-импульсных электронных системах ультразвукового контроля двукратно отраженный импульс, составляющий основную часть реверберации, поступает на ПЭП раньше прямого импульса в

последующем такте запуска частотной схемы (вследствие задержки импульсов в соединительных кабелях и электронной схеме). Это вызывает искажение фронта прямого импульса, что может привести к преждевременному запуску частотной схемы и нарушению нормальной работы прибора.

Посредством искусственного увеличения времени электронной задержки в частотно-импульсных схемах можно получить режим их работы, при котором двукратно отраженный импульс не будет накладываться на фронт прямого импульса, а будет поступать раньше или позже его.

В импульсно-временных электронных системах УЗ-контроля этого же эффекта можно добиться определенным соотношением времени распространения и периода запуска импульсов. В обоих видах систем УЗ-контроля для исключения ложного срабатывания электронно-измерительной схемы применяется электронная отсечка двукратно отраженного импульса. Для этого также необходимо, чтобы амплитуда прямого импульса мало изменялась в процессе эксплуатации УЗ-прибора. В противном случае вводят систему автоматического регулирования усиления импульса.

В производственных условиях вследствие колебаний температуры, концентрации, плотности контролируемой жидкости и содержания газовых пузырьков в ней амплитуда давления УЗ-волны может на 2–3 порядка уменьшаться, приближаясь к уровню внешних акустических помех. Поэтому в этих случаях в велосимметрических системах с использованием частотно-импульсного и импульсного методов (как и при использовании непрерывных УЗ-колебаний) должно выполняться неравенство (2.11).

Объемная реверберация внешних звукопроводов конструктивными мерами может быть уменьшена до требуемых пределов. Условия устранения объемной реверберации промежуточных сред преобразователя также обычно выполнимы.

Несколько сложнее обстоит дело с многократными отражениями волны от ПЭП и ПЭИ. Здесь снижение амплитуды

двукратно отраженной волны обычно связано с уменьшением амплитуды прямой волны.

Амплитуда P волны прямого прохождения, падающей на ПЭП, зависит от соотношения волновых сопротивлений и скоростей распространения УЗ-волны в промежуточных средах, угла α_o затухания в средах и амплитуды P_0 излучения:

$$P_d = P_0 k D, \quad (2.12)$$

здесь k – коэффициент, учитывающий затухание волны в средах преобразователя; D – общий коэффициент пропускания волны по амплитуде, равный произведению коэффициентов пропускания отдельных сред:

$$D = D_1 D_2 D_3 \dots D_i \dots D_{2n}, \quad (2.13)$$

где n – количество поверхностей раздела сред между ПЭ и КС.

Путь двукратно отраженной волны в три раза длиннее пути прямой волны. При симметричной системе преобразователя амплитуду волны двукратного отражения можно представить в виде следующего выражения:

$$Pr = P_0 k 3 D 3 R 2, \quad (2.14)$$

где R – коэффициент отражения ПЭП, равный отношению амплитуд падающей на ПЭП волны и отраженной от него.

Разделив друг на друга левые и правые части выражений (2.12) и (2.14), получим:

$$Pr / P = k 2 D 2 R 2. \quad (2.15)$$

Таким образом, для сред преобразователя в соответствии с формулами (2.11) и (2.15) должно выполняться неравенство:

$$k D R \leq 0,1. \quad (2.16)$$

Как видно из полученного выражения, исключение влияния реверберации на результаты измерений или исследований может быть достигнуто как увеличением затухания и уменьшением коэффициента пропускания D сред преобразователя, так и

снижением коэффициента отражения R от ПЭИ (или ПЭП). Первые два способа влекут за собой значительное ослабление принятого сигнала, третий же способ незначительно ослабляет сигнал.

Вопросы отражения от слоистой границы (где слоем может являться в АПС сред стенка трубопровода (резервуара) с контролируемой средой рассмотрены в главе 3.

2.4. Экстракция в гидрометаллургии

2.4.1. Жидкостная экстракция

Жидкостная экстракция (ЖЭ) представляет собой извлечение и разделение компонентов раствора путем их перевода из одной жидкой фазы в другую, содержащую экстрагент (избирательный растворитель), при контакте обеих фаз.

Экстракция используется в гидрометаллургии и технологии редких металлов для:

- извлечения и очистки золота, галлия, кобальта, лантаноидов, молибдена, никеля, ниобия, тантала, ванадия;
- в урановой промышленности для получения и контроля концентрации урана и переработки радиоактивных отходов.

Применяют экстракцию также в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности и в других производствах.

При этом используются экстрагент, смешиваемый с исходным раствором. Возникающий экстракционный массообменный процесс количественно характеризуется коэффициентом распределения – отношением равновесных концентраций извлекаемого компонента в водной и органической фазах соответственно. Скорость процесса определяется разностью между равновесной и рабочей концентрациями извлекаемого компонента в экстракте.

Различают монообменный (катионо- и анионообменный), сольватационный и смешанный механизмы. Ионообменный и смешанный механизмы характерны для экстракции ионов

металлов карбоновыми и фосфорорганическими кислотами, сольватационный – для нейтральных экстрагентов (эферы, кетоны, сульфоксиды).

Жидкостная экстракция может протекать по катионообменному механизму с образованием соли экстрагируемого металла, сольватируемой органической фазой (например, ЖЭ ионов металлов фосфорорганическими или карбоновыми кислотами). При анионном обмене образуются проточные комплексы (ЖЭ ионов металлов солями высокомолекулярных аминов).

Жидкостная экстракция включает в себя *стадии*:

- смешения исходного раствора с экстрагентом;
- механического разделения (расслаивания) двух образующих фаз – экстракта, обогащенного извлекаемым компонентом, и остатка исходного раствора);

- удаления экстрагента из обеих фаз и его регенерацию с целью повторного использования.

Обычно экстракт – органический раствор, а рафинат – водный. Селективность экстрагентов практически позволяет разделять близкие по химическим свойствам металлы. Часто экстрагенты применяют в смеси с инертным разбавителем (керосином, например), сольватирующим образующиеся неионизированные комплексы. Полученный экстракт промывают для отделения примесей и механически увлеченного раствора, а затем подвергают *реэкстракции*, то есть переводят измельченный компонент из органической фазы в водную для дальнейшей переработки. При этом также осуществляется регенерация экстрагента.

Реэкстракция обеспечивается изменением: а) степени окисления и координационного числа атомов металлов; б) *pH* водной фазы; в) температуры.

Из многих видов ЖЭ наиболее эффективна непрерывная противоточная многоступенчатая, с многократным смешиванием и расслаиванием фаз. Противоточная многоступенчатая ЖЭ обеспечивает высокую (до 99%) степень извлечения целевого компонента.

2.4.2. Экстрагенты

Экстрагент является избирательным растворителем для извлечения отдельного компонента из жидких смесей (к примеру, водных растворов). Основные к нему требования: а) высокий коэффициент распределения; б) высокая селективность; в) низкая растворимость в воде; г) химическая устойчивость; д) высокая температура вспышки; е) нетоксичность.

Различают *кислые* (экстрагируют по катионообменному механизму), *основные* (экстрагируют по анионообменному механизму с образованием комплексов) и *нейтральные* (экстрагируют за счет сольватации) экстрагенты (ЭА).

К *кислым* ЭА относятся кислоты:

- карбоновые ($C_7 - C_9$) с неразветвленной и разветвленной цепями (извлечение кобальта, никеля);
- нафтеновые (извлечение кобальта, меди, никеля, цинка);
- фосфорно-органические: в основном ди(2-этилгексил)-фосфорная (извлечение урана, лантаноидов, ванадия, висмута, кадмия, кобальта, цинка, хрома), а также:
 - сульфокислоты (извлечение кобальта, никеля);
 - фенолы (разделение щелочных металлов);
 - кислые халатообразующие агенты, в частности оксимы (извлечение меди).

К *основным* ЭА относятся соли:

- четвертичных аммониевых оснований (извлечение вольфрама, урана, кобальта, ванадия);
- первичных, вторичных и третичных высокомолекулярных аминов (извлечение урана, вольфрама, молибдена, ванадия).

В число *нейтральных* ЭА входят:

- фосфорорганические соединения, в основном, трибутил фосфат (извлечение урана, циркония);
- сульфоксиды, фосфиносиды, спирты, кетоны (извлечение германия, урана, разделение никеля и таллия);
- альдегиды, например, фурфурол (извлечение кобальта).

2.4.3. Экстракторная система

Экстракторная система (ЭКС) является сложным аппаратом для разделения жидких и твердых веществ с помощью селективных растворителей (экстрагентов). В зависимости от взаимного направления движения фаз ЭКС разделяются на прямоточные, противоточные и со смешанным током. Процесс может проводиться в неподвижном слое твердого материала, движущимся или псевдосжиженном слое.

Используют ЭКС периодического, полупериодического и непрерывного действия. Для производства небольших партий продуктов применяют ЭКС периодического и полупериодического действия. В крупнотоннажных производствах используются непрерывные противоточные ЭКС (колонные аппараты, смесители-отстойники или центробежные аппараты).

К *колонным ЭКС* относятся:

– пульсационные колонны (ситчатые или насадочные), которые могут применяться для жидкостной экстракции (ЖЭ) из растворов твердыми примесями;

– роторно-дисковые, разделенные на секции дисками, вращающимися на общем валу, и с чередующимися смесительными и отстойными насадочными секциями, причем мешалки находятся на общем валу.

Смесители-отстойники (в частности, ящичного типа) состоят из ряда секций, включающих смесительную и отстойную камеры. Перемешивание осуществляется: механически, потоком воздуха или с помощью пульсаций. Смесители-отстойники применяются там, где требуется небольшое число ступеней или большие потоки реагентов (10^2 – 10^3 м³/ч).

Центробежные ЭКС представляют собой ротор с закрепленными цилиндрами, перфорированными или со спиральной щелью. Исходный раствор подводится с одного торца к центру аппарата, а экстрагент вводится в периферийную часть ближе к противоположному торцу. Противопоток реализуется под

действием центробежной силы, а диспергирование смеси происходит при прохождении ее через перфорированные цилиндры. По эффективности центробежные ЭКС соответствуют нескольким ступеням разделения. Применяются при разделении радиоактивных растворов, отличаются высокой производительностью и малым временем контакта фаз.

2.5. Контроль концентрации нитратов самария, гадолиния и упругих модулей

2.5.1. Метод совмещения информативного эхо-импульса с его отражением

Использование ультразвуковых методов контроля, а также выявление возможностей этих методов в автоматическом контроле различных параметров требует знания акустических характеристик сред, через которые проходит ультразвуковая волна. К ним относятся: скорость ультразвука c (велосиметрия), коэффициент затухания и акустический импеданс $АИм$.

Из общего перечня жидких сред редкометаллических производств имеется ряд веществ, наиболее характерных для широко распространенных технологических процессов, автоматический контроль параметров которых требует совершенствования существующей или разработки новой аппаратуры, программных продуктов.

Выбор исследуемых жидкостей осуществляется с учетом требуемого объема контроля параметров этих сред, а также возможности судить об акустических свойствах других жидкостей, сходных с исследуемыми по физико-химическим параметрам, и, следовательно, возможности применять разработанные УЗ-измерительные системы [21; 61] в аналогичных технико-технологических условиях на других технологических средах.

Важность контроля концентрации растворов солей редкоземельных элементов ($PЗЭ$) обусловлен в первую очередь тем, что в настоящее время доля производства $PЗЭ$ методами

экстракции и ионного обмена, куда в качестве основных компонентов входят *нитраты* лантаноидов самария $Sm(NO_3)_3$ и гадолиния $Gd(NO_3)_3$, достигает 90–95%.

Экстракционные процессы в производствах *РЗЭ*, рассмотренные выше в п. 2.4, позволяют получать металл высокой чистоты, которую не всегда можно достигнуть другими способами. Естественно, что такие процессы должны быть оснащены точной и надежной контрольно-измерительной аппаратурой, обеспечивающей более полное извлечение ценных продуктов.

Следует отметить, что в ряде *редкометаллических* производств для оптимального ведения технологического процесса необходим контроль состава и расхода вышеупомянутых жидкостей. Причем там, где возможно, применяют методы, основанные на применении ультразвука.

При использовании метода ультразвуковой локации одним из важных информативных параметров является скорость ультразвука. Такой выбор объясняется тем, что локация как метод определения времени распространения излученного *УЗ*-сигнала до границы раздела двух сред не зависит от затухания сигнала в контролируемой среде, которое может по различным причинам (например за счет взвесей и пузырьков газов) изменяться на порядок и более во время технологического процесса. Эти факторы при использовании метода локации надо учитывать только при разработке приемных устройств акустических сигналов для определения их пороговой чувствительности. На скорость ультразвука в среде эти причины влияют незначительно.

При изучении акустических характеристик сред обычно определяют зависимость скорости ультразвука в среде от концентрации и температуры, а также удельный акустический импеданс (*АИм*), являющийся, как отмечалось выше, произведением скорости ультразвука c на плотность среды ρ .

От *АИм* сред, образующих границу их раздела, зависят, как показано в предыдущих главах, коэффициенты отражения и

пропускания акустической энергии, падающей на эту границу. Поэтому величина *АИМ* жидкости в значительной степени определяет выбор конструктивных материалов и саму конструкцию тех частей *УЗ*-систем, которые соприкасаются с контролируемой средой. Близкие значения *АИМ* различных сред позволяют применять для контроля их параметров одинаковые конструкции *АПС* сред, рассмотренных в данной главе.

Широко применяемой является группа частотно-импульсных методов (*ЧИМ*) исследования скорости ультразвука М. Гринспана, К. Чигга – Н. Бражникова с импульсно-фазовым совмещением зондирующего импульса возбуждения ультразвука и многократными отражениями импульсов [21; 61–63]. При этом используется дающее эффективное возбуждение короткопакетное высокочастотное (*ВЧ*) электрическое возбуждение.

В одной из модификаций *ЧИМ* Н.И. Бражникова (внедренной на Подольском заводе института ГИРЕДМЕТ автором метода совместно с А.К. Тарелкиным) применено возбуждение одиночными полуволновыми импульсами. Осциллограммы полуволнового видеоимпульсного возбуждения совмещенного пьезопреобразователя (*СПП*) в системе эхо-локации несплошностей твердой контролируемой среды с воздушным отражателем приведены на рис. 2.9. В этой системе эхо-импульс имеет полярность первого полупериода колебаний, обратную полупериоду возбуждающему импульсу.

Для примененного *твердого* отражателя по указанной модификации *ЧИМ* исследования жидких сред осциллограмма показана на рис. 2.9.

Полупериодное возбуждение акустически жестко демпфированного *СПП* в измерительных системах осуществляется униполярным прямоугольным электрическим импульсом с напряжением *V*. Последний имеет длительность, равную полупериоду колебаний *ПЭ* в *СПП* на частоте f_0 полуволнового резонанса (*ПВР*):

$$\tau_p = 0.5 / f_0. \quad (2.17)$$

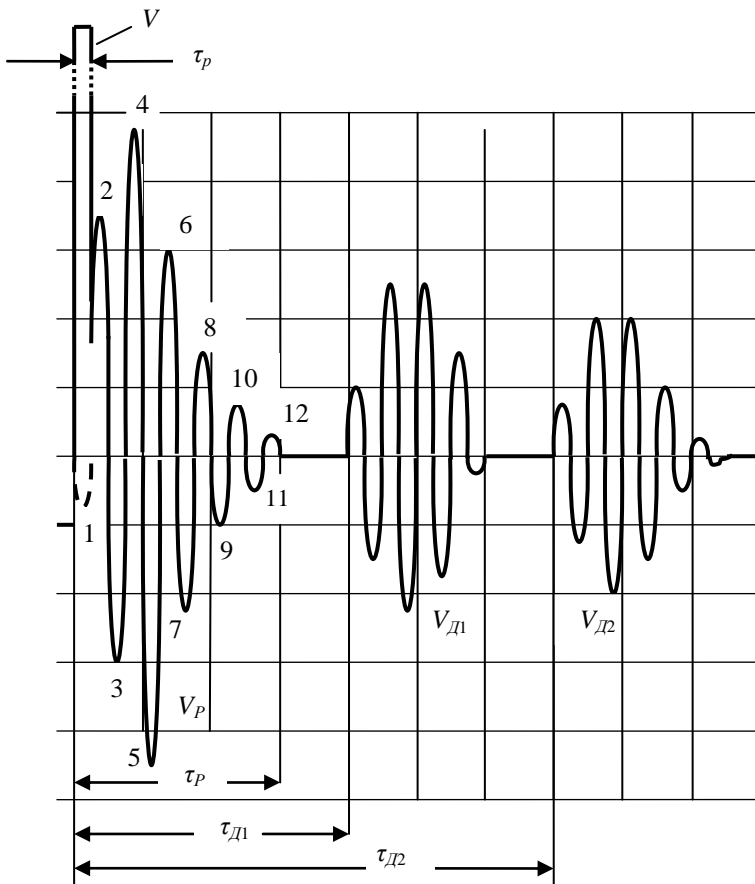


Рис. 2.9. Осциллограмма электрических эхо-сигналов $V_{дi}$ СПП ($i=1,2,\dots,n$) с пьезоэлементом частоты f_0 (МГц) при возбуждении видеоимпульсом V длительностью $\tau_p = 0,5/f_0$ (мкс): · условный разрыв полувциклового импульса V ; пунктиром – невидимый 1-й полувцикл импульса пьезореакции V_p , поглощаемый полувцикловым импульсом V возбуждения СПП; 1÷12 – полувциклы импульса V_p .

Импульс V_p пьезореакции, наблюдаемый на осциллограмме рис. 2.9, состоит из полувциклов 1–12 колебаний электрического напряжения.

Полуцикл 1 имеет полярность, обратную возбуждающему видеоимпульсу V генератора и поглощается им (так как амплитуда 1-го полуцикла $V_{p1} \ll V$). Полуциклы 1–12 V_p имеют частоту f_0 ПВР и отображают ту часть акустической энергии W_a (перешедшей из электрической энергии $W_{\text{э}}$, соответствующей возбуждающему импульсу V), которая остается после излучения в КС и демпфер. Полуцикл 2 в V_p практически сливается с задним фронтом импульса V возбуждения.

Донные УЗ-эхо (на рис. 2.9 показаны два: V_{d1} и V_{d2}) преобразуются в СПП в убывающие по амплитуде импульсы электрических колебаний. Первый полуцикл у них по знаку у всех совпадает с возбуждающим униполярным импульсом V . Времена τ_{d1} первого, τ_{d2} второго и последующих τ_{dn} донных эхо-импульсов определяются выражениями:

$$\tau_{d1} = 2(H/c + \tau_{\text{пр}}) \quad (2.18)$$

$$\tau_{d2} = \tau_{d1} + 2H/c \quad (2.19)$$

$$\tau_{dn} = \tau_{d1} + 2(n-1)H/c, \quad (2.20)$$

где H , c – высота жидкостного столба и скорость ультразвука в нем; $n = 3, 4, 5$, и $\tau_{\text{пр}}$ – время прохождения ультразвука через протектор (Пр) в СПП.

Из (2.20) следует, что каждый донный импульс отделен от эхо-импульса временным интервалом двойного прохождения ультразвука через КС:

$$\tau = 2H/c. \quad (2.21)$$

Благодаря этому становится возможным синфазное наложение друг на друга донных эхо-импульсов V_{d1} , V_{d2} , ..., V_{dn} при периоде T следования возбуждающих импульсов

$$T = 2H/c. \quad (2.22)$$

Сфазированный донный импульс (СДИ) получает амплитуду на порядок выше, чем у одиночного донного импульса. СДИ и импульс пьезореакции V_p находятся в противофазе и

минимум их разности свидетельствует о достижении равенства по (2.22). Поскольку период T обратен частоте F следования возбуждающих полуволновых импульсов V , то из (2.22) следует:

$$F = c/2H. \quad (2.23)$$

Достоинством импульсного ЧИМ Н. Бражникова является то, что измерительную задачу можно свести к достаточно несложному определению частоты следования эхо-импульсов, когда их период кратен времени распространения УЗ-сигнала. Это обеспечивает высокую чувствительность и точность измерений, так как частота следования импульсов может быть измерена с погрешностью $<10^{-5}$.

Импульсный УЗ-контроль данным методом предпочтительнее также в тех случаях, когда по различным причинам возможно значительное изменение затухания ультразвука в исследуемой среде. Для достижения высокой точности измерения, потенциально обеспечиваемой импульсной техникой, большое внимание необходимо уделять устранению некоторых систематических погрешностей, сопутствующих измерениям скорости ультразвука – дифракционным явлениям, волновым эффектам, однородности распределения температуры по объему образца, влиянию характеристик связующих слоев между преобразователем и средой и т.д. Эти обстоятельства рассмотрены и учтены в предыдущих главах.

2.5.2. Импульсная система для велосиметрических исследований лантаноидов

Исследование зависимости скорости ультразвука от температуры в водных растворах нитратов лантаноидов $Sm(NO_3)_3$ и $Gd(NO_3)_3$ (самария Sm и гадолиния Gd) проведено на Подольском заводе института ГИРЕДМЕТ и в Ассоциации АСК канд. техн. наук А.К. Тарелкиным под научным руководством основателя УЗКР ТП Н. Бражникова. При этом описанный выше

метод был дополнен определением относительного отклонения скорости ультразвука в контролируемой среде (*КС*) от скорости ультразвука в воде при той же температуре.

Велосиметрическая *УЗ*-система схематично показана на рис. 2.10. В ней был применен описанный выше импульсный метод, когда синфазно наложенные друг на друга эхо-сигналы в противофазе совмещают (регулировкой частоты посылок импульсов синхронизатора 1) с очередным возбуждающим импульсом совмещение наблюдают на экране осциллографа 6.

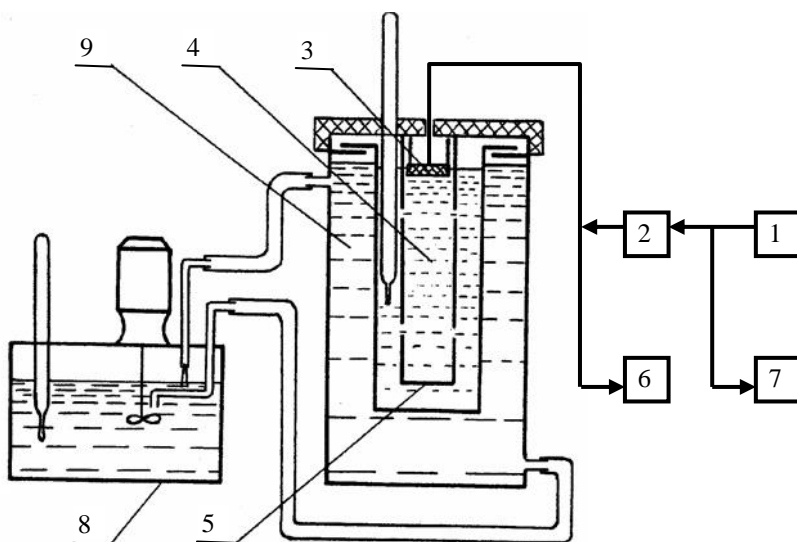


Рис. 2.10. Схема системы для велосиметрического исследования растворов солей лантаноидов: 1 – синхронизатор; 2 – генератор возбуждающих импульсов; 3 – пьезопреобразователь; 4 – исследуемая (контролируемая) среда; 5 – отражатель; 6 – осциллограф; 7 – прецизионный частотомер; 8 – термостат; 9 – вода.

Частота следования возбуждающих импульсов F , которая регламентирует скорость ультразвука c в *КС* (m/c) соответственно (2.23), где H – расстояние между совмещенным пьезо-

преобразователем (СПП) 3 и отражателем 5, фиксируется частотомером 7.

Возбуждающим импульсом на обкладках пьезоэлемента СПП в данном методе является не только единичный полцикловый импульс V генератора 2, но и «продолжающий» его в противофазе импульс пьезореакции V_p .

Для более точного совмещения импульса пьезореакции V_p со сфазированным сигналом применена короткая развертка, начинающаяся не в момент начала возбуждающего импульса V , а с некоторой временной задержкой, позволяющей рассматривать в увеличенном масштабе отдельные участки развертки осциллографа. Аналогично определяется частота F_e следования возбуждающих импульсов V для бидистиллированной воды при той же температуре:

$$F_a = \frac{1}{\tau} = \frac{c_a}{2H}, \quad (2.24)$$

где c_a – скорость ультразвука в воде.

Из сравнения выражений (2.23) и (2.24) следует формула для определения скорости ультразвука в КС:

$$c = \frac{F}{F_e} c_e. \quad (2.25)$$

Скорость ультразвука в воде измерялась многими исследователями. В описываемых исследованиях использовалась дистиллированная вода. В процессе исследований периодически осуществлялась градуировка велосиметрической установки по бидистиллированной воде. Температура контролируемой среды КС в измерительной системе (рис. 2.10) устанавливается и поддерживается посредством термостата 8 с «водяной ванной» и контролируется термометром (помещенным в КС).

Как отмечено выше, скорость ультразвука в контролируемой среде определяется по формуле (2.25). Погрешности Δ и Δ_e измерения частот F и F_e в велосиметрической системе определяются следующими факторами: а) допустимой погреш-

ностью определения частоты возбуждающих (зондирующих) импульсов по частотомеру 7 (рис. 2.10), которая оценивается величиной $\Delta_F = 0,001\%$ при подсчете частот F и F_6 до пятого знака; б) погрешностью определения частоты возбуждающих импульсов за счет неточности визуального противофазного совмещения полуциклов 2–4 импульса пьезореакции с полуциклами 2–4 сфазированного эхо-сигнала V_6 . В велосиметрической системе сфазированное напряжение V_6 эхо-сигналов обратно по знаку импульса V_p пьезореакции (рис. 2.9).

При оценке этой погрешности было сделано допущение, что отношение совмещаемых полуциклов сфазированного эхо-сигнала к реверберационной части зондирующего импульса $>0,25$. Тогда погрешность Δ_τ совмещения импульсов по экрану осциллографа: не $\geq 0,02$ периода U_3 -колебаний (толщина луча $\leq 0,5$ мм; высота экрана 80 мм при горизонтальной развертке 0,5 мкс/см). Это приводит к ошибке Δ_τ в определении времени между зондирующим импульсом и сфазированным эхо-сигналом на U_3 -частоте 1 МГц не $\geq 0,002$ мкс или к осциллографической погрешности при $\tau = 100$ мкс в определении частоты F соответственно $\Delta_\tau \leq 0,002\%$.

2.5.3. Концентрационные зависимости велосиметрии растворов нитратов лантаноидов самария и гадолиния

Нитраты самария. Результаты ультразвуковой велосиметрии водных растворов нитратов лантаноида $Sm(NO_3)_3$ в функции температуры ($t, ^\circ C$) для концентраций $g = 50; 99; 148; 200$ и 247 г/л по окислу Sm_2O_3 приведены в табл. 2.3. Характерными особенностями экспериментально полученных температурных зависимостей скорости s являются: положительный рост максимумов скорости c_m и смещение температуры t_m самого максимума с увеличением концентрации g нитрата лантаноида $Sm(NO_3)_3$.

Таблица 2.3

Экспериментальные данные по скорости ультразвука
в водном растворе $Sm(NO_3)_3$

t , $^{\circ}C$	ρ , $кг/м^3$	g , $г/л$	F , $Гц$	F_0 , $Гц$	c_0 , $м/с$	c_p , $м/с$
25	1072	50	3700,0	3694,0	1497,0	1499,9
40			3767,0	3766,5	1529,2	1528,2
50			3791,0	3794,5	1542,9	1541,4
65			3805,0	3816,0	1553,8	1549,3
70			3804,5	3816,5	1555,1	1550,2
80			3797,5	3812,5	1554,8	1548,7
95	1146	99	3768,0	3785,0	1547,5	1540,5
24,9			3718,0	3693,5	1496,5	1506,9
40			3770,0	3766,0	1529,2	1531,1
60			3796,0	3813,0	1551,3	1544,3
70			3795,0	3815,5	1555,1	1546,8
80			3783,0	3811,5	1554,8	1543,6
95	1221	148	3754,5	3783,5	1547,5	1535,6
19,9			3731,2	3673,0	1488,6	1512,2
22			3741,5	3693,0	1497,0	1516,7
25			3780,0	3765,0	1529,2	1535,6
40			3796,5	3808,5	1549,5	1544,6
57,5			3791,0	3815,0	1555,1	1545,3
70	1229	200	3743,5	3782,5	1547,5	1531,5
95			3768,0	3692,5	1497,0	1529,3
23,5			3771,0	3765,5	1529,2	1541,6
25			3796,0	3792,5	1542,9	1545,9
40			3800,0	3814,5	1555,1	1544,1
50			3787,5	3792,5	1550,8	1531,4
70	1336	247	3745,0	3781,0	1547,5	1526,0
90			3728,5	3673,0	1488,6	1539,3
95			3791,0	3692,0	1497,0	1542,0
21,5			3798,0	3764,5	1529,2	1548,5
22			3804,0	3803,0	1547,7	1549,1
25			3812,0	3814,0	1555,1	1543,9
40	3806,5	3725,5	3780,0	1547,5	1525,2	
55						
70						
95						

В диапазоне концентраций $g = 0 \div 247$ г/л температура t_m сдвигается от 74°C (для воды) до 50°C . Температурный коэффициент скорости ультразвука в области температур $t < t_m$ с ростом концентрации g снижается.

Концентрационная зависимость скорости c ультразвука в растворах нитрата самария для температуры $t = 25^\circ\text{C}$ приведена соответственно на графике, отмеченном знаком “о” на рис. 2.11.

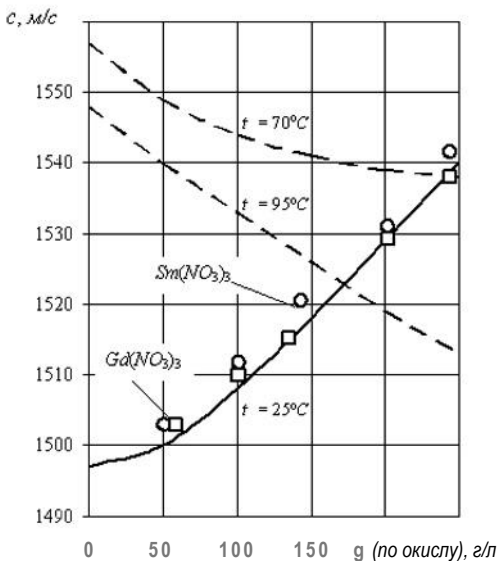


Рис. 2.11. Зависимость скорости ультразвука c от концентрации g в водных растворах нитратов лантаноидов при 25°C , 70°C и 95°C

При $t = 25^\circ\text{C}$ росту концентрации $\Delta g = 1$ г/л (по окислу Sm_2O_3) в области малых концентраций соответствует абсолютное приращение скорости c ультразвука:

$$\frac{\Delta c}{\Delta g} = 0.06 \frac{\text{м/с}}{\text{г/л}}. \quad (2.26)$$

В области повышенных концентраций ($g = 200$ г/л по окислу самария Sm_2O_3 , например) нитрата самария $Sm(NO_3)_3$

при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ приращению концентрации $\Delta g = 1\text{ г/л}$ соответствует увеличение (\approx в 4 раза) до $0,24\text{ м/с}$ приращение Δc скорости ультразвука.

При более высоких температурах велосиметрическая чувствительность $\Delta c/\Delta g$ снижается, а при $t > t_m$ она меняет знак с положительного на отрицательный (то есть с ростом концентрации g скорость c ультразвука уменьшается).

Нитраты гадолия. Результаты экспериментальной УЗ-велосиметрии водных растворов нитрата лантаноида $Gd(NO_3)_3$ в функции температуры для концентраций раствора $g = 54; 100; 134; 199$ и 240 г/л (по окислу Gd_2O_3) приведены табл. 2.4.

Таблица 2.4

Экспериментальные данные по скорости ультразвука
в водном растворе $Gd(NO_3)_3$

$t,$ $^{\circ}\text{C}$	$\rho,$ кг/м^3	$g,$ г/л	$F,$ $\Gamma\text{ц}$	$F_0,$ $\Gamma\text{ц}$	$c_0,$ м/с	$c,$ м/с		
23,5	1075	54						
25			3698,0	3691,5	1497,0	1500,0		
40			3762,0	3763,5	1529,2	1528,5		
50			3787,0	3791,5	1542,9	1541,0		
65			3801,0	3811,0	1553,8	1549,1		
70			3800,0	3812,5	1555,1	1550,2		
80			3791,5	3807,0	1554,8	1548,7		
95			3760,5	3777,5	1547,5	1540,5		
23,5			1145	100				
25					3715,5	3690,5	1497,0	1506,8
40	3765,5	3764,0			1529,2	1530,6		
60	3790,5	3808,5			1551,3	1544,5		
70	3789,5	3813,0			1555,1	1545,5		
80	3778,0	3807,5			1554,8	1542,7		
95	3747,5	3778,0	1547,5	1535,0				
23	1196	134						
25			3736,0	3691,2	1497,0	1513,2		
40			3776,0	3764,0	1529,2	1534,1		
57,5			3789,5	3807,0	1549,5	1542,5		
70			3784,0	3813,5	1555,1	1543,1		
95			3735,0	3778,5	1547,5	1529,7		

t , °C	ρ , кг/м ³	g , г/л	F , Гц	$F_{с}$, Гц	$c_{с}$, м/с	c , м/с		
23,5	1297	199						
25			3768,0	3691,0	1497,0	1528,2		
40			3791,0	3764,0	1529,2	1540,2		
50			3795,0	3792,5	1542,9	1543,9		
70			3781,5	3814,0	1555,1	1541,9		
90			3739,0	3791,5	1550,8	1529,3		
95			3724,0	3779,0	1547,5	1524,5		
22			3789,0	3672,5	1488,6	1535,8		
25			1360	240	3794,0	3691,0	1497,0	1538,7
40					3806,0	3781,0	1529,2	1546,3
55	3800,7	3764,0			1547,7	1546,6		
70	3780,0	3803,5			1555,1	1541,2		

Для данного лантаноида Gd , как и для лантаноида Sm , имеют место: максимумы c_m скорости ультразвука c в водных растворах при температурах t_m в диапазоне $50 \div 74,2^\circ C$, положительный температурный коэффициент скорости ультразвука при температурах $t < t_m$ и отрицательный – при $t > t_m$.

Концентрационная зависимость скорости ультразвука в водных растворах нитратов лантаноида гадолиния для температуры $25^\circ C$ приведена на графике рис. 2.11, отмеченном знаками “□”. При температуре $25^\circ C$ концентрационное приращение скорости ультразвука Δc , как и для самария, положительно, и имеет то же значение. В области повышенных концентраций водных растворов нитрата лантаноида $Gd(NO_3)_3$, например $g = 200$ г/л, величина концентрационного приращения скорости $\Delta c/\Delta g$ возрастает до $0,24$ (м/с)/(г/л).

2.5.4. Импедансы и упругие модули лантаноидов Gd , Jt , La , Sm

Исследования металлических лантаноидов проводились на Подольском заводе института ГИРЕДМЕТ компенсационным

импульсно-фазовым методом с акустической задержкой эталонного импульса, описанным в п. 1.4 главы 1. Результаты контроля скоростей распространения продольных c_l , поперечных c_t , стержневых c_b и поверхностных c_S УЗ-колебаний в гадолинии Gd , иттербии Jt , лантане La и самарии Sm , а также данные по их плотности ρ и коэффициенту Пуассона σ приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Результаты контроля характеристик УЗ-колебаний

Металл	Скорости распространения ультразвука, м/с				$\rho, \text{кг/м}^3$	σ
	c_l	c_t	c_b	c_S		
<i>Gd</i>	2950,1	1681	2668	1548,2	7890	0,2596
<i>Jt</i>	1819,8	998,9	1601	923,9	6980	0,2844
<i>La</i>	2772,9	1542,6	2464,2	1424,7	6170	0,2759
<i>Sm</i>	2702,4	1292,2	2214,7	1208,6	7540	0,3518

Результаты УЗ-определения для контролируемых 4-х лантаноидов удельных акустических импедансов (УАИМ): продольного z_l , поперечного z_t , стержневого z_b и поверхностного z_S и модулей упругости (сдвига Y_t и стержневого динамического Y_b) приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6.

Значения удельных акустических импедансов и модулей упругости для лантаноидов Gd, Jt, La, Sm

Металл	УАИМ, МНс/м ³				Модули, ГН/м ²	
	z_l	z_t	z_b	z_S	Y_t	Y_b
<i>Gd</i>	23,276	13,263	21,051	12,215	22,295	56,163
<i>Jt</i>	12,702	6,972	11,175	6,449	6,9647	17,891
<i>La</i>	17,109	9,518	15,204	8,791	14,682	37,466
<i>Sm</i>	20,376	9,743	16,699	9,113	12,590	34,039

Наибольшими (в исследованной группе лантаноидов) значениями импедансов, плотности и модулей упругости обладает гадолиний. Он же имеет наименьший коэффициент Пуассона σ .

Библиографический список к главе 2

1. **Firestone, F.A.** Sperry supersonic reflectoscope / F.A. Firestone // Iron Age. – V. 154. – Okt. – 1944. – P. 116.
2. **Бражников, Н.И.** Разработка прибора для дефектоскопии пресстужаины в латунных и бронзовых прутках / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 22-6-11. – М.: СКБ ЦМА, 1956.
3. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковая дефектоскопия пресстужаины в латунных и бронзовых прутках / Н.И. Бражников // Цветные металлы. – 1958. – № 11. – С. 67–69.
4. **Бениева, Т.Я.** Влияние деформации на свойства *Ni-Cr* сплавов / Т.Я. Бениева // Применение УЗ-колебаний для исследования свойств, контроля качества и обработки металлов и сплавов. – Киев, 1960. С. 40–44.
5. **Иванов, В.Е.** Исследование демпфированного преобразователя дефектоскопа / В.Е. Иванов [и др.] // Заводская лаборатория. – 1962. – Т. 28. – № 12. – С. 1459–1464.
6. **Сергеев, Е.И.** Ультразвуковая дефектоскопия стеклопластика // Не разрушающие методы контроля материалов и изделий / Е.И. Сергеев; под ред. С.Т. Назарова. – М.: ОНТИ-Прибор, 1964. – С. 235–238.
7. **Ямщиков, В.С.** Метод на изключване мъртвата зона на измерване в някой области на дефектоскопията / В.С. Ямщиков и др. // Съвременни методи за измервания и изпитания в машиностроенето. – Силистра, 1969. – С. 5.
8. **Миховски, М.** Използуване ефекта на Баркхаузен за безразрушителен контрол / М. Миховски, В. Вичев // Съвременни методи за измервания и изпитания в машиностроенето. – Силистра, 1969. – С. 69–79.
9. **Столин, В.Е.** Основные направления и перспективы развития ультразвуковой шумодиагностики в дефектоскопии / В.Е. Столин [и др.] // Дефектоскопия. – 1971. – № 4. – С. 82–86.
10. **Кузнецов, А.П.** Перспективы развития способов ударного возбуждения акустических сигналов для дефектоскопии / А.П. Кузнецов [и др.] // Дефектоскопия. – 1973. – № 1. – С. 126–127.
11. **Духанин, А.М.** Развитие электро-магнитно-акустических методов и средств / А.М. Духанин [и др.] // Дефектоскопия. 1974. – № 2. – С. 70–73.
12. **Бражников, Н.И.** Некоторые новые возможности эхо импульсной дефектоскопии приповерхностных слоёв в металлоизделиях / Н.И. Бражников / Н.И. Бражников [и др.] // УЗ-методы интенсификации технологических процессов. – М.: МИСиС, 1975. – С. 126.

13. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1976.
14. **Jacob, W.** Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit and Schmelz-Punkteleischmelzbarer Metalle von Wasser and Eis. Diss. – Göttingen. 1939.
15. **Ботаки, А.А.** УЗ-контроль прочностных свойств конструкционных материалов / А.А. Ботаки, В.Л. Ульянов, А.В. Шарко. – М., 1983.
16. **Иванушкин, Е.С.** Ультразвуковые методы контроля при производстве отливок / Е.С. Иванушкин, Г.Е. Белай. – Киев, 1984.
17. **Иванушкин, Е.С.** Оценка механических свойств высокопрочного чугуна в отливках ультразвуковым методом / Е.С. Иванушкин // Литейное производство. – 1988. – № 8. – С. 11–12.
18. **Крауткремер, Й.** Ультразвуковой контроль материалов / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер; пер. с нем. – М.: Металлургия, 1991.
19. **Белевитина, И.П.** УЗ-метод контроля качества профилированных поковок / И.П. Белевитина [и др.] // Металлург. – 1995. – № 10. – С.35.
20. **Бражникова, Е.В.** Зонный УЗ-контроль кованных изделий / Е.В. Бражникова [и др.] // Производство проката. – 2002. – № 9. – С. 32–34.
21. **Бражников, Н.И.** УЗ-контроль и регулирование технологических процессов / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин, А.И. Бражников. – М.: Теплотехник, 2008. – 256 с.
22. **Бражников, Н.И.** Способ ультразвуковой эхо-локации тонкостенных сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 237438. – БИ. – 1973. – № 15.
23. **Бражников, Н.И.** Разработка УЗ-метода и приборов для контроля толщины латунного проката и прессованных труб / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 1-17-1. – М.: СКБ ЦМА, 1967.
24. **Александров, А.М.** УЗ-эхолокатор тонкостенных сред / А.М. Александров [и др.] // Авт. св-во № 344384 от 20.11.1967. – БИ. – 1972. – № 21.
25. **Бражников, Н.И.** Импульсный УЗ-метод измерения малых толщин / Н.И. Бражников [и др.] // Тр. VI Всес. конф. – Серия С18. – Л., 1968.
26. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковые импульсные методы измерения толщины металлов / Н.И. Бражников, В.В. Кузнецов // Докл. XIII межвуз. научн. конф. – М.: МОПИ, 1969.
27. **Бражников, Н.И.** Доводка и внедрение УЗ-толщиномера латунного проката / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 1-17-2. – М.: СКБ ЦМА, 1969.
28. **Балаян, Р.Д.** Ультразвуковой импульсный толщиномер / Р.Д. Балаян [и др.] // Авт. св-во № 239574 – БИ. – 1969. – № 11.

29. **Александров, А.М.** Ультразвуковой импульсный прибор для контроля металлоконструкций / А.М. Александров [и др.] // Докл. XIII межвуз. научн. конф. – М.: МОПИ, 1969.
30. **Бражников, Н.И.** УЗ-эхолокация тонкостенных сред / Н.И. Бражников [и др.] // Прикладная акустика. – Таганрог: ТРТИ, 1970. – Вып. 21. – С. 177.
31. **Balaian, R.D.** Ultraschalleinrichtung für die Dickenmessung dünner Prüflingen / R.D. Balaian [и др.] // Österr. Pat. № 297357, 1971.
32. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковые толщиномеры / Н.И. Бражников, Н.Н. Полуниин // Цветная металлургия. – 1975. – № 2. – С. 36–37.
33. **Бражников, Н.И.** УЗ-импульсный толщиномер с уменьшенной мёртвой зоной / Н.И. Бражников // Измерительная техника. – 1975. – № 12. – С. 68.
34. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой эхо-импульсный толщиномер / Н.И. Бражников, А.П. Гордеев // Авт. св-во № 487020. – БИ. – 1975. – № 32.
35. **Королев, М.В.** Генератор наносекундных импульсов для возбуждения аперриодических пьезодатчиков / М.В. Королев // Приборы и техника эксперимента. – 1973. – № 4. – С. 125–126.
36. **Королев, М.В.** Аперриодический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов / М.В. Королев // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 12.
37. **Королев, М.В.** УЗ-эхоимпульсный толщиномер УТ-30К с цифровой индикацией / М.В. Королев // Дефектоскопия. – 1974. – № 1. – С. 143–144.
38. **Королев, М.В.** Портативный эхо-импульсный УЗ-толщиномер УТ-31МЦ / М.В. Королев [и др.] // Дефектоскопия. – 1977. – № 2. – С. 18–26.
39. **Бражников, Н.И.** Ведущие направления автоматического УЗ-контроля технологических процессов / Н.И. Бражников // УЗ-методы интенсификации технологических процессов. – М.: МИСиС, 1987. – С. 235.
40. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой концентратомер цинкового электролита / Н.И. Бражников // Отчёт СКБ ЦМА 681-11-2. – М., 1960.
41. **Бражников, Н.И.** Измерение концентрации гидрoметаллургических растворов по скорости ультразвука / Н.И. Бражников [и др.] // Отчет НИР 500-11-1. – М.: СКБ ЦМА, 1958.
42. **Воронов, Ф.Ф.** Импульсная установка для измерения скорости распространения ультразвуковых волн / Ф.Ф. Воронов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 1958. – № 3. – С. 81–85.

43. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой концентратор цинка в цинковом электролите / Н.И. Бражников // Отчет СКБ ЦМА 681-11-1. – М., 1959.
44. **Полоцкий, И.Г.** Установка для измерения скорости ультразвука в жидких металлах // И.Г. Полоцкий [и др.] // Акустический журнал. 1959. – Т. 5. – № 2. – С. 202–204.
45. **Биргер, Г.И.** Ультразвуковой концентратор растворов / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников // Авт. св-во № 134904. – БИ. – 1961. – № 1.
46. **Бражников, Н.И.** Установка для прецизионного измерения ультразвуковых характеристик жидких и твердых тел / Н.И. Бражников // КИП. – М.: ЦИНТИЭП, 1960. – С. 28–37.
47. **Бражников, Н.И.** Аппаратура для одновременного измерения параметров продольных и поперечных волн в твердых материалах / Н.И. Бражников, В.И. Рогожников // VII Всес. акуст. конф. – Л., 1971. – С. 41.
48. **Бражников, Н.И.** Акустический способ контроля физических свойств жидких сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 321689. – БИ. – 1971. – № 21.
49. **Бражников, Н.И.** Устройство для измерения скорости распространения ультразвука в жидкостях / Н.И. Бражников [и др.] // Авт. св-во № 394462. – БИ. – 1973. – № 34.
50. **Бражников, Н.И.** Зависимость спектра акустического импульса в растворе от его концентрации / Н.И. Бражников // Вопросы методики и техники УЗ-спектроскопии. – Каунас, 1974. – С. 24–28.
51. **Sokolov, S.J.** Means for indicating flaws in materials / S.J. Sokolov // Pat. USA № 2164125, 1937.
52. **Boyle, R.W.** Reflection on sound energy and thickness of plate reflector / R.W. Boyle, D.K. Froman // Canad. Journ. Res. – 1929. – V. 1. – P. 405.
53. **Сиваков, М.А.** Устройство для измерения временных интервалов приёма ультразвуковых импульсов / М.А. Сиваков [и др.] // Авт. св-во № 368784. – БИ. – 1972. – № 40.
54. **Сиваков, М.А.** Устройство для нормализации ультразвуковых сигналов / М.А. Сиваков [и др.] // Авт. св-во № 328773. – БИ. – 1973. – № 6.
55. **Бражников, Н.И.** Средства неразрушающего контроля / Н.И. Бражников [и др.] // Докл. науч.-технич. семинара «Механизация и автоматизация операций контроля и испытаний». – М.: ВДНХ, 1976.
56. **Сиваков, М.А.** Устройство для нормализации ультразвуковых сигналов / М.А. Сиваков [и др.] // Авт. св-во № 328777. – БИ. – 1973. – № 6.

57. **Бражников, Н.И.** Устройство для контроля теплофизических параметров газов / Н.И. Бражников [и др.] // Авт. св-во № 600434. – БИ. – 1978. – № 14.
58. **Джапаридзе, И.Т.** Измерения влагосодержания жидкостной продукции ультразвуковым методом / И.Т. Джапаридзе [и др.] // Достижения и перспективы разработки и внедрения средств измерения влажности продукции агропромышленного комплекса. – Кутаиси, 1984. – С. 256.
59. **Бражников, Н.И.** Ведущие направления автоматического УЗ-контроля технологических процессов / Н.И. Бражников // УЗ-методы интенсификации технологических процессов. – М.: МИСиС, 1987. – С. 235–236.
60. **Бражников, А.И.** УЗ-спектральный метод Н.И. Бражникова технологического контроля концентрации электролита / А.И. Бражников [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 3. – С. 54.
61. **Бражников, Н.И.** УЗ-фазометрия / Н.И. Бражников. – М.: Энергия, 1968.
62. **Бражников, Н.И.** УЗ-методы / Н.И. Бражников. – М.: Энергия, 1965.
63. **Бражников, Н.И.** Способ измерения УЗ-скорости жидкости и газа / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 243975. – БИ. – 1969. – № 7.

Глава 3

БЕСКОНТАКТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ. УЛЬТРАЗВУК В ВЫЩЕЛАЧИВАНИИ МЕДИ ИЗ ХАЛЬКОЗИНА

3.1. Применение преобразователей в технике

Бесконтактными являются преобразователи, у которых не только отсутствует контакт пьезоэлементов (*ПЭ*) или их протекторов (*Пр*) с контролируемой средой (*КС*), но и ввод ультразвука конструктивно не связан с какими-либо локальными нарушениями объема или сечения контролируемой среды (*КС*).

Бесконтактные преобразователи, как следует из их определения, имеют в основном промышленное назначение.

В ультразвуковых автоматических системах они применяются в:

– металлургии, энергетике для контроля скорости и расхода потоков, концентрационного состава растворов электролизных производств алюминия, меди, цинка и др. [1–20];

– в контроле и регулировании уровня и дозировании флото-реагентов, пульп и жидко-сыпучих сред гидрозакладочного комплекса [21–40];

– в контроле и регулировании процессов прокатки листов и полос из черных и цветных металлов и сплавов [41–59].

Практика ультразвукового контроля технологических процессов требует изучения и определения параметров слойно-граничного отражения и преломления продольных l и поперечных t $УЗ$ -волн в средах. Прохождение $УЗ$ -волны через среды, разделенные тонким твердым или жидким слоем, имеет место, в частности, при контроле физических параметров технологических сред бесконтактными методами, в том числе Н. Бражникова. К ним относятся методы просвечивания гидроемкостей и трубопроводов (скорость потока, плотность, расход), «звонящей» стенки (концентрация, уровень, плотность), аэроакустической

прозрачности (поверхностная плотность, толщина, удельное натяжение) и др. [19–42].

3.2. Слойно-граничное прохождение волн

3.2.1. Суперпозиционная система уравнений

Исходные положения. Распространение продольной l и поперечной t УЗ-волн через среды 1 и 2, разделенные жидким или твердым слоем 0, толщиной h , схематично показано на рис. 3.1.

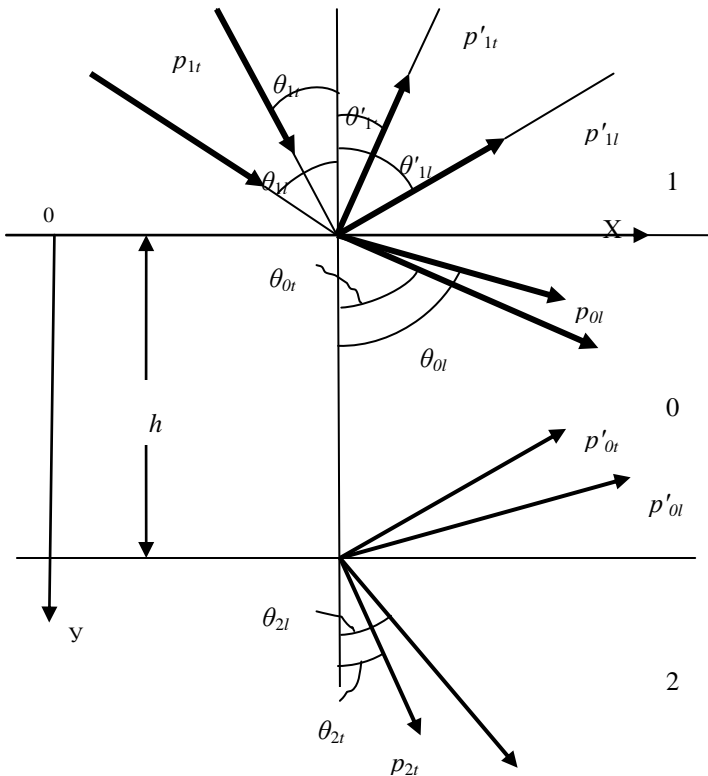


Рис. 3.1. Общая схема распространения волн (продольной l и поперечной t) через слойную границу

Акустические характеристики проанализируем согласно граничным условиям непрерывности суммарных нормальных T_y и касательных T_x напряжений и нормальных смещений на входной 1–0 и выходной 0–2 границах, на которых $y = 0$ и $y = h$, соответственно, при:

$$y = 0: \quad \begin{aligned} \sum(u_y)_1 &= \sum(u_y)_0, \quad \sum(T_x)_1 = \sum(T_x)_0, \\ \sum(T_{xy})_1 &= \sum(T_{xy})_0, \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$y = h \quad \begin{aligned} \sum(u_y)_0 &= \sum(u_y)_2, \quad \sum(T_x)_0 = \sum(T_x)_2, \\ \sum(T_{xy})_0 &= \sum(T_{xy})_2, \end{aligned} \quad (3.2)$$

где T_x, T_y – касательная и нормальная компоненты тензора напряжений; u_y – нормальная компонента смещения; 0, 1, 2 – индексы слоя и сред; y – координата оси, нормальной к границам раздела сред.

Общие граничные уравнения. Вышеуказанные граничные условия по компонентам смещений u_i и тензора напряжений T_i (4 при $y = 0$ и 4 при $y = h$) записываются согласно [61–63] в виде системы 8-ми уравнений.

Они составляются в функциях: компонентов давления p_i , нормальных импедансов Z_i материальных сред и углов θ_i направления движения УЗ-волн относительно оси Y (являющейся нормалью к поверхностям раздела сред):

$$\frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l}} - \frac{p_{1t} + p'_{1t}}{Z_{1t} \operatorname{ctg} \theta_{1t}} = \frac{p_{0l} - p'_{0l}}{Z_{0l}} - \frac{p_{0t} + p'_{0t}}{Z_{0t} \operatorname{ctg} \theta_{0t}}, \quad (3.3)$$

$$(p_{1l} - p'_{1l})Z_{1l}Z_{1l}^{-1} \operatorname{tg} 2\theta_{1t} + p_{1t} + p'_{1t} = 0, \quad (3.4)$$

$$(p_{0l} - p'_{0l})Z_{0l}Z_{0l}^{-1} \sin 2\theta_{0t} + (p_{0t} + p'_{0t}) \cos 2\theta_{0t} = 0, \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} (p_{1l} + p'_{1l}) \cos 2\theta_{1t} - (p_{1t} - p'_{1t}) \sin 2\theta_{1t} &= \\ = (p_{0l} + p'_{0l}) \cos 2\theta_{0t} - (p_{0t} - p'_{0t}) \sin 2\theta_{0t}, \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{p_{0l} \exp(-ia) - p'_{0l} \exp(ia)}{Z_{0l}} - \frac{p_{0t} \exp(-ib) p'_{0t} \exp(ib)}{Z_{0t} \operatorname{ctg} \theta_{0t}} &= \\ = \frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l}} - \frac{p_{2t} \exp(-ib_2)}{Z_{2t} \operatorname{ctg} \theta_{2t}}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$[p_{0l} \exp(-ia) - p'_{0l} \exp(ia)]Z_{0l}Z_{0l}^{-1} \operatorname{tg} 2\theta_{0l} + p_{0r} \exp(-ib) + p'_{0r} \exp(ib) = 0, \quad (3.8)$$

$$p_{2l} \exp(-ia_2)Z_{2l}Z_{2l}^{-1} \sin 2\theta_{2l} + p_{2t} \exp(-ib_2) \cos 2\theta_{2l} = 0, \quad (3.9)$$

$$[p_{0l} \exp(-ia) - p'_{0l} \exp(ia)] \cos 2\theta_{0l} - p_{2l} \exp(-ia_2) \cos 2\theta_{2l} - [p_{0r} \exp(-ib) - p'_{0r} \exp(ib)] \sin 2\theta_{0l} + p_{2t} \exp(-ib_2) \sin 2\theta_{2l} = 0, \quad (3.10)$$

где p – акустическое давление УЗ-волн; θ – угол распространения волны в среде (0, 1, 2); Z – нормальный акустический импеданс АИМ среды; $0l, 1l, 2l, 0t, 1t, 2t$ – индексы продольной l и поперечной t волн в слое 0 и средах 1, 2 соответственно; a, b, a_2, b_2 – фазовые набег продольной l и поперечной t волн в слое 0 между средами 1 и 2 и в квазислое среды 2 толщиной h , примыкающей к реальному слою 0.

Фазовые набег продольной l и поперечной t волн в твердом слое a и b определяются выражениями:

$$a = \frac{\omega h}{c_{2l}} \cos \theta_{0l}, \quad (3.11)$$

$$b = \frac{\omega h}{c_{0t}} \cos \theta_{0t}. \quad (3.12)$$

Аналогично выражаются фазовые набег продольных и поперечных УЗ-колебаний в квазислое среды 2 толщиной, равной толщине h твердого слоя:

$$a_2 = \frac{\omega h}{c_{2l}} \cos \theta_{2l}, \quad (3.13)$$

$$b_2 = \frac{\omega h}{c_{2t}} \cos \theta_{2t}. \quad (3.14)$$

где c_{2l} и c_{2t} – скорости распределения соответственно продольной и поперечной волн в среде 2 (в случае жидкой среды 2, не обладающей сдвиговой вязкостью, $c_{2t} = 0$).

Выражения продольного Z_{0r} и поперечного Z_{0l} АИМ твердого слоя 0 имеют вид:

$$Z_{0r} = \frac{\rho c_{0r}}{\cos \theta_{0r}}, \quad (3.15)$$

$$Z_{0l} = \frac{\rho c_{0l}}{\cos \theta_{0l}}. \quad (3.16)$$

где z_{20r} и z_{0l} – удельный поперечный и удельный продольный АИМ слоя 0 соответственно.

Взаимосвязь преломленных волн. Искомыми являются давления отраженных p'_{1l} , p'_{1r} (среда 1) и преломленных p_{2l} , p_{2r} (среда 2) волн.

Преобразуем уравнения (3.3), (3.6), (3.7) и (3.10). Подставив в (3.3), (3.6) выражения p'_{1r} и p'_{0r} из (3.4) и (3.5), получим:

$$\frac{p_{0l} - p'_{0l}}{Z_{0l} \cos 2\theta_{0r}} = \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1r}}; \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} & 2(p_{0l} \cos 2\theta_{0r} - p_{0r} \sin 2\theta_{0r}) - S_0 \frac{p_{0l} - p'_{0l}}{Z_{0l} \cos 2\theta_{0r}} = \\ & = 2(p_{1l} \cos 2\theta_{1r} - p_{1r} \sin 2\theta_{1r}) - S_1 \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1r}}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

где граничный импеданс слоя S_0 подобен граничному АИМ S и его продольный S_{0l} и поперечный S_{0r} компоненты определяются выражениями:

$$S_0 = S_{0r} + S_{0l}, \quad (3.19)$$

$$S_{0r} = Z_{0r} \sin^2 2\theta_{0r}, \quad (3.20)$$

$$S_{0l} = Z_{0l} \cos^2 2\theta_{0r}. \quad (3.21)$$

Аналогично, из уравнений (3.7) и (3.10) исключаем давления поперечной отраженной волны p'_{0r} и преломленной поперечной p_{2r} в среде 2. Ввод в уравнения (3.7) и (3.10) значений

$p'_{0l} \exp(ib)$ и $p_{2l} \exp(-ib_2)$ из (3.8) и (3.9) приводит к следующему результату:

$$\frac{p_{0l} \exp(-ia) - p'_{0l} \exp(ia)}{Z_{0l} \cos 2\theta_{0l}} = \frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2l}}, \quad (3.22)$$

$$2[p_{0l} \exp(-ia) \cos 2\theta_{0l} - p_{0l} \exp(-ib) \sin 2\theta_{0l}] - S_0 \frac{p_{0l} \exp(-ia) - p'_{0l} \exp(ia)}{Z_{0l} \cos 2\theta_{0l}} = S_2 \frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2l}}. \quad (3.23)$$

Для исключения из уравнений (3.18), (3.23) выражения давлений p_{0l} , p'_{0l} и p_{0l} волн в слое, необходимо выразить слагаемые в левых частях этих уравнений через давления в средах 1 и 2.

Суммирование (3.17), помноженного на $-\exp(ia)$ с (3.22), исключает p'_{0l} и с учетом S_{0l} по (3.21), получим следующее выражение:

$$-p_{0l} \cos 2\theta_{0l} = \frac{S_{0l}}{\exp(ia) - \exp(-ia)} \left[\frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2l}} - \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1l}} \exp(ia) \right]. \quad (3.24)$$

Из суммирования (3.5), помноженного на $-\exp(ib)$ с уравнением (3.8), при учете S_{0l} по (3.20) следует промежуточное уравнение:

$$p_{0l} [\exp(ib) - \exp(-ib)] \sin 2\theta_{0l} = S_{0l} \left[\frac{p_{0l} \exp(-ia) - p'_{0l} \exp(ia)}{Z_{0l} \cos 2\theta_{0l}} - \frac{p_{0l} - p'_{0l}}{Z_{0l}} \exp(ib) \right]. \quad (3.25)$$

Подстановка в правой части выражения (3.25) вместо дробных множителей их значений из (3.22) и (3.17) соответственно приводит к выражению давления p_{0l} в слое через давления в средах 1 и 2:

$$p_{0r} \sin 2\theta_{0r} = \frac{S_{0r}}{\exp(ib) - \exp(-ib)} \left[\frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2l}} - \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1l}} - \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1l}} \exp(ib) \right]. \quad (3.26)$$

Известны аналитические выражения:

$$\exp(im) - \exp(-im) = 2i \sin m, \quad (3.27)$$

$$-2 \exp(-im) [\exp(im) - \exp(-im)]^{-1} = 1 + ictgm, \quad (3.28)$$

$$2 \exp(im) [\exp(im) - \exp(-im)]^{-1} = 1 - ictgm. \quad (3.29)$$

С учетом равенств (3.27) – (3.29), сложив выражение (3.24) с (3.26) и выражение (3.24), помноженное на $\exp(-ia)$, с (3.26), помноженным на $\exp(-ib)$ получим следующие выражения:

$$2(p_{0l} \cos 2\theta_{0l} - p_{0r} \sin 2\theta_{0r}) = \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1l}} (S_0 - iM) + iN \frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2l}}, \quad (3.30)$$

$$2(p_{0l} \exp(-ia) \cos 2\theta_{0l} - p_{0r} \exp(-ib) \sin 2\theta_{0r}) = \frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2l}} (S_0 + iM) - iN \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1l}}, \quad (3.31)$$

где введены обозначения импедансов параметров слоя:

$$N = \frac{S_{0l}}{\sin a} + \frac{S_{0r}}{\sin b}, \quad (3.32)$$

$$M = S_{0l} ctga + S_{0r} ctgb. \quad (3.33)$$

Суперпозиция уравнений. Из подстановки вместо 1-го слагаемого и дробного множителя в левых частях уравнений (3.18) и (3.23) их выражений, соответственно из (3.30) и (3.17) для уравнения (3.18) и из (3.31) и (3.22) для уравнения (3.23), а также при использовании (3.4) и (3.9) следует суперпозиционная система уравнений Н. Бражникова [60–62] для слойной границы сред:

$$(S_1 - iM) \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1r}} + iN \frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2r}} - 2(p_{1l} \cos 2\theta_{1r} - p_{1r} \sin 2\theta_{1r}) = 0, \quad (3.34)$$

$$(S_2 - iM) \frac{p_{2l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2r}} + iN \frac{p_{1l} - p'_{1l}}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1r}} = 0, \quad (3.35)$$

$$(p_{1l} - p'_{1l})Z_{1r} \operatorname{tg} 2\theta_{1r} + (p_{1r} + p'_{1r})Z_{1l} = 0, \quad (3.36)$$

$$p_{2l} \exp(-ia_2)Z_{2l} \operatorname{tg} 2\theta_{2r} + p_{2r}Z_{2l} \exp(-ib_2) = 0. \quad (3.37)$$

Решение этой системы относительно давлений отраженных p'_{1l} , p'_{1r} в среде 1 и преломленных p_{2l} , p_{2r} в среде 2 волн выполняются после разделения суперпозиции *падающих* волн на подсистемы для продольной p_{1l} и поперечной p_{1r} волн.

3.2.2. Пересечение слойной границы продольной волной

Коэффициенты *отражения* R продольной волны l на слойной границе раздела сред определяются выражениями:

$$R_{l0l} = p'_{1l} / p_{1l}, \quad (3.38)$$

$$R_{l0r} = p'_{1r} / p_{1r}. \quad (3.39)$$

Для коэффициентов *прохождения* D продольной волны l через слойную границу раздела сред имеют место выражения:

$$D_{l0l} = p_{2l} / p_{1l}, \quad (3.40)$$

$$D_{l0r} = p_{2r} / p'_{1l}. \quad (3.41)$$

В индексах коэффициентов отражения R и слойно-граничного прохождения волны (*СГП*) D через слойную границу раздела сред первым знаком обозначен тип (продольная l) падающей волны, вторым знаком 0 – слой и третьим – тип отраженной или преломленной волн. С учетом обозначений (3.38) – (3.41), приравнявая p_{1r} нулю (поскольку на границу падает продольная волна p_{1l}), разделив на p_{1l} слагаемые в уравнениях (3.34) – (3.37) суперпозиционной системы, получим систему уравнений для

коэффициентов отражения и прохождения R_{li} , D_{li} на слойной границе:

$$\frac{(1-R_{l0l})(S_1-iM)}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1r}} + \frac{iND_{l0l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2r}} - 2 \cos 2\theta_{1r} = 0, \quad (3.42)$$

$$\frac{iN(1-R_{l0l})}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1r}} + \frac{D_{l0l}(S_2-iM) \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2r}} = 0, \quad (3.43)$$

$$R_{l0r}Z_{1l} + (1-R_{l0l})Z_{1r} \operatorname{tg} 2\theta_{1r} = 0, \quad (3.44)$$

$$D_{l0r}Z_{2l} \exp(-ib_2) + D_{l0l}Z_{2r} \exp(-ia_2) \operatorname{tg} 2\theta_{2r} = 0. \quad (3.45)$$

Здесь S_1 , S_1 – граничные АИМ первой и второй сред (рис. 3.1), разделенных слоем 0 толщиной h . Они определяются выражениями (2.55), (2.56).

Из уравнения (3.43) следует, что

$$\frac{D_{l0l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2r}} = \frac{-iN(1-R_{l0l})}{(S_2-iM)Z_{1l} \cos 2\theta_{1r}}, \quad (3.46)$$

где параметры N , M определяются выражениями (3.32), (3.33).

Подстановка значения левой части равенства (3.45) во второе слагаемое (3.42), дает выражение для определения коэффициента R_{l0l} зеркального отражения продольной волны p'_{1l} (рис. 3.1) от входной поверхности слойной границы:

$$(1-R_{l0l})(S_1-iM + \frac{N^2}{S_2-iM}) = 2Z_{1l} \cos^2 2\theta_{1r}. \quad (3.47)$$

Здесь выражение в правой части равенства пропорционально, согласно (2.61), продольному компоненту S_{1l} граничного АИМ (в отсутствие слоя 0) для среды 1. Подстановка значения $(1-R_{l0l})$ из (3.47) в правую часть (3.46) дает выражение для определения коэффициента D_{l0l} прохождения через слойную границу для преломленной продольной волны p_{2l} (рис. 3.1):

$$D_{l0l} \frac{(M+iS_1)(S_2-iM) + iN^2}{N} = 2Z_{2l} \exp(ia_2) \cos 2\theta_{1r} \cos 2\theta_{2r}. \quad (3.48)$$

Правая часть полученного равенства пропорциональна, согласно (2.63), продольной компоненте S_{2l} граничного АИМ (в отсутствие слоя 0) для среды 2.

Функции параметров M и N в левых частях выражений (3.47) – для коэффициентов отражения R_{l0l} от входной поверхности слойной границы и (3.48) – для коэффициентов прохождения продольной волны D_{l0l} на выходной (на рис. 3.1 – нижней поверхности слоя) представляют собой соответственно входной S_{10} (среда 1 – слой 0) и выходной S_{02} (слой 0 – среда 2) АИМ слойной границы.

Раскрывая дробные множители в правых частях выражений (3.47) и (3.48), получим, что множителем при $(1-R_{l0l})$ в (3.47) является S_{10} , а S_{02} – множителем при D_{l0l} . Входной S_{10} и выходной S_{02} АИМ могут быть записаны в виде:

$$S_{10} = \frac{M(S_1 + S_2) + i(N^2 - M^2 + S_1 S_2)}{M + iS_2}, \quad (3.49)$$

$$S_{02} = \frac{M(S_1 + S_2) + i(N^2 - M^2 + S_1 S_2)}{N}. \quad (3.50)$$

При толщине слоя $h \rightarrow 0$ импедансные параметры слоя M и $N \rightarrow \infty$, а входной и выходной АИМ S_{10} и $S_{02} \rightarrow (S_1 + S_2)$.

С учетом выражений (3.47) – (3.50) и значений продольных компонентов АИМ из (2.58), (2.60) выражения (3.47) и (3.48) принимают следующую зависимость от импедансов:

$$(1 - R_{l0l})S_{10} = 2S_{1l}, \quad (3.47 \text{ а})$$

$$D_{l0l}S_{02} = 2S_{2l} \exp(ia_2) \frac{\cos 2\theta_{1t}}{\cos 2\theta_{2t}}. \quad (3.48 \text{ а})$$

В этих выражениях $(S_1 + S_2)$ представляет собой, согласно (2.55)–(2.56), АИМ S границы непосредственного раздела двух полубезграничных сред 1 и 2 (т.е. в отсутствие слоя 0).

Коэффициенты R_{l0t} трансформировано-отраженной поперечной волны p'_{1t} в среде 1 и прохождения D_{l0t} трансформировано-преломленной поперечной волны в среде 2 вычисляются

из (3.44) – (3.45) подстановкой в них выражений для $(1-R_{10l})$ и D_{10l} из (3.47а) – (3.48а)

Согласно вышеизложенному и с учетом значений *АИМ*: S_{1l} , S_{1r} , S_{2l} , S_{2r} из (2.57) – (2.60), а также (3.49) – (3.50), расчетные формулы для отражения и прохождения продольной волны через слойную границу принимают следующий вид:

$$R_{10l} = 1 - 2 \frac{S_{1l}}{S_{10}}, \quad (3.51)$$

$$R_{10r} = -2 \frac{S_{1r}}{S_{10}} \operatorname{ctg} 2\theta_{1r}, \quad (3.52)$$

$$D_{10l} = 2 \frac{S_{2l}}{S_{02} \cos 2\theta_{2l}} \exp(ia_2) \cos 2\theta_{1r}, \quad (3.53)$$

$$D_{10r} = -2 \frac{S_{2r}}{S_{02} \sin 2\theta_{2r}} \exp(ib_2) \cos 2\theta_{1r}. \quad (3.54)$$

В (3.51) – (3.54) вместо одинакового *АИМ* границы $S = S_1 + S_2$ имеется в коэффициентах отражения входной S_{10} , а в коэффициентах прохождения выходной S_{02} граничный *АИМ* с фазовыми множителями $S_{02} \exp(ia_2)$ для продольной и $S_{02} \exp(ib_2)$ для поперечной волн в среде 2. Если одна из сред является жидкой или газообразной средой, не обладающей сдвиговой вязкостью, то поперечная волна в ней нет.

3.2.3. Слойное отражение – прохождение поперечной волны

Коэффициенты *отражения*: зеркального R_{10r} – поперечной волны P'_{1r} и трансформированного R_{10l} продольной волны P'_{1l} – определяются выражениями:

$$R_{10l} = P'_{1r} / P_{1r}, \quad (3.55)$$

$$R_{10r} = P'_{1l} / P_{1l}. \quad (3.56)$$

Для коэффициентов *прохождения* D_{10t} преломленной поперечной волны p_{2t} и D_{10l} трансформировано–преломленной волны p_{2l} имеют место выражения:

$$D_{10t} = p_{2t} / p_{1t}, \quad (3.57)$$

$$D_{10l} = p_{2l} / p_{1t}. \quad (3.58)$$

Приравняв нулю давление p_{1l} продольной волны, поскольку на границу падает поперечная волна p_{1t} , в суперпозиционной системе уравнений (3.34)–(3.37) и поделив на p_{1t} их слагаемые, согласно (3.55)–(3.58) получаем систему уравнений для R_{it} , D_{it} :

$$\frac{R_{10l}(S_1 - iM)}{Z_{1l} \cos 2\theta_{1t}} - \frac{iND_{10l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2t}} - 2 \sin 2\theta_{1t} = 0, \quad (3.59)$$

$$R_{10t} iNZ_{2l} \cos 2\theta_{2t} - D_{10l}(S_2 - iM) \exp(-ia_2) Z_{1l} \cos 2\theta_{1t} = 0, \quad (3.60)$$

$$(1 + R_{10t}) Z_{1l} \cos 2\theta_{1t} - R_{10l} Z_{1l} \sin 2\theta_{1t} = 0, \quad (3.61)$$

$$D_{10t} Z_{2l} \exp(-ib_2) \cos 2\theta_{2t} + D_{10l} \exp(-ia_2) \sin 2\theta_{2t} = 0. \quad (3.62)$$

Из уравнения (3.60) выразим коэффициент прохождения D_{10l} трансформировано-преломленной волны p_{2l} в среде 2 через коэффициент отражения R_{10l} – трансформировано-отраженной волны p'_{1l} в среде 1 следующим образом:

$$\frac{D_{10l} \exp(-ia_2)}{Z_{2l} \cos 2\theta_{2t}} = \frac{iNR_{10l}}{(S_2 - iM) Z_{1l} \cos 2\theta_{1t}}. \quad (3.63)$$

Из подстановки значения левой части (3.63) во второе слагаемое (3.59) следует:

$$R_{10l} \left(S_1 - iM + \frac{N^2}{S_2 - iM} \right) = Z_{1l} \sin 4\theta_{1t}, \quad (3.64)$$

где множитель при R_{10l} , как и при $(1 - R_{10l})$ представляет собой входной АИМ S_{10} слюной границы, определяемый выражением (3.49).

Выражение для коэффициента D_{10l} трансформации падающей поперечной волны p_{1t} в продольную волну $p_{1\ell}$ в среде 2 находим заменой $R_{10\ell}$ в правой части (3.63) на его значение из (3.64):

$$D_{10l} \frac{iN^2 + (M + iS_1)(S_2 - iM)}{N} = -2Z_{2l} \exp(ia_2) \sin 2\theta_{1t} \cos 2\theta_{2t}. \quad (3.65)$$

В выражении (3.65) множитель при D_{10l} , как и ранее для продольной волны в (3.48) при D_{10l} , является выходным АИМ S_{02} слойной границы, определяемым по (3.50).

Последующие вычисления производятся в следующем порядке. Вводятся в (3.64), (3.65) обозначения S_{10} , S_{02} и значения S_{1l} , S_{2l} из (2.58), (2.60), что дает выражения для расчета коэффициента отражения R_{10l} и коэффициента прозрачности D_{10l} .

Искомые расчетные формулы для коэффициентов отражения в среде 1 преломленной поперечной, трансформировано-отраженной продольной волн и слойно-граничного прохождения (СПП) в твердой среде 2 для трансформировано-преломленной продольной и преломленной поперечной волн по Н. Бражникову имеют вид:

$$R_{10l} = 2 \frac{S_{1l}}{S_{10}} - 1, \quad (3.66)$$

$$R_{10l} = 2 \frac{S_{1l}}{S_{10}} \operatorname{tg} 2\theta_{1t}, \quad (3.67)$$

$$D_{10l} = -2 \frac{S_{2l}}{S_{02} \cos 2\theta_{2t}} \exp(ia_2) \sin 2\theta_{1t}, \quad (3.68)$$

$$D_{10l} = 2 \frac{S_{2l}}{S_{02} \sin 2\theta_{2t}} \exp(ib_2) \sin 2\theta_{1t}. \quad (3.69)$$

В полученных выражениях для слойной границы присутствуют входной граничный АИМ S_{10} в формулах коэффициентов отражения (3.66), (3.67) и выходной $S_{02} \exp(-ia_2)$ и $S_{02} \exp(-ib_2)$ с фазовыми множителями в формулах (3.68), (3.69) для коэффициентов СПП. Модули входного S_{10} и выходного S_{02} граничных АИМ определяются выражениями (3.49), (3.50).

3.3. Бесконтактные АПС твердых сред

Различные модификации АПС сред по виду УЗ-волны, внешнему звукопроводу (ЗП), протекторам (Пр) и характеристикам границ раздела сред приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Модификации бесконтактных АПС твердых сред

Тип АПС Вид волны		Без преломления l, t	С преломлением		
			l, t	s	n
Модификации АПС		1 2 3 4	5 6 7 8	9 10	11 12
Поверхность КС	Плоская	++--	++--	+ -	+ -
	Цилиндрич.	--++	--++	- +	- +
Протекторы		-+++	-+++	--	--
Внешний ЗП	Твердый	----	++	--	--
	Жидкий	++++	--	++	++
Модификации АПС		1 2 3 4	5 6 7 8	9 10	11 12
Число границ раздела сред между КС и ПЭ		2 3 2 3	2 3 2 3		
Число преломлений между КС и ПЭ		----	1 1 1 1	1 1	1 1

3.3.1. Преобразователи без УЗ-преломления волны и с ним

АПС твердых сред без УЗ-преломления. Схематический ход центрального луча УЗ-волны 1 в АПС этого типа показан на рис. 3.2. Конструкционно он состоит из ПЭИ, ПЭП и двух жидкостных ЗП, обеспечивающих бесконтактный ввод УЗ-волны 1 в КС и последующий ее прием. Излучение ПЭИ в ЗП УЗ-колебаний и прием их после прохождения КС производится как непосредственно, так и через протекторы пьезоэлементов ПЭ.

В модификации 3 (табл. 3.1) центральный УЗ-луч не испытывает преломления при распространении от ПЭИ к ПЭП. Однако боковые периферические лучи, не находящиеся в плоскости, проходящей через ось цилиндрической КС и ось АПС, все же

испытывают преломление. Это преломление тем сильнее, чем больше отношение диаметра *ПЭ* в *ПЭИ* к диаметру цилиндрической *КС*.

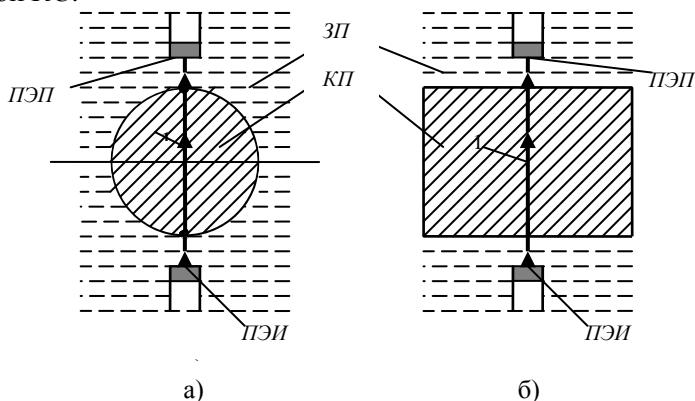


Рис. 3.2. Бесконтактные преобразователи для твердых сред без преломления: *а* – контроль цилиндрических тел; *б* – контроль плоских тел

В преобразователях данного типа *УЗ*-волна 1, прошедшая границу раздела сред *КС–ЗП*, поступает в *ПЭП*, вырабатывающий информативный электрический сигнал (*ЭС*). Параметры последнего имеют определенную зависимость фазы, времени и амплитуды от параметров *КС*.

АПС твердых КС с УЗ-преломлением. Схемы *АПС* твердых *КС* с преломлением волны в акустическом тракте приведены на рис. 3.3.

Ход центрального луча *УЗ*-волны здесь приведен для угла ввода в *КС* $\theta_{ЗП}$, превышающего первый критический:

$$\theta_{ЗП} \geq \arcsin(c_1/c_{ЗП}), \quad (3.70)$$

где c_1 , $c_{ЗП}$ – скорости распространения продольной волны в *КС* и в звукопроводе *ЗП* соответственно.

При выполнении условия (3.70) в *КС* распространяется один тип *УЗ*-колебаний – поперечные волны 1 и 2.

В модификациях 6, 8 преобразователя с преломлением волны в цилиндрических *КС* (рис. 3.3, *а*) распространение волны 1

аналогично распространению в контактном преобразователе с твердыми внешними ЗП (рис. 2.2, а и б) для твердых сред с преломлением. Отличие – в виде внешнего ЗП и применяемых ПЭИ и ПЭП.

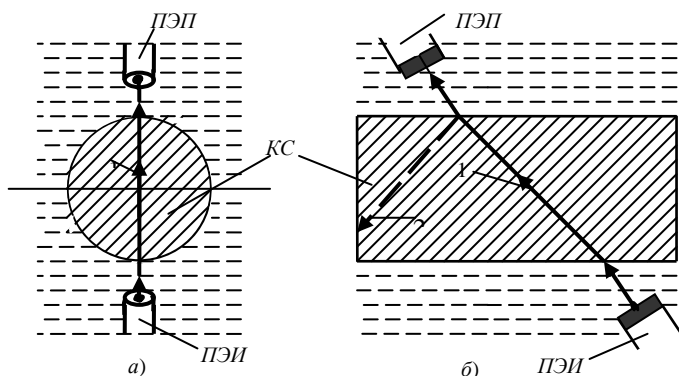


Рис. 3.3. Бесконтактные преобразователи для твердых сред с преломлением УЗ-волн (l или t в КС):
 а – контроль цилиндрических тел; б – контроль плоских тел

Ход луча в случае тел с плоскими поверхностями для преобразователей с преломлением (модификации 7, 8) соответствует рис. 3.3, б. При вводе УЗ-волны из ЗП в КС под углом θ , меньшим первого критического, в КС распространяются продольная l и поперечная t волны. В этом случае возможен двухволновый контроль при обеспечении приема каждой из этих волн раздельными ПЭП и использовании второго электронного канала.

3.3.2. Поверхностно- и нормально-волновые АПС сред

Поверхностно-волновой преобразователь. Схемы бесконтактных АПС твердых КС на основе поверхностной волны Дж. Рэлея и слабозатухающих нормальных волн Г. Лэмба аналогичны контактному АПС сред, приведенным на рис. 2.3 главы 2.

Отличие состоит в применении жидкостных внешних ЗП вместо твердых ЗП, что обеспечивает бесконтактность и возможность контроля твердых сред непосредственно в среднескоростном технологическом потоке.

Нормально-волновый преобразователь. Слабозатухающая нормальная волна n (НВ) Г. Лэмба распространяется при отсутствии демпфирования граничащими средами слоя твердой КС (рис. 2.3, б) в зоне 3 распространения волны (между ЗП1 и ЗП2).

Условие возникновения НВ (вне зоны 3 ее распространения), заключающееся в равенстве нулю входного акустического импеданса (АИМ) слойной границы S_{10} (при $S_1 = S_2 \rightarrow 0$), согласно (3.49) записывается в виде:

$$(N + M)(N - M)/M = 0, \quad (3.71)$$

где N и M – определяются из (3.32), (3.33).

Из (3.71) следуют уравнения для слабозатухающих недемпфированных волн Г. Лэмба:

$$\text{симметричных НВ:} \quad N + M = 0, \quad (3.72)$$

$$\text{антисимметричных НВ:} \quad N - M = 0. \quad (3.73)$$

С учетом значений N и M после изменения в (3.32) и (3.33) обозначений продольного и поперечного граничных АИМ слоя с S_{0l} и S_{0t} на S_l и S_t , из (3.72) и (3.73) следует:

$$\frac{S_l(1 + \cos a)}{\sin a} + \frac{S_t(1 + \cos b)}{\sin b} = 0, \quad (3.74)$$

$$\frac{S_l(1 - \cos a)}{\sin a} + \frac{S_t(1 - \cos b)}{\sin b} = 0, \quad (3.75)$$

где согласно (3.19) – (3.21) и изменениям индексов:

$$S_0 = S_t + S_l, \quad S_t = z_t \sin^2 2\theta_t, \quad S_l = z_l \sin^2 2\theta_l. \quad (3.76)$$

С учетом известных аналитических тождеств:

$$\frac{1 + \cos x}{\sin x} = \operatorname{ctg} \frac{x}{2}, \quad (3.77)$$

$$\frac{1 - \cos x}{\sin x} = \operatorname{tg} \frac{x}{2}. \quad (3.78)$$

Из выражений (3.74) и (3.75) следуют уравнения для симметричных и антисимметричных слабозатухающих *НВ* Г. Лэмба:

$$\text{симметричные } НВ: S_{rctg} \frac{a}{2} + S_{rctg} \frac{b}{2} = 0, \quad (3.79)$$

$$\text{антисимметричные } НВ: S_{rtg} \frac{a}{2} + S_{rtg} \frac{b}{2} = 0. \quad (3.80)$$

В *ЗП* угол α ввода возбуждающей *УЗ*-волны 1 (рис. 2.3, б) в твердый слой определяется выражением:

$$\alpha = \arcsin(c_{ЗП}/c_n), \quad (3.81)$$

где $c_{ЗП}$, c_n – скорости *УЗ*-волны 1 в *ЗП* и *НВ* n в слое *КС* соответственно.

3.4. Бесконтактные *АПС* жидкостей и газов

Различные модификации бесконтактных преобразователей для жидкостей и газов по виду применяемой *УЗ*-волны, внешнему *ЗП* и характеристике границ раздела сред приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Бесконтактные *АПС* жидкостей и газов на продольной l без преломления поверхностной s и нормальных n волн

Тип <i>АПС</i> Вид волны		Без преломления l, t	С преломлением																
			l, t		s		n												
Модификации <i>АПС</i>		1 2 3 4 5 6 7 8	9 10	11 12 13 14	15 16 17 18														
Поверхность <i>КС</i>	Плоская	++++-----	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Цилиндр.	-----++++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Протекторы		-+--+--+--+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Внешний <i>ЗП</i>	Твердый	-----	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Жидкий	-----	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Промежуточный <i>ЗП</i>	Стенка	++--++--	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Мембрана	--++--++	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Число границ раздела сред между <i>КС</i> и <i>ПЭ</i>		2 3 2 3 2 3 2 3	2 4	3 3 3 3	4 4 4 4														
Число преломлений между <i>КС</i> и <i>ПЭ</i>		-----	2 2	2 2 2 2	2 2 2 2														

3.4.1. АПС жидкостей и газов без преломления волны и с ним

АПС сред без УЗ-преломления. Схематично бесконтактный преобразователь без преломления продольной волны l для контроля физических свойств жидкостей и газов изображен на рис. 3.4.

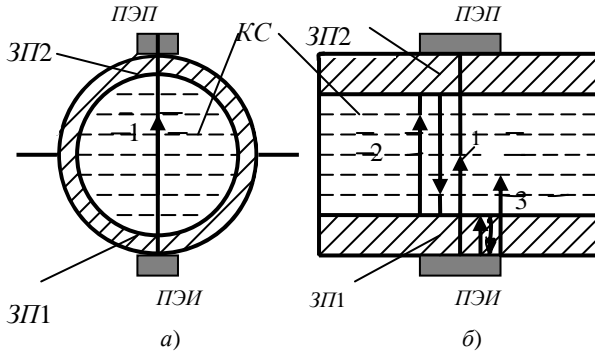


Рис. 3.4. Бесконтактные акустические преобразователи без преломления для жидкостей и газов

В модификациях 1, 2, 5, 6 (табл. 3.2) бесконтактных АПС (рис. 3.4, а) без преломления в качестве ЗП1 и ЗП2 используются стенки магистрали или резервуара, а в модификациях 3, 4, 7 и 8 – врезаемые в стенки гидроемкости (ГЕ) звукопроводные мембраны.

На практике мембраны выполняются из химически стойкого материала полуволновой или четвертьволновой толщины, которая обеспечивает режим акустической прозрачности для непрерывных и пакетных УЗ-колебаний.

Информативный электрический импульс формируется ПЭП из принятой УЗ-волны (прямого прохождения от ПЭИ к ПЭП). Наряду с ним на ПЭП поступают волны 2 многократного отражения волны 1 от внутренней поверхности ГЕ, а также волны 3 многократного отражения волны 1 в стенке ГЕ. В зависимости

от методов контроля, отражения (рис. 3.4) могут быть либо помехой, либо дополнительным информативным сигналом [64].

АПС сред с УЗ-преломлением. Преобразователи с преломлением волн УЗ-колебаний, применяющиеся в УЗ-расходомерах и концентратомерах в гидрометаллургии и энергетике, описаны в [1; 8; 20].

Бесконтактные *АПС с одним преломлением* волны между *КС* и *ПЭИ* (или *ПЭП*) имеют приведенные в таблице 3.3 характеристики (модификация 19).

Таблица 3.3

Бесконтактные АПС жидкостей и газов
с преломлением объемной волны

Число преломлений между КС и ПЭ		1		2					3				4	
Модификации АПС		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
Поверхность КС	Плоская	+	- +	+	-	+ -	-	+	-	+	+	+		
	Цилиндр.	-	- +	-	+	-	+	-	+	-	-	-		
Протекторы		-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	+		
Внешний ЗП	Твердый	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+		
	Жидкий	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-		
Промежуточный ЗП	Стенка	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-		
	Мембранный ЗП	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+		
Число границ раздела сред между КС и ПЭ		2	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4		

Схема углового *АПС* жидкостных потоков (модификация 19) с одним преломлением приведена на рис. 3.5.

В угловом *АПС* сред с одной преломляющей поверхностью между *ПЭИ* (или *ПЭП*) и контролируемой средой *КС* гидропотока размещен мембранный *ЗП1* (или *ЗП2*), который с обеспечением герметизации под требуемым углом α закреплен (врезан) в трубопроводе 1 (или трубчатой вставке того же внутреннего диаметра, что и трубопровод) через отверстие в его стенке. На внешних торцевых плоскостях *ЗП* с обеспечением акустического контакта закреплены излучатель *ПЭП* и приемник *ПЭП*.

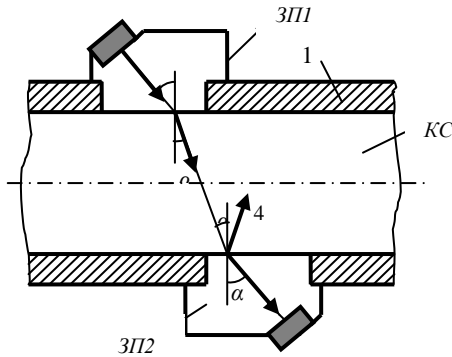


Рис. 3.5. Распространение центрального УЗ-луча в канале угловых бесконтактных акустических преобразователей с одной преломляющей поверхностью между КС и ПЭИ (или ПЭП)

Преломляющая поверхность ЗП с высокой степенью чистоты обработана заподлицо с внутренней поверхностью трубопровода (или трубчатой вставки). АПС такой конструкции обеспечивает бесконтактность контроля гидротоков. В частности, он применен в УЗ-расходомере газообразных сред УЗР-1-2 и УЗ-концентрагомере серной кислоты УЗК-1-1.

Волна 2 (продольная или поперечная), распространяясь в ЗП1, под углом α падает на границу раздела сред «ЗП1 – поток КС» и частично проходит в поток. В гидротоке волна 3 начинает распространяться под углом β , определяемым выражением:

$$\sin \beta = \frac{c}{c_{ЗП}} \sin \alpha, \quad (3.82)$$

где c , $c_{ЗП}$ – скорости УЗ-волны, соответственно в КС и ЗП.

На границе раздела сред «ЗП2 – поток КС» продольная волна 3 имеет тот же угол β , что и после входа в поток КС, и происходит частичное зеркальное отражение под углом β в виде волны 4:

$$\sin \beta' = \sin \beta \quad (3.83)$$

и частичное преломление в ЗП под углом α в виде волны 5:

$$\sin \alpha_{П} = c_{ЗП} c^{-1} \sin \beta, \quad (3.84)$$

имеющим то же значение α , что и при излучении волны 2 в ЗП1. Из принятой волны 5 приемник ПЭП вырабатывает электрический сигнал ЭС, несущий информацию о гидротоке КС.

АПС сред с двойным преломлением волны между КС и ПЭИ (или ПЭП) схематично представлены на рис. 3.6, рис. 3.7.

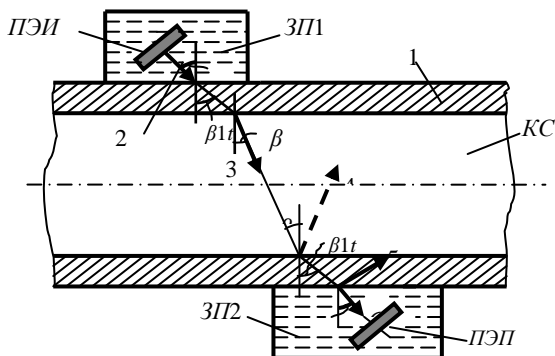


Рис. 3.6. Канал бесконтактного акустического измерительного преобразователя с двойным преломлением и жидкостными внешними волноводами при угле излучения α , большем критического $\alpha_{кр}$

В виде модификаций 20–23 и 24–27 АПС сред с двойным преломлением волны между КС и ПЭИ (или ПЭП) даны в табл. 3.3.

При УЗ-контроле с распространением объемной волны внутри стенки трубопровода 1 в модификации 20, 21 ПЭИ излучает волну 2 в жидкий ЗП1 под углом α относительно нормали к стенке, определяемым неравенствами:

$$\alpha_{1кр} \leq \alpha \leq \alpha_{2кр}, \quad (3.85)$$

в которых критические углы рассчитываются согласно выражениям:

$$\text{первый } \alpha_{1кр} \text{ из } \sin \alpha_{1кр} = c_{ЗП1} / c_{1t}, \quad (3.86)$$

$$\text{второй } \alpha_{2кр} \text{ из } \sin \alpha_{2кр} = c_{ЗП1} / c_{1l}, \quad (3.87)$$

где c_{1l} , c_{1t} – скорости продольных и поперечных УЗ-колебаний в материале стенки трубопровода.

В этом случае в стенке со скоростью c_{1t} распространяется только поперечная t волна под углом β_{1t} , согласно выражению:

$$\sin \beta_{1t} = \frac{c_{1t}}{c_{3П}} \sin \alpha, \quad (3.88)$$

а продольная l волна в стенке претерпевает полное внутреннее отражение и на границу внутренней поверхности трубопровода 1 не поступает.

Поперечная t волна в стенке, достигнув внутренней поверхности трубопровода, частично зеркально отражается в ней (на рис. 3.7 не показано) и частично проходит в $KС$ в виде трансформировано-преломленной продольной l волны 3 под углом β , определяемым выражением:

$$\sin \beta = \frac{c}{c_{1t}} \sin \beta_{1t}, \quad (3.89)$$

или, с учетом формулы (3.88), под углом, определяемым выражением (3.82) для $АПС$ с одним преломлением (рис. 3.6). Как видно из (3.89), для $АПС$ с двойным преломлением при выполнении неравенств (3.85) угол β в $KС$ не зависит от свойств материала трубопровода (сталь, фарфор, винипласт и др.).

На границе « $KС$ – внутренняя поверхность трубопровода» на участке над $ЗП2$ волна 3 имеет тот же угол β , что и после ввода в $KС$, частично отражается (в виде волны 4) и частично проходит в стенку в виде трансформировано-преломленной поперечной волны под углом β_{1t} , определяемым выражением (3.88).

На внешней поверхности трубопровода поперечная волна, частично отразившись в виде волны 5 под углом β_{1t} (тем же, что и при преломлении из $ЗП1$ в стенку 1), поступает в $ЗП2$. Из принятой волны 6 в $ПЭ$ вырабатывается информативный электрический сигнал.

Модификации 24–27 бесконтактного $АПС$ с мембранным $ЗП$ схематично приведены на рис. 3.7. В угловом бесконтактном $АПС$ с двумя преломляющими поверхностями между излучателем 1 (или приемником 2) и гидротоком 3 размещены:

внешний звукопровод 4 (или 5) и герметично вмонтированная в стенку трубопровода 6 звукопроводная мембрана 7 (или 8).

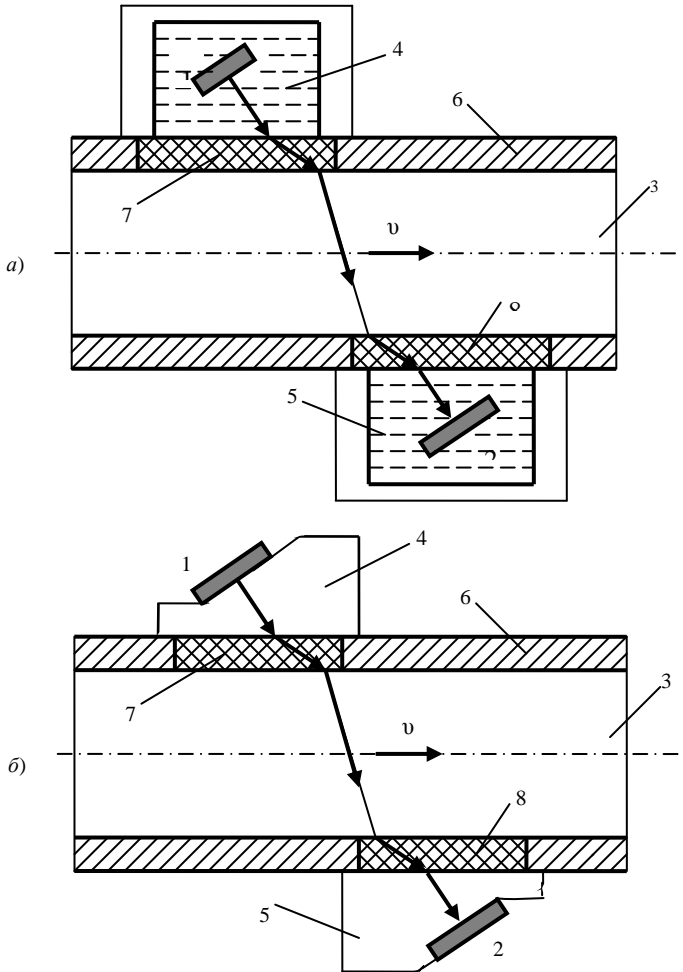


Рис. 3.7. Канал бесконтактных акустических преобразователей с двумя преломляющими поверхностями и звукопроводными мембранами в стенках трубопровода при угле излучения, больше, чем первый критический с жидкостными (а) и твердыми (б) звукопроводами

Аналогично вмонтирование мембран и в случае использования трубчатой вставки на фланцах в разрез трубопровода. Поверхность мембран, граничащей с гидротоком, чисто обрабатывается заподлицо с внутренней поверхностью трубопровода 6 (или вставки). В потоке контролируемой жидкости v (рис. 3.7) УЗ-волна начинает распространение под углом β , определяемым выражением (3.89).

В качестве внешних ЗП (4 и 5) применяют жидкую (рис. 3.7, а) или твердую (рис. 3.7, б) среды. Распространение УЗ-волны в данных АПС сред аналогично АПС на рис. 3.6, полагая звукопроводные мембраны 7, 8 как участки стенок 6 трубопровода.

Преимуществом АПС с мембранами является более низкое значение скорости поперечной волны в пластмассовых мембранах в сравнении с металлической или фарфоровой стенкой трубопровода и более высокий угол преломления β в контролируемом потоке жидкости v , так как здесь

$$\sin \beta = \frac{c}{c_M} \sin \alpha. \quad (3.90)$$

Это имеет важное значение в УЗ-контроле уровня, скорости потоков и расхода жидкостей и газов в гидрометаллургии и энергетике.

3.4.2. Поверхностно-волновый АПС жидкостей

Дж. Рэлея – Н. Бражникова

Бесконтактный преобразователь свойств жидкостей и газов на основе поверхностной волны s Дж. Рэлея (модификации 11–14 в табл. 3.2) представлен на рис. 3.8.

Описываемый бесконтактный АПС технологических сред впервые был применен в экспериментальном образце УЗ-системы контроля массового расхода и уровня растворов в электролизном производстве цинка [63]. В системе контроля по изменению амплитуды давления поверхностной волны в изме-

рительном тракте производилась автоматическая корректировка фазового сдвига, вызываемого скоростью гидротока.

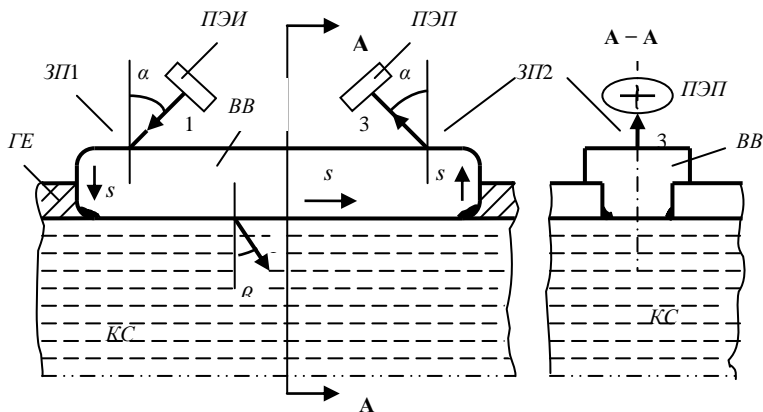


Рис. 3.8. Бесконтактный преобразователь для жидкостей на основе поверхностной волны s Дж. Рэлея

Волна 1, излученная ПЭИ в ЗП1 (со скоростью c_s) под углом α , удовлетворяющим условию

$$\arcsin \alpha = (c_{ЗП1}/c_s), \quad (3.91)$$

в ВВ (герметично врезанную в стенку гидроемкости ГЕ) трансформируется в поверхностную волну s Дж. Рэлея.

Распространяясь по поверхности ВВ, волна s , испытывая преломление, частично трансформируется в КС в виде продольной волны 2. Отток волны происходит на всем пути s -волны, имеющем контакт КС с ВВ. Угол β волны 2 оттока из ВВ в КС определяется выражением:

$$\beta = \arcsin (c_{КС}/c_s). \quad (3.92)$$

Степень оттока акустической энергии в КС из контактирующей с ней ВВ определяется физическими свойствами КС. Этот эффект сопровождается изменением фазы и затухания

волны s , распространяющейся в BB . Ослабленная поверхностная волна s , достигнув $ЗП2$, трансформируется в нем в волну 3 , аналогичную излученной волне 1 . Под воздействием волны 3 в $ПЭП$ (рис. 3.8) вырабатывается информативный электрический сигнал, пропорциональный технологическому параметру $KС$.

3.5. Отражение ультразвуковой волны в АПС сред

3.5.1. Отражение от материального слоя

Излучение (или прием) ультразвука пьезоэлементом ($ПЭ$) в преобразователе может осуществляться через протектор или без него. Соответственно можно считать, что для волны, падающей на приемник, или для волны, падающей на излучатель, после отражения от приемника имеет место падение волны на двухслойную или однослойную пьезоэлектрическую пластину, заключенную между двумя средами.

Первой из сред является та, из которой волна падает, например, на приемник, и второй – демпфирующая среда, расположенная на противоположной стороне $ПЭ$.

В связи с этим практический интерес представляют закономерности прохождения ультразвуковой волны через однослойную или многослойную пластину, которая в общем случае разделяет среды с разными плотностями и скоростями ультразвука.

Общая теория прохождения плоской продольной волны непрерывных $УЗ$ -колебаний через однослойную пластину рассмотрена выше (в п.п. 3.2.2 главы 3). Частный случай при нормальном падении на плоский слой показывает принципиальную возможность обеспечения полной акустической прозрачности (отсутствия отражения) пластины, заключенной между двумя средами с заданными акустическими характеристиками.

Если между двумя средами 1 и 2 с волновыми сопротивлениями z_1 и z_2 заключена пластина толщиной h с волновым сопротивлением z , то коэффициент отражения R продольной $УЗ$ -

волны, равный отношению амплитуд отраженной и падающей волн, определяются согласно (3.51) выражением:

$$R = (S_{10} - 2 S_{1l}) / S_{10}. \quad (3.93)$$

В формуле (3.93) входной *АИМ* слоистой границы S_{10} определяется выражением (3.49), а импедансные параметры слоя N , M – формулами (3.32)–(3.33). Подстановка значения входного *АИМ* из (3.49) в (3.93) приводит к следующему выражению для коэффициента отражения:

$$R = \frac{M(S_2 - S_{1l} + S_{1r}) + i(N^2 - M^2 - S_2(S_{1l} - S_{1r}))}{M(S_2 + S_{1l}) + i(N^2 - M^2 + S_1 S_2)}. \quad (3.94)$$

Граничные *АИМ* сред 1 и 2 при *нормальном* падении *УЗ*-волны имеют значения:

$$S_{1l} = 0, \quad (3.95)$$

$$S_1 = S_{1l} = z_{1l}, \quad (3.96)$$

$$S_2 = S_{2l} = z_{2l}, \quad (3.97)$$

где z_{1l} , z_{2l} – удельные *АИМ* сред 1 и 2.

Согласно выражениям (3.32)–(3.33) для параметров слоя N и M при прохождении волны по нормали к слою (с учетом акустического «скольжения» $c_t = 0$ при падении волны l) справедливы выражения:

$$N = z_l / \sin a, \quad (3.98)$$

$$M = z_l / \operatorname{tg} a, \quad (3.99)$$

где z_l – удельный *АИМ* слоя.

Здесь фазовый набег a продольной *УЗ*-волны l в слое согласно (83.11) при нормальном падении волны определяется выражением:

$$a = \omega h / c_l = 2\pi h / \lambda, \quad (3.100)$$

где λ – длина волны в слое, ω – круговая частота *УЗ*-колебаний, h – толщина слоя.

Поскольку согласно выражениям (3.98) и (3.99)

$$N^2 - M^2 = z_l^2, \quad (3.101)$$

то, с учетом выражений (3.95)–(3.97), (3.101) формула для коэффициента отражения преобразуется к виду:

$$R = \frac{(z_{2l} - z_{1l}) \cos a + i(z_l - z_{1l}z_{2l} / z_3) \sin a}{(z_{1l} + z_{2l}) \cos a + i(z_l + z_{1l}z_{2l} / z_3) \sin a}. \quad (3.102)$$

Здесь и в последующем принято допущение, что затухание в исследуемом твердом слое невелико и что среды, расположенные по обеим сторонам пластины толщиной h , имеют бесконечную протяженность, т.е. не имеют объемной реверберации.

Из выражения (3.102) следует, что отсутствие отражения (полная прозрачность) будет иметь место в следующих двух случаях, когда R обращается в нуль:

$$z_{1l} = z_{2l} \text{ и } h = n\lambda/2; \quad (3.103)$$

$$z = \sqrt{z_{1l}z_{2l}} \text{ и } h = (2n+1)\lambda/4. \quad (3.104)$$

Первый случай соответствует отражению волны от полуволновой ($\lambda/2$) и второй от четвертьволновой ($\lambda/4$) пластины.

3.5.2. Излучение – прием УЗ-волны пьезоэлементами без протекторов и с ними

Излучение – прием без протекторов. В отсутствие протектора однослойной пластиной является сам пьезоэлемент (*ПЭ*). Так как *ПЭ* продольных колебаний обычно работает на своей основной резонансной частоте, то он представляет собой полуволновую пластину:

$$h = \lambda_l/2. \quad (3.105)$$

Поэтому обязательным условием отсутствия отражения является равенство акустических сопротивлений демпфера z_{20} и среды z_1 . Средой z_1 в зависимости от модификации преобразователя (табл. 2.1–2.2 и 3.1–3.3) может быть:

– исследуемая среда – в контактных преобразователях без преломления;

– стенка трубопровода (резервуара) или ультразвуковое «окно» в ней (в бесконтактных преобразователях без преломления для исследования жидких сред);

– внешний звукопровод в контактных и бесконтактных преобразователях с преломлением (а также в бесконтактных *АПС* без преломления для твердых исследуемых сред).

$$R = \frac{z_\partial - z_1 + i \left(z_{\Pi p} - \frac{z_\partial z_1}{z_{\Pi p}} \right) \operatorname{tga}_3}{z_\partial + z_1 + i \left(z_{\Pi p} + \frac{z_\partial z_1}{z_{\Pi p}} \right) \operatorname{tga}_3}, \quad (3.108)$$

где фазовый набег a_3 в протекторе определяется согласно (3.107) из формулы:

$$a_3 = \frac{2\pi h_{\Pi p}}{\lambda_{\Pi p}}, \quad (3.109)$$

$z_{\Pi p} = \rho_{\Pi p} c_{\Pi p}$ – удельный АИМ протектора, $\lambda_{\Pi p}$ – длина волны в протекторе.

Из последних двух выражений видно, что отражение исчезает (R обращается в нуль) в двух случаях:

$$z_1 = z_\partial \text{ и } h_{\Pi p} = n\lambda_{\Pi p}/2 \quad (3.110)$$

$$z_M = \sqrt{z_1 z_\partial} \text{ и } h_{\Pi p} = (2n+1)\lambda_{\Pi p}/4. \quad (3.111)$$

Первый случай согласно (3.110) относится к полуволновому, а второй согласно (3.111) – к четвертьволновому протектору.

Так же, как и для преобразователей без протекторов, здесь предпочтительнее бесконтактные преобразователи. Следует отметить, что при наличии протекторов имеется более широкая свобода выбора материала сред с удельными АИМ: z_1 , $z_{\Pi p}$ и z_∂ .

Если для полуволнового протектора $z_1 \neq z_\partial$, то коэффициент отражения R определяется выражением:

$$R = \frac{z_\partial - z_1}{z_\partial + z_1}. \quad (3.112)$$

Если для четвертьволнового протектора $z_{\Pi p} \neq \sqrt{z_1 z_\partial}$, то коэффициент отражения R определяется выражением:

$$R = \frac{z_{\Pi p}^2 - z_1 z_\partial}{z_{\Pi p}^2 + z_1 z_\partial}. \quad (3.113)$$

Следует отметить, что теоретические значения R , приведенные в выражениях (3.112) и (3.113), для различных случаев

излучения – приема непрерывных УЗ-колебаний достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Однако в случае кратковременных импульсов с высокочастотным (ВЧ) заполнением наблюдаются значительные отличия. В частности, для УЗ-импульсов, полученных ударным возбуждением, отражение не обращается в нуль даже при полном выполнении условий (3.103), (3.104) или (3.110), (3.111).

Для прямоугольных импульсов с ВЧ-заполнением достаточно большой длительности при выполнении этих условий $R = 0$ лишь для средней части импульса. Ранее была отмечена эта особенность и были приведены [60] аналитические выражения коэффициента отражения R для первых полуциклов УЗ-импульсов. Эти выражения показывают, что величина R не зависит от акустического сопротивления z_0 демпфера и от волновых параметров a_3 и a протектора или самого ПЭ, а зависит от отношения удельных АИМ сред по обеим сторонам отражающей поверхности.

Коэффициенты отражения R первых полуциклов УЗ-импульсов имеют вид:

– в отсутствии протектора:

$$R = \frac{z_{ПЭ} - z_1}{z_{ПЭ} + z_1}, \quad (3.114)$$

где $z_{ПЭ} = \rho_{ПЭ} c_{ПЭ}$ – удельный АИМ пьезоэлемента, z_1 – удельный АИМ среды, из которой поступает волна на ПЭ,

– при наличии протектора:

$$R = \frac{z_{ПР} - z_1}{z_{ПР} + z_1}. \quad (3.115)$$

3.6. Выщелачивание меди из халькозина ультразвуком

3.6.1. Халькофильные элементы

Халькофильные элементы (от англ. *halcophile elements*), согласно классификации норвежского геохимика В.М. Гольд-

шмидта, – химические элементы, находящиеся в земной коре и метеоритах преимущественно в форме сульфидов.

Относительная термодинамическая устойчивость сульфидов по сравнению с кислородными соединениями (силикатами, оксидами, карбонатами, фосфатами и др.) выше, чем у железа – самого распространенного в природе металла. Они обладают незавершенной внешней электронной оболочкой и располагаются на участках возрастания кривой атомных объемов.

К халькофильным элементам ($XЭ$) относятся металлы, присутствующие в природных сульфидах в виде катионов (Ag, Hg, Cu, Pb, Cd, Bi, Zn, Sb), и неметаллы в виде анионов (S, Se, Te, As). Халькофильными свойствами обладает также ряд элементов, относящихся одновременно к нескольким группам (Mo, Pd, Au, Ga, In, Tl, Ge, Co и др.).

Масштабы концентрирования элементов в сульфидных фазах определяются не только их химическими свойствами, но и соотношением концентраций S, O₂ и Fe в природной среде минералообразования. Так, в присутствии избытка железа (в метеоритах и, вероятно, в глубинных, подкорковых оболочках Земли) сульфидная фаза представлена троилитом (FeS), в котором $XЭ$ концентрируются в форме твердого раствора. В породах земной коры $XЭ$ встречаются в виде твердого раствора сульфидных фаз и формируют большое число разнообразных сульфидов в виде самостоятельных минеральных фаз. Сульфидные руды (концентрированная форма нахождения $XЭ$ в земной коре) имеют большое практическое значение как сырьё для цветной металлургии и других отраслей промышленности. Из своих соединений $XЭ$ восстанавливаются сравнительно легко.

3.6.2. Халькозин

Медный блеск халькозин (от греч. *chalkos* – Cu) – минерал класса сульфидов Cu₂S. Содержит 79,8% Cu, примесь Ag (до 0,2%). Сингония моноклинная, гексагональная полиморфная модификация устойчива при $t > 105^{\circ}\text{C}$. Кристаллическая струк-

тура координационная. Призматические или толстотаблитчатые кристаллы являются редкостью. Образует двойники псевдогексагональной формы или микроскопически пластинчатые. Халькозин образуется при гипер- и гипогенных процессах и обычно встречается в виде массивноплотных или зернистых агрегатов серой (до черной) окраски. Блеск металлический, излом раковистый. Твердость 2,5 – 3. Плотность 5500–5800 кг/м³. Ковкий, хороший проводник электричества.

Значительные скопления халькозина обычно сосредоточены в зонах вторичного сульфидного обогащения медно-колчеданных месторождений (Рио-Тинто, Испания; Моренси, Бингем-Каньон, США и др.), где он ассоциирует с борнитом, халькопиритом и другими сульфидами. Халькозин – главный рудный минерал медистых песчаников (Джезказганское месторождение, Казахстан; Меденосный пояс, Центральная Африка и др.). Встречается также в рудах гидротермальных кварцево-сульфидных жильных месторождений медных руд (Бьют, США). Халькозин обогащается в основном пенной флотацией или выщелачиванием.

3.6.3. Ультразвуковая интенсификация выщелачивания халькозина

Халькозин, как уже отмечалось выше, – один из наиболее распространенных сульфидных минералов, встречающихся в медных рудах. В обычных условиях выщелачивания процесс растворения халькозина длителен и поэтому исследование этого процесса с точки зрения его интенсификации имеет весьма большое значение. Растворение (извлечение в раствор) меди из халькозина [65] интенсифицируется при воздействии ультразвуковых колебаний, в том числе в сравнении – при механическом перемешивании в подкисленном растворе сульфата окиси железа Fe₂(SO₄)₃ при одинаковой $t \approx 50^\circ\text{C}$.

Результаты ультразвуковой интенсификации выщелачивания меди из халькозиновой руды на частоте 18 кГц мощных колебаний интенсивностью 1 Вт/см² приведены на рис. 3.9.

Как видно из графиков *a – z* (сплошные линии) извлечение меди из халькозиновой руды под воздействием ультразвука по сравнению с механическим перемешиванием значительно возрастает, скорость же извлечения меди из халькозина, как под воздействием ультразвука, так и механическом перемешивании, для приведенных на рис. 3.9 данных от крупности измельчения халькозиновой руды изменяется незначительно.

Результаты извлечения меди в раствор из халькозиновой руды крупности $-0,5 \div 0,25$ (рис. 3.9, графики *a – z* пунктирными линиями) в зависимости от типа и концентрации растворителя приведены в табл. 3.4.

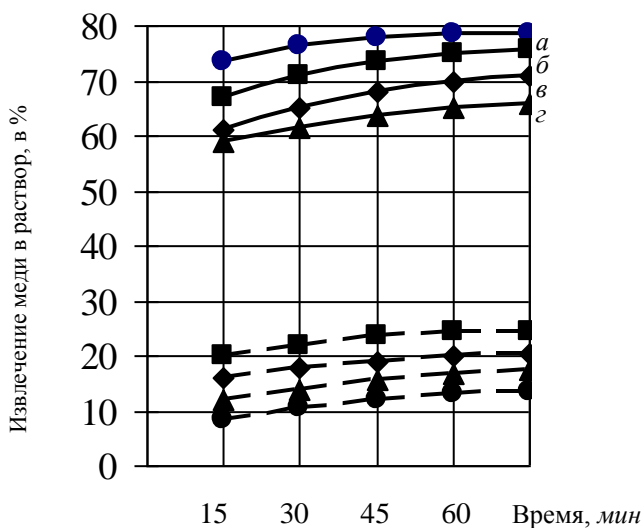


Рис. 3.9. Извлечение меди в раствор из халькозина в зависимости от времени воздействия ультразвука (сплошные линии) и механического перемешивания (пунктирные линии) при различной крупности (мм) минерала: *a* – $(-0,5 \div 0,25)$; *б* – $(-2 \div 1)$; *в* – $(-3 \div 2)$ и *z* – $(-10 \div 30)$

Таблица 3.4

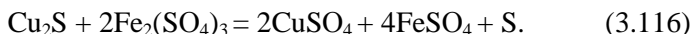
Извлечение меди из халькозиновой руды крупности – $0,5\div 0,25$ мм
в растворах различного типа и концентрации

№ п/п	Состав и концентрация исходного раствора	Извлечение меди в раствор, в %
1	1% H ₂ SO ₄	0,8
2	1% Fe ₂ (SO ₄) ₃	6,6
3	2% Fe ₂ (SO ₄) ₃ + 2% H ₂ SO ₄	60,9
4	5% Fe ₂ (SO ₄) ₃ + 2% H ₂ SO ₄	71,2

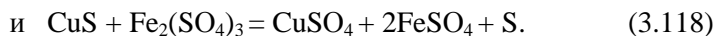
Длительность ультразвукового воздействия составляла 30 мин, температура раствора – в пределах 50°C.

Из таблицы 3.4 видно, что халькозин почти не растворяется в слабом растворе серной кислоты. Хорошими растворителями для халькозина являются подкисленные растворы солей трехвалентного железа, содержащие 2 и 5% Fe₂(SO₄)₃ и 2% серной кислоты.

Растворение халькозина в сульфате трехвалентного железа идет по следующей реакции:



Эта реакция является суммарной двух последовательно идущих процессов:



Извлечение меди в раствор из халькозиновой руды крупностью $0,5\div 0,25$ под воздействием УЗ-колебаний и при механическом перемешивании в зависимости от температуры (в диапазоне $10\div 50^\circ\text{C}$) подкисленного сульфата окиси железа приведено на рис. 3.10.

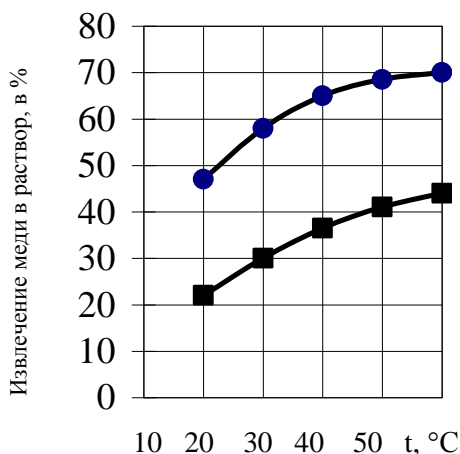


Рис. 3.10. Зависимость извлечения меди из халькозина от температуры:

1 – при механическом перемешивании и

2 – при ультразвуковом воздействии

3.6.4. Нормально-волновой контроль Н. Бражникова уровня жидкостей в гидрометаллургии

На рис. 3.11 приведена схема контроля уровня промышленных жидких сред с применением симметричной (или антисимметричной) нормальной волны Н. Бражникова [40; 65]. Бесконтактный метод контроля уровня жидких сред в процессах извлечения меди из халькозина рассматривается с изложением теории его автора.

В нормально-волновом АПС технологических жидкостей распространение симметричной и антисимметричной нормальной n волны (рис. 3.11) в стенке гидроемкости ГЕ (или трубопровода) подвержено акустическому одностороннему демпфированию жидкой КС (среда 2 на рис. 3.11).

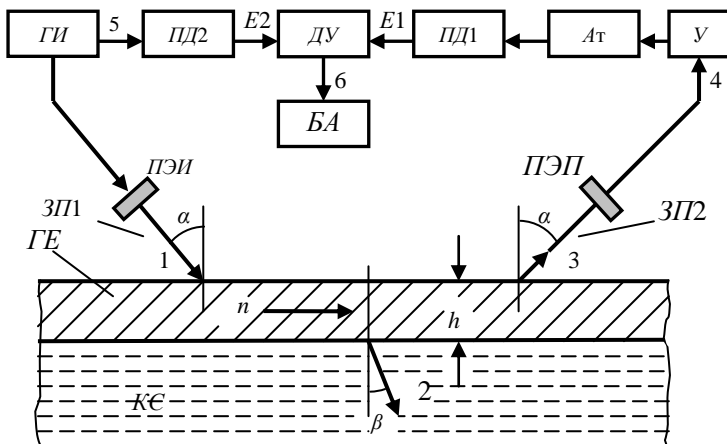


Рис. 3.11. Бесконтактная УЗ-система уровнетрии в выщелачивании меди из халькозина в гидрометаллургии и энергетике по методу Н. Бражникова

Условие возникновения нормальной волны вне зоны ее распространения (т.е. исключая участки $ГЕ$, находящиеся под $ЗП1$ и $ЗП2$) заключается в равенстве нулю входного АИМ S_{10} , при АИМ сред $S_1 \rightarrow 0$ и $S_2 \neq 0$. С учетом приближения $S_1 \rightarrow 0$ согласно выражению (3.49) условие $S_{10} = 0$ записывается в виде:

$$\frac{MS_2 + i(N^2 - M^2)}{M + iS_2} = 0. \quad (3.119)$$

Умножение на $-i$ числителя и знаменателя в (3.119) и перегруппировка слагаемых приводит к уравнению:

$$\frac{N^2 - M^2(1 + iS_2 / M)}{S_2 - iM} = 0, \quad (3.120)$$

из которого следует:

$$\frac{(N + M\sqrt{1 + iS_2 / M})(N - M\sqrt{1 + iS_2 / M})}{S_2 - iM} = 0. \quad (3.121)$$

В (3.121) функции N и M определяются выражениями (3.32), (3.33). В них продольный S_l и поперечный S_t , граничные АИМ-слоистой границы определяются из (3.76), а фазовые набеги

a и b (продольных l и поперечных t колебаний) в слое – согласно формулам (3.11) и (3.12).

В этих формулах для продольного компонента нормальной волны:

$$\cos \theta_l = \sqrt{1 - \frac{c_l^2}{c_{\zeta l}^2} \sin^2 \alpha} \quad (3.122)$$

или:
$$\cos \theta_l = \sqrt{1 - \frac{c_l^2}{c_n^2}}, \quad (3.123)$$

где c_l , c_t – скорости продольных l и поперечных t колебаний в материале твердого слоя (стенке гидроемкости $ГЕ$), $c_{\zeta l}$ и α – соответственно скорость и угол падения падающей волны 1 (рис. 3.11) в звукопроводе $ЗП1$.

Аналогично для поперечного компонента нормальной волны:

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - \frac{c_t^2}{c_{\zeta t}^2} \sin^2 \alpha} \quad (3.124)$$

или
$$\cos \theta_t = \sqrt{1 - c_t^2 / c_n^2}. \quad (3.125)$$

Из (3.121) непосредственно следуют отличающиеся от уравнений (3.72), (3.73) Г. Лэмба множителем при функции M (в виде корней функции от мнимой величины iS_2 / M) обобщенные уравнения симметричной n_s и антисимметричной n_a нормальных волн:

для n_s :
$$N + M \sqrt{1 + iS_2 / M} = 0, \quad (3.126)$$

для n_a :
$$N - M \sqrt{1 + iS_2 / M} = 0. \quad (3.127)$$

Для решения этих уравнений требуется определить корень квадратный из комплексного выражения:

$$\sqrt{1 + iS_2 / M} = \sqrt[4]{1 + S_2^2 / M^2} \exp(i\varphi_1 / 2), \quad (3.128)$$

где
$$\operatorname{tg} \varphi_1 = S_2 / M. \quad (3.129)$$

С учетом разложения экспоненты в (3.128) следует:

$$\sqrt{1 + iS_2 / M} = \sqrt[4]{1 + S_2^2 / M^2} (\cos(\varphi_1 / 2) + \sin(\varphi_1 / 2)). \quad (3.130)$$

Известны аналитические функции:

$$\cos(\varphi_1/2) = \sqrt{0,5(1 + \cos \varphi_1)}, \quad (3.131)$$

$$\cos \varphi_1 = 1/\sqrt{1 + tg^2 \varphi_1}. \quad (3.132)$$

Подстановка в (3.131) значения $\cos \varphi_1$ из (3.132) с учетом (3.129) приводит к выражению:

$$\cos(\varphi_1/2) = \sqrt{0,5\left(1 + 1/\sqrt{1 + S_2^2/M^2}\right)}. \quad (3.133)$$

Следовательно, вещественная часть корня комплексного выражения (3.130), в соответствии с (3.133), составляет:

$$\sqrt[4]{1 + \frac{S_2^2}{M^2}} \cos \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + S_2^2/M^2} + 1\right)}. \quad (3.134)$$

Из известного выражения $\sin \varphi_1/2 = \sqrt{(1 - \cos \varphi_1)/2}$ с учетом (3.129) и (3.132) следует:

$$\sin \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{0,5\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + S_2^2/M^2}}\right)}. \quad (3.135)$$

Величина мнимой части корня комплексного выражения (3.130) в соответствии с (3.135) составляет:

$$\sqrt[4]{1 + \frac{S_2^2}{M^2}} \sin \frac{\varphi_1}{2} = \sqrt{\frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + S_2^2/M^2} - 1\right)}. \quad (3.136)$$

Преобразование (3.136) путем умножения и деления подкоренного выражения на величину

$$\gamma_2 = \sqrt{1 + S_2^2/M^2} + 1 \quad (3.137)$$

дает формулу мнимой части (3.130):

$$\sqrt[4]{1 + \frac{S_2^2}{M^2}} \sin \frac{\varphi_1}{2} = \frac{S_2}{2M} \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{1 + S_2^2/M^2}}}. \quad (3.138)$$

Таким образом, входящая в уравнения симметричной и антисимметричных нормальных волн (3.126), (3.127) комплексная функция, в соответствии с (3.130), (3.134) и (3.138), определяется выражением:

$$M \sqrt{1 + iS_2 / M} = M + S_c + iS_\delta, \quad (3.139)$$

где скоростной S_c и абсорбционной S_δ АИМ демпфирующего воздействия KC на распространение нормальной волны в стенке $ГЕ$ (твердом слое толщиной h):

$$S_c = M \left(\sqrt{0,5(\sqrt{1 + S_2^2 / M^2} + 1)} - 1 \right), \quad (3.140)$$

$$S_\delta = \frac{S_2}{2} \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{1 + S_2^2 / M^2}}}. \quad (3.141)$$

В соответствии с (3.139) уравнения (3.126), (3.127) для симметричной n_s и антисимметричной n_a нормальных волн принимают вид для n_s : $N + M + S_c + iS_\delta = 0$, (3.142)

$$\text{для } n_a: N - M - S_c - iS_\delta = 0. \quad (3.143)$$

С учетом (3.79) и (3.80), уравнения (3.142) и (3.143) записываются в виде:

$$\text{для } n_s: S_l \operatorname{ctg} \frac{a}{2} + S_l \operatorname{ctg} \frac{b}{2} + S_c + iS_\delta = 0, \quad (3.144)$$

$$\text{для } n_a: S_l \operatorname{tg} \frac{a}{2} + S_l \operatorname{tg} \frac{b}{2} - S_c - iS_\delta = 0. \quad (3.145)$$

С достаточно высокой степенью точности скоростной АИМ воздействия KC на нормальную волну S_c , определяемый выражением (3.140), может быть представлен выражением:

$$S_c = \frac{S_2^2}{8M \sqrt{1 + 0.6S_2^2 / M^2}}. \quad (3.146)$$

Волна 1 (рис. 3.11), излученная в $ЗП1$, распространяясь в нем со скоростью $c_{ЗП}$, падает на стенку $ГЕ$ под углом α , определяемым (3.81), вызывая возбуждение нормальной волны в стенке при ωh (ω – круговая частота $УЗ$ -колебаний, h – толщина стенки $ГЕ$), удовлетворяющем уравнению (3.144) для симметричной n_s либо (3.145) для антисимметричной n_a односторонне демпфированной волны. На пути распространения нормальной волны (от $ЗП1$ до $ЗП2$) происходит отток части акустической

энергии нормальной волны n из стенки гидроемкости в жидкостную $KС$ в виде энергии наклонной (под углом β) продольной волны 2. Отток акустической энергии вызывает затухание амплитуды нормальной волны n . Угол преломления волны оттока в $KС$ определяется формулой:

$$\beta = \arcsin (c_{KC}/c_n). \quad (3.147)$$

Ослабленная нормальная волна, достигнув $ЗП2$, трансформируется в нем в волну 3, аналогичную возбуждающей волне 1 в $ЗП1$. Под действием волны 3 $ПЭП$ вырабатывает электрический импульсный сигнал 4, несущий информацию об уровне $KС$.

Через усилитель $У$ и аттенюатор $Ат$ сигнал 4 поступает в пиковый детектор $ПД1$, преобразуясь им в аналоговый сигнал E_1 , который поступает на вход дифференциального устройства $ДУ$. Из генератора $ГИ$ возбуждающий импульс 5 поступает в пиковый детектор $ПД2$, выходной аналоговый сигнал E_2 которого подается на левый вход $ДУ$. В последнем происходит сравнение аналоговых сигналов E_1 и E_2 по амплитуде. Итоговый сигнал 6 $ДУ$ (рис. 3.11) поступает в блок автоматики $БА$, управляющий уровнем $KС$.

3.6.5. Дисперсия и зарождение нормальных волн

Дисперсия волн. Входящие в уравнения (3.144), (3.145) нормальных волн аргументы a и b в соответствии с (3.11), (3.14) являются частотно-зависимыми функциями. Следовательно, полученные из решения этих уравнений фазовые скорости симметричных c_{ns} и антисимметричных c_{na} волн обладают дисперсией (т.е. частотной зависимостью). Полученные решения фазовой скорости графически нагляднее привести в виде зависимости не от произведения $f \cdot h$ частоты f на толщину твердого слоя h , а от толщины h , деленной на длину λ_t поперечной волны в материале слоя

$$h/\lambda_t = h \cdot f / c_t, \quad (3.148)$$

где c_t – скорость поперечной волны t в материале слоя. При этом акцентируется внимание на безразмерности аргумента h/λ_t .

На рис. 3.12 показаны дисперсионные характеристики первых трех мод симметричных HV (s_0 , s_1 , s_2) в твердом слое из углеродистой стали. Зависимость фазовой скорости c_n нормальной волны дана в пределах $0 \div 8000$ м/с и условно от 8000 м/с до ∞ . Здесь c_n – скорости рэлеевской волны, определяемые выражениями (3.144) и (3.145). Расчеты производились для твердых сред (имеющих коэффициент Пуассона $\sigma = 0,2931$) в практически используемом в УЗ-контроле диапазоне безразмерного аргумента:

$$h/\lambda_t = 0 \div 3. \quad (3.149)$$

УЗ-измерение коэффициента Пуассона свидетельствует, что его значения для большого числа твердых сред находятся в диапазоне $0,07 \div 0,45$. Величину $\sigma = 0,3404$ имеет алюминий и $\sigma = 0,2931$ – углеродистая сталь. Достаточно близки к ним по этой величине висмут (0,335), олово (0,334), медь (0,3444). Из этих сред конструкционными материалами для трубопроводов и гидроемкостей являются алюминий и медь. Для других металлов и сплавов характер дисперсионных кривых близок к изображенным на рис. 3.12.

Из приведенных дисперсионных кривых видно, что скорости всех мод симметричных и антисимметричных (кроме a_0) волн по мере возрастания h/λ_t уменьшаются, достигая значения скорости c_S рэлеевской волны при $h/\lambda_t = \infty$.

Зарождение нормальных волн. Нулевая мода симметричной волны s_0 зарождается при

$$h/\lambda_t = 0 \quad (3.150)$$

как продольная волна сжатия. Остальные моды симметричных нормальных волн s_1 , s_2 , s_3 зарождаются на *критических* частотах, имея скорость (при зарождении):

$$c_{S_n} = c_t / \sin \mathbf{O} = \infty, \quad (3.151)$$

представляя собой стоячую волну продольных и поперечных колебаний при вполне определенных значениях частотных аргументов h/λ_t и h/λ_l .

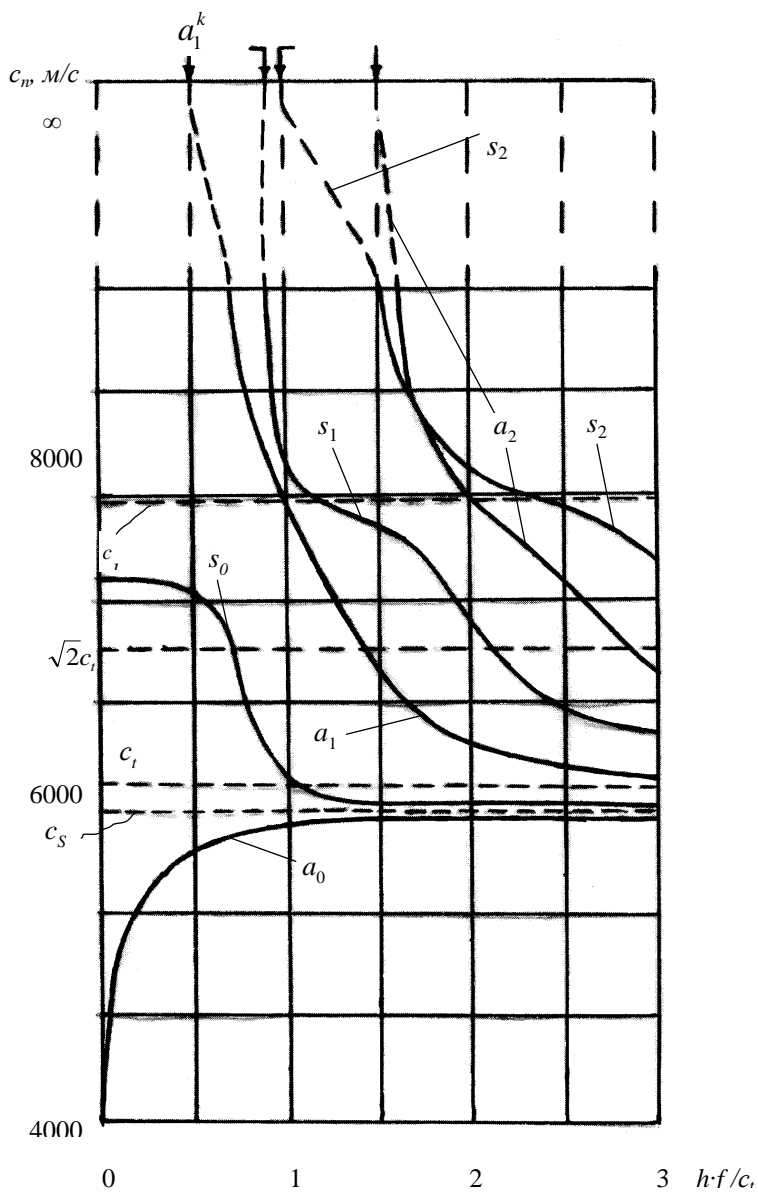


Рис. 3.12. Дисперсионные характеристики нормальных волн в твердом слое с коэффициентом Пуассона $\sigma = 0,2931$

Эти аргументы соответствуют нечетному числу продольных полуволен λ_l , укладываемых по толщине h слоя для продольно-зарождающихся симметричных нормальных волн (*HB*):

$$h / \lambda_l = 1/2, 3/2, 5/2, \dots, \quad (3.152)$$

и целому числу поперечных волн λ_t , укладываемых по толщине h слоя для поперечно-зарождающихся симметричных *HB*:

$$h / \lambda_t = 1, 2, 3, \dots, \quad (3.153)$$

Следует отметить, что при аргументах ниже

$$h / \lambda_l = 1/2 \quad \text{и} \quad h / \lambda_t = 1 \quad (3.154)$$

зарождение симметричных *HB* отсутствует.

Из приведенных на рис. 3.12 дисперсионных кривых симметричных *HB*, нулевая мода s_0 и мода s_1 зарождаются как *продольные*, в том числе для s_0 – как продольная волна сжатия, имеющая скорость c_{s_0} , близкую к стержневой скорости c_b . Моды волн a_1, s_2 зарождаются как поперечные волны, имеющие в материале слоя скорость c_t поперечных колебаний.

Рассмотрим волновое уравнение (3.144) при малости аргументов a и b , их тангенсов и функции S_2/M , определяемых выражениями (3.11) и (3.12). Скоростной S_c и абсорбционный S_δ *АИМ* согласно (3.140) и (3.141) с учетом малости S_2^2/M^2 составляют величины:

$$S_c = M \sqrt{\frac{1}{2} \left(2 + \frac{S_2^2}{2M^2} \right)} - 1 = \frac{S_2^2}{8M}, \quad (3.155)$$

$$S_\delta = \frac{S_2}{2} \sqrt{\frac{2}{2 + 0.5S_2^2/M^2}} = \frac{S_2}{2} \left(1 - \frac{S_2^2}{8M^2} \right). \quad (3.156)$$

При этом (3.144) принимает вид волнового уравнения для малых аргументов a и b (когда $S_2^2/M^2 \ll 1$):

$$S_1 \operatorname{ctg} \frac{a}{2} + S_1 \operatorname{ctg} \frac{b}{2} + \frac{S_2^2}{8M} + i \frac{S_2}{2} = 0 \quad (3.157)$$

или после умножения на $\operatorname{tg}(a/2)$ и замены тангенсов на их аргументы с учетом значений a и b из (3.11), (3.12):

$$S_t + \frac{c_t \cos \theta_\ell}{c_l \cos \theta_l} S_t + \frac{aS_2^2}{16M} + \frac{aS_2}{4} = 0. \quad (3.158)$$

Нулевая мода s_0 симметричной волны при зарождении ($a = 0$) теряет мнимое слагаемое в (3.158), показывая *отсутствие оттока* акустической энергии из твердого слоя в демпфирующую его жидкую среду 2 с граничным АИМ S_2 . Следовательно, при $h/\lambda_t = 0$, коэффициент затухания нормальной волны $\delta_{s_0} = 0$.

С учетом значений продольного S_t и поперечного S_r , граничных АИМ слоя из (3.20) и (3.21) для S_{0t} и S_{0r} , уравнение (3.158) преобразуется в уравнение вида:

$$\cos^2 2\theta_t + \frac{c_t^2 \cos^2 \theta_l}{c_l^2 \cos^2 \theta_l} \sin^2 2\theta_t = 0. \quad (3.160)$$

Из (3.160) с учетом

$$\cos^2 2\theta_t = (1 - 2\sin^2 \theta_t)^2, \quad \sin^2 2\theta_t = 4\sin^2 \theta_t \cdot \cos^2 \theta_t, \quad (3.161)$$

$$\frac{c_t^2}{c_l^2} \cos^2 \theta_l = \frac{c_t^2}{c_l^2} - \sin^2 \theta_t \quad (3.162)$$

следует уравнение с одной переменной $\sin^2 \theta_t$:

$$(1 - 2\sin^2 \theta_t)^2 + 4 \left(\frac{c_t^2}{c_l^2} - \sin^2 \theta_t \right) \sin^2 \theta_t = 0. \quad (3.163)$$

Дальнейшее упрощение ведет к следующему результату:

$$1 - 4 \left(1 - \frac{c_t^2}{c_l^2} \right) \sin^2 \theta_t = 0. \quad (3.164)$$

Согласно закону непрерывности скоростей касательного следа волн отношение скоростей поперечной t и нормальной n волн

$$c_t / c_n = \sin \theta_t. \quad (3.165)$$

Скорость C_{S_0} зарождающейся НВ s_0 , как следует из уравнения (3.164) и выражения (3.165), рассчитывается по формуле:

$$c_{s_0} / c_t = \sin^{-1} \theta_t = 2\sqrt{1 - c_t^2 / c_l^2}. \quad (3.166)$$

Так, для слоя из углеродистой стали *Ст.40* скорость c_{s_0} нулевой моды симметричной волны ($h/\lambda_t = 0$), зарождающейся как продольная волна сжатия (на рис. 3.12 дисперсионной кривой s_0), составляет

$$c_{s_0} (\text{Ст.40}) = 1,6820c_t = 5433,8 \text{ м/с}. \quad (3.167)$$

Библиографический список к главе 3

1. **Бражников, Н.И.** Способ ввода волны в расходомере с жидкостным звукопроводом / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 151053. – БИ. – № 20. – 1962.
2. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер агрессивных жидкостей и пульп. Часть 2 / Н.И. Бражников // Отчет СКБ ЦМА 22-11-2. – М., 1958.
3. **Биргер, Г.И.** УЗ-концентратор растворов / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников // Авт. св-во № 134904. – БИ. – № 1. – 1961.
4. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой концентратор цинка в цинковом электролите / Н.И. Бражников // Отчет СКБ ЦМА 681-11-1. – М., 1959.
5. **Биргер, Г.И.** Измерения концентрации химических и гидрометаллургических растворов по скорости звука / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников // УЗ-КИП. – М.: ЦИНТИЭП, 1960. – С. 49–62.
6. **Бражников, Н.И.** Способ автоматической компенсации погрешностей фазовых УЗ-расходомеров и устройство для его осуществления / Н.И. Бражников, Н.Ф. Орлова // Авт. св-во № 178128 от 2.11.1962. – БИ. – № 2. – 1966.
7. **Бражников, Н.И.** Устройство для измерения УЗ-скорости / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 204038. – БИ. – № 21. – 1967.
8. **Бражников, Н.И.** Теоретический анализ ультразвуковых расходомеров / Н.И. Бражников // Измерительная техника. – 1966. – № 8. – С. 57–62.
9. **Бражников, Н.И.** УЗ-расходомер жидких сред / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 287337. – БИ. – № 35. – 1970.
10. **Бражников, Н.И.** УЗ-расходомер жидких сред / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 288333. – БИ. – № 36. – 1970.

11. **Бражников, Н.И.** Способ УЗ-контроля скорости потока сред в трубопроводах / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // Авт. св-во № 459731. – БИ. – № 11. – 1975.
12. **Бражников, Н.И.** Экспресс-контроль малых расходов жидкости ультразвуковыми методами / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // докл. XIII межвуз. научн. конф. по применению ультразвуки. – М.: МОПИ, 1969.
13. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер переносного типа / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // Методы и приборы для измерения расходов и количеств жидкости, газа и пара. – Л.: ВНИИМ, 1969. – С. 59.
14. **Бражников, Н.И.** Фазовые соотношения в акустическом тракте расходомера со съёмным пьезопреобразователем / Н.И. Бражников, В.В. Калинин // тез. XVII научн.-метод. конференции. Таганрог: ТРТИ, 1971. – С. 36
15. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 371438. – БИ. – № 12. – 1973.
16. **Бражников, Н.И.** Устройство для экспресс-контроля расхода жидкостей / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 457918, Б.И. – № 8, 1975.
17. **Бражников Н.И.** Ультразвуковой фазовый двухканальный расходомер / Н.И. Бражников // Приборы и системы управления. – 1972. – № 11. – С. 13–14.
18. **Биргер, Г.И.** Разработка комплекта приборов для автоматического анализа алюминатных растворов в процессе получения глинозёма из нефелина / Г.И. Биргер и др. // Отчёт НИР 46-11. – М.: СКБ ЦМА, 1964.
19. **Бражников, Н.И.** УЗ-методы измерения плотности вещества / Н.И. Бражников // Приборы и системы управления. – 1976. – № 10. – С. 17–21.
20. **Бражников, А.И.** О контроле скорости потока жидкости посредством высокочастотных импульсов по методу Н.И. Бражникова / А.И. Бражников и др. // Наука и технологии. Избр. тр. Российской школы «К 70-летию Г.П. Вяткина». – М.: РАН, 2005. – С. 551–555.
21. **Каневский, И.Н.** Ультразвуковые методы контроля состава и свойств вещества Н.И. Бражникова / И.Н. Каневский // Акустический журнал. – 1969. – Т. 15. – № 2. – С. 316–317.
22. **Бражников, Н.И.** Способ УЗ-дискретной сигнализации уровня сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 333410 от 14.04. 1970. – БИ. – № 11. – 1972.

23. **Бражников, Н.И.** Способ контроля физических параметров жидкостей / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 425098 от 18.05.1970. – БИ. – № 15. – 1974.
24. **Бражников, Н.И.** Бесконтактный УЗ-уровнемер Н.И. Бражникова / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 418737. – БИ. – № 9. – 1974.
25. **Белевитин, В.А.** Бесконтактный автоматический контроль уровня жидкости по ультразвуковому методу Н.И. Бражникова с применением антисимметричной нормальной волны / В.А. Белевитин и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 10. – С. 37–40.
26. **Бражников, Н.И.** Устройство для автоматического контроля массы жидкости в резервуаре / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 524124. – БИ. – № 28. – 1976.
27. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой измеритель уровня жидкости в резервуарах. / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 1435943. – БИ. – № 41. – 1988.
28. **Бражников, Н.И.** Формирователь сигналов управления дозированием / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 843196. – БИ. – № 24. – 1981.
29. **Бражников, Н.И.** Бесконтактный ультразвуковой сигнализатор уровня / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 842416. – БИ. – № 24. – 1981.
30. **Бражников, Н.И.** УЗ-измеритель концентрации растворов / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина // Авт. св-во № 1231453. – БИ. – № 18. – 1986.
31. **Бражников, Н.И.** Устройство для измерения плотности жидкостей / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина // Авт. св-во № 1364973. – БИ. – № 1. – 1988.
32. **Бражников, Н.И.** Способ контроля физических параметров жидкостей. / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 1377715. – БИ. – № 9. – 1988.
33. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой концентратомер / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 1408355. – БИ. – № 25. – 1988.
34. **Бражников, Н.И.** Устройство для контроля уровня жидкости. / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 1377597. Приор. 12.07.1976. – БИ. – № 8. – 1988.
35. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой сигнализатор уровня расплавленного металла / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 1377598. – БИ. – № 8. – 1988.
36. **Бражников, Н.И.** Бесконтактный ультразвуковой сигнализатор уровня / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 842416. – БИ. – № 24. – 1981.

37. **Бражников, Н.И.** Новый УЗ-метод бесконтактной уровнеметрии / Н.И. Бражников, В.В. Киселева, Б.А. Никишин // Современные методы и приборы автоматического контроля и регулирования технологических процессов. – М.: МДНТП, 1988. – С. 46–50.
38. **Бражников, Н.И.** Способ дискретно-непрерывного автоматического контроля уровня гидromеталлургических сред в резервуаре / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина // Авт. св-во № 1435947. от 09.09.74. – БИ. – № 41. – 1988.
39. **Бражников, Н.И.** Способ непрерывного измерения уровня жидких сред / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 1462113. – БИ. – № 8. – 1989.
40. **Белевитин, В.А.** Бесконтактный автоматический контроль уровня жидкости по УЗ-методу Н.И. Бражникова с применением антисимметричной нормальной волны / В.А. Белевитин и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 10. – С. 37–40.
41. **Якубович, И.А.** Ультразвуковые методы контроля свойств и состава вещества Н.И. Бражникова / И.А. Якубович // Измерительная техника. – 1967.– № 8. – С. 84.
42. **Бражников, Н.И.** УЗ-способ Н.И. Бражникова измерения толщины материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 308607. – БИ. – № 37. – 1978.
43. **Бражников, Н.И.** Акустический бесконтактный способ контроля толщины листовых материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 479406 от 16.09.1968. – БИ. – № 37. – 1978.
44. **Brazhnikov, N.I.** Method for checking of sheet materials by using acoustic oscillation and device for effecting same / N.I. Brazhnikov // USA Pat. 4117732, 1976.
45. **Бражников, Н.И.** УЗ-импульсные методы измерения толщины металлов / Н.И. Бражников [и др.] // докл. XIII межвуз. науч. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
46. **Бражников, Н.И.** Акустический амплитудный метод контроля толщины твёрдых сред / Н.И. Бражников // докл. XIII межвуз. научн. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
47. **Королев, М.В.** Портативный УЗ-толщиномер УТ-31МЦ / М.В. Королев, В.В. Аристов, В.В. Урываев // Дефектоскопия. – 1977. – № 2. – С. 18.

48. **Бражников, Н.И.** Исследование зависимости затухания ультразвука от толщины тонких пленок, помещённых в газообразную среду / Н.И. Бражников, В.С. Заводов // тез. VII всес. конф. – Л., 1971. – С. 205–206.
49. **Бражников, Н.И.** Устройство для контроля физических размеров малых объектов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 403950. – БИ. – № 43. – 1973.
50. **Бражников, Н.И.** Устройство для бесконтактного контроля физических параметров движущегося объекта / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 393667. – БИ. – № 33. – 1973.
51. **Бражников, Н.И.** УЗ-устройство для измерения толщины движущихся объектов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 485377. – БИ. – № 35. – 1975.
52. **Бражников, Н.И.** Способ измерения толщины движущегося объекта / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 627697. – БИ. – № 46. – 1977.
53. **Бражников, Н.И.** Иммерсионный способ контроля физических свойств материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 918841. – БИ. – № 13. – 1982.
54. **Скрипник, Ю.А.** Ультразвуковой способ определения толщины пленочных изделий / Ю.А. Скрипник, Н.И. Бражников, В.Г. Здоренко // Авт. св-во № 1535139. – БИ. – № 28. – 1989.
55. **Некрасов, А.Г.** Способ измерения толщины ленточных материалов / А.Г. Некрасов, Н.И. Бражников, Л.А. Кондрашов // Пат. РФ. № 1525454, 1993.
56. **Белевитин, В.А.** Применение дефектоскопов УД2-12 для контроля толщины сверхтонкой стали / В.А. Белевитин и др. // Сталь. – 2006. – № 1. – С. 44.
57. **Бражников, Н.И.** Импульсный метод контроля поверхностной плотности фольгопроката по степени его аэроакустической прозрачности / Н.И. Бражников, А.И. Бражников // Производство проката. – 2003. – № 8. – С. 41–43.
58. **Выборнов, Б.И.** Методы ультразвуковой дефектоскопии / Б.И. Выборнов – М.: Металлургия, 1985.
59. **Белевитин, В.А.** Ультразвуковой бесконтактный контроль поверхностной плотности фольги способом Н.И. Бражникова / В.А. Белевитин и др. // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – № 10. – С. 35.
60. **Бражников, Н.И.** Измерение концентрации гидromеталлургических растворов по скорости ультразвука / Н.И. Бражников // Отчет НИР 500-11-2. – М.: СКБ ЦМА, 1958.

- 61 **Бражников, Н.И.** Распространение ультразвуковой волны в бесконтактном акустическом датчике ультразвуковых расходомеров // Н.И. Бражников // докл. IX межвуз. науч. конф. по применению ультраакустики к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1961.
62. **Brazhnikov, N.I.** Method of measuring properties of a fluid in a container and device for realizing same / N.I. Brazhnikov, N.N. Khavsky, V.F. Kravchenko // Japan. Pat. 57-40464. – Int. Cl. G01B 17/00. – 1976.
63. **Бражников, Н.И.** Измерение концентрации гидрометаллургических растворов по скорости ультразвука // Отчет НИР 500-11-1. – М.: СКБ ЦМА, 1958.
64. **Brazhnikov, N.I.** Kontrollverfahren und Einrichtung für Gas-Flüssigkeits- und -Flüssigkeit-Grenzflächen / N.I. Brazhnikov // Deutsch. Pat. № 2631037. – 1977.
65. **Русихина, Л.П.** Использование УЗ-колебаний при интенсификации выщелачивания медных руд / Л.П. Русихина, Н.В. Черкашин // Техническая акустика в горном деле. – М.: МГИ, 1968. – С. 114–125.

Глава 4

ВРЕМЯ-АМПЛИТУДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ АПС. УЛЬТРАЗВУК В ПРОИЗВОДСТВЕ МЕДИ

Основными информативными параметрами ультразвуковой волны, проходящей через контролируемую среду (*КС*) и волны (акустически контактирующие с *КС*) являются время [1–30], фаза [31–60], частота [61–100], амплитуда давления [101–120]. Данные параметры и их взаимосвязь со свойствами технологических сред являются физической основой разработок приборов и систем ультра-звукового контроля (*УЗ*-контроля).

4.1. Измерительные преобразователи без *УЗ*-преломления

К акустическим преобразователям свойств (*АПС*) технологических сред относятся контактные и бесконтактные модификации. Общим свойством для них является то, что ультразвуковая (*УЗ*) волна падает перпендикулярно к границам раздела сред, контролируемых *АПС*. Следует учитывать, что в преобразователях на пьезоэлектрический приемник (*ПЭП*) поступают многократные отражения от этих сред, что представляет в ряде случаев существенные неудобства для фазовых методов исследований по скорости *УЗ*-волны. Однако вследствие простоты конструкции и малого ослабления амплитуды сигнала они находят достаточно широкое практическое применение, к примеру для контроля как технологических процессов, так и изделий и полуфабрикатов обработки металлов давлением (ковки, прокатки, прессования).

Основными параметрами измерительного акустического преобразователя свойств (*АПС*) сред без преломления в них *УЗ*-волны являются [19; 33; 113; 120–145]:

- 1) время распространения прямой волны τ ;
- 2) общий коэффициент прозрачности (коэффициент пропускания *УЗ*-волны) D границ сред;

3) коэффициент ослабления $UЗ$ -волны k_δ , вызванного дифракцией и затуханием $UЗ$ -волны в средах.

4.1.1. Время распространения волны, коэффициент прозрачности АПС сред

Схемы *контактных АПС* сред без преломления $UЗ$ -волны ($\theta_{1l} = \theta_{1r} = 0$) приведены на рис. 2.1 главы 2.

Полное время распространения прямой волны τ в *контактных АПС* без преломления (рис. 2.1 *а, б*) включает в себя наряду с временем распространения $2R_c/c$ в исследуемой среде, также удвоенное время распространения $2\tau_{Пр}$ в протекторах (*Пр*), входящих наряду с пьезоэлементом *ПЭ* и демпфером в состав *ПЭП* и пьезоэлектрического излучателя (*ПЭИ*):

$$\tau = 2R_c / c + 2\tau_{Пр}, \quad (4.1)$$

где $2R_c$ – поперечный размер контролируемой среды *КС*. В *АПС* эхо-режима (рис. 2.1, *в*) время в *КС* удваивается (волны 1, 2).

Схемы *бесконтактных АПС* твердых сред приведены на рис. 3.2. Время распространения в *бесконтактных АПС* твердых сред (рис. 3.2, *а* и *б*) зависит от длины $H_0 - R_c$ жидкостного звукопровода (*ЗП*), находящегося между *КС* и *ПЭИ* (*ПЭП*), и скорости c_1 $UЗ$ -волны в ней:

$$\tau = \frac{2R_c}{c} + 2\tau_{Пр} + 2\frac{2H_0 - 2R_c}{c_1}. \quad (4.2)$$

В *бесконтактных АПС* жидких сред (рис. 3.4, *а* и *б*) в выражение τ входит, кроме того, удвоенное время распространения $UЗ$ -волны в стенке (толщиной h_c) трубопровода или резервуара:

$$\tau = \frac{2R_c}{c} + 2\tau_{Пр} + 2\frac{h_c}{c_1}. \quad (4.3)$$

Поскольку в *контактных преобразователях* промежуточные среды отсутствуют, а затухание в тонком *контактном слое* пренебрежительно мало, то коэффициент пропускания $UЗ$ -волны (или коэффициент прозрачности D)

$$D = 1. \quad (4.4)$$

Для бесконтактных преобразователей без преломления общий коэффициент прозрачности D границ раздела в АПС сред без учета реверберации может быть записан следующим образом:

$$D = D_1 D_2, \quad (4.5)$$

где D_1, D_2 – коэффициенты прозрачности волны на границах раздела сред «стенка (или ЗП) – КС» и «КС – стенка (или ЗП)».

В расчетах (главы 1–3) УЗ-волна переходит из среды 1 в среду 2. Поэтому для первой и второй границ

$$z_{1l} = z_1, \quad z_{2l} = z, \quad (4.6)$$

где $z_1 = \rho_1 c_1$ – удельный АИМ материала ЗП или стенки трубопровода (резервуара), $z = \rho c$ – удельный АИМ КС.

Следовательно коэффициенты прозрачности границ раздела сред в АПС сред:

$$D_1 = \frac{2z}{z + z_1}, \quad D_2 = \frac{2z_1}{z + z_1}. \quad (4.7)$$

Общий коэффициент D в соответствии с (9.5)–(9.6) определяется выражением:

$$D = 4zz_1 / (z + z_1)^2. \quad (4.8)$$

4.1.2. Ослабление волны, акустическая реверберация

Коэффициент ослабления УЗ-волны k_δ , вызванного дифракцией и затуханием УЗ-волны в средах преобразователя, определяется выражениями [19]:

- для контактных преобразователей:

$$k_\delta = \exp(-2R_c \delta), \quad (4.9)$$

- для бесконтактных преобразователей:

$$k_\delta = \exp[-2(R_c \delta + h_c \delta_1)], \quad (4.10)$$

где δ, δ_1 – коэффициенты затухания УЗ-волн в КС и стенке (или ЗП) толщиной h_c .

Для жидкостного $ЗП$ в выражении (4.10) величина h_c заменяется на $H_0 - R_c$:

$$k_\delta = \exp[-2(R_c\delta + H_0 - R_c\delta_1)] \quad (4.11)$$

Исключение влияния *реверберации* в контактных преобразователях для измерений с применением *УЗ-непрерывных* колебаний обеспечивается при выполнении условий:

– без протекторов или при полуволновых протекторах:

$$\left| \frac{z_\delta - z}{z_\delta + z} \right| \leq 0,1 \exp(2R_c\delta), \quad (4.12)$$

– при четвертьволновых протекторах:

$$\left| \frac{z_{Пр}^2 - zz_\delta}{z_{Пр}^2 + zz_\delta} \right| \leq 0,1 \exp(2R_c\delta). \quad (4.13)$$

В контактных *АПС* для *импульсных* ультразвуковых систем без применения временной электронной *селекции* должны выполняться антиреверберационные условия:

– при отсутствии протекторов:

$$\left| \frac{z_n - z}{z_n + z} \right| \leq 0,1 \exp(2R_c\delta), \quad (4.14)$$

– при наличии протекторов:

$$\left| \frac{z_{Пр} - z}{z_{Пр} + z} \right| \leq 0,1 \exp(2R_c\delta). \quad (4.15)$$

В бесконтактных *АПС* сред без преломления, помимо двукратно отраженной волны (от приемника *ПЭП*, а затем от излучателя *ПЭИ*), на *ПЭП* поступают также многократные отражения от границ промежуточных *ЗП* с *КС*. Вследствие этого в преобразователях такого вида исключение влияния реверберации является весьма сложной задачей и выполняется лишь в отдельных случаях. Так, в частности, если это конструктивно возможно, стремятся изготовить *ЗП* (что предпочтительнее) или стенку трубопровода из материала с акустическим сопротив-

лением, близким к акустическому сопротивлению $KС$. Если это не удастся выполнить, то для $УЗ$ -систем, где требуется исключение акустической реверберации, применяют преобразователи с одной или двумя преломляющими поверхностями между $KС$ и $ПЭИ$ (или $ПЭП$).

4.2. $УЗ$ -преобразователи с одним преломлением волны между $ПЭИ$ ($ПЭП$) и контролируемой средой

Общей характеристикой $АПС$ сред с ультразвуковым преломлением $УЗ$ -волны является то, что волна переходит границы раздела сред преобразователя под углом, отличающимся от прямого. Вследствие этого, при определенным образом рассчитанных параметрах, можно исключить попадание на пьезоэлектрический приемник ($ПЭП$) многократных отражений от поверхностей раздела сред. Эта возможность имеет существенное практическое значение.

4.2.1. Лучевая акустика $АПС$ сред

Твердые среды и звукопроводы. На рис. 4.1 приведено распространение центральных лучей в модификациях преобразователей с одной преломляющей поверхностью для твердых $KС$ контролируемых изделий и полуфабрикатов в обработке давлением и др.

Поверхности раздела сред преобразователя, как правило, имеют ось симметрии, которая называется осью $АПС$ сред. В случае цилиндрических $KС$ эта ось совпадает с осью цилиндра.

Начало декартовой системы координат поместим в центре дискового пьезоэлектрического излучателя ($ПЭИ$) радиусом a . Ось X направим параллельно оси $АПС$, а ось $У$ – перпендикулярно к ней в плоскости, проходящей через ось $ПЭП$. Геометрическое положение распространяющихся лучей определяется координатами точки излучения x_0, y_0, z_0 и углом α_0 между осью

ПЭИ и нормалью к оси АПС. Угол α_0 называется углом излучения.

Луч, выходящий из центра ПЭИ в звукопровод (ЗП), называется *центральной*; лучи, распространяющиеся в плоскости, проходящей через ось преобразователя и ось ПЭИ, называются *субцентральной*; все остальные лучи – *периферическими*.

Направления распространения лучей в средах, в том числе и в контролируемой среде (КС), можно определить как для пространственной прямой в аналитической геометрии, направляющими косинусами l, m, n ; углами с нормальями в точках падения α и β ; координатами x, y, z точек пресечения границ сред и направляющими косинусами m_n, n_n нормали в этих точках.

При использовании контактного преобразователя с твердыми внешними ЗП (рис. 4.1) в твердой КС распространяются две волны: продольная ll и поперечная lt , трансформирующиеся из падающей на поверхность продольной волны l .

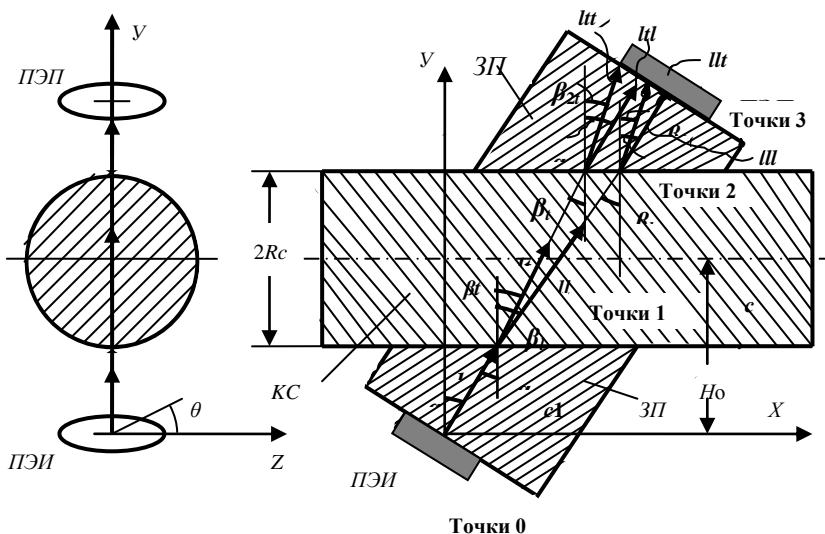


Рис. 4.1. Схема распространения центральной волны в контактном АПС с одной преломляющей поверхностью для твердых сред

Таблица 4.1

Параметры центрального и субцентрального лучей в АПС сред с одной преломляющей поверхностью между ПЭМ (ПЭИ) и РС

№ точки	Вид лучей, падающих в данную точку		Ход луча, синус угла падения	Время распространения	Координаты	
	α	θ σ			x	y
1	l	l	$L_{0,1} = \frac{H_0 - R_c - y_0}{\cos \alpha}$ $l_0 = \sin \alpha$	$\tau_{0,1} = \frac{L_{0,1}}{c_{11}}$	$x_0 = -r \sin \theta \cos \alpha$ $x_1 = x_0 + l_0 L_{0,1}$	$y_0 = -r \sin \theta \cos \alpha$ $y_1 = H_0 + R_c$
2	h	h	$L_{0,2} = 2R_c / \cos \beta_{11}$ $l_{11} = \sin \beta_{11} = \frac{c_{11}}{c_{12}} \sin \alpha$	$\tau_{1,2} = \frac{L_{1,2}}{c_{12}}$	$x_2 = x_1 + l_{11} L_{1,2}$	$y_2 = H_0 + R_c$
2	h	h	$L_{1,2} = 2R_c / \cos \beta_{10}$ $l_{10} = \sin \beta_{10} = \frac{c_{10}}{c_{11}} \sin \alpha$	$\tau_{1,3} = \frac{L_{1,2}}{c_{11}}$	$x_2 = x_1 + l_{10} L_{1,2}$	$y_3 = H_0 + R_c$
2	h	h	$L_{2,3} = \frac{H_0 - R_c}{\cos \alpha}$	$\tau_{2,3} = \frac{L_{2,3}}{c_{11}}$	$x_{wp} = \lambda [(H_0 - R_c) \operatorname{tg} \alpha + R \operatorname{tg} \beta_{10}]$	$y_{wp} = 2H_0$

Окончание табл. 4.1

№ точки	Вид лучей, падающих в данную точку.			Ход луча, с учетом угла падения	Время распространения	Координаты	
	α	β	θ			x	y
2	<i>lll</i>	<i>lll</i>	<i>lll</i>	$L_{2,3} = \frac{H_0 - R_c + y_0}{\cos \alpha}$ $L_{1,3} = \frac{L_{2,3}(lll)}{\cos(\alpha - \beta_{2,1})}$ $l_{2,1} = \sin \beta_{2,1} = \frac{c_{2,1} \sin \alpha}{c_{1,1}}$	$\tau_{2,3} = \frac{L_{2,3}}{c_{1,1}}$ $\tau_{1,3} = \frac{L_{1,3}}{c_{1,1}}$	$x_3 = x_{20} + l_0 L_{2,3}$ $x_3 = x_{20} + l_{2,1} L_{2,3}$	$y_3 = y_2 + L_{2,3} \cos \alpha$ $y_3 = y_2 + L_{2,3} \cos \beta_3$
3	<i>lll</i>	<i>lll</i>		$L_{2,3} = L_{2,3}(lll) + 2R(\operatorname{tg} \beta_0 - \operatorname{tg} \beta_0) \sin \alpha$ $L_{1,3} = \frac{L_{2,3}(lll)}{\cos(\alpha - \beta_{2,1})}$	$\tau_{2,3} = \frac{L_{2,3}}{c_{1,1}}$ $\tau = \sum_{i=1}^3 \tau_{i,i+1}$	$x_3 = x_{20} + l_0 L_{2,3}$ $x_3 = x_{20} + l_{2,1} L_{2,3}$	$y_3 = y_2 + L_{2,3} \cos \alpha$ $y_3 = y_2 + L_{2,3} \cos \beta_0$

На противоположной поверхности твердой *КС* на границе с *ЗП* *ПЭП* каждая из волн трансформируется также в две: продольную и поперечную. При этом к *ПЭП* из *ЗП* распространяются четыре волны: две продольные *lll*, *ltl* и две поперечные *llt*, *ltl*.

В таблицу 4.1 сведены аналитические выражения основных параметров центральных и субцентральных лучей в *АПС* с одной преломляющей поверхностью [19, 100].

Жидкости и твердые среды. Распространение *УЗ*-луча в бесконтактном *АПС* твердой *КС* с жидкостными *ЗП* приведена на рис. 4.2.

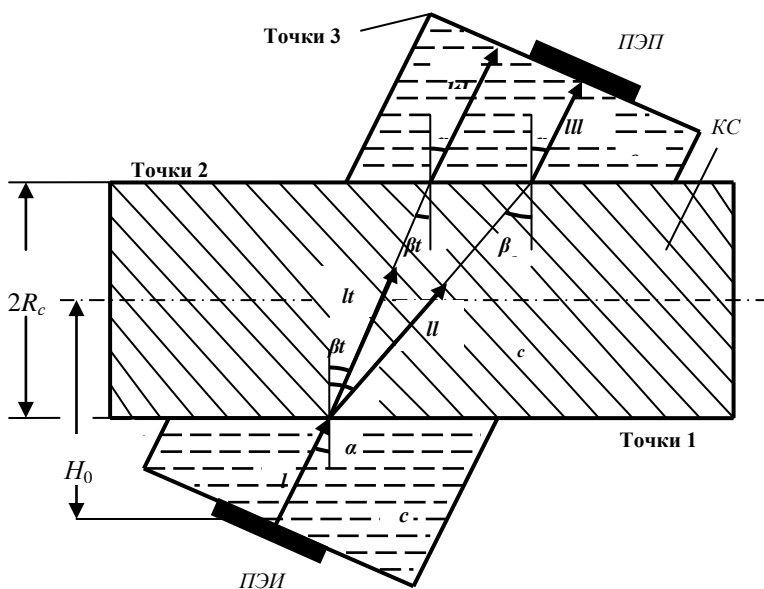


Рис. 4.2. Схема распространения лучей *УЗ*-волн в бесконтактном *АПС* твердых сред с одной преломляющей поверхностью

Распространение *УЗ*-волны в бесконтактном *АПС* с жидкостными внешними звукопроводами (рис. 4.2) для твердых сред (изделий и полуфабрикатов в обработке давлением и

машиностроении) отличается от вышеописанного (рис. 4.1) тем, что в звукопроводе *ПЭП* распространяются лишь два луча продольных волн *lll* и *ltl*. Согласно рис. 4.2 разность Δx их координат в точках 2 составляет:

$$\Delta x = 2R_c (\operatorname{tg} \beta_l - \operatorname{tg} \beta_t), \quad (4.16)$$

где β_l, β_t – углы распространения продольной *ll* и поперечной *lt* волн, а условие исключения реверберации записывается в виде

$$\Delta x \geq 2a / \cos \alpha, \quad (4.17)$$

где α – угол распространения волн в *ЗП ПЭП*, равный углу в *ЗП ПЭИ*. С учетом (4.16) условие (4.17) исключения реверберации принимает вид:

$$a/R_c \leq (\operatorname{tg} \beta_l - \operatorname{tg} \beta_t) \cos \alpha. \quad (4.18)$$

В *АПС жидкостей* (рис. 4.3) в *КС* распространяется одна продольная волна *ll*, а в звукопроводе *ПЭП* – две волны: продольная *lll* и поперечная *llt*. Поперечная волна *llt* (как и поперечная трансформированная волна *ltt* на рис. 4.1) падает на плоскость *ПЭП* под углом, отличающимся от прямого:

$$\theta' = \pi / 2 - \alpha + \arcsin(c_t c_l^{-1} \sin \alpha). \quad (4.19)$$

Так как *ПЭП* имеет достаточно острую угловую избирательность (до 0,1–0,2 рад.), то электрический сигнал (*ЭС*) под действием *llt* и *ltt* волн вырабатывается в *ПЭП* существенно меньшим, чем под действием информативной продольной *lll* волны, но он может привести к появлению реверберационной помехи.

При использовании продольной волны *lll* в *ЗП ПЭП* исключают попадание поперечной волны на *ПЭП*, для чего необходимо, чтобы крайний правый субцентральный луч поперечной волны *llt* (рис. 4.3) не пересекал плоскость *ПЭП*. При этом расстояние r между точками пересечения плоскости *ПЭП* 3_l – лучом *lll* волны и 3_t – лучом *llt* волны определяется как

$$r = l_{3П} \operatorname{tg} (\alpha - \beta_{lt}), \quad (4.20)$$

где средняя длина *ЗП* (по центру *ПЭП*) составляет величину:

$$l_{3П} = (H_0 - R_c) / \cos \alpha \quad (4.21)$$

и угол распространения β_{lt} поперечной волны llt определяется выражением, зависящим от угла α ввода и скоростей продольной c_{1l} и поперечной c_{lt} волн в ЗП:

$$\sin \beta_{lt} = c_{lt} c_{1l}^{-1} \sin \alpha. \quad (4.22)$$

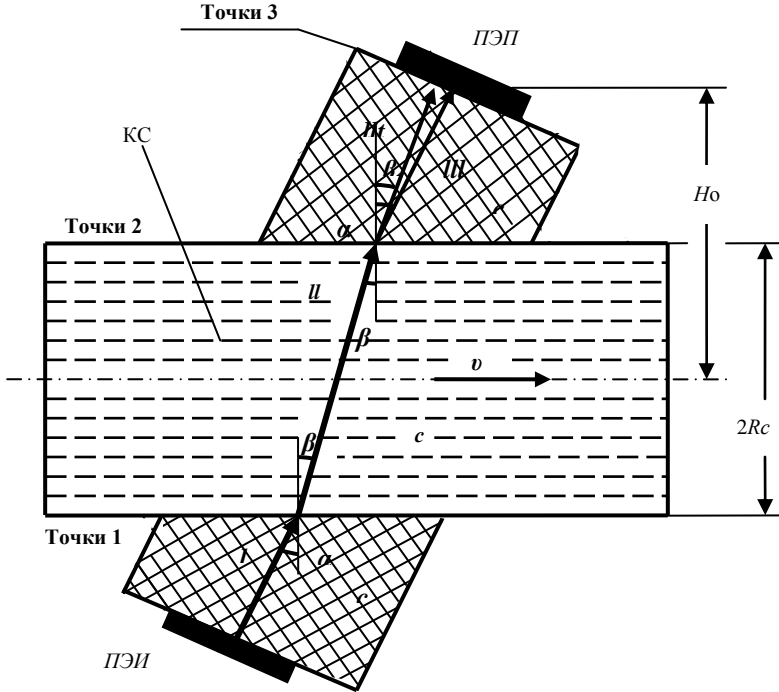


Рис. 4.3. Схема распространения лучей УЗ-волн в бесконтактном АПС жидких КС с одним преломлением между КС и ПЭИ (или ПЭП)

Условие исключения поступления на ПЭП правого крайнего субцентрального луча поперечной волны llt

$$r \geq 2a. \quad (4.23)$$

В итоге, согласно (4.20)–(4.23), исключение попадания

поперечной волны llt в $ПЭП$ достигается при отношении $H_0 - R_c$ (средней высоты $3П$) к эффективному радиусу a $ПЭП$:

$$(H_0 - R_c) / a \geq 2 \operatorname{tg}(\alpha - \beta_{lt}) / \cos \alpha. \quad (4.24)$$

Такой характер распространения волны, строго говоря, относится лишь к центральным и субцентральному лучам.

Время распространения волны. Время распространения $УЗ$ -волны в $АПС$ сред зависит от модификации преобразователя и ориентации $ПЭП$ в нем. В случае $АПС$ сред, представленных на рис. 4.1 на $ПЭП$ в общем случае могут поступать четыре волны. Каждая из них имеет различное время распространения. При импульсных колебаниях раньше всех поступает волна lll и определяет фронт принятого импульса.

Ориентация $ПЭП$ обычно ведется по центральному лучу $УЗ$ -волны lll (так, как показано на рис. 4.1 и 4.2). При подобной ориентации для всех модификаций $АПС$ на рис. 4.1 и 4.2 время τ_{lll} распространения волны, в соответствии с данными, приведенными в табл. 4.2, может быть записано в одном и том же виде:

$$\tau_{lll} = 2 \left[\frac{R_c}{c_1 \cos \beta_l} + \tau_{лп} + \frac{H_0 - R_c}{c_{ll} \cos \beta_l} - \frac{\nu R_c \operatorname{tg} \beta_l}{c_l^2} B_{a\Gamma} \right], \quad (4.25)$$

где ν – скорость движения $КС$, $B_{a\Gamma}$ – акустогидродинамическая поправка на трение в трубопроводе, близкая к 1; $\tau_{лп}$ – время распространения волны через протектор (рис. 4.1) $ПЭИ$ или $ПЭП$; $2R_c$ – средний размер $КС$; H_0 – расстояние между центром $КС$ и $ПЭИ$ ($ПЭП$).

При такой ориентировке $ПЭП$ (по $УЗ$ -волне lll) время распространения для волны llt , поступающей на $ПЭП$ позднее волны lll , определяется выражением

$$\tau_{llt} = 2 \left[\frac{R_c}{c_1 \cos \beta_l} + \tau_{лп} \frac{H_0 - R_c}{c_{ll} \cos \alpha} + \frac{R(\operatorname{tg} \beta_l - \operatorname{tg} \beta_t) \sin \alpha}{c_{ll}} - \frac{\nu R_c \operatorname{tg} \beta_l}{c_l^2} B_{a\Gamma} \right]. \quad (4.26)$$

4.2.2. Границы раздела сред

Общий коэффициент пропускания сред преобразователя определяется выражением (4.5).

Коэффициенты пропускания волны через поверхности, ограничивающие контролируруемую среду, имеют разные величины для всех трех типов (рис. 4.1–4.3) преобразователей. Рассмотрим аналитические выражения для граничных соотношений при переходе УЗ-волны из жидкой среды в твердую и из твердой – в жидкую для продольной и поперечной волн.

Граница «жидкость – твердая среда» имеет место в АПС при вводе продольной волны l из жидкостного ЗП в твердую КС (рис. 4.3) и при выходе трансформированной продольной волны ll из КС в твердый ЗП. Поскольку в жидкости (среда 1) поперечная волна не распространяется, то с учетом того, что входящие соответственно понятию об АИМ в него суммарные граничные АИМ

$$S = S_1 + S_2, \quad (4.27)$$

соответственно первой S_1 и второй S_2 сред, представляют собой сумму продольных $S_{1l}(S_{2l})$ и поперечных $S_{1t}(S_{2t})$ компонент

$$S_1 = S_{1t} + S_{1l} \quad (4.28)$$

$$S_2 = S_{2t} + S_{2l}, \quad (4.29)$$

вычисляемых из выражений

$$S_{1t} = Z_{1t} \sin^2 2\theta_{1t} \quad (4.30)$$

$$S_{1l} = Z_{1l} \cos^2 2\theta_{1t}, \quad (4.31)$$

которые для среды 1 в рассматриваемом случае равны:

$$S_{1t} = 0, \quad \cos 2\theta_{1t} = 1, \quad S_{1l} = \frac{z_1}{\cos \theta_{1t}} \cos^2 2\theta_{1t} = \frac{z_1}{\cos \theta_{1t}}. \quad (4.32)$$

Полный АИМ границы определяется выражением:

$$S = S_{2l} + S_{2t} + z_{1l} / \cos \theta_{1l}. \quad (4.33)$$

Преломленная продольная ll и трансформированная поперечная lt волны в твердой среде имеют коэффициенты прозрачности:

$$D_{ll} = \frac{2S_{2l}}{S \cos 2\theta_{2l}}, \quad (4.34)$$

$$D_{lt} = -\frac{2S_{2t}}{S \sin 2\theta_{2t}}. \quad (4.35)$$

Значение продольного граничного $АИМ$ (среда 2) для расчета коэффициентов прозрачности определяются с учетом

$$Z_{2l} = \frac{z_{2l}}{\cos \theta_{2l}} \quad (4.36)$$

выражением:

$$S_{2l} = \frac{z_{2l}}{\cos \theta_{2l}} \cos^2 2\theta_{2l}. \quad (4.36a)$$

Значение поперечного граничного $АИМ$ (среда 2) для расчета коэффициентов прозрачности определяются с учетом

$$Z_{2t} = \frac{z_{2t}}{\cos \theta_{2t}} \quad (4.37)$$

выражением:

$$S_{2t} = \frac{z_{2t}}{\cos \theta_{2t}} \sin^2 2\theta_{2t}. \quad (4.37a)$$

С учетом выражений граничных $АИМ$ S_{2l} (4.36a) и S_{2t} (4.37) выражения (4.34), (4.35) коэффициентов прозрачности D_{ll} и D_{lt} преобразуются к виду:

$$D_{ll} = \frac{2z_{2l}}{S \cos \theta_{2l}} \cos 2\theta_{2l}, \quad (4.38)$$

$$D_{lt} = \frac{-2z_{2t}}{S \cos \theta_{2t}} \sin 2\theta_{2t} = \frac{-4z_{2t}}{S} \sin \theta_{2t}, \quad (4.39)$$

где S определяется суммарным $АИМ$ по выражениям (4.33), (4.36a) и (4.37a).

Граница «твердая среда – жидкость» для l -волны имеется в АПС при вводе: из твердого ЗП в жидкую КС продольной УЗ-волны l (рис. 4.3) и из твердой КС в жидкостный ЗП (рис. 4.2) трансформированной продольной ll . Здесь в среде 1 (из которой волна падает на границу) может распространяться продольная и поперечная волны, а в среде 2 – только продольная. Поэтому входящие в АИМ границы параметры имеют значения:

$$S_{2l} = 0, \quad \cos 2\theta_{2l} = 1, \quad S_{2l} = \frac{z_2}{\cos \theta_2} \cos^2 2\theta_{2l} = \frac{z_2}{\cos \theta_2}. \quad (4.40)$$

С учетом выражений (4.40), АИМ S границы «твердая среда – жидкость» согласно (4.27)–(4.31) определяется выражением:

$$S = S_{1l} + S_{1r} + z_{2l} / \cos \theta_{2l}, \quad (4.41)$$

составляющие которого, а именно продольный S_{1l} и поперечный S_{1r} граничные АИМ вычисляются из выражений:

$$S_{1l} = \frac{z_{1l}}{\cos \theta_{1l}} \cos^2 2\theta_{1l}, \quad (4.42)$$

$$S_{1r} = \frac{z_{1r}}{\cos \theta_{1r}} \sin^2 2\theta_{1r}. \quad (4.43)$$

С учетом параметров среды 2, определяемых выражением (4.40) и граничных АИМ среды, по (4.42) и (4.43) выражение коэффициента прозрачности границы D_{ll} «твердая среда – жидкость» (4.34) для продольной волны упрощается к виду:

$$D_{ll} = \frac{2z_{2l}}{S \cos \theta_{2l}}, \quad (4.44)$$

где АИМ границы S определяется суммой граничных АИМ сред (4.41)–(4.43).

4.2.3. Прозрачность бесконтактных АПС сред

Твердые среды. Для первой границы (точки 1) в бесконтактном АПС твердых сред (рис. 4.2) с жидкостными ЗП параметры составляют следующие величины:

$$\theta_1 = \alpha, \quad S_{2l} = S_l, \quad S_{2l} = S_l, \quad (4.45)$$

$$z_{2l} = z_l, \quad \theta_{2l} = \beta_l, \quad \theta_{2l} = \beta_l, \quad (4.46)$$

где S_t , S_i – продольный и поперечный граничные *АИМ* твердой *КС*; α , β_l , β_t – углы распространения продольной волны в *ЗП*, продольной и поперечной *УЗ*-волн в *КС*.

С учетом значений параметров (4.45) и (4.46) выражения *АИМ* границы (4.33) и коэффициента прозрачности (4.38) примут вид:

$$S = S_t + S_i + z_1 / \cos \alpha, \quad (4.47)$$

$$D_1 = \frac{2z_1}{S \cos \beta_l} \cos 2\beta_l, \quad (4.48)$$

Для *второй границы* (точки 2) в *АПС* твердых сред (твердые *КС–ЗП ПЭП*) первой средой (в обозначениях расчетов в гл. 2, 5) является *КС* и второй средой – *ЗП*:

$$\theta_{1l} = \beta_l, \quad \theta_{1t} = \beta_t, \quad \theta_2 = \alpha, \quad (4.49)$$

$$S_{1l} = S_l, \quad S_{1t} = S_t, \quad z_2 = z_1, \quad (4.50)$$

где вторые символы равенств относятся к *АПС*.

В соответствии со значениями параметров из (4.49) и (4.50) выражение (4.41) для *АИМ* S границы преобразуются к виду (4.47), равному *АИМ* S для первой границы. С учетом значений параметров из (4.49)–(4.50) и выражения *АИМ* первой и второй границ, из (4.44) следует выражение для коэффициента прозрачности второй границы:

$$D_2 = \frac{2z_1}{S \cos \alpha}, \quad (4.51)$$

где S определяется выражением (4.47).

Таким образом, коэффициент прозрачности *АПС* *твердой КС* с жидкостными *ЗП* в соответствии с (4.48) и (4.51) определяется формулой:

$$D = D_1 D_2 = \frac{4z_1 z_l}{S^2 \cos \alpha \cos \beta_l} \cos 2\beta_l, \quad (4.52)$$

где S – *АИМ* границ, определяемых выражением (4.47); z_1 , z_l – удельные *АИМ* жидкостного *ЗП* и твердого *КС* для продольной волны; α , β_l , β_t – углы распространения продольных волн в *ЗП*, твердом *КС* и поперечной *УЗ*-волн в *КС* соответственно.

КС – жидкости и газы. Для *первой границы* (точки 1) «твердый ЗП – жидкость» в АПС жидкостей (рис. 4.3) с твердым ЗП переход индексов от расчетов гл. 2 и 5 к данному АПС сред составляет:

$$\theta_{1l} = \alpha, S_{1l} = S_{1l}, S_{1t} = S_{1t}, S_{2t} = 0, \quad (4.53)$$

$$S_{2l} = z / \cos \beta, z_{2l} = z, \theta_{2l} = \beta, \quad (4.54)$$

где S_{1l} , S_{1t} – продольный и поперечный граничные АИМ твердых ЗП; z , $z / \cos \beta$ – удельный и граничный АИМ жидкостной КС; α – угол распространения продольных УЗ-волн I и III в ЗП ПЭИ и продольной II УЗ-волны в КС.

Согласно выражению (4.41) для границы «твердая среда – жидкость» и формул индексов (4.53) и (4.54), АИМ S первой границы (точки 1 на рис. 4.3 АПС с одним преломлением волны) определяется формулой:

$$S = S_{1l} + S_{1t} + z / \cos \beta. \quad (4.55)$$

С учетом формул индексов (4.53) и (4.54) коэффициент прозрачности (4.34) преобразуется для первой границы к виду:

$$D_1 = 2z / S \cos \beta, \quad (4.56)$$

где S – определяется выражением (9.55).

Для *второй границы* «жидкость – твердый ЗП» (точки 2) в АПС (рис. 4.3) жидких КС переход индексов составляет:

$$\theta_1 = \beta, S_{1l} = z / \cos \beta, S_{1t} = 0, \quad (4.57)$$

$$S_{2t} = S_{1t}, z_{2l} = z, \theta_{2l} = \alpha, \theta_{2t} = \beta_{1t}, \quad (4.58)$$

где правые символы в равенствах (4.57), (4.58) относятся к АПС жидкостей (рис. 4.3).

Подстановка этих символов в (4.33) приводит к выражению (4.55), т.е. к равенству АИМ первой и второй границ. С учетом формул перехода индексов (4.57), (4.58) формула коэффициента прозрачности границы «жидкость – твердая среда» (4.38) для рассматриваемого АПС принимает вид:

$$D_2 = \frac{2z_{1l}}{S \cos \alpha} \cos 2\beta_{1t}. \quad (4.59)$$

где S – определяется выражением (4.55).

Из выражений (4.56), (4.59) следует формула коэффициента прозрачности бесконтактного АПС жидкостей:

$$D = D_1 D_2 = \frac{4z z_{1l}}{S^2 \cos \alpha \cos \beta} \cos 2\beta_{1l}, \quad (4.60)$$

где S – АИм границ, определяемых выражением (4.55); z_{1l} , z – удельные АИм продольных УЗ-волн соответственно в твердом ЗП и жидкой КС; α , β , β_{1l} – углы распространения соответственно продольной УЗ-волны в ЗП ПЭИ и КС, поперечной УЗ-волны llt в ЗП ПЭП.

4.2.4. Затухание. Угол излучения. Диаметр пьезоэлемента

Затухание УЗ-волны. Коэффициент ослабления УЗ-волны k_δ при распространении в звукопроводах и контролируемой среде определяется выражением

$$k_\delta = \exp \left[-2 \frac{R_c \delta}{\cos \beta} + \frac{H_0 - R_c}{\cos \alpha} \delta_1 \right], \quad (4.61)$$

где δ , δ_1 – коэффициенты затухания волн в КС и в материале ЗП; β – угол распространения волны в КС; $2R_c$ – поперечный размер трубопровода с жидкостью или твердой КС.

Угол излучения. В производственных условиях КС обычно находится в движении и перемещается относительно неподвижных ПЭИ и ПЭП со скоростью v . Поэтому в преобразователях с преломлением, согласно выражению (9.26), имеет место приращение времени τ распространения УЗ-волны на величину:

$$\Delta \tau_v = 2 \frac{v R_c \operatorname{tg} \beta}{c^2} B_{a\Gamma}, \quad (4.62)$$

где $B_{a\Gamma}$ – поправка на механическое трение в трубопроводе, мало отличимая от 1.

При УЗ-контроле физико-химических свойств технологических сред необходимо, чтобы изменение времени τ распространения УЗ-волны не превышало некоторой величины ψ , как заданной части основной погрешности измерений.

Обозначим через $\Delta\tau_q$ информативное изменение времени τ распространения УЗ-волны. Тогда необходимое и достаточное условие исключения влияния скорости v движения КС на результаты исследования и контроля сред

$$\Delta\tau_v \leq \psi \quad (4.63)$$

может быть записано в виде:

$$2 \frac{vR_c \operatorname{tg} \beta}{c^2 \Delta\tau_q} B_{a\Gamma} \leq \psi. \quad (4.64)$$

Это неравенство практически удобнее использовать, если в нем выразить величину $\Delta\tau_q$ через относительное приращение ε_q скорости УЗ-волн в КС. Влияние на ε_q , вызванное изменением состава или механического давления на КС, можно опустить.

Полагая зависимость скорости ультразвука c от ε_q в виде

$$c = c_0(1 + \varepsilon_q), \quad (4.65)$$

величину $\Delta\tau_q$ с достаточной степенью приближения можно записать в виде:

$$\Delta\tau_q = 2 \frac{R_c}{c \cos \beta} \varepsilon_q. \quad (4.66)$$

Подстановка $\Delta\tau_q$ из (4.66) и формулы

$$\sin \beta = cc_{1l}^{-1} \sin \alpha \quad (4.67)$$

в выражение (4.64) для допустимой погрешности, ψ приводит к следующему результату:

$$\frac{v}{\varepsilon_q c} \sin \alpha \leq \psi. \quad (4.68)$$

Следовательно, значение угла α излучения должно удовлетворять условию:

$$\sin \alpha \leq \varepsilon_q c \psi / v. \quad (4.69)$$

Диаметр пьезоэлемента. Максимальный эффективный диаметр $2a$ пьезоэлементов ПЭ акустического преобразователя АПС сред рассчитывают таким образом, чтобы при выбранном угле излучения α на ПЭП не поступали УЗ-волны, повторно

отраженные от границ раздела $KС$ и $ЗП$. При использовании непрерывных ультразвуковых колебаний должны выполняться неравенства (4.18) – для $АПС$ твердых сред (рис. 4.2) и (4.24) – для $АПС$ жидкостей (рис. 4.3).

При выполнении условий (4.18), (4.24) и (4.69) на $ПЭП$ из повторных отражений будут поступать лишь двукратно отраженные $УЗ$ -волны от $ПЭП$ и $ПЭИ$. Условие, когда исключается реверберационное влияние двукратно отраженной $УЗ$ -волны:

$$k_{\beta}DR \leq 0,1, \quad (4.70)$$

практически выполнимо.

4.3. Лучевое распространение волны в гидрометаллургических расходомерах

Периферические лучи $УЗ$ -волны имеют иной характер распространения (табл. 4.2), причем тем значительнее отличающийся от описанного в п. 4.2, чем больше отношение радиуса пьезоэлемента a к радиусу R_c цилиндрической преломляющей поверхности $KС$ [19]. $УЗ$ -луч, поступающий в $ПЭП$, можно охарактеризовать тремя основными параметрами – временем распространения τ от $ПЭИ$ до плоскости $ПЭП$, расстоянием r_3 от точки пересечения лучом плоскости $ПЭП$ до его центра и углом α_3 между лучом и осью приемника $ПЭП$. Эти параметры всей совокупности лучей определяют начальную интегральную фазу непрерывных и форму импульсных электрических колебаний, преобразованных $ПЭП$ из принятых $УЗ$ -колебаний.

Выражения параметров *периферических* лучей в $АПС$ с одним преломлением приведены в табл. 4.2. В ней через $\alpha_0, \beta_{nb}^{\circ}, \gamma_{nl}, \beta_{1l}, \beta_{2l}$, обозначены углы, через x_{np} – расстояние для центральных лучей и φ – фаза. При небольших углах излучения α_0 и отношении a/R_c такие основные параметры лучей, как τ , α_3 и r_3 у периферических лучей, незначительно отличаются от центрального луча и их отличия можно не учитывать.

Таблица 4.2

Параметры периферических лучей (знак α_0 для центральных лучей) в АЛС
с одной преломляющей поверхностью

№ точки и вид падаю- щего лучей	Ход луча до данной точки и время распространения луча	Координаты	Синусы кривизны и косинусы углов падения и преломления	Направляющие косинусы нормали и преломленного луча
1	$L_{0,1} = \frac{H_0 - Y_0 - \sqrt{R_c^2 - z_0^2}}{\cos \alpha_0}$	$x_1 = x_0 + l_0 L_{0,1}$	$\sin \gamma_{11} = \frac{c_1 z_0}{c_1 R_c} \cos \alpha_0$	$m_{s,1} = \sqrt{1 - \frac{z_0^2}{R_c^2}}$
l	$r_{0,1} = \frac{L_{0,1}}{c_1}$	$y_1 = y_0 + m_0 L_{0,1}$ $z_1 = z_0$ $m_0 = \cos \alpha_0$	$\sin \gamma_{1l} = \frac{c_1 z_0}{c_1 R_c} \cos \alpha_0$ $\cos \beta_{1l} = \frac{-\sqrt{\cos^2 \beta_{11} - \sin^2 \gamma_{1l}}}{\cos \beta_{11}} = \frac{-\sqrt{\cos^2 \beta_{11} - \sin^2 \gamma_{1l}}}{\cos \beta_{11}}$	$n_{s,1} = -\frac{z_0}{R_c}$ $m_1 = m_{0,1} \cos \beta_{11} - n_{0,1} \cos \gamma_{11}$ $n_1 = n_{0,1} \cos \beta_{11} + m_{0,1} \cos \gamma_{11}$

Окончание табл. 4.2

№ точки и вид падения лучей	Ход луча до данной точки и время распространения луча	Координаты	Синусы кривизны и косинусы углов падения и преломления	Направляющие косинусы нормали и преломленного луча
2	$L_{1,2} = 2R_1 \frac{\cos \beta_1}{\cos^2 \beta_0}$	$x_1 = x_1 + l_1 L_{1,2}$	$\sin \gamma_{1T} = \frac{z_0}{R_1} \cos \alpha_0$	$m_{1,2} = (H_0 - y_2) / R_1$
<i>И</i>	$r_{1,2} = \frac{L_{1,2}}{c}$	$y_1 = y_1 + m_1 L_{1,2}$	$\sin \gamma_{2T} = \frac{c_{12} z_0}{c_{11} R_1} \cos \alpha_0$	$m_{2,1} = -z_1 / R_1$
<i>И</i>		$z_1 = z_0 + n_1 L_{1,2}$	$-\cos \beta_{2T} =$ $= \sqrt{\cos^2 \alpha_0 - \sin^2 \gamma_{2T}}$	$m_2 = m_{2,2} \cos \beta_2 -$ $= n_{2,1} \sin \gamma_2$
3	$L_{2,3} = \frac{(x_{0T}^2 - x_1^2) \sin \alpha_0 + \cos \alpha_3}{\cos \alpha_0}$	$x_2 = x_2 + l_2 L_{2,3}$	$-\cos \beta_{3T} =$ $= \sqrt{\cos^2 \beta_{2T} - \sin^2 \gamma_{3T}}$	$m_{2,2} \cos \beta_2 +$ $+ m_{2,1} \cos \alpha_0$
<i>ИИ</i>	$\leftarrow \frac{(2H_0 - y_2) \cos \alpha_0}{\cos \alpha_0}$	$y_2 = y_2 + m_2 L_{2,3}$		$\cos \alpha_3 = l_3 \sin \alpha_0 +$ $+ m_{2,2} \cos \alpha_0$
<i>ИИ</i>	$r_{2,3} = \frac{L_{2,3}}{c_1}$	$z_2 = z_2 + n_2 L_{2,3}$	$r = \sum_{n=0}^{\infty} r_{(n+1)}$	$\Delta \varphi = 2\pi \Delta r$

На рис. 4.4 приведена в двух проекциях картина распространения центрального 0, субцентральных 3, 7 и периферических 1, 2, 4, 5, 6, 8 УЗ-лучей в акустическом преобразователе расхода (АПР). АПР пульпы Ti -трихлорида имеет два внешних ЗП из плексигласа с обработанной внутренней цилиндрической радиусом R_c поверхностью.

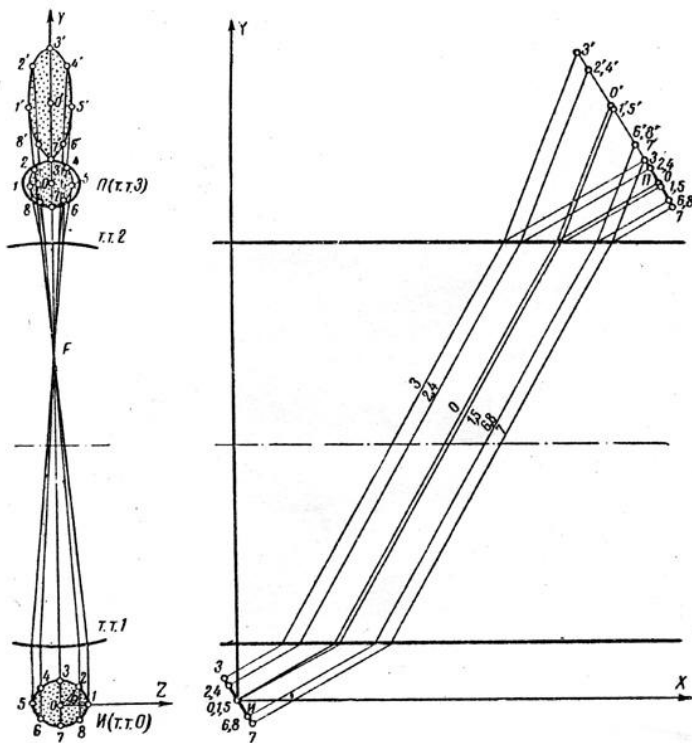


Рис. 4.4. Распространение акустических лучей в преобразователе гидрометаллургического расходомера с внешними звукопроводами из плексигласа

Точки излучения УЗ-лучей 1–8 расположены по окружности дискового ПЭИ равномерно через каждые $\pi/4$ рад.

Угол излучения α в АПП сред выбран (соответствующим градуировке расходомера по воде) равным $\pi/3$ рад., скорость распространения УЗ-волны в градуировочной среде – $c = 1490$ м/с, эффективный радиус ПЭ – $a = 10$ мм и трубопровода – $R_c = 75$ мм.

До границы раздела сред «звукотруба ПЭИ – контролируемая жидкость» УЗ-колебания распространяются в виде цилиндрического (радиусом a) пучка параллельных лучей 1–8. После преломления на этой границе акустические лучи фокусируются.

Область фокусирования F расположена вблизи противоположной стороны внутренней поверхности ЗП. Центральные и субцентральные лучи фокусированию не подвергаются. Поэтому в области F имеет место клиновидное фокусирование пучка лучей. Сечение пучка лучей в контролируемой жидкости в общем случае представляет собой эллипс с переменной малой осью, величина которой определяется периферическими лучами 1, 5 и постоянной большой осью, величина которой определяется субцентральными лучами 3, 7.

На границу с ЗП ПЭИ лучи поступают дефокусированными. После преломления в этом ЗП распространяются два пучка расходящихся лучей. На левой проекции рис. 4.4 показаны следы пересечения плоскости ПЭИ пучком лучей продольной волны (эллипс 1–8) и пучком лучей поперечной волны (эллипс 1'–8'). На правой проекции рис. 4.4 показаны преломления и ход распространения центральных и субцентральных УЗ-лучей.

4.4. Плавка и рафинирование меди

4.4.1. Сырье и применение

Медь очень хорошо проводит электричество и тепло. Удельное сопротивление меди равно $0,018$ Ом·мм²/м, а теплопроводность при 20 °С составляет 385 Вт/(м·К). По электропроводности медь лишь немного уступает серебру. Ее электропро-

водность в 1,7 раза выше, чем у алюминия, и примерно в 6 раз выше, чем у платины и железа. Медь обладает ценными механическими свойствами – ковкостью и тягучестью.

В присутствии воздуха, влаги и сернистого газа медь постепенно покрывается плотной зеленовато-серой пленкой основной сернокислой соли, предохраняющей металл от дальнейшего окисления. Поэтому медь и ее сплавы находят широкое применение при строительстве линий электропередач и устройстве различного вида связи, в электромашиностроении и приборостроении, в холодильной технике (производство теплообменников охлаждающих устройств) и химическом машиностроении (изготовление вакуумаппаратов, змеевиков). Около 50% всей меди расходует электропромышленность.

На основе меди создано большое число сплавов с такими металлами, как Zn, Sn, Al, Be, Ni, Mn, Pb, Ti, Ag, Au и др., и реже с неметаллами P, S, O и др. Область применения этих сплавов очень обширна. Многие из них обладают высокими антифрикционными свойствами. Сплавы применяют в литом и ковком состоянии, а также в виде изделий из порошка. Например, широко применяют сплавы типа оловянных (4–33% Sn), свинцовых (~ 30% Pb), алюминиевых (5–11% Al), кремниевых (4–5% Si) и сурьмяных бронз. Бронзы применяют для изготовления подшипников, теплообменников и других изделий в виде листа, прутков и труб в химической, бумажной и пищевой промышленности. Сплавы меди с хромом и порошковый сплав с вольфрамом идут на изготовление электродов и электроконтактов.

В химической промышленности и машиностроении также широко применяют латунь – сплав меди с цинком (до 50% Zn), обычно с добавками небольших количеств других элементов (Al, Si, Ni, Mn). Сплавы меди с фосфором (6–8%) используют в качестве припоев.

Для получения меди применяют медные руды, а также отходы меди и ее сплавов. В рудах содержится 1–6% меди.

Горную породу, содержащую меньше 0,5% Cu, не перерабатывают, так как при современном уровне техники извлечение из нее меди нерентабельно. В рудах медь обычно находится в виде сернистых соединений [146–147]: (халькозин Cu_2S , медный колчедан или халькопирит CuFeS_2 , ковелин CuS ; окислов: куприт Cu_2O , тенорит CuO и гидрокарбонатов: малахит $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$, азурит $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$). Пустая порода руд состоит из пирита FeS_2 , кварца SiO_2 , карбонатов магния и кальция (MgCO_3 и CaCO_3), а также из различных силикатов, содержащих Al_2O_3 , CaO , MgO и оксиды железа наряду с SiO_2 .

Руды разделяют на сульфидные, окисленные и смешанные. Сульфидные руды обычно бывают первичного происхождения, а окисленные руды образовались в результате окисления минералов сульфидных руд. В сульфидных рудах медь находится в виде сернистых соединений, в этих рудах всегда много пирита FeS_2 . Окисленные руды состоят главным образом из оксидов.

Сульфидные руды содержат обычно 1–6% Cu, 8–40% Fe, 9–46% S, 1–6% Zn, 5–55% SiO_2 , 2–12% Al_2O_3 , 0,3–4% CaO, 0,3–1,5% MgO, а в окисленных рудах обычно находится около 2% Cu, около 1% Fe, 0,1–0,2% S, 60–68% SiO_2 , 10–16% Al_2O_3 , 0,3–0,7% CaO и 0,3–0,7% MgO.

В небольших количествах встречаются так называемые самородные руды, в которых медь находится в свободном виде.

Нередко руды являются комплексными, т.е. они содержат заметные количества других металлов: цинка, свинца, никеля, золота, серебра, селена, таллия и др.

4.4.2. Подготовка руд к плавке

Известны два способа извлечения меди из руд и концентратов: гидрометаллургический и пирометаллургический. Первый из них используется при переработке бедных окисленных и самородных руд. Этот способ в отличие от пирометаллургического не позволяет извлекать попутно с медью драгоценные металлы.

Большую часть меди (85–90%) производят пирометаллургическим способом из сульфидных руд. Одновременно решается задача извлечения из руд помимо меди других ценных сопутствующих металлов. Пирометаллургический способ производства меди является многостадийным. Основные стадии этого производства: подготовка руд (обогащение и иногда дополнительно обжиг), плавка на штейн (выплавка медного штейна), конвертирование штейна с получением черновой меди, рафинирование черновой меди (сначала огневое, а затем электролитическое).

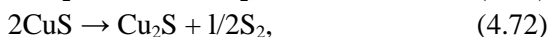
Сульфидные медные руды до плавки обычно обогащают. Предварительно руду измельчают до частиц крупностью 0,1–0,5 мм. После обогащения получают медный концентрат, содержащий 8–35% Cu, 40–50% S, 30–35% Fe и пустую породу, главными составляющими которой являются SiO_2 , Al_2O_3 и CaO.

Медь в концентрате находится в виде сернистых соединений, железо – в основном в виде пирита FeS_2 . Концентрат содержит 8–10% влаги. Большую часть концентратов (богатые концентраты, содержащие 25–35% Cu) переплавляют на штейн без обжига, а незначительную часть (бедные концентраты, содержащие 10–25% Cu) предварительно подвергают обжигу. Основная цель обжига – частичное окисление содержащихся в концентрате серы и железа с тем, чтобы в последующем обеспечивалось получение штейна с достаточно высоким (~ 25–30%) содержанием меди.

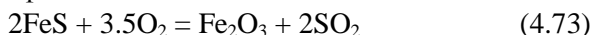
Обжиг осуществляют преимущественно в печах кипящего слоя. Печь представляет собой футерованную шамотным кирпичом вертикальную шахту высотой до 9 м со сводом и подом, в котором расположены сопла (30–50 сопел на 1 м^2 пода), через которые в печь снизу вдувают воздух, иногда обогащенный кислородом. Над подом печи имеется окно, через которое непрерывно загружают шихту, а с противоположной стороны печи – отверстие для непрерывной выгрузки продукта плавки (огарка).

Загружаемая в печь шихта состоит из медного концентрата, флюсов (измельченных известняка и кварцита) и оборотной пыли. Расход воздуха поддерживают таким, чтобы зерна загружаемой шихты находились во взвешенном состоянии, совершая в потоке воздуха непрерывное возвратно-поступательное движение (движение, похожее на кипение жидкости).

В процессе обжига происходят: нагрев шихты; термическая диссоциация высших сульфидов:



окисление образующихся паров серы до SO_2 с выделением тепла; горение сульфида железа:



с выделением тепла.

Этого тепла с избытком хватает для требуемого нагрева шихты ($700\text{--}850\text{ }^\circ\text{C}$). Температура в печи не должна превышать $850\text{ }^\circ\text{C}$ во избежание спекания шихты. Чтобы избежать перегрева, в шихту вводят флюсы, иногда в печь вдувают воду или в кипящий слой вводят трубчатые холодильники.

Продукт обжига – огарок состоит из низших сульфидов Cu_2S и FeS и различных оксидов. Отходящие из печи газы, содержащие $7\text{--}13\%$ SO_2 , используют для производства серной кислоты. Чтобы уменьшить вынос мелкой шихты отходящими газами, иногда перед обжигом медный концентрат подвергают окомкованию.

Широко распространенный в прошлом обжиг медных концентратов в многоподовых печах с механическим перегреванием материалов применяется в настоящее время редко.

4.4.3. Плавка на штейн

Медный штейн состоит в основном из сульфидов меди и железа ($\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS} = 80\text{--}90\%$) и других сульфидов, а также оксидов железа, кремния, алюминия и кальция. Плавку на штейн или выплавку штейна осуществляют для того, чтобы

путем расплавления шихты получить два жидких продукта: штейн и шлак – и тем самым отделить медь, переходящую в штейн от оксидов шихты, которые образуют шлак. Выплавку штейна производят несколькими способами: в отражательных, электродуговых и шахтных печах, автогенными процессами, плавкой А. Ванюкова в жидкой ванне.

Плавка в отражательных печах. Этот процесс – наиболее распространенный процесс получения медного штейна [146–147].

Отражательные или пламенные печи имеют длину 30–40 м, ширину 8–10 м, высоту от пода до свода 3,5–4,5 м. Опирающийся на фундамент под печи выполняют из динасового кирпича либо путем наварки, из кварцевого песка, толщина пода составляет 0,6–1,5 м.

Стены выкладывают из магнезитохромитового или магнезитового кирпича. Свод печи делают арочным из динасового кирпича, распорно-подвесным в форме арки или подвесным, который может быть плоским или трапециевидной формы (два последних свода – из магнезитохромитового кирпича).

Для выпуска штейна служат шпурсы периодического действия, которые после окончания выпуска закрывают глиняной пробкой; иногда для выпуска штейна предусматривают сифонные устройства. Выпуск шлака производится через шлаковые окна в конце печи. Высота расположения порога шлакового окна определяет высоту слоя расплава в печи, она равна 0,8–1,2 м, в том числе высота слоя штейна – 0,4–0,6 м.

Оттапливают печь природным газом, мазутом или угольной пылью. Горелки или форсунки обычно располагают в один ряд в передней торцевой стенке. Воздух, подаваемый для горения, нагревают до 200–400 °С и обогащают кислородом до 28–30%. Газообразные продукты сгорания проходят до задней стенки и через газоход – в боров. Температура газов на небольшом расстоянии от передней стенки достигает 1550–1600 °С, а в хвостовой части снижается до 1250–1300 °С.

Шихту загружают через несколько отверстий в своде печи (рис. 4.5), расположенных близ боковых стен по длине печи.

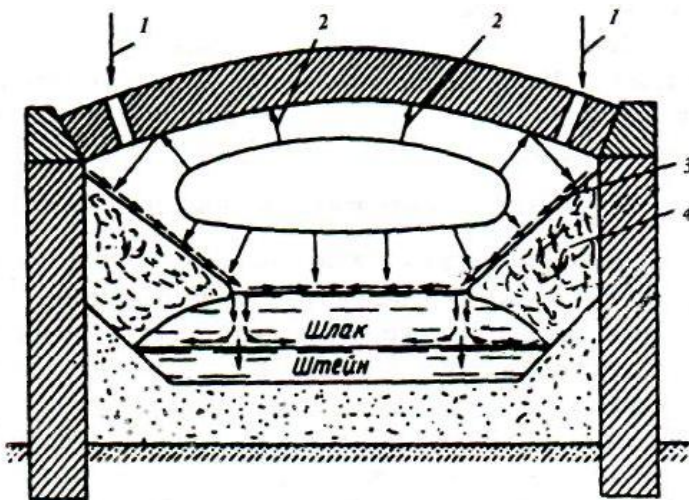


Рис. 4.5 Схема плавки в отражательной печи:

- 1 – загрузка шихты; 2 – теплоизлучение от факела;
3 – стекающая плавящаяся шихта; 4 – шихтовый откос

Основную часть штейна выплавляют из сырых (необожженных) концентратов. В шихту при этом вводят немного флюсов – известняка и кварца. Загружаемая шихта ложится откосами вдоль стен (при плавке огарка она растекается по поверхности шлака). Шихта и поверхность жидкой ванны нагреваются факелом, образующимся при сгорании топлива.

По мере нагрева шихта плавится и стекает с откосов в слой шлакового расплава, где протекает разделение штейновой и шлаковой фаз – капли штейна опускаются через слой шлака. Происходит это поскольку штейн и шлак нерастворимы друг в друге, а плотность штейна ($4,2\text{--}5,2 \text{ г/см}^3$) заметно выше плотности шлака ($2,6\text{--}3,2 \text{ г/см}^3$).

Основными химическими реакциями в ванне являются: разложение (термическая диссоциация) высших сульфидов, окисление образующейся при разложении сульфидов серы и окисление части FeS за счет реагирования с оксидами железа. При этом удаляется 45–55% серы, содержащейся в шихте.

При переплаве огарка, не содержащего высших сульфидов, основными реакциями являются: окисление части FeS оксидами железа и восстановление:



при этом из шихты удаляется менее 20–25% серы.

Благородные металлы (золото и серебро) плохо растворяются в шлаке и почти полностью переходят в штейн.

Штейн отражательной плавки на 80–90% (по массе) состоит из сульфидов меди и железа Cu_2S и FeS. Остальная часть – оксиды других металлов. Штейн содержит 15–55% Cu, 15–50% Fe, 20–30% S, 0,5–1,5% SiO_2 , 0,5–3,0% Al_2O_3 , 0,5–2,0% (CaO + MgO), около 2% Zn и небольшие количества Au и Ag.

Шлак состоит в основном из SiO_2 , FeO, CaO и Al_2O_3 и содержит 0,1–0,5% Cu. Извлечение меди и благородных металлов в штейн достигает 96–99,5%. Количество шлака составляет примерно 1,1–1,5 т/т штейна. Недостатками процесса являются необходимость расходования топлива и неиспользование теплотворной способности сульфидов.

Плавка в электродуговых печах. Плавка в руднотермических печах этого типа является близким аналогом отражательной плавки. Выплавку медного штейна ведут в прямоугольных закрытых сводом электрических печах с тремя или шестью расположенными в линию угольными электродами, концы электродов погружены в шлак. Шихту загружают в печь через отверстие в своде вблизи электродов. Тепло, необходимое для плавления шихты, выделяется при прохождении тока от электродов через шлаковый расплав, толщину слоя шлака в печи поддерживают в пределах 1,4–1,8 м. Процесс в руднотермической печи аналогичен процессу в отражательной печи – происходит плавление шихты и разделение расплава на штейн и шлак. Химизм элект-

рической и отражательной плавок полностью сходен. Штейн и шлак выпускают из печи периодически через шпурь. Расход электроэнергии изменяется от 380 до 600 $\kappa\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{т}$ шихты.

Существенным недостатком процесса, как и процесса отражательной плавки, является необходимость постороннего источника тепловой энергии, и неиспользование теплотворной способности сульфидов (тепла, которое могло бы быть получено при их сжигании в печи).

Плавка в шахтных печах. Шахтная печь имеет вытянутое по вертикали рабочее пространство. При плавке загружаемые сверху шихтовые материалы опускаются вниз, а им навстречу движутся горячие газы, образующиеся внизу у фурм, где происходит горение сульфидов шихты и топлива (кокса) и где плавится шихта, разделяющаяся затем на штейн и шлак. Для обеспечения газопроницаемости столба шихты необходимо применять кусковые материалы крупностью 20–100 мм, поэтому мелкие концентраты и руды предварительно подвергают брикетированию или агломерации.

Известны четыре разновидности шахтной плавки: восстановительная, пиритная, полупиритная и медно-серная. В восстановительной плавке, применявшейся для переработки окисленных руд, тепло для плавления шихты получалось за счет сжигания кокса. В пиритной плавке необходимое тепло выделялось при сгорании в печи сульфидов шихты; руда для такого процесса должна содержать не менее 75% пирита FeS_2 . В настоящее время применяют две разновидности процесса: *медно-серную и полупиритную плавку*, при которых тепло получается как от горения в печи сульфидов шихты, так и топлива (кокса). *Особенностью медно-серной плавки* является то, что помимо штейна в качестве продукта получают элементарную серу, выделяемую из отходящих газов. В качестве шихты применяют кусковые высокосернистые руды и высокосернистые окускованные концентраты.

Шахтная печь для медно-серной плавки показана на рис. 4.6 [146].

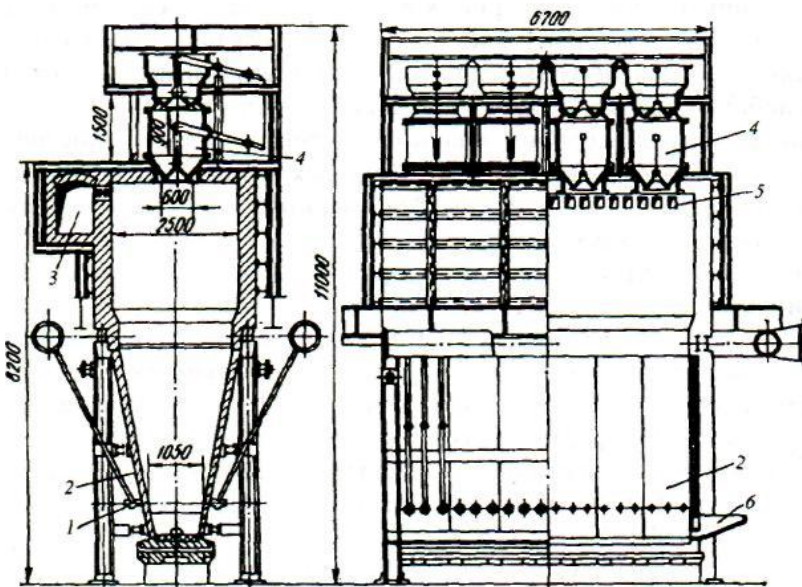


Рис. 4.6. Шахтная печь для медно-серной плавки:
1 – фурмы; 2 – кессоны; 3 – газоотвод; 4 – загрузочное устройство;
5 – газоотводящие отверстия; 6 – желоб

В поперечном (горизонтальном) сечении печь имеет прямоугольную форму. Нижнюю часть шахты (ее стены) собирают из плоских полых водоохлаждаемых коробок – кессонов (2). На внутренней стороне кессонов нарастает слой застывшего шлака (гарнисаж), который работает как футеровка. Кессонированная часть шахты сделана сужающейся книзу. В нижней ее части установлены фурмы для подачи воздуха, а ниже фурм имеется желоб с порогом для выпуска штейна и шлака.

Верхнюю часть печи выкладывают из шамота и для герметизации заключают в железный кожух. В своде шахты печи находятся двухконусные загрузочные устройства, подобные

засыпному аппарату доменной печи. Они обеспечивают герметизацию рабочего пространства печи в процессе загрузки шихты; при загрузке очередной порции шихты вначале опускают верхний конус при поднятом нижнем, а затем опускают нижний конус при поднятом верхнем. Это исключает попадание в печь воздуха и тем самым предотвращает окисление паров серы в отходящих из печи газах. Газы отводят через отверстия (5) в продольной стенке и газоход (рис. 4.6). Штейн и шлак выпускают из печи через желоб непрерывно в отстойный горн (на рис. 4.6 не показан). Он представляет собой футерованное внутри железное корыто с двумя-четырьмя шпурами для периодического выпуска штейна и желобами для непрерывного удаления шлака.

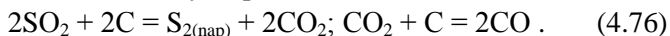
Шихта медно-серной плавки состоит из высокосерных окискованных концентратов и кусковых медных руд, флюсов (известняка и кварца) и 10–12% мелкого кокса. Через фурмы вдувают воздух, иногда с добавкой кислорода, расход дутья такой, чтобы весь кислород расходовался в нижней части печи.

В нижней части шахты при медно-серной плавке формируется окислительная зона (среда), а в верхней – восстановительная. В окислительной зоне, где есть кислород поступающий из фурм дутья, происходит горение кокса ($C + O_2 = CO_2$) и сернистого железа



с выделением тепла, благодаря чему температура в зоне составляет 1000–1100 °С, а у фурм достигает 1500 °С. При таких температурах плавятся сульфиды и остальная шихта с образованием штейна и шлака. По мере их выпуска из печи шихта опускается навстречу потоку горячих газов.

В поднимающихся газах кислород постепенно расходуется на перечисленные реакции горения и вверху формируется восстановительная зона (зона без кислорода). Здесь происходит восстановление SO_2 и CO_2 углеродом:



Протекают также другие побочные процессы с образованием газообразных CS_2 , COS , H_2S . Формирующийся из продуктов их реакций колошниковый газ дополнительно обогащается в восстановительной зоне парами элементарной серы в результате термической диссоциации высших сульфидов CuS и FeS_2 . Для сохранения серы в парообразном состоянии в процессе дальнейшей обработки газа температура газа на выходе из печи должна быть не менее 450-500 °С. Из газа сначала осаждают пыль, а затем из него извлекают серу (около 80% от общего количества в газе).

В результате медно-серной плавки получают бедный штейн, содержащий 6–15% меди. Чтобы повысить содержание меди этот штейн подвергают сократительной плавке. Плавку осуществляют в таких же шахтных печах. Штейн загружают кусками размером 30–100 мм вместе с кварцевым флюсом, известняком и коксом. Расход кокса составляет 7–8% от массы шихты. При этом железо переходит в шлак, а содержание меди в штейне повышается до 25–40%. Несмотря на сложность такого двустадийного процесса, он окупается за счет получения элементарной серы.

Схожа с медно-серной *полупиритная плавка*, но ее проводят без улавливания серы из отходящих газов. Шахтная печь для полупиритной плавки отличается от показанной на рис. 4.6 тем, что шахта по всей высоте выполнена из водоохлаждаемых кессонов и верх печи не герметизирован, а шихту загружают через шторы (дверцы) в стенах расположенного над шахтой шатра (колошника), служащего для отвода газов.

Шихтой служат кусковые концентраты и руды, известняк, кварц и 5–10% кокса. К шихте предъявляют менее жесткие требования, руда может содержать меньше серы (пирита) и больше пустой породы; в шихту вводят оборотные материалы (шлак, бедный штейн). Расход дутья поддерживают так, чтобы по всей высоте печи была окислительная атмосфера (избыток кислорода).

Содержание меди в штейне в зависимости от состава перерабатываемого сырья составляет 15–50%. Вся сера в отходящих газах находится в виде SO_2 .

В последние годы начали применять дутье, обогащенное кислородом (до 28-30%), что вызывает улучшение показателей плавки; в частности снижается расход кокса.

Автогенные процессы. Дефицит энергетических ресурсов, неиспользование теплотворной способности сульфидов шихты, необходимость расходования дополнительного топлива при низком тепловом коэффициенте полезного действия (к.п.д.) отражательной плавки и электроплавки, невозможность выделения серы из отходящих газов вследствие ее низкого содержания в газах привели к тому, что начиная с 50-х годов XIX в. начался постепенный переход к автогенным процессам выплавки штейна из медных сульфидных руд.

Автогенной называют плавку без затрат топлива, осуществляемую за счет тепла, получаемого при окислении составляющих шихты. При переплаве сульфидного сырья автогенность обеспечивается за счет сгорания сульфидов шихты. В последние годы в нашей стране и за рубежом разработаны, внедрены и внедряются ряд автогенных процессов переработки сернистых медных руд. Сжигание сульфидов при этом может производиться в факеле или в расплаве.

Плавка в жидкой ванне (ПЖВ). Процесс плавки в жидкой ванне, разработанный А. Ванюковым [147] осуществляют в шахтной печи (рис. 4.7), стены которой выполнены из медных водоохлаждаемых плит 7, а под и свод – из огнеупоров 8. Длина печи составляет 10–30 м, ширина 2,5–3 м и высота 6–6,5 м.

Фурмы (8) для подачи дутья 2 расположены в боковых стенах в ряд по всей длине печи на высоте 1,5–2 м от пода. Шихту (1) загружают через расположенные в своде воронки (9). Выпуск штейна (3) и шлака (4) происходит непрерывно и раздельно через сифоны (10) и (11), расположенные в противоположных торцах печи.

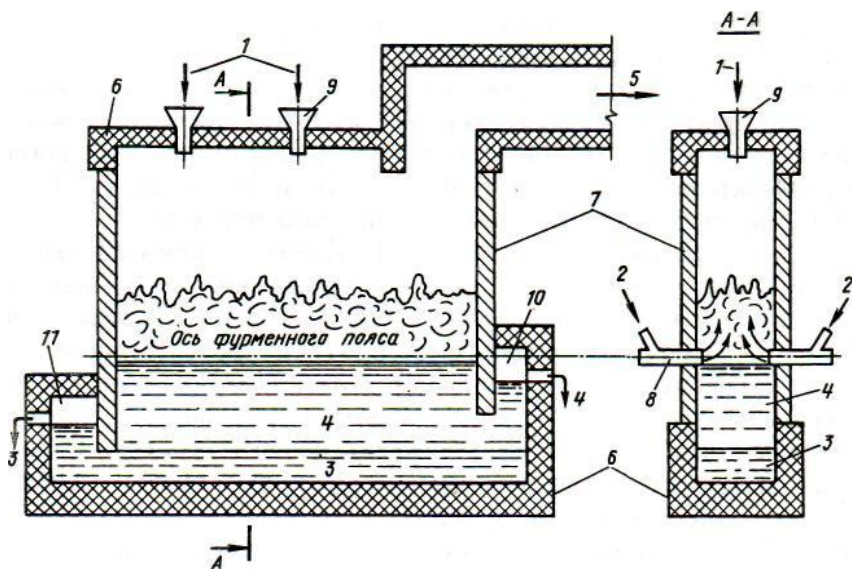


Рис. 4.7. Схема устройства печи ПЖВ А. Ванюкова: 1 – шихта; 2 – дутье; 3 – штейн; 4 – шлак; 5 – газы; 6 – огнеупорная кладка; 7 – медные литые кессоны; 8 – фурмы; 9 – загрузочная воронка; 10 – шлаковый сифон; 11 – штейновый сифон

Процесс малочувствителен к качеству шихтовых материалов: можно переплавлять как кусковые руды крупностью до 50 мм, так и мелкие концентраты без их сушки. Дутьем служит обогащенный кислородом воздух, для обеспечения автогенности процесса содержание кислорода в дутье должно составлять 40–45% при влажности шихты 1–2% и 55–65% при влажности 6–8%.

Процесс ПЖВ непрерывный. Дутье (2) (рис. 4.7) подают в объем расплава и в расплаве, что отличает этот процесс от других, происходит окисление сульфидов за счет реагирования с кислородом дутья. Расплав в печи условно делится на две зоны: зону выше фурм (8), где идет интенсивный барботаж (перемешивание поднимающимися пузырями газа) и подфурменную, где расплав находится в относительно спокойном состоянии. В

верхней (надфурменной) зоне протекают процессы окисления сульфидов с выделением тепла, нагрева и плавления шихты за счет этого тепла, укрупнения мелкой сульфидной взвеси в шлаковом расплаве.

Крупные капли сульфидов, как более тяжелые, движутся через слой шлака вниз, образуя на поду печи слой штейна (3).

В получаемом штейне содержание меди достигает 45–55%. Достоинством процесса является то, что его удельная производительность (удельный проплав шихты, $60\text{--}80\text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$) значительно выше, чем у других процессов выплавки штейна; так этот удельный проплав более чем в 12 раз превышает проплав отражательной плавки. Процесс пригоден для плавки на штейн медно-никелевых, никелевых и других сульфидных руд.

Плавка во взвешенном состоянии или процесс взвешенной плавки. При этом способе сульфиды шихты сгорают, двигаясь в потоке кислородосодержащего дутья, т.е. сгорают в факеле во взвешенном состоянии. В качестве дутья используют обогащенный кислородом воздух и иногда кислород. Шихту предварительно необходимо измельчать и просушивать. Находит применение ряд разновидностей этого процесса.

Способ фирмы «Оутокумпу» (Финляндия), применяемый в ряде стран, предусматривает использование обогащенного кислородом (до 31%) и подогретого до $\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ воздуха. Печь имеет вертикальную плавильную шахту и расположенную под ней горизонтальную удлиненную отстойную камеру. Через специальную горелку в своде шахты в нее подают дутье и измельченную шихту. При движении вниз в факеле сгорают сульфиды шихты, обеспечивая температуру в шахте $\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$. Образующиеся в факеле сульфидно-оксидные капли падают на поверхность шлака в отстойной камере, и здесь происходит разделение расплава на шлак и штейн. Горячие газы из шахты движутся через отстойную камеру вдоль поверхности расплава, подогревая его. Далее газы проходят котел-утилизатор, и из них извлекают элементарную серу. Штейн содержит до 60% меди.

Плавку во взвешенном состоянии на кислородном дутье или кислородно-факельную плавку применяют на заводах в Казахстане, Канаде и США. Печь горизонтальная, вытянутая вдоль движения факела, выполнена из огнеупоров. Стены, свод и газоотвод оборудованы водоохлаждаемыми устройствами. В торцевой стене печи установлены две горизонтально расположенные горелки, подающие кислород и просушенную шихту. Температура факела при сгорании сульфидов в кислороде достигает 1500–1600 °С, образующиеся в факеле капли сульфидно-оксидного расплава оседают в шлаковую ванну, в которой происходит отставание штейна от шлака. Штейн содержит до 50% Cu, отходящие газы до ~80% SO₂, серу из газов улавливают.

Процесс «Норанда», разработанный в Канаде, – непрерывный барботажный, схожий с отечественным процессом ПЖВ. Его осуществляют в горизонтальной цилиндрической печи, вдувая через 50–60 расположенных в ряд фурм обогащенный кислородом (до 37%) воздух в объем расплава, где происходит окисление сульфидов и разделение штейна и шлака.

4.4.4. Конвертирование медного штейна

Цель конвертирования – получение черновой меди путем окисления содержащихся в штейне серы и железа. Конвертирование осуществляют продувкой штейна воздухом в горизонтальном конвертере. Перерабатываемые штейны, как отмечалось выше, состоят в основном из сульфидов меди (Cu₂S) и железа (FeS). Вследствие экзотермичности основных реакций конвертирование не требует затрат топлива.

Современный медеплавильный конвертер [146] показан на рис. 4.8. Конвертеры делают длиной 6–12 м, с наружным диаметром 3–4 м. Производительность конвертера за одну операцию составляет 40–100 т. Футеруют конвертер хромомagneзитовым кирпичом. Заливку расплавленного штейна и слив продуктов плавки осуществляют через горловину конвертера,

расположенную в средней части его корпуса. Через ту же горловину удаляются газы. Фурмы 4 для вдувания воздуха расположены в ряд по длине конвертера. Число фурм обычно составляет 32–62, а диаметр фурмы 40–50 мм. Расход воздуха (при нормальных условиях) достигает $800 \text{ м}^3/\text{мин}$.

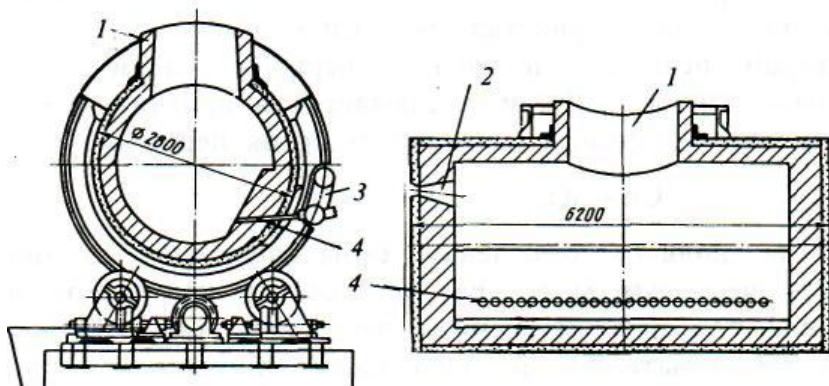


Рис. 4.8. Горизонтальный конвертер: 1 – горловина; 2 – окно для загрузки флюсов; 3 – воздушный коллектор; 4 – фурмы

Процесс в конвертере циклический и делится на два периода. Первый период (период окисления сульфида железа), называемый набором сульфидной массы, начинается с заливки штейна, после чего подают дутье и через горловину (1) или отверстие (2) в торцевой стенке конвертера загружают порцию кварцевого флюса, содержащего 70–80% SiO_2 . Период длится 6–24 ч в зависимости от содержания меди в штейне.

Основными реакциями периода являются окисление сульфида железа:



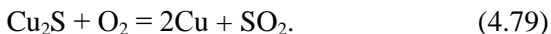
и ошлакование образующегося оксида FeO кремнеземом флюса:



По мере накопления шлака, состоящего из FeO и SiO₂, его сливают, в конвертер заливают новую порцию штейна и, добавляя флюс, продолжают продувку. Длительность таких циклов набора массы составляет 30–50 мин. Температура заливаемого штейна в результате протекания этих экзотермических реакций повышается с 1100–1200 до 1250–1350 °С. Более высокая температура нежелательна, и поэтому при продувке бедных штейнов, содержащих много FeS, добавляют охладители – твердый штейн, сплески меди, корки из ковшей, медные концентраты.

Сульфид меди в течение первого периода не окисляется, поскольку у железа большее химическое сродство к кислороду, чем у меди. По окончании первого периода и слива последней порции шлака в конвертере остается белый штейн – почти чистая полусернистая медь Cu₂S.

Второй период – получение черновой меди из белого штейна – длится 2–3 ч и заключается в продувке без добавки в конвертер флюса. Основная реакция периода:



После полного окисления серы продувку заканчивают, получая черновую медь. Ее сливают из конвертера и либо направляют в рафинировочную печь, либо разливают в слитки, которые затем направляют на специальные рафинировочные заводы.

Таким образом, в результате продувки получаются черновая медь, содержащая 96,0–99,4% Cu, 0,01–0,04% Fe, 0,02–0,1% S, небольшое количество Ni, Sn, As, Sb, Ag, Au и конвертерный шлак, содержащий 22–30% SiO₂, 45–70% FeO, около 3% Al₂O₃ и 1,5–2,5% Cu. Последующее рафинирование черновой меди от примесей по экономическим соображениям проводят в две стадии – вначале методом огневого рафинирования, а затем электролитическим методом [146–147].

4.4.5. Огневое рафинирование

Цель огневого рафинирования – подготовить медь к электролитическому рафинированию путем удаления из нее основного количества примесей [146]. Огневое рафинирование жид-

кой меди (на медеплавильных заводах) проводят в цилиндрических наклоняющихся печах, а на медеэлектролитных заводах, получающих черновую медь в слитках, – в стационарных отражательных печах. Печи для огневого рафинирования часто называют анодными, так как после рафинирования жидкую медь разливают в аноды – слитки, имеющие форму пластин.

Наклоняющаяся (поворотная) цилиндрическая печь схожа с горизонтальным конвертером, применяемым для выплавки штейна (рис. 4.8). Для выпуска меди предусмотрена лётка, наиболее распространены печи вместимостью 160–220 т. Стационарные печи вместимостью до 500 т по устройству схожи с отражательной печью для выплавки штейна (рис. 4.8).

Огневого рафинирования в отражательной печи длится ~ 24 ч и включает следующие периоды: загрузка (длится до 2 ч), расплавление (~ 10 ч), окислительная обработка расплава, удаление шлака, восстановительная обработка, разливка готовой меди. Рафинирование в цилиндрических печах, где не требуется плавления меди, длится примерно в два раза меньше и состоит из четырех последних периодов процесса в отражательной печи.

Окислительная обработка длительностью 1,5–4 ч заключается во вдувании в ванну воздуха через погруженные на глубину 600–800 мм стальные трубки, покрытые огнеупорной обмазкой. При этом окисляются примеси с большим, чем у меди химическим сродством к кислороду – такие, как Al, Fe, Zn, Sn, Sb, Bi, As, Ni и немного меди до Cu_2O .

Полностью остаются в меди золото и серебро и большая часть селена и теллура. Оксиды примесей, Cu_2O и загружаемый в печь в небольших количествах кремнезем образуют на поверхности ванны шлак, который в конце окислительной продувки удаляют из печи деревянными гребками.

Восстановительную обработку ванны (дразнение) длительностью 2,5–3 ч проводят для раскисления меди (удаления кислорода, содержащегося после окислительной продувки в количестве до 0,9% в виде Cu_2O) и удаления растворенных газов. Ранее дразнение проводили погружением в расплав сырой

древесины (жердей, бревен), в настоящее время – путем вдувания паромазутной смеси или природного газа.

Вдуваемые вещества разлагаются с образованием H_2 , CO и CH_4 , которые, выделяясь, вызывают перемешивание ванны и удаление растворенных газов (SO_2 , CO_2 и др.), а также раскисляют ванну, восстанавливая Cu_2O , например по реакции



После дразнения медь, содержащую $< 0,01\% S$ и $< 0,2\% [O]$, разливают в аноды – слитки толщиной 35–40, длиной 800–900 и шириной 800–900 мм, предназначенные для электролитического рафинирования. Анодная медь содержит 99,4–99,6% меди. Слитки-аноды, подвергаются *ультразвуковому контролю*.

4.4.6. Электролитическое рафинирование

При электролитическом рафинировании решаются две задачи – глубокое рафинирование меди от примесей, что обеспечивает ее высокую электропроводность, и попутно извлечение ценных золота, серебра и селена. Электролиз ведут в ваннах ящичного типа длиной 3–5,5, шириной 1 и глубиной 1,2–1,3 м, футерованных внутри кислотостойкими материалами (винилпласт, стеклопластик и др.). В ванне подвешивают аноды и между ними катоды – пластины из чистой меди. Электролитом служит раствор $CuSO_4$ и H_2SO_4 , напряжение между анодами и катодами 0,3–0,4 В. Происходит электролитическое растворение анодов, т.е. в раствор переходят ионы Cu , а на катодах эти ионы разряжаются, осаждаясь на них слоем чистой меди. Электролит периодически обновляют. Часть примесей остается в электролите, а такие, как Au , Ag , Se , Te , Pb , Sn , Pt выпадают в осадок – шлам, который выгружают из ванны и перерабатывают, извлекая ценные металлы. Удельный расход электроэнергии равен 230–350 кВт/ч на 1 т меди.

Растворение анода длится 20–30 суток, катоды выгружают через 6–12 суток. Перед выгрузкой производится *ультразвуковое* определение толщины катода и его акустических свойств.

Часть катодов направляют потребителям, а основное количество переплавляют для получения слитков и литых заготовок. Катоды расплавляют в отражательных и шахтных печах с отоплением природным газом, в электродуговых и индукционных печах. Жидкую медь разливают на карусельных разливочных машинах в вайербарсы или в слитки различной формы. Разливку производят также на установках непрерывной и полунепрерывной разливки, получая литые заготовки требуемого сечения. Применяют литейно-прокатные агрегаты, где отливаемую заготовку обжимают в прокатных валках агрегата до получения полосы или прутка, подвергаемых ультразвуковому контролю.

4.5. Контактный УЗ-контроль толщины листопроката меди и цветных сплавов

К основным средствам ультразвукового контроля технологических процессов цветной металлургии, включая электролитическое рафинирование меди, относятся толщиномеры.

В первое поколение ультразвуковых приборов и систем вошли разработки:

– *резонансных* толщиномеров по методу частотной модуляции [148] С. Соколова; *контактных* «Сонигейдж» У. Эрвина в 1944 г., УРД-3 Д. Шрайбера в 1951 г., УРД-6 (ТУК-3) ЦНИИТ-МАШ в 1960 г. и *иммерсионных* приборов «Видигейдж» фирмы «Бренсон» в 1955 г., «Металл-2М» ВНИИНК [149–151] в 1967 г.;

– *приставок* к эхо дефектоскопам «Хьюз & Сан», «Крауткремер», УЗД-7 А. Матвеева [149; 152] и другие в 1946–50 гг.;

– *время-импульсных* толщиномеров на базе эхо импульсного дефектоскопа Н. Бражникова и импульсного анализатора О. Бабикова [153–154] в 1956–58 гг.;

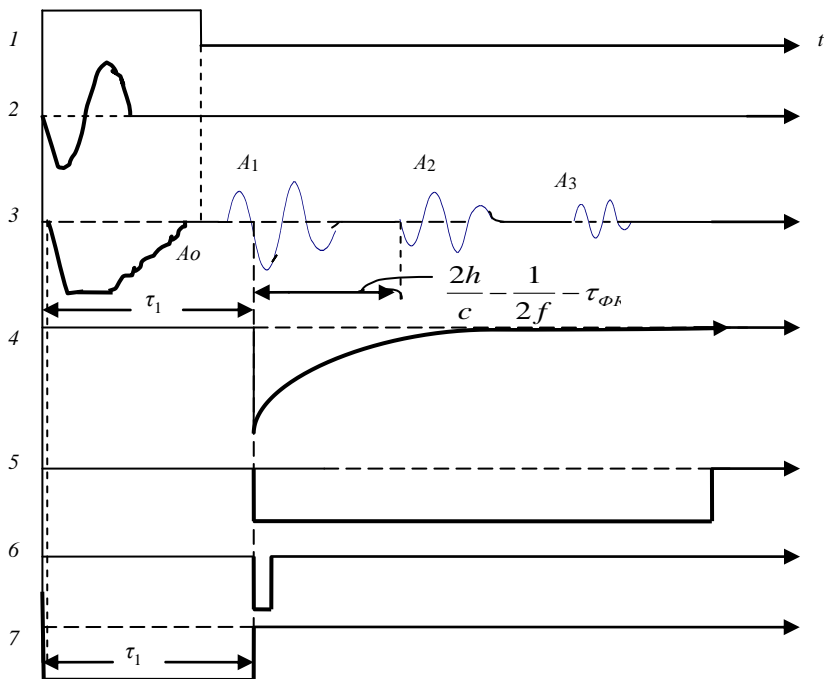


Рис. 4.10. Импульсные диаграммы блоков толщиномера УЗИТ

Принцип действия созданного Н. Бражниковым в НТК СЦМА и впервые примененного на заводе «Красный Выборжец» прибора УЗИТ на базе *СПП* и импульсного измерителя скорости ультразвука типа УЗК-1Э [88], заключается в следующем.

С блокинг-генератора *ГСИ* вырабатываемые им импульсы *1* (эюра 1, рис. 4.10) синхроселекции длительностью $0,4 \text{ мкс}$ с периодичностью 1 мс поступают на вход импульсного генератора *ГИ* и управляющий вход селекторного усилителя *СУ*, соединенного с амплитудным ограничителем *АО*.

Под воздействием импульсов *1* в *ГИ* формируются двух-полуцикловые импульсы *2* (эюра 2, рис. 4.10) общей длительностью 130 нс , поступающие на пусковой вход триггера *T* и на

вход усилителя мощности *УМ*, который своим выходом соединен с *СПП*.

Жестко демпфированный *ПЭ* диаметром 5 мм в *СПП* возбуждается поступающим из *УМ* импульсом 2 (эпюра 2) на частоте 8 МГц и излучает через тонкий протектор в *КС* короткий *УЗ*-импульс из трех полуциклов колебаний. В сравнении с возбуждением импульсом 2 (эпюра 2) излучение удлиняется на полуцикл). Внутри *КС* излученный импульс испытывает ряд отражений от противоположной вводу поверхности *КС* (граничащей с воздухом) и от поверхности, акустически контактирующей с *СПП*. Модуль коэффициента отражения от воздуха равен 1. Для описываемого толщиномера материалом *КС* являются цветные металлы и сплавы, акустический импеданс (*АИм*) которых одного порядка с *АИм* демпфированного *ПЭ* со стальным протектором (толщиной 50 мкм). Поэтому коэффициент отражения *УЗ*-импульса от *СПП* менее 0,5 и *УЗ*-отражения имеют резко убывающий характер.

Поступившие в *СПП* из *КС* *n*-отраженные *УЗ*-импульсы (*n* – число отражений) преобразуются *ПЭ* в *СПП* в электрические импульсы, поступающие в амплитудный ограничитель *АО*. Последовательность этих (удлиненных *ПЭ* при приеме в *СПП* еще на полуцикл по сравнению с излучением) импульсов (A_1, A_2, \dots, A_n) на выходе *АО* приведена на эпюре 3 (рис. 4.10). Вместе с ними на выход *АО* проходит также начальный импульс A_0 , представляющий собой ограниченный по амплитуде импульс электрического возбуждения с «продолжением» в виде короткого высокочастотного импульса (*ВЧ*-импульса) пьезореакции *ПЭ* на электрическое возбуждение видеоимпульсом 2. Длительность и амплитуда пьезореакции обратно пропорциональны степени демпфирования *ПЭ*. В толщиномере *УЗИТ* длительность начального импульса A_0 на амплитудном уровне 0,1 A_1 составляет менее 400 нс.

В селекторном усилителе *СУ* (входом соединенным с *АО*), под воздействием поступающего из *ГСИ* селектирующего им-

пульса 1, имеющего длительность 400 нс, начальный импульс A_0 блокируется и на выход CV (эпюра 4) не поступает. Выходной сигнал CV представляет собой видеоимпульс 4 с крутым передним фронтом, соответствующим началу 2-го полуцикла (отрицательного, эпюра 3) первого эхо-сигнала A_1 . Задний фронт выходного сигнала 4 имеет спад по экспоненте до нуля-потенциала.

Выходной сигнал 4 поступает на пусковой вход ждущего блокинг-генератора $ЖБГ$, который вырабатывает прямоугольный импульс 5 длительностью 100 мкс. По переднему фронту этого импульса в формирующем каскаде $ФК$ вырабатывается нормированный импульс 6, поступающий на стопный вход триггера Tr .

Под воздействием импульса 6 триггер переводится в исходное состояние и на его выходе (эпюра 7) образуется *информативный* прямоугольный импульс 7 длительностью

$$\tau_1 = \frac{2h}{c} + 2\tau_{ПР} + \frac{1}{2f} + \tau_{ФК}, \quad (4.82)$$

где: $\tau_{ПР}$ – время прохождения ультразвука через протектор; $\tau_{ФК}$ – задержка формирования стопного импульса 6 относительно начала первого (положительного на эпюре 3) полуцикла эхо-сигнала A_1 .

Последовательность импульсов 7 триггера Tr (с периодом следования 1 мс) поступает на вход время-аналогового преобразователя $ВАП$, выходной сигнал которого по амплитуде пропорционален длительности τ_1 импульсов 7. Этот сигнал поступает в выходной блок $ВБ$, в котором из сигнала вычитается часть его, соответствующая сумме времени двойного прохождения ультразвука через протектор $СПП$ (при $УЗ$ -излучении и приеме) и полного времени задержки в формировании стопного сигнала 6. Из $ВБ$ выходной сигнал поступает через реле P в регистрирующий прибор $РП$ класса 0,5 с градуированной в мм шкалой толщины $КС$. При изменении марки металла $КС$ по стандартному ее образцу производится подстройка цены деле-

ния *РП* регулятором, имеющимся перед выходной клеммой в *ВБ*. При отсутствии эхо-сигнала, входе его в мертвую зону или неисправности селекторного усилителя импульсы 5 от ждущего *БГ* перестают поступать на реле *Р1* и его контакты размыкаются, прекращая доступ сигнала выходного блока в *РП*, показания которого зануляются.

Технические характеристики толщиномера УЗИТ:

Поддиапазоны измерений, мм	1,2–5; 1,2–10; 1,2–20
Погрешность	измерений
от верхнего предела поддиапазона, % не более	0,5
Частота ультразвука, МГц	8
Питание от сети переменного тока, В (Гц).....	220 (50)

Библиографический список к главе 4

1. **Jacob, W.** Die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit and Schmelzpunkt-leichschmelzbarer Metalle von Wasser and Eis / W. Jacob. – Göttingen, 1939.
2. **Pellam, J.R.** Ultrasonic absorption and velocity measurements in liquids by means of pulse techniques / J.R. Pellam // Bull. Amer. Phys. Soc. – 1946. – V. 21. – P. 21.
3. **Galt, J.K.** Sound absorption and velocity in liquefied argon, oxygen, nitrogen and hydrogen / J.K. Galt // Mass. Inst. Technol. Rep. – 1947. – № 46.
4. **Pellam, J.R.** Ultrasonic absorption and velocity measurements in liquid helium / J.R. Pellam, C.F. Squere // Phys. Rev. – 1947. – V. 71. – P. 477.
5. **Galt, J.K.** Mechanical properties of alkali-halide crystals / J.K. Galt // Mass. Inst. Technol. Techn. Rep. – 1947. – № 45. – P. 24.
6. **Frederick, J.R.** Ultrasonic measurement of the elastic properties of polycrystalline materials at high and low temperatures / J.R. Frederick // Journ. Acoust. Soc. Amer. – 1948. – V. 20. – P. 586.
7. **Nolle, A.W.** Measurement of ultrasonic bulk-wave propagation in high polymers / A.W. Nolle // Journ. Acoust. Soc. Amer. – 1948. – V. 20. – P. 587.

8. **Nolle, A.W.** Measurement of ultrasonic bulk-wave propagation in high polymers / A.W. Nolle, S.C. Mowry // *Journ. Acoust. Soc. Amer.* – 1948. – V. 20. – P. 432.
9. **Overton, W.C.** Ultrasonic measurements in metallic Beryllium at low temperatures / W.C. Overton // *Journ. Chem. Phys.* – 1950. – V. 48. – P. 113.
10. **Hughes, D.S.** Variation of elastic moduli and wave velocity with pressure and temperature in plastics / D.S. Hughes, E.B. Blankenship, R.L. Mims // *Journ. Appl. Phys.* – 1950. – V. 21. – P. 294.
11. **Баби́ков, О.И.** Импульсные ультразвуковые методы исследований физико-химических процессов. Диссертация. – Л.: ЛЭТИ, 1953.
12. **Бражни́ков, Н.И.** Внедрение прибора для дефектоскопии прессы-уляжины в прутках / Н.И. Бражни́ков // *Отчет СКБ ЦМА 9–11.* – М., 1957.
13. **Зашу́к, И.В.** Электроника и акустические методы испытания строительных материалов / И.В. Зашу́к. – М.: Высшая школа, 1968.
14. **Smith, M.C.** The velocity of sound in water as a function of temperature and pressure / M.C. Smith, A.W. Lawson // *Journ. Chem. Phys.* – 1954. – V. 22. – № 3. – P. 351.
15. **Воронов, Ф.Ф.** Аппаратура высокого давления для ультразвуковых исследований до 10 кат / Ф.Ф. Воронов, Л.Ф. Верещагин // *Приборы и техника эксперимента.* – 1960. – № 6. – С. 104–106.
16. **Воронов, Ф.Ф.** Импульсная установка для измерения скорости распространения УЗ-волн / Ф.Ф. Воронов, Л.Ф. Верещагин, В.И. Муравьев // *Приборы и техника эксперимента.* – 1958. – № 3. – С. 81–85.
17. **Parthasarathy, S.** Studies in ultrasonic propagation in mixtures of ethyl alcohol and water / S. Parthasarathy, M. Pancholy // *Ztschr. angew. phys.* – 1958. – Bd. 10. – № 10. – S. 452.
18. **Астраханкин, В.А.** К вопросу об измерении скорости распространения ультразвука в нефтях / В.А. Астраханкин и др. // *Применение ультразвуки к исследованию веществ.* – М.: МОПИ, 1961. – Вып. 14. – С. 77.
19. **Бражни́ков, Н.И.** Ультразвуковые методы / Н.И. Бражни́ков. – М.: Энергия, 1965.
20. **Бражни́ков, Н.И.** Способ ультразвукового контроля параметров твердых сред / Н.И. Бражни́ков и др. // *Авт. св-во № 285395.* – БИ. – № 33. – 1970.
21. **Бражни́ков, Н.И.** Аппаратура для одновременного измерения параметров продольных и поперечных УЗ-волн в твердых материалах / Н.И. Бражни́ков, В.И. Рогожников // *Тез. докл. VII Всес. акуст. конф.* – Л., 1971. – С. 41.

22. **Бражников, Н.И.** Способ формирования коротких пусковых импульсов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 242525 от 6.03.1967. – БИ. – № 15. – 1969.
23. **Биргер, Г.И.** Устройство для измерения временных интервалов приема ультразвуковых импульсов / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников, М.А. Сиваков // Авт. св-во № 242526. – БИ. – № 15. – 1969.
24. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой импульсный локаатор / Н.И. Бражников [и др.] // Авт. св-во № 267389. – БИ. – № 12. – 1970.
25. **Balaian, R.D.** Ultraschalleinrichtung für Dickenmessungen an Dünnwandigen Prüflingen / R.D. Balaian [und andere] // Deutch. Pat. 2021095. Int. Cl. G01N 29/00. 1971.
26. **Бражников, Н.И.** Способ УЗ-эхо-локации тонкостенных сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 237438 от 12.07.1967. – БИ. – № 15. – 1973.
27. **Королев, М.В.** Универсальный эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер / М.В. Королев // Дефектоскопия. – 1972. – № 1. – С. 38–45.
28. **Бражников, Н.И.** Устройство для измерения УЗ-скорости / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 204038. – БИ. – № 21. – 1967.
29. **Кондрашов, Л.А.** Устройство для автоматического измерения скорости ультразвука в жидкостях и пробоотборной линии / Л.А. Кондрашов и др. // Пат. РФ № 1552016. МКИ G01N 29/00, 1994.
30. **Бражников, А.И.** Бесконтактный одноканальный время-импульсный расходомер / А.И. Бражников и др. // Измерительная техника. Метрология. – 2004. – № 11. – С. 16–25.
31. **Бражников, Н.И.** Измерение концентрации гидрометаллургических растворов по скорости ультразвука / Н.И. Бражников // Отчет НИР 500-11-1. – М.: СКБ ЦМА, 1958.
32. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой концентратомер цинка в цинковом электролите / Н.И. Бражников // Отчет СКБ ЦМА 681-11-1. – М., 1959.
33. **Бражников, Н.И.** Установка для прецизионного измерения ультразвуковых характеристик жидких и твердых сред / Н.И. Бражников // Тез. докл. Всесоюзной научн.-технич. конф. по применению ультразвука в промышленности. – М., 1960. – С. 51.
34. **Welkowitz, W.** Ultrasonic flowmeter / W. Welkowitz // Pat. USA № 2923155. Prior. 2.02.1960.
35. **Биргер, Г.И.** Ультразвуковой концентратомер растворов / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников // Авт. св-во № 134904. – БИ. – № 1. – 1961.

36. **Бражников, Н.И.** Распространение ультразвуковой волны в бесконтактном акустическом датчике ультразвуковых расходомеров / Н.И. Бражников // Докл. IX Межвуз. науч. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1961.
37. **Биргер, Г.И.** Ультразвуковой расходомер / Г.И. Биргер, Н.И. Бражников // Авт. св-во № 127077 от 14.05.1959. – БИ. – № 6. – 1960.
38. **Бражников, Н.И.** Высокочастотный фазовый детектор УЗ-расходомеров / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 400809. Приор. 5.05.65. – БИ. – № 40. – 1973.
39. **Бражников, Н.И.** Способ беспроливной градуировки фазовых УЗ-расходомеров / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 209783. – БИ. – № 6. – 1968.
40. **Бражников, Н.И.** УЗ-двухканальный фазовый расходомер жидкостей и газов / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 281844. – БИ. – 1970. – № 29.
41. **Бражников, Н.И.** Способ автоматической компенсации погрешностей фазовых УЗ-расходомеров и устройство для его осуществления / Н.И. Бражников, Н.Ф. Орлова // Авт. св-во № 178128 от 2.11.1962. – БИ. – № 2. – 1966.
42. **Бражников, Н.И.** Двухканальный акустический преобразователь расхода фазового типа / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 273947. Приор. 2.10.68.
43. **Бражников, Н.И.** Экспресс-контроль малых расходов жидкости УЗ-методами / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // Докл. XIII межвуз. научн. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
44. **Бражников, Н.И.** УЗ-расходомер переносного типа. / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // Методы и приборы для измерения расходов и количеств жидкости, газа и пара. – Л.: ВНИИМ, 1969. – С. 59.
45. **Бражников, Н.И.** УЗ-расходомер жидких сред / Н.И. Бражников, Г.Н. Колманович, Э.Д. Крылова // Авт. св-во № 288307. – БИ. – № 35. – 1970.
46. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер жидких сред / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 288333. – БИ. – № 36. – 1970.
47. **Бражников, Н.И.** УЗ-расходомер / Н.И. Бражников, А.С. Оганесов // Авт. св-во № 322622. – БИ. – № 36. – 1971.
48. **Бражников, Н.И.** Фазовые соотношения в акустическом тракте расходомера со съёмным пьезопреобразователем / Н.И. Бражников и др. // Тез. докл. XVII научн.-метод. конф. – Таганрог: ТРТИ, 1971. – С. 36

49. **Бражников, Н.И.** Способ измерения температурного коэффициента скорости распространения акустических колебаний в средах / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 325511. – БИ.– 1972. – № 3.
50. **Бражников, Н.И.** УЗ-фазовый двухканальный расходомер УЗР-1 / Н.И. Бражников // Приборы и системы управления. – 1972. – № 11. – С. 13–14.
51. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 371438. – БИ.. – 1973. – № 12
52. **Бражников, Н.И.** Фазовое ультразвуковое устройство для контроля давления и расхода жидкости / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 416568. – БИ.– 1974. – № 7.
53. **Бражников, Н.И.** Устройство для экспресс-контроля расхода жидкостей. / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 457918. – БИ.– 1975. – № 8.
54. **Бражников, Н.И.** Способ изготовления акустического преобразователя мозаичного типа / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // Авт. св-во № 459718. – БИ.– 1975. – № 11.
55. **Балдин, А.А.** Устройство для контроля физических параметров жидких сред / А.А. Балдин и др. // Авт. св-во № 468145. – БИ.– 1975. – № 12.
56. **Джапаридзе, И.Т.** Измерения влагосодержания жидкостной продукции УЗ-методом / И.Т. Джапаридзе, А.З. Якобишвили, Н.И. Бражников // Достижения и перспективы разработки и внедрения средств измерения влажности продукции агропромышленного комплекса. – Кутаиси, 1984. – С. 256
57. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой измеритель концентрации растворов / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина // Авт. св-во № 1231453. – БИ. – № 18. – 1986.
58. **Бражников, Н.И.** К вопросу УЗ-контроля плотности жидкости без приёма прошедшей через неё волны / Н.И. Бражников, Н.С. Шавыкина // УЗ-методы интенсификации технологических процессов. – М.: МИСиС, 1979. – С. 36.
59. **Александров, А.М.** Ультразвуковой импульсный прибор для контроля металлоконструкций / А.М. Александров, Н.И. Бражников, А.А. Полянский // Докл. XIII межвуз. научн. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
60. **Бражников, А.И.** Об ультразвуковом контроле скорости потока жидкости без расстыковки трубопровода по методу Н.И. Бражникова / А.И. Бражников и др. // Инженерно-физический журнал – 2006. – Т. 79. – № 2. – С. 131–138.

61. **Holbrook, R.D.** Journ. Acoust. Soc. Amer. – 1948. – V. 20. – P. 590.
62. **Kritz, J.** Acoustic Velocity Measuring System / J. Kritz // USA Pat. 2826912. Int.Cl. G01H 5/00, 1948.
63. **Kritz, J.** An Ultrasonic Flowmeter / J. Kritz // Instruments and Automation. – 1955. – V. 28. – № 11. – P. 1912–1913.
64. **Kritz, J.** An Ultrasonic Flowmeter for liquids / J. Kritz // Proceedings of the Instrument Society of America. – 1955. – V. 10. – Part. 1. – № 16/3. – P. 1–6.
65. **Greenspan, M.** Speed of Sound in Water by direct method / M. Greenspan, C.E. Tschiegg // Journ. Research. Nat. Standarts. – 1957. – V. 59. – № 4. – P. 249.
66. **Kritz, J.** Acoustic Velocity Measuring System / J. Kritz // Pat. USA 2826912, 1958.
67. **Kritz, J.** Apparatus for suppressing undesirable modes in ultrasonic flowmeters / J. Kritz // Pat. USA 2831348, 1958.
68. **Kritz, J.** Mass. flow fluid measurement / J. Kritz // Pat. USA № 2911825, 1959.
69. **Kritz, J.** Flowmeter / J. Kritz // Pat. USA № 2911826, 1959.
70. **Tschiegg, C.E.** Transistorized velocimeter for measuring the speed of sound in the sea / C.E. Tschiegg, E.E. Nays // Journ. Acoust. Soc. Amer. – 1959. – V. 31. – № 7. – P. 1033.
71. **Гордон, М.М.** Измерение расходов каменноугольной смолы импульсным ультразвуковым расходомером / М.М. Гордон, Е.Т. Прокураков, В.В. Шапиро // Приборостроение. – 1959. – № 9. – С. 24–25.
72. **Михалев, Б.Е.** Основные схемные решения ультразвуковых приборов физико-химического контроля / Б.Е. Михалев, Г.С. Поль-Мари // Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы – М.: ЦИНТИЭП, 1960. – С. 60–64.
73. **Бражников, Н.И.** Изыскание способов непрерывного измерения расходов жидкостей / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 35-11-1. – М.: СКБЦМА, 1960.
74. **Гитис, М.Е.** Установки для измерения скорости звука в жидких металлах и расплавах / М.Е. Гитис, И.Г. Михайлов, А.С. Химунин // Вестник ЛГУ – Сер. физики и химии. – 1962. – № 22. – С. 52–56.
75. **Журавлёв, Л.И.** Способ исключения влияния паразитных отражений в акустических каналах частотно-импульсных расходомеров / Л.И. Журавлёв. – М.: Тр. НИИТП, 1964. – № 3. – С. 3–11.
76. **Балдин, А.А.** Вопросы конструирования акустических измерительных преобразователей расхода / А.А. Балдин и др. // Методы измерения расходов и количеств жидкости, газа и пара. – Л., 1969. – С. 56–57.

77. **Бражников, Н.И.** Метод исключения реверберационных погрешностей частотно-импульсных ультразвуковых расходомеров / Н.И. Бражников и др. // Докл. XIII межвуз. научн. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
78. **Бражников, Н.И.** Импульсно-фазовый прибор с прямым отсчетом УЗ-скорости в жидкостях / Н.И. Бражников, В.М. Карбачинский, В.Я. Копьев // Тр. VI Всес. акуст. конф. – М., 1968. – Серия СШ-1.
79. **Якубович, И.А.** Ультразвуковые методы контроля состава и свойств вещества Н.И. Бражникова / И.А. Якубович // Измерительная техника. – 1967. – № 8. – С. 84–85.
80. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой двухканальный частотно-импульсный метод бесконтактного контроля скорости потока жидкости / Н.И. Бражников, О.С. Вавилов, А.С. Оганесов // Докл. всесоюзн. совещ. «Точное измерение расходов, количеств и вместимостей веществ». – Казань, 1968.
81. **Ямщиков, В.С.** Методы и УЗ-аппаратура для исследования и контроля состояния массива горных пород / В.С. Ямщиков, Н.И. Бражников, В.П. Негурица // Прикладная акустика – Таганрог: ТРТИ, 1969. – Вып. 21. – С. 172.
82. **Бражников, Н.И.** Способ контроля скорости потока / Н.И. Бражников, А.С. Оганесов // Авт. св-во № 284462. – БИ. – № 32. – 1970.
83. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой частотно-импульсный метод бесконтактного контроля скорости потока жидкости / Н.И. Бражников, О.С. Вавилов, А.С. Оганесов // Точное измерение расходов и количеств веществ: тр. метрол. ин-та. – М., 1970. – Вып. 122 (182). – С. 141–145.
84. **Ямщиков, В.С.** Устройство для одновременного измерения скорости распространения и затухания ультразвука / В.С. Ямщиков, Н.И. Бражников, В.П. Негурица // Авт. св-во № 222771. – БИ. – 1970. – № 23.
85. **Бражников, Н.И.** Способ УЗ-контроля скорости потока / Н.И. Бражников, А.А. Иванов, А.С. Оганесов // Авт. св-во № 301179. – БИ. – № 14. – 1971.
86. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер / Н.И. Бражников, А.А. Иванов, А.С. Оганесов // Авт. св-во № 300876. – БИ. – № 13. – 1971.

87. **Бражников, Н.И.** Акустический способ контроля физических свойств жидких сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 321689. – БИ. – № 21. – 1971.
88. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой концентратомер цинка в цинковом электролите / Н.И. Бражников // Отчёт СКБ ЦМА 681-11-2. – М., 1960.
89. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой расходомер / Н.И. Бражников, А.А. Иванов, А.С. Оганесов // Авт. св-во № 330346. – БИ. – № 8. – 1972.
90. **Бражников, Н.И.** Устройство для измерения скорости распространения ультразвука в жидкостях / Н.И. Бражников, В.С. Ямщиков, И.П. Гольяева // Авт. св-во № 394462. – БИ. – № 34. – 1973.
91. **Kanevsky, I.N.** Verfahren zum messen des durchflüssen von flüssigen Medium und einrichtungen zu dessen realisierung / I.N. Kanevsky und andere // Deutch. Pat. № 2128750. Int.Cl. G01F 1/00, 1973.
92. **Бражников, Н.И.** Способ изготовления акустообразователя / Н.И. Бражников, Э.Д. Крылова // Авт. св-во № 459718. – БИ. – 1975. – № 11.
93. **Балдин, А.А.** Устройство для контроля физических параметров жидких сред / А.А. Балдин и др. // Авт. св-во № 468145. – БИ. – № 12. – 1975.
94. **Бражников, Н.И.** Зависимость спектра акустического импульса, распространяющегося через твёрдый слой, в растворе от его концентрации / Н.И. Бражников // Вопросы методики и техники ультразвуковой спектроскопии. – Каунас, 1974. – С. 24–28.
95. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковые методы измерения плотности вещества / Н.И. Бражников // Приборы и системы управления. – 1976. – № 10. – С. 17–21.
96. **Крылович, В.И.** Ультразвуковые частотно-фазовые методы исследования и неразрушающего контроля / В.И. Крылович // под ред. А.Г. Шашкова. – Минск: Наука и техника, 1985.
97. **Brazhnikov, N.I.** Verfahren zur Prüfung der Eigenschaften von Material in einem Behälter / N.I. Brazhnikov, N.N. Chavku., V.F. Kravtshenko // Schweiz. Pat. № 613047, 1977.
98. **Забелин, В.Л.** Ультразвуковое устройство для контроля параметров жидких сред / В.Л. Забелин и др. // Авт. св-во № 1376715. – БИ. – № 4. – 1988.
99. **Бражников, А.И.** УЗ-спектральный метод Н.И. Бражникова технологического контроля концентрации электролита / А.И. Бражников и др. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 3. – С. 54–56.

100. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин, А.И. Бражников. – М.: Теплотехник, 2008. – 256 с.
101. **Соколов, С.Я.** Устройство для испытания материалов / С.Я. Соколов // Авт. св-во № 23246. – МКИ G01N 29/04. – 1928.
102. **Соколов, С.Я.** Основы электроакустики / С.Я. Соколов. – Л.: ЛЭТИ, 1932.
103. **Отпущенников, Н.Ф.** Определение поглощения ультразвуковых колебаний в твердых и жидких средах / Н.Ф. Отпущенков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1939. – Т. 9. – С. 229.
104. **Отпущенников, Н.Ф.** Ультразвуковой метод исследования металлов / Н.Ф. Отпущенков // Заводская лаборатория – 1937. – Т. 6. – С. 999.
105. **Бабиков, О.И.** Ультразвук и его промышленное применение / О.И. Бабиков. – Л.: ГИЗ ФМЛ, 1958.
106. **Bär, R.** Eine Methode zur Bestimmung der elastischen Konstanten isotroper Festkörper mit Hilfe von Ultraschallwellen / R. Bär // Helv. phys. Acta. – 1940. – Bd. 13. – S. 61.
107. **Бражников, Н.И.** Способ сигнализации уровня жидких сред / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 450962. – 1975. – БИ. – № 1.
108. **Меркулов, Л.Г.** Методика экспресс-анализа свойств образцов малых размеров / Л.Г. Меркулов, В.А. Третьяков // Вопросы методики и техники ультразвуковой спектроскопии. – Каунас, 1973. – С. 75–78.
109. **Бражников, Н.И.** Устройство для контроля звукового давления в поле стоячей акустической волны / Н.И. Бражников, В.П. Вербицкий, И.А. Якубович // Авт. св-во № 233312. – БИ. – № 2. – 1968.
110. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой анализатор пульпы / Н.И. Бражников, В.А. Максимов, И.А. Якубович / Авт. св-во № 275499. – БИ. – № 22. – 1970.
111. **Бражников, Н.И.** УЗ-способ Н.И. Бражникова измерения толщины материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 308607. – БИ. – № 37. – 1978.
112. **Бражников, Н.И.** Акустический бесконтактный способ контроля толщины листовых материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 479406 от 16.09.1968. – БИ. – № 37. – 1978.
113. **Brazhnikov, N.I.** Method of checking thickness of sheet Materials by using acoustic oscilation and a device for effecting the same / N.I. Brazhnikov // Brit. Pat. № 1496060, 1975.

114. **Бражников, А.И.** Применение бесконтактного УЗ-метода Н.И. Бражникова для САРТ прокатываемых полос / А.И. Бражников и др. // Современные технологии и материаловедение. – Магнитогорск: МГМИ, 2004. – Вып. 2. – С. 38.
115. **Бражников, Н.И.** Способ дискретной УЗ-сигнализации уровня сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 333410 от 14.04.1970. – БИ. – № 11. – 1972.
116. **Бражников, Н.И.** Способ Н.И. Бражникова контроля физических параметров жидкостей / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 425098 от 18.05.1970. – БИ. – № 15. – 1974.
117. **Brazhnikov, N.I.** Method and device controlling gas-liquid or liquid-liquid interface in monolayer reservoirs / N.I. Brazhnikov // Brit. Pat. № 1555549, Int. Cl. G01B 17/00, 1977.
118. **Бражников, Н.И.** Бесконтактный уровнемер Н. Бражникова / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 418737. – БИ. – № 9. – 1974.
119. **Brazhnikov, N.I.** Verfahren zur Prüfung der Eigenschaften von Material in einem Behälter / N.I. Brazhnikov und andere // Schweiz. Pat. № 613047, 1977.
120. **Белевитин, В.А.,** Ультразвуковой бесконтактный контроль поверхностной плотности фольги способом Н.И. Бражникова / В.А. Белевитин и др. // Заводская лаборатория. – 2005. – Т. 71. – №10. – С. 35–37.
121. **Бражников, Н.И.** Разработка ультразвукового метода и приборов для контроля толщины латунного проката и прессованных труб / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 1-17-1. – М.: СКБ ЦМА, 1967.
122. **Александров, А.М.** УЗ-эхо локатор тонкостенных сред / А.М. Александров и др. // Авт. св-во № 344384 от 20.11.1967. – БИ. – № 21. – 1972.
123. **Бражников, Н.И.** Импульсный УЗ-метод измерения малых толщин / Н.И. Бражников и др. // Тр. VI Всес. конф. – Л., 1968. – Серия С18.
124. **Бражников Н.И.** УЗ-способ Н.И. Бражникова измерения толщины материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 308607. – БИ. – № 37. – 1978.
125. **Бражников, Н.И.** УЗ-импульсные методы измерения толщины металлов / Н.И. Бражников, В.В. Кузнецов // XIII межвуз. научн. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
126. **Бражников, Н.И.** Доводка и внедрение УЗ-толщиномера латунного проката / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 1-17-2. – М.: СКБ ЦМА, 1969.

127. **Балаян, Р.Д.** Ультразвуковой импульсный толщиномер / Р.Д. Балаян и др. // Авт. св-во № 239574. – БИ. – № 11. – 1969.
128. **Александров, А.М.** УЗ-импульсный прибор для контроля металлоконструкций / А.М. Александров и др. // Докл. XIII межвуз. научн. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
129. **Бражников, Н.И.** УЗ-эхолокация тонкостенных сред / Н.И. Бражников и др. // Прикладная акустика. – Таганрог: ТРТИ, 1970. – Вып. 21. – С. 177–179.
130. **Balaian, R.D.** Ultraschalleinrichtung für die Dickenmessung dünner Prüflingen / R.D. Balaian und andere // Österr. Pat. № 297357, 1971.
131. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковые толщиномеры, применяемые на заводе «Красный Выборжец» / Н.И. Бражников, Н.Н. Полунин // Цветная металлургия. – 1975. – № 2. – С. 36–37.
132. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой импульсный толщиномер с уменьшенной мёртвой зоной / Н.И. Бражников // Измерительная техника, 1975. – № 12. – С. 68.
133. **Бражников, Н.И.** УЗ-эхоимпульсный толщиномер / Н.И. Бражников, А.П. Гордеев // Авт. св-во № 487020. – БИ. – № 32. – 1975.
134. **Королев, М.В.** Генератор наносекундных импульсов для возбуждения апериодических пьезодатчиков / М.В. Королев // Приборы и техника эксперимента. – 1973. – № 4. – С. 125–126.
135. **Королев, М.В.** Аperiодический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов / М.В. Королев // Дефектоскопия. – 1973. – № 4. – С. 12–18.
136. **Королев, М.В.** УЗ-эхоимпульсный толщиномер УТ-30К с цифровой индикацией // М.В. Королев // Дефектоскопия. – 1974. – № 1. – С. 143–144.
137. **Королев, М.В.** Портативный эхо-импульсный УЗ-толщиномер УТ-31МЦ / М.В. Королев и др. // Дефектоскопия. – 1977. – № 2. – С. 18–26.
138. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой способ измерения толщины твёрдых сред / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 266404. – БИ. – № 10. – 1970.
139. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковое импульсное устройства для контроля параметров листовых материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 306767. – Приор 02.07.1968. – БИ. – № 37. – 1978.
140. **Бражников, Н.И.** Иммерсионный способ контроля физических свойств материалов / Н.И. Бражников // Авт. св-во № 918841. – БИ. – № 13. – 1982.
141. **Бражников, Н.И.** Исследование бесконтактного ультразвукового контроля толщины алюминиевого проката / Н.И. Бражников // Отчёт НИР 2-17-1. – М.: СКБ ЦМА, 1968.

142. **Бражников, Н.И.** Акустический амплитудный метод контроля толщины твёрдых сред / Н.И. Бражников // XIII межвуз. науч. конф. по применению ультразвуки к исследованию вещества. – М.: МОПИ, 1969.
143. **Бражников, Н.И.** Ультразвуковой толщиномер фольги / Н.И. Бражников и др. // Авт. св-во № 277265. – БИ. – № 24. – 1970.
144. **Бражников Н.И.** Разработка экспериментального бесконтактного ультразвукового толщиномера алюминиевого проката // Н.И. Бражников // Отчёт НИР 2-17-2. – М.: СКБ ЦМА, 1970.
145. **Brazhnikov, N.I.** Verfahren und Einrichtung zum Messen der dicke flachigen Guts mittels Schalleschwingunge / N.I. Brazhnikov // Deutsch. Pat. 2600154, 1977.
146. **Воскобойников, В.Г.** Общая металлургия / В.Г. Воскобойников и др. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002.
147. **Лисенко, В.Г.** Оборудование промышленных предприятий. Том 1. Развитие цветной металлургии. Тяжелые цветные металлы / В.Г. Лисенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплотехник, 2008.
148. **Sokolov, S.J.** Means for indicating flaws in materials / S.J. Sokolov // Pat. USA.2164125, 1937.
149. **Бергман, Л.** Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: ИИЛ, 1957.
150. **Шрайбер, Д.С.** Ультразвуковая дефектоскопия / Д.С. Шрайбер. – М.: Металлургия, 1965.
151. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1976.
152. **Богословский, Ю.В.** Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-7 и некоторые результаты его применения. / Ю.В. Богословский, М.С. Губанова, А.С. Матвеев // Заводская лаборатория. – 1952. – Т. 7. – С. 846–854.
153. **Бражников, Н.И.** Выявление прессутяжки с помощью УЗ-прибора УЗД-37 / Н.И. Бражников, И.А. Крым // Тех. бюл. з-да «Красный Выборжец». – Л., 1958. – № 1. – С. 14–17.
154. **Бабилов, О.И.** УЗ-метод контроля и анализа физико-химических процес-сов / О.И. Бабилов // Тез. докл. Всесоюз. научн.-технич. конф. по применению ультразвука в промышленности. – М., 1960. – С. 50.
155. **Мак-Скимин, Г.** Измерение механических характеристик жидкостей и твердых тел / Г. Мак-Скимин // Физическая акустика. – М.: Мир, 1966.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной составляющей частью арсенала новых средств, направленных на повышение надежности и достоверности ультразвукового контроля и регулирования технологических процессов (УЗКР ТП) в машиностроительной, металлургической, химической, энергетической и других отраслях промышленности, являются акустические преобразователи свойств (АПС) технологических сред. В зависимости от параметров последних (плотность, концентрация, давление, скорость аэро- и гидротоков, толщина и структура полуфабрикатов цветных металлов – проката, поковок, отливок и т.д.) и вынужденных особенностей их контроля (контактного и бесконтактного, без преломления ультразвуковой волны и с ним, с применением объемной, поверхностной Дж. Рэлея, нормальных волн Г. Лэмба и Н. Браунникова, их дисперсионных характеристик, реверберации, затухания, поглощения и т.д.) представлены:

а) расчетные аналитические выражения прохождения и отражения волны на границах «звукпровод – контролируемая среда», возникающей в преобразователе и контролируемой среде реверберации, дисперсионных характеристик и условий зарождения нормальных волн;

б) элементы и особенности конструирования контактных и бесконтактных акустических измерительных преобразователей свойств технологических сред в информативное изменение параметров ультразвука (фаза, частота, амплитуда, время распространения) при использовании поверхностной и нормальной волн, включая соотношения между параметрами излучающего и приемного преобразователей.

С целью обеспечения наиболее благоприятных условий практической реализации вышеупомянутого арсенала АПС технологических сред проанализированы:

– жидкостная экстракция в редкометаллическом производстве;

– воздействие мощного ультразвука на выщелачивание меди из халькозина;

– ключевые аспекты плавки и рафинирования меди;

– ультразвуковой контроль концентрации нитратов лантаноидов (самария и гадолиния);

– бесконтактный нормально-волновой контроль уровня жидкостей, плотности и толщины (слоя, покрытия) движущейся в воздухе технологической твердой среды (прокатываемых листов, полос и фольги, в частности) в металлургии и энергетике с использованием методов, которые впервые в мире открыл, исследовал и применил основатель УЗКР ТП, выдающийся ученый и конструктор Н. Бражников.

К таким методам, обозначившим крупный этап в развитии промышленного использования ультразвукового контроля, относятся:

– метод бесконтактного ультразвукового просвечивания технологической среды по степени ее аэроакустической прозрачности;

– метод «звнящей стенки», в котором источником информации о физических свойствах, технологическом давлении и уровне жидкости служит стенка гидроёмкости (трубопровода) при возбуждении в ней мод симметричной и антисимметричной, нормальной, продольно-поверхностной, рэлеевской поверхностной или наклонно распространяющейся поперечной ультразвуковых волн.

Данные методы существенно расширяют диапазон промышленного использования ультразвукового контроля без необходимости инструментально-конструктивной адаптации к параметрам и условиям эксплуатации трубопровода или гидроёмкости (диаметру, толщине стенки, температуре и влажности окружающей среды) и, следовательно, без значительных дополнительных затрат – временных, финансовых, производственно-трудовых.

Рассмотренные в вышедшей в издательстве ГОУ ВПО

«ЧГПУ» коллективной монографии авторов Н.И. Бражникова, В.А. Белевитина, Е.В. Бражниковой «Акустика ультразвукового контроля в технике» (2010 г.) научно-технические исследования природы ультразвуковых колебаний, основных свойств и граничной суперпозиции упругих волн – продольных, поперечных, поверхностных Дж. Рэлея, нормальных Г. Лэмба и Н. Бражникова, связи параметров упругости материальных сред с давлением ультразвуковой волны, системы уравнений давлений ультразвуковых волн на границах раздела материальных сред (жидких, газообразных, твердых) позволили создать предпосылки для совершенствования и модернизации в исследовательских и проектно-конструкторских организациях методов, технологий, комплексов контрольно-измерительной и регулировочно-управляющей аппаратуры.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные сокращения

АИм – акустический импеданс; *ПП* – пьезообразователь;
АПК – акустический преобразователь концентрации; *ПЭ* – пьезоэлемент;
АПП – акустический преобразователь расхода; *ПЭИ* – пьезоэлектрический излучатель;
АПС – акустический преобразователь свойств; *ПЭП* – пьезоэлектрический приемник;
БИ – бюллетень изобретений; *СПП* – совмещенный *ПП* (*ПЭИ*, *ПЭП*);
ЗП – звукопровод; *УЗ* – ультразвуковой, -ая;
КС – контролируемая среда; *УЗКР ТП* – ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов;
ПВР – полуволновой резонанс; *ЭИм* – электрический импеданс;
ПК – пьезокерамика; *ЭМР* – электромеханический резонанс

Предприятия и организации

Ассоциация АСК – Ассоциация разработчиков акустических систем контроля
ВКЗ – Владикавказский завод
ВНИИ ТВЧ – Всесоюзный НИИ токов высокой частоты
ГОУ ВПО «ЮурГУ» – Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет»
ГИРЕДМЕТ – Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности
ИГД – Институт горного дела
ЛГУ – Ленинградский государственный университет
ЛЭТИ – Ленинградский электротехнический институт
МГИ – Московский горный институт
МГИРЭА – Московский государственный институт радиоэлектроники и автоматики
ФГОУ «МИСиС» – Федеральное государственное образовательное учреждение «Московский институт стали и сплавов»

ческого резонанса ПЭ соответственно, $\Gamma\zeta$;
 g, i, h, h_{II} – концентрация, %; мнимое число, толщина, толщина ПЭ, м;
 $h_l (h_{33})$ – пьезоконстанта деформации, В/м;
 J_0, J_1 – функции Бесселя нулевого и первого порядка;
 k_d, k_h – динамический и статический (по толщине h) коэффициенты электромеханической связи;
 k, ka – волновое число, m^{-1} ; волновой параметр ПП;
 k_l, k_t, k_b, k_n, k_s – волновые числа продольных, поперечных, стержневых, нормальных и поверхностных УЗ-колебаний соответственно в твердой среде, m^{-1} ;
 l, t, b, n, s – продольная, поперечная, стержневая, нормальная и поверхностная волны в твердой среде, м/с;
 l, σ – акустическая база; коэффициент Пуассона;
 p – УЗ-давление на оси ПП при излучении, H/m^2 ;
 p_0, p_a – давление излучения и на акустическом цилиндре радиусом a , H/m^2 ;
 p_{cp} – среднее давление излучения по сечению цилиндра, H/m^2 ;
 Q_P, Q_D, Q_K, Q_M, Q_H – добротности: полная, демпфера, конструкционная, механических потерь, нагрузки (акустической);
 R_C, R_D, R_K, R_M, R_H – сопротивления акустические: суммарное, демпфера, конструкционное, механических потерь, нагрузки, Ом;
 r, r_m – расстояния между точками излучения и приема и от точки приёма ультразвука на оси до края излучающей поверхности соответственно, м;
 ψ – потенциал точечного источника, m^{-1} ;
 r_0, S – условное расстояние, м; поверхность излучения, m^2 ;
 R_T – радиус внутренней поверхности трубопровода, м;
 t – текущее время (и обозначение поперечной волны), с;
 V, V_{II} – электрические напряжения генератора на излучателе и принятого сигнала, В;
 Y_b, Y_t – модули: стержневой упругости (Юнга), сдвига, H/m^2 ;
 V, y, y_B – ось преобразователя; координата, проекция r на ось преобразователя, м; протяженность ближней зоны

излучения, m ;

$z_{ж}, z_{lз}, z_{lc}$ – удельные акустические импедансы жидкости, звукопровода, звукопоглощающего слоя для продольной волны, $H c/m^3$;

z_c – суммарный акустический импеданс ПП, $H c/m^3$;

$\alpha_{1кр}$ – первый критический угол ввода волны в твердую среду, $рад$;

$\alpha, \alpha', \alpha'_t$ – углы: излучения, отражения продольной и поперечной волн в ЗП относительно нормали к оси трубопровода, $рад$;

$\Delta\alpha$ – отклонение угла приема от угла излучения, $рад$;

$\Delta\varphi, \omega$ – фазовый сдвиг, $рад$; круговая частота, $Гц$;

β_b, β'_b, β – углы преломления волн: продольной l , поперечной t волн в стенке трубопровода относительно нормали к его оси и распространения волны в жидкостном потоке относительно нормали к его оси, $рад$;

$\delta_{ж}, \delta_{lз}, \delta_{lc}$ – коэффициенты затухания продольной волны в жидкости, звукопроводе и слое, m^{-1} ;

$\delta_l, \delta_t, \delta_b, \delta_n, \delta_s$ – коэффициенты затухания продольной, поперечной, стержневой, нормальной и поверхностной волн, m^{-1} ;

$\varepsilon_a, \varepsilon_b, \varepsilon_o, \varepsilon_1$ – аргументы функции Бесселя;

$\lambda, \lambda_{ж}, \lambda_{lз}$ – длина продольной волны в среде излучения, в жидкости и звукопроводе соответственно, m ;

$\rho, \rho_з, \rho_c$ – плотности среды, ЗП и звукопоглощающего слоя, $кг/m^3$;

$\tau_з, \tau_{ж}$ – время распространения волны в звукопроводе и жидкости, c ;

θ_a – коэффициент пропорциональности для коэффициента затухания антисимметричной нормальной волны;

θ_T – коэффициент сопротивления трубопровода;

φ_b, φ_a – фазы УЗ-колебаний на оси и акустическом цилиндре преобразователя при излучении, $рад$.

Научное издание

*Бражников Николай Иванович
Белевитин Владимир Анатольевич
Бражникова Елена Владимировна*

**АКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
СВОЙСТВ СРЕД В ТЕХНИКЕ**

Монография

Работа рекомендована РИСом университета.
Протокол № 12 (пункт 16) от 16.02.10.

Издательство ЧГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор О.В. Боярская
Компьютерная верстка Т.Н. Никитенко

ISBN 978-5-85716-806-6

Подписано в печать 00.00.2010
Формат 60×84 1/16 . Объем 11,0 уч.- изд. л.
Заказ № . Тираж экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЧГПУ
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69