

*На правах рукописи*

**Владимиров Илья Александрович**

**УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДИАГНОСТИКА ВОСХОДЯЩИХ  
ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РАСПРЕДЕЛЕННОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

01.04.06 - Акустика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном  
учреждении высшего профессионального образования  
“Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского”

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук, доцент  
**Муякшин Сергей Иванович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
**Салин Борис Михайлович**  
ИПФ РАН

кандидат физико-математических наук, доцент  
**Мартьянов Александр Иванович**  
ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Ведущая организация: Федеральное государственное научное учреждение  
"Научно-исследовательский радиофизический  
институт"

Защита состоится “ 30 ” мая 2012 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета  
Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.  
Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 4, ауд.  
203.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке  
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.ф.-м.н., доцент



В.В. Черепенников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследования.** Двухфазные потоки в виде смеси жидкости и газа встречаются в разных областях техники: в добыче нефти и газа, в химической и пищевой промышленности, в энергетике, в коммунальном хозяйстве. Для учета добытого углеводородного сырья, управления технологическими установками, контроля стоков, необходимо измерение расхода жидкой и газовой фаз по отдельности. В нефтяной промышленности проблема измерения расходов таких потоков возникла еще в начале 1980-х годов. Необходимо, чтобы приборы, измеряющие расход многофазного потока (расходомеры) удовлетворяли следующим требованиям: обладали приемлемой точностью и надежностью, не создавали возмущений в потоке, не зависели от режима течения и были пригодными для применения во всем возможном диапазоне изменения расходов компонентов потока. Несмотря на большое количество технических решений [1], предложенных в последние годы, ни один из двухфазных расходомеров, появившихся на рынке, всем указанным требованиям все же не отвечает [2]. В настоящее время для определения расходов потока в основном используется предварительная дегазация потока [2]. Такие установки дороги и сложны в эксплуатации. Поэтому создание надежных, точных и не слишком дорогих многофункциональных приборов для измерения расхода компонентов потока без их предварительного разделения является актуальной задачей. Отметим, что наиболее перспективными методами диагностики двухфазных потоков, являются активные акустические методы. В представленной работе для изучения и определения параметров двухфазных потоков используется ультразвуковая система, основанная на методе измерения скорости неоднородностей с помощью эффекта Доплера. Принцип работы системы приводится в [3,4]. В работе [3] описан способ ввода ультразвукового пучка в поток, основанный на использовании эффекта трансформации изгибной волны в стенке трубы (волны Лэмба) в продольную звуковую волну в жидкости. Там же предложено использовать для формирования волны Лэмба накладную фазированную антенную решетку из пьезоэлементов. В патенте [4] описан способ измерения параметров двухфазного потока и система для его реализации, в которой используется описанный выше способ ввода ультразвука в поток и эффект Доплера. Однако в [4] раскрывается только лишь принципиальная возможность определения расходов фаз потока. Поэтому полная реализация возможностей системы, включая достижение в большом диапазоне изменения расходов двухфазного потока достаточной точности измерения, требует систематического и углубленного исследования процессов распространения и рассеяния ультразвука в газожидкостных смесях (ГЖС).

**Целью работы** является детальное изучение закономерностей рассеяния ультразвуковых импульсов в восходящем газожидкостном потоке, в который они вводятся через стенку трубы с помощью накладного пьезоэлектрического преобразователя, выполненного в виде фазированной антенной решетки (ФАР), и

изучение возможности использования этих закономерностей для отдельного определения расходов газовой и жидкой фаз.

Для достижения этой цели в работе были поставлены следующие основные задачи:

1. Создание и испытание лабораторной экспериментальной установки и программного обеспечения для изучения процессов распространения и рассеяния в ГЖС ультразвуковых волн, излучаемых накладными ФАР.

2. Теоретические и экспериментальные исследования процессов распространения и рассеяния в ГЖС ультразвуковых волн, излучаемых накладными ФАР, при различных режимах течения.

3. Разработка на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований, способа определения расхода фаз газожидкостного потока в «пузырьковом» и «снарядном» режимах течения.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Использование разработанной модели формирования зависимости энергии рассеянных ультразвуковых сигналов от дальности (профилей), в «пузырьковом» режиме газожидкостного потока, позволяет определять газосодержание по форме профиля энергии.

2. В «снарядном» режиме течения, при прохождении мимо датчика жидкой перемычки, рассеяние происходит на содержащихся в ней пузырьках газа, а при прохождении газовой полости – на неоднородностях толщины стекающей пленки. Неоднородности толщины пленки, на которых происходит рассеяние, движутся относительно стенки со скоростью близкой к скорости стекания пленки.

3. Для определения расходов фаз потока, в «пузырьковом» режиме течения, наиболее информативными являются зависимости от дальности энергии и средней частоты рассеянного в потоке сигнала, а в «снарядном» режиме – временные реализации средней частоты сигнала, получаемые с различных удалений от датчика.

#### **Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Объяснен механизм формирования зависимостей энергии рассеянного сигнала от дальности в «пузырьковом» потоке. На его основе предложен способ измерения газосодержания (при фиксированном составе газовой и жидкой фаз), преимуществом которого является использование одного приемно-излучающего датчика.

2. При «снарядном» режиме течения исследованы механизм рассеяния ультразвуковых волн Лэмба в стенке трубы, по которой стекает пленка жидкости, а также поведение зависимостей различных характеристик рассеянного сигнала от времени (энергии, доплеровского сдвига частоты, ширины спектра).

3. Экспериментально проверена модель расчета интегральных расходных характеристик газожидкостного потока с использованием ультразвуковой системы с накладными ФАР.

**Достоверность результатов.** Научные положения и выводы, представленные в диссертационной работе, аргументированы, обоснованы и базируются на фундаментальных теоретических положениях общей акустики и теории распространения и рассеяния волн, а также результатах целенаправленных экспериментальных исследований.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обосновывается использованием современных средств и методик проведения исследований, повторяемостью результатов многократных экспериментов и согласованностью экспериментальных и теоретических оценок.

**Практическое значение.** Полученные в работе теоретические и экспериментальные результаты могут быть положены в основу разрабатываемых ультразвуковых измерителей расходов двухфазных потоков, а созданная и опробованная экспериментальная установка может рассматриваться как прототип ультразвукового расходомера.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на XII Всероссийском семинаре «Волновые явления в неоднородных средах», (Звенигород, МГУ, 2010), XII, XIII и XIV научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, ННГУ, 2008-2010), XV и XVI Нижегородских сессиях молодых ученых (Нижний Новгород, 2009, 2010).

По теме диссертационной работы опубликовано 5 статей в трудах конференций и 3 статьи в журналах из перечня, рекомендованного ВАК для публикации результатов кандидатских диссертаций. Работа выполнена при поддержке проекта ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" (контракт № П2134), руководителем которого был автор диссертации, и гранта государственной поддержки ведущих научных школ НШ-3700.2010.2.

**Личный вклад автора.** На протяжении всей исследовательской работы диссертант принимал непосредственное участие в постановке задач, проведении экспериментов и расчетов, построении моделей, обсуждении и физической интерпретации результатов исследований. Исключением является раздел 3.1.3, в котором автору принадлежат только проведение экспериментов и обсуждение результатов.

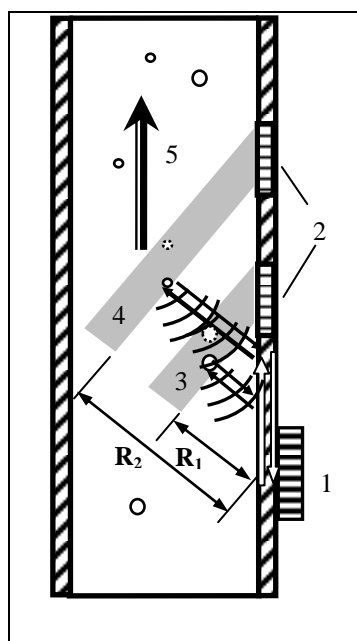
**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 112 страниц, включая 79 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 73 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована проблема исследования, обоснована ее актуальность, определены цели работы и задачи исследований. Сформулированы основные научные результаты, выносимые на защиту, определена их научная новизна и практическая значимость. Приведены сведения по апробации результатов работы.

**Первая глава** посвящена общему описанию и классификации двухфазных потоков. Приводятся количественные характеристики двухфазных потоков, а так же их возможные режимы течения, формируемые в вертикальной трубе в зависимости от различных соотношений расходов газа и жидкости. Также представлен обзор методов измерения параметров газожидкостных потоков, основой которого является проведенный в работе патентный анализ. Результаты проведенного анализа позволили определить направления исследований и сформулировать основные задачи, решение которых обусловило достижение цели данной диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена описанию используемой в данной работе ультразвуковой измерительной системы. В системе применяется бесконтактный способ ввода ультразвука в поток, основанный на трансформации антисимметричной волны Лэмба, возбуждаемой в стенке трубы с помощью накладной ФАР, параметры которой для этого подобраны специальным образом, в продольную звуковую волну в жидкости. При этом в жидкости одновременно формируются два симметричных луча. Рис.1 иллюстрирует этот способ (показан только один луч) в случае, когда в потоке



*Рис.1 Бесконтактный ввод ультразвука в поток. Белые стрелки – путь звука в стенке, черные – в жидкости.*

содержится небольшое количество неоднородностей, например, в виде пузырьков газа малых размеров.

Датчик (1) возбуждает в стенке трубы импульс изгибной волны (2), бегущий (как вверх, так и вниз) со скоростью  $C_f$ . Эксперимент показывает, что изгибная волна распространяется по стенке трубопровода на расстояние, в несколько раз превышающее длину преобразователя. Эта волна будет излучать в жидкость звуковую волну (3,4) (ее скорость  $C_s$ ), фронт которой, образуя со стенкой трубы угол  $\theta = \arcsin(C_s / C_f)$ . Таким образом, датчик и возбужденный участок трубы играют роль распределенного электромеханического преобразователя. На приеме за счет специальных приемов обработки данных формируются два независимых наклонных луча. В зависимости от задержек приема  $t_1 < t_2$ , соответствующий импульсный объем (или иначе «элемент дальности») будет перекрывать сечение трубы либо частично (3), либо полностью (4). Доплеровское смещение частоты (ДСЧ) сигнала, рассеянного одиночной

неоднородностью, определяется соотношением:  $\Delta f = 2 \cdot f_0 \cdot V \cdot \sin(\theta) / C_s$  ( $V$  – скорость рассеивателя относительно антенны,  $f_0$  – частота заполнения импульса). Поскольку  $\sin(\theta) = C_s / C_f$ , то доплеровский сдвиг  $\Delta f = 2 \cdot f_0 \cdot V / C_f$  не зависит от скорости звука в среде.

Для выделения доплеровского сдвига частоты в системе используется широко распространенный в радио- и акустической локации когерентно-импульсный метод

обработки эхосигналов [8]. Сигналы, относящиеся к определенным элементам дальности, подвергались спектральному анализу со скользящим окном. Перед вычислением спектра из анализируемого участка сигнала вычиталось среднее значение. Для спектров по нижепредставленным формулам вычислялись их интегральные характеристики: энергия  $En$ , средняя частота спектра  $F_d$  и ширина  $\Delta F$ .

$$En = \sum_{n=-N/2}^{N/2} |S_n|^2 \quad F_d = \mathcal{F} \cdot \frac{\sum_{n=-N/2}^{N/2} n \cdot |S_n|^2}{En} \quad \Delta F = \sqrt{\mathcal{F}^2 \cdot \left( \frac{\sum_{n=-N/2}^{N/2} n^2 \cdot |S_n|^2}{En} \right) - F_d^2}$$

Здесь:  $S_n$ - отсчеты спектра;  $\mathcal{F}=F_r/N$  – частотное разрешение,  $F_r$  – частота квантования (в данном случае – частота повторения импульсов),  $N$  – число отсчетов в спектральном окне. Экспериментально измеряя зависимости интегральных характеристик от номера «элемента дальности» или от времени (при выбранном «элементе дальности»), мы получим соответственно профили этих характеристик или их временные зависимости.

Измерительная система имела следующие параметры. Рабочая частота ФАР  $f_0=962$  КГц, расстояние между ее элементами  $l=0,78$  мм, число элементов –  $M=16$ , их ширина – 8 мм. Использовалось импульсное излучение с частотой повторения  $F_r=4$  кГц, длительность импульса составляла 13 периодов, т.е. 13,5 мкс. Частота квантования  $F_s$  сигналов составила 189 КГц.

Для правильной интерпретации результатов измерений характеристик потока необходимо знать структуру акустического поля в трубе и расположение импульсных объемов, соответствующих определенным временным стробам. В результате исследования акустического поля внутри трубы, заполненной жидкостью, экспериментально определено, что в ней существует пучек излучаемого сигнала, ширина которого примерно равна ширине излучающего датчика. Выяснено также, что зондирующий импульс несколько раз отражается от противоположных стенок трубы.

**Третья глава** посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процессов рассеяния ультразвуковых волн в «пузырьковом» потоке, а также в стекающей пленке жидкости, которая формируется при «снарядном» течении газожидкостной смеси. Все представленные в главе экспериментальные результаты получены на специально созданной в ННГУ лабораторной установке.

Параграф 3.1 посвящен исследованию «пузырькового» потока.

В разделе 3.1.1 представлена упрощенная модель формирования профилей энергии рассеянного сигнала, полученная с использованием первого приближения теории многократного рассеяния. Схема импульсной локации моностатическая, излучающий датчик работает и на прием. В модели использованы результаты экспериментального исследования акустического поля в трубе.

Основной результат, вытекающий из модели, заключается в том, что профиль энергии рассеянного сигнала имеет несколько максимумов (рис.2), и фактически представляет собой наложение (сумму) двух различных профилей. Первый формируется при обычном рассеянии «назад». Ему соответствует первый максимум.

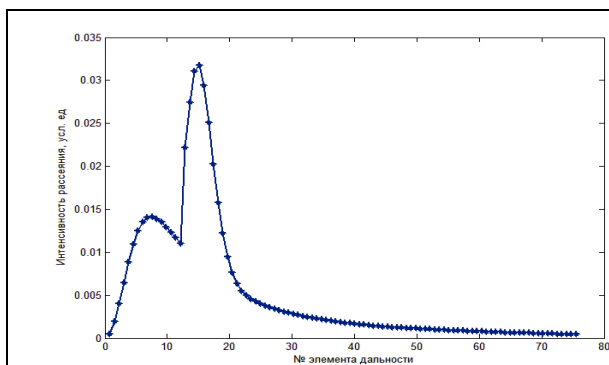


Рис.2 Зависимость энергии от номера элемента дальности в трубе с диаметром 4 см. (газосодержание 0,5 %)

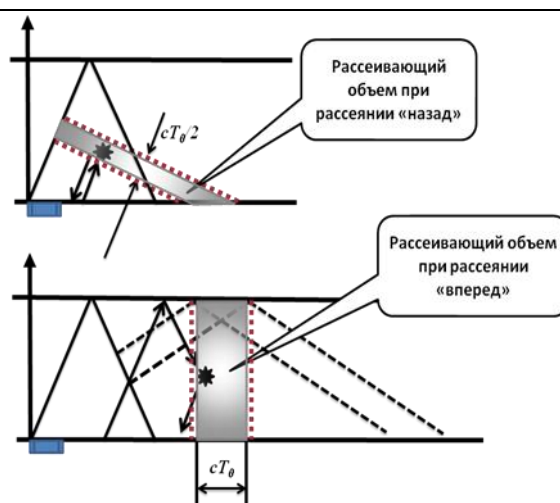


Рис.3 Изображение рассеивающих объемов

При этом сигнал от излучателя до рассеивателей и рассеянный обратно («назад») сигнал проходят по одному и тому же пути. Этому случаю соответствует импульсный объем  $\Delta V_1(t)$  с протяженностью  $C_s T_\theta / 2$  (рис.3), где  $T_\theta$  — длительность излученного импульса. Второй профиль рассеянного сигнала формируется иначе. В этом случае сигнал доходит до рассеивателей, например, после отражения от верхней стенки. На датчик же попадает сигнал, рассеянный уже не назад (по отношению к падающему на рассеиватель сигналу), а в переднюю полусферу («вперед»). Соответствующий импульсный объем  $\Delta V_2(t)$  имеет уже другую ориентацию и продольные размеры, которые для угла  $\theta = 28^\circ$   $\alpha = 28^\circ$  (случай, реализуемый в эксперименте) примерно вдвое больше  $\Delta V_1(t)$  (рис.3). Другая форма второго импульсного объема  $\Delta V_2(t)$  связана с геометрией задачи, вследствие которой время задержки рассеянного сигнала не зависит от координаты поперек трубы (вдоль диаметра). Поэтому, если в трубе есть несколько рассеивателей, находящихся на одной линии вдоль диаметра, сигналы, рассеянные от них «вперед», на приемник будут приходить одновременно.

В разделе 3.1.2 представлено экспериментальное исследование рассеяния ультразвуковых волн в потоке пузырьков и проведено сравнение эксперимента с теорией. На рис.4 показаны зависимости энергии от номера элемента дальности, полученные в опытах с водой при увеличении газосодержания в трубе диаметром 40 мм. Эти зависимости, действительно, имеют несколько максимумов, что согласуется с модельными расчетами.

На рис. 5 представлено отношение величин первого максимума энергии ко второму в зависимости от относительного газосодержания для пузырькового потока в



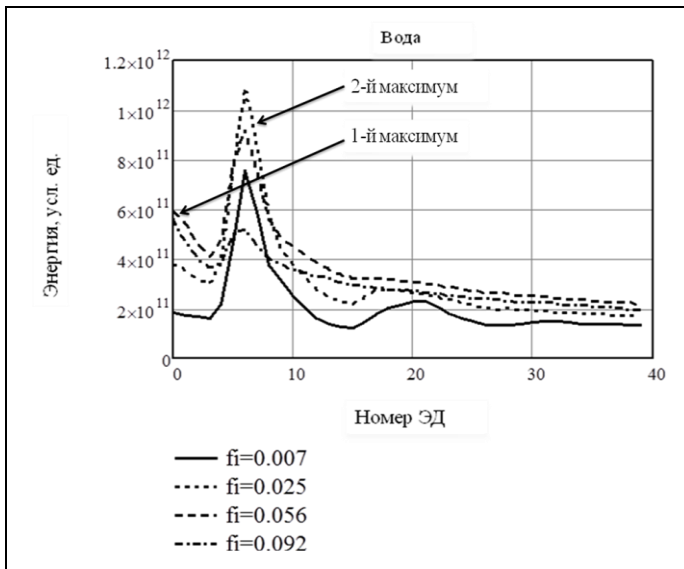


Рис.4 Профили энергии для воды.  $f_i$ -газосодержание

воде и гидросиле, полученное в эксперименте. Рядом, на рис.6 представлена зависимость той же величины для воды, рассчитанная с помощью модели. Эта зависимость имеет практически линейный рост, при этом поведение теоретической и экспериментальной зависимостей отношения первого и второго максимумов качественно совпадает. Наблюдаемое на графике аномальное поведение зависимости для гидросила при газосодержании более 3%, вероятно, объясняется

использованием для интерпретации результатов приближенной модели рассеяния.

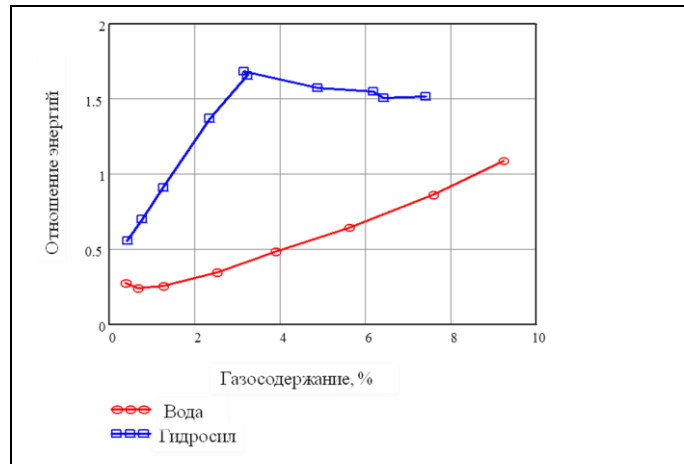


Рис.5 Отношение первого и второго максимумов энергии в зависимости от относительного газосодержания

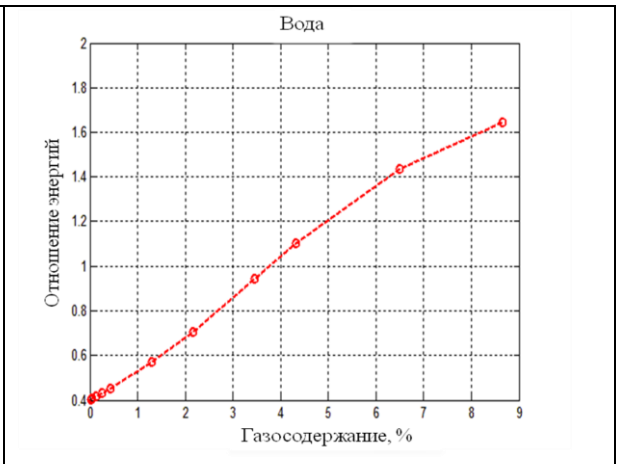


Рис.6 Отношение первого и второго максимумов энергии. Модель.

В разделе 3.1.3 экспериментально исследован метод определения размеров мелких газовых пузырьков в достаточно разреженном потоке с помощью набора полосовых фильтров настроенных на различные частоты. Эта задача достаточно важна, поскольку размер пузырьков главным образом определяет их рассеивающие свойства, и знание этого параметра позволяет строить для «пузырькового» потока ясную модель рассеяния, которая, в свою очередь, является основой для определения содержания газа в потоке.

Для получения информации о размерах пузырька, производилось численное моделирование процесса локации на основе решения уравнения Рэлея – Плессета для радиальных колебаний пузырька [6], а затем частотная фильтрация принимаемого сигнала, содержащего собственные колебания пузырька, с помощью набора полосовых фильтров, настроенных на различные частоты. Методика разделения сигналов от пузырьков разного размера была проверена экспериментально. Для

возбуждения собственных колебаний пузырьков в широком диапазоне создавался широкополосный зондирующий импульс. При этом регистрация сигналов, порождаемых колебаниями пузырька, производилась в полосе ниже центральной частоты зондирования. Генератор радиоимпульсов вырабатывал импульсные сигналы с длительностью около 2 мкс с частотой заполнения 1 МГц. Частотный диапазон, в котором осуществлялось возбуждение и регистрация собственных колебаний пузырька, составлял от нескольких кГц до 750 кГц. В результате экспериментов была продемонстрирована возможность выделения сигналов от пузырьков с оценкой их размеров в широком диапазоне радиусов. Недостатком такого метода является то, что сигналы от пузырьков, необходимые для их идентификации, должны приходить достаточно редко, чтобы на осциллограмме существовала возможность разделения времен их приходов. Поэтому данный метод измерения работоспособен только в разреженных потоках пузырьков.

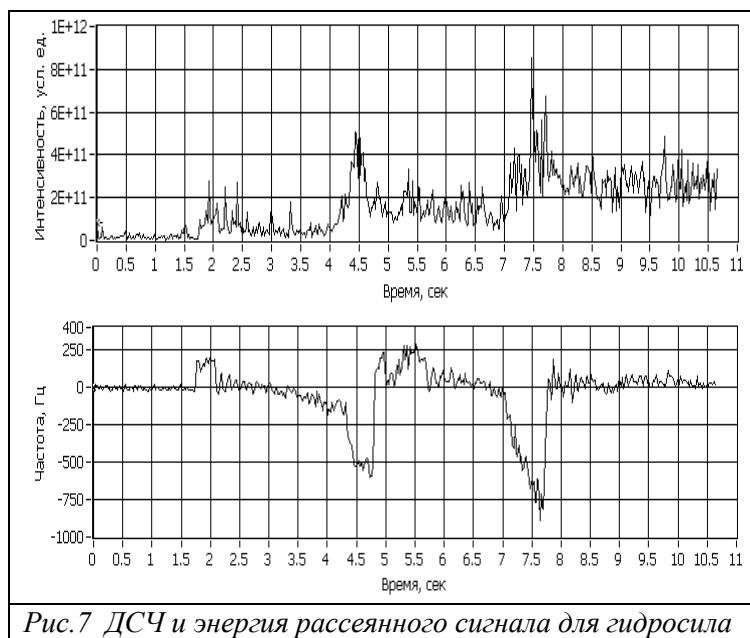


Рис. 7 ДСЧ и энергия рассеянного сигнала для гидросила

(ДСЧ) и энергии рассеянного сигнала. Обе реализации относятся к лучу (и волне Лэмба), направленному вверх – т.е. в сторону движения пузырей.

Основной интерес представляет тот факт, что энергия рассеянного на пленке сигнала в момент всплытия второго пузыря превышает энергию, рассеянную на пленке, стекающей в момент прохождения первого пузыря. Первый пузырь, который всплывает в невозмущенной жидкости, имеет правильную, симметричную форму. При его движении деформации поверхности стекающей пленки незначительны. Пузырь, следующий за первым, имеет уже искаженную, не симметричную форму, а стекающая пленка имеет значительные деформации толщины. Вероятно, именно за счет этого энергия, рассеянная при подъеме второго пузыря, значительно больше, нежели первого. Искажение формы второго пузыря вызвано воздействием на него возмущенной жидкости, находящейся в следе первого.

Параграф 3.2 посвящен исследованию процессов рассеяния ультразвуковых сигналов в стекающей пленке жидкости, возникающей при «снарядном» режиме течения. Ниже представлены результаты эксперимента при всплытии двух, следующих друг за другом пузырей. Первый пузырь всплывает в невозмущенной жидкости. На рис.7 показаны временные зависимости доплеровского сдвига частоты

В дальнейшем анализе подвергались именно те сигналы, которые получены при рассеянии на пленке, возмущенной следом предыдущего пузыря. Ниже, на одном графике (рис. 8, 9) представлен набор зависимостей ДСЧ от времени, полученных для пузырей различной протяженности. Эти зависимости совмещены так, что их начала (моменты времени, когда ДСЧ близко к нулю) совпадают. Для самого длинного пузыря, как видно из рисунка, временная зависимость (график) располагается в интервале времени от 0 до 1 сек. Видно также, что графики от более длинных пузырей продолжают графики от более коротких. Таким образом, при наложении друг на друга эти графики образуют зависимость, которая характеризует максимальную скорость стекания пленки как функцию ее длины.

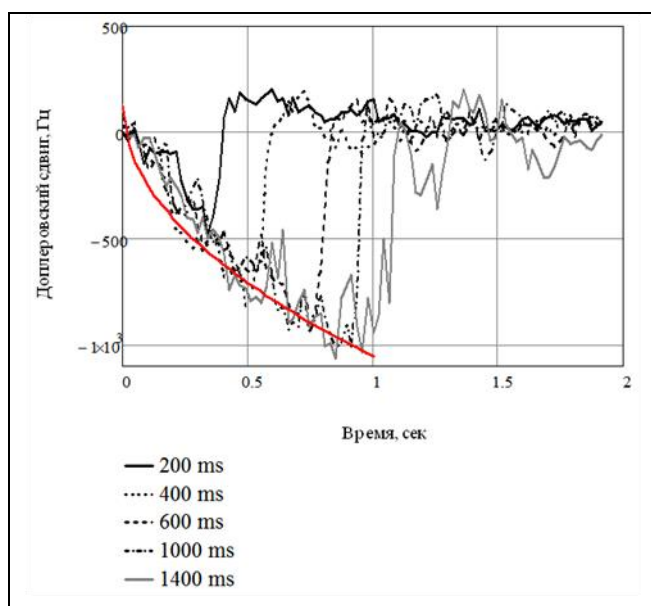


Рис.8 Временные реализации ДСЧ для нескольких пузырей различной длительности в воде.

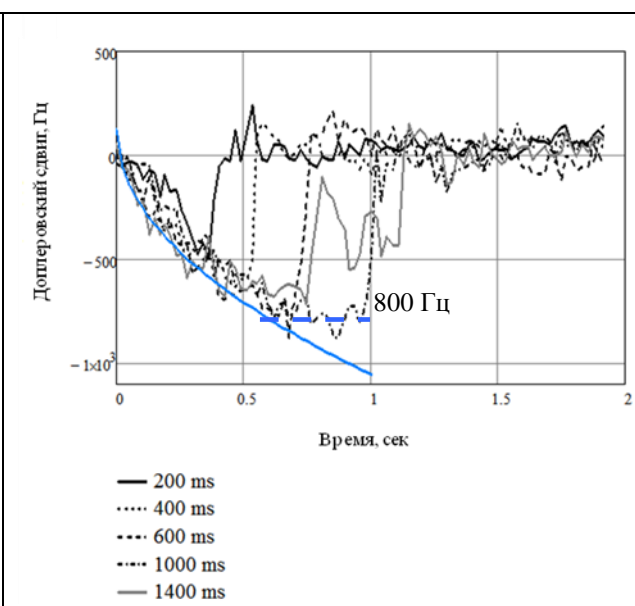


Рис.9 Временные реализации ДСЧ для нескольких пузырей различной длительности в гидросиле.

Известно [7], что для стекающей пленки, средняя скорость жидкости относительно пузыря в направлении, противоположном его движению, на расстоянии  $L$  от его верхней точки, определяется только инерционными эффектами и равна  $\sqrt{2gL}$ . Тогда относительно стенки скорость стекания пленки будет определяться выражением:  $v_{пл} = \sqrt{2gL} - v_{\infty}$ , где  $v_{\infty}$  - скорость всплытия пузыря. Эта величина определялась с помощью видеосъемки. В результате для нее получились экспериментальные значения, лежащие в интервале 20 – 26 см/сек. Существует теоретическая оценка скорости всплытия пузыря [7], которая определяется выражением  $v_{\infty} = 0,345\sqrt{gD}$ ,  $D$  - диаметр трубы. В нашем случае теория дает значение  $v_{\infty} = 22 \text{ см/сек}$ , что хорошо согласуется с экспериментом.

Теоретическая зависимость скорости стекания пленки, пересчитанная во временную зависимость доплеровского смещения частоты подстановкой  $L=tv_{\infty}$ , также нанесена на рисунки. Доплеровское смещение частоты  $Fd$  рассчитывалось по формуле:  $Fd=(2f_0/C)V_{пл}$ . Здесь  $f_0=1 \text{ МГц}$  - несущая частота зондирующих импульсов,

$C = C_{flex} = 3060$  м/с – скорость излучаемой изгибной волны Лэмба в стенке трубы,  $V_{пл}$  – скорость стекающей пленки. Теоретическая зависимость и экспериментальные графики, как для воды, так и для гидросила, практически совпадают почти в течение всего процесса стекания пленки. Совпадение измеренного и оцененного по формулам доплеровского сдвига достигается при скорости  $C$ , равной скорости изгибной волны  $C_{flex}$ . Отсюда следует, во-первых, что доплеровское смещение частоты возникает именно за счет рассеяния изгибной волны, во-вторых, что рассеивающие эту волну неоднородности движутся со скоростью (относительно стенки) близкой к средней скорости стекания пленки.

Для воды совпадение экспериментальных графиков с расчетным наблюдается в диапазоне доплеровских смещений от 0 до 1000 Гц. Такое смещение частоты соответствует довольно значительной по величине скорости стекания относительно стенки  $V_{max} = 1,5$  м/с, а относительно головной части всплывающего пузыря – даже 1,7 м/с. Для гидросила экспериментальные графики выходят на некоторый постоянный уровень, для которого ДСЧ составляет около 800 Гц. Этот экспериментальный результат свидетельствует, что, в конечном счете, достигается некая предельная скорость стекания, при которой вес пленки полностью уравнивается касательными напряжениями на стенке. Чем больше вязкость жидкости, тем раньше достигается это предельное значение скорости. Вязкость гидросила больше чем у воды, поэтому процесс выхода стекания пленки на постоянную скорость для него уже заметен. Для воды же на интервалах времени, доступных в эксперименте, эта стадия процесса стекания просто еще не достигнута.

**Четвертая глава** посвящена методу определения расходов и поиску характеристик сигналов, пригодных для определения расходов компонентов потока.

В параграфе 4.1 представлен общий подход к определению расходных параметров двухфазного потока, который заключается в нахождении решения  $Q_f^*$ ,

$$Q_g^* \text{ системы уравнений вида: } \begin{cases} P_1 = \Phi_1(Q_f, Q_g) \\ P_2 = \Phi_2(Q_f, Q_g) \end{cases},$$

где,  $P_1, P_2$  – набор характеристик сигналов, выбранных для определения параметров потока,  $\Phi_1(...), \Phi_2(...)$  – эмпирические, полуэмпирические или теоретические функциональные зависимости характеристик сигналов от расходов газа  $Q_g$  и жидкости  $Q_f$ . Первая трудность при решении этой обратной задачи заключается в том, что правые части уравнений определяются в результате калибровочных измерений ультразвуковой системой и поэтому точно известны только в ограниченном числе точек. Вторая связана со структурой (видом) уравнений, которая может оказаться, во-первых, нелинейной, а во-вторых - допускающей неоднозначные решения. Таким образом, при выборе характеристик сигналов  $P_i$  необходимо отбирать те из них, которые монотонно убывают (или нарастают) при изменении расходов компонентов потока.

Решение обратной задачи можно получить различными методами. Основой метода, использованного в работе, является то, что хотя способ постановки опыта, т.е. задание параметров потока и измерение соответствующих им характеристик сигналов определяет причинно-следственную связь между ними, с математической точки зрения оба пространства равноправны. Поэтому для «измерения» параметров потока, т.е. - для определения точки в пространстве параметров потока по значениям характеристик сигналов, не содержащимся в калибровочной базе, может быть использован алгоритм 2-х мерной интерполяции точки в пространстве параметров потока по точке в пространстве характеристик сигналов, полученных в результате измерения. Данный метод был реализован с помощью проведения 2-х мерной интерполяции с использованием функции “griddata” из пакета MATLAB.

Параграфы 4.2 и 4.3 посвящены определению расходов газа и жидкости для «пузырькового» и «снарядного» режимов течения. Для изучения работы ультразвуковой системы в условиях существования в трубе реального двухфазного газожидкостного потока и построения калибровочной базы, то есть набора функциональных зависимостей характеристик сигналов от расходов  $P_i = \Phi_i(Q_f, Q_g)$ , была проведена серия экспериментов на сертифицированном промышленном проливном стенде ООО «АЗМИП». На стенде существовала возможность проводить измерения в достаточно широких пределах изменения расходов жидкой и газовой фаз потока (0-800 м<sup>3</sup>/сут), и создавать как «пузырьковый» так и в «снарядный» режимы течения.

В результате исследований было определено, что наиболее характерные отличия между «пузырьковым» и «снарядным» режимами течения проявляются во временных зависимостях ДСЧ. На рис.10 и 11 приведены временные реализации ДСЧ для 5-ых элементов дальности двух противоположно направленных лучей антенны.

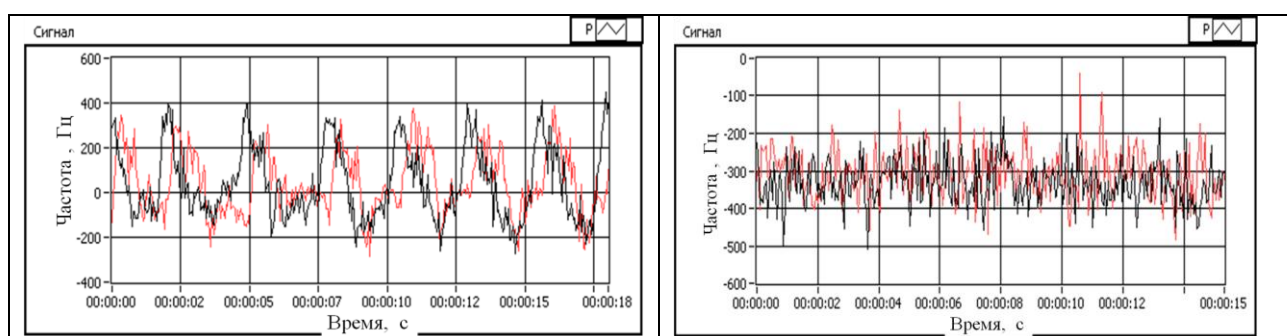


Рис.10 Зависимости ДСЧ (Гц) от времени для  $Q_f=30 \text{ м}^3 / \text{сут.}$  и  $Q_g=100 \text{ м}^3 / \text{сут.}$  «Снарядный» режим течения.

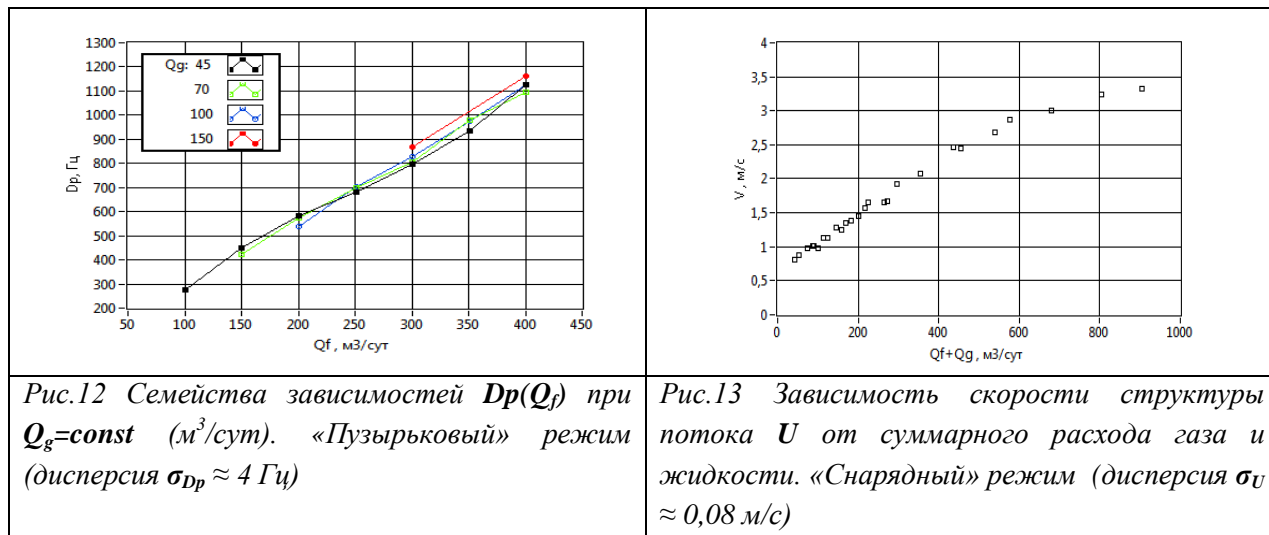
Рис.11 Зависимости ДСЧ (Гц) от времени для  $Q_f=200 \text{ м}^3 / \text{сут.}$ , газа  $Q_g=15 \text{ м}^3 / \text{сут.}$  «Пузырьковый» режим течения.

Можно заметить, что для «снарядного» режима зависимость ДСЧ является квазипериодической функцией времени и отслеживает чередующуюся структуру «газовый пузырь - жидкая перемычка». В противоположность к «снарядному» режиму течения, в «пузырьковом» режиме временная зависимость ДСЧ не имеет

квазипериодической структуры, и представляет собой шумовой процесс. Среднее значение ДСЧ  $Dp$  при этом почти линейно зависит от расхода жидкости (рис.12) и определяет некоторую среднюю скорость движения потока. Расход газа влияет на величину  $Dp$ , но весьма незначительно.

При «снарядном» режиме течения (рис.10) хорошо виден временной сдвиг между зависимостями ДСЧ противоположных лучей антенны, направленных по потоку и против него. Поэтому, вследствие коррелированности между собой зависимостей ДСЧ, существует возможность непосредственного определения скорости движения структуры «газовый пузырь - жидкая перемычка» с помощью соотношения  $U=L/\Delta t_{кор}$ , где  $\Delta t_{кор}$  – временной сдвиг между реализациями ДСЧ, определяемый по сдвигу максимума взаимной корреляционной функции,  $L$  – некоторая база, которую можно определить по скорости распространения изгибной волны по стенке и задержкам элементов дальности, из которых взяты последовательности ДСЧ. На рис.13 представлена экспериментальная зависимость параметра  $U$  от суммарного расхода компонентов потока, которая представляет собой почти линейно нарастающую функцию.

Таким образом, с помощью ультразвуковой системы, при использовании одного датчика, для обоих режимов удалось получить характеристики сигналов, определяющие среднюю скорость течения потока, которая связана непосредственным образом с расходами фаз потока. Однако, для определения расходов фаз в каждом из режимов, необходимо использование минимум двух



характеристик сигнала. Поэтому в работе для «пузырькового» и «снарядного» режимов течения были найдены и исследованы другие характеристики, обладающие условием монотонности при изменении расходов  $Q_f$  или  $Q_g$ . Для «снарядного» режима наиболее информативной является зависимость ДСЧ от времени, поэтому все характеристики были получены из нее. А именно, это минимальное значение доплеровского сдвига частот  $F_{min}$ , среднее значение доплеровского сдвига  $\overline{Dp}$ , и отношение длительностей участков ДСЧ с разными знаками  $T/T_+$ .

Для «пузырькового» режима наиболее информативными оказались профили энергии. Характеристики профилей энергии тем или иным образом связаны с затуханием в потоке, которое, в свою очередь, связано с газосодержанием. Использовались следующие характеристики профилей энергии:  $En_2/En_1$ -отношение величины второго максимума к первому,  $X_{cm} = \frac{\int nEn_a(n) dn}{\int En_a(n) dn}$  – координата «центра масс» профиля, которая также описывает соотношение между его пиками.

В результате, имея в распоряжении несколько различных характеристик сигналов для каждого из режимов, для их сочетаний ( $P_1, P_2$ ), были оценены погрешности определения расходов газа и жидкости. По оценкам погрешностей производилось сравнение используемых пар характеристик. Определение погрешности решения

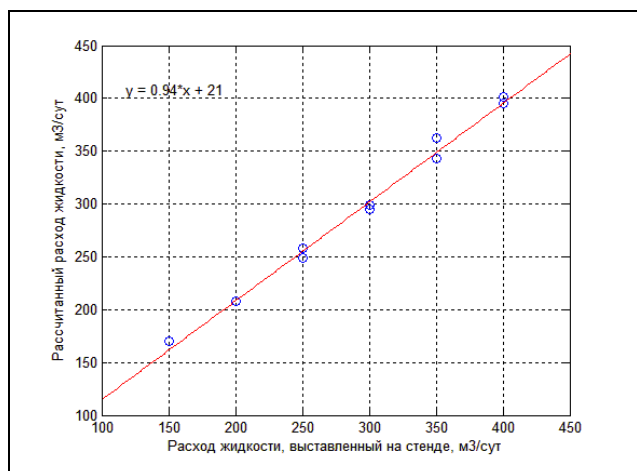


Рис.14 Результаты восстановления расхода жидкости. «Пузырьковый» р-м.

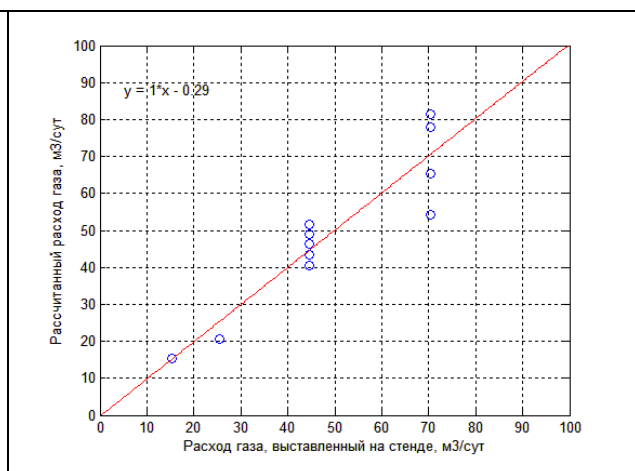


Рис.15 Результаты восстановления расхода газа. «Пузырьковый» р-м.

обратной задачи производилось путем удаления из калибровочной базы одной точки и ее последующего восстановления по предварительно отобраным характеристикам сигналов с помощью алгоритма интерполяции. Оказалось, что в «пузырьковом» режиме течения, наименьшая погрешность одновременного определения расходов жидкости ( $\pm 1,3\%$ ) и газа ( $\pm 10\%$ ) получается при

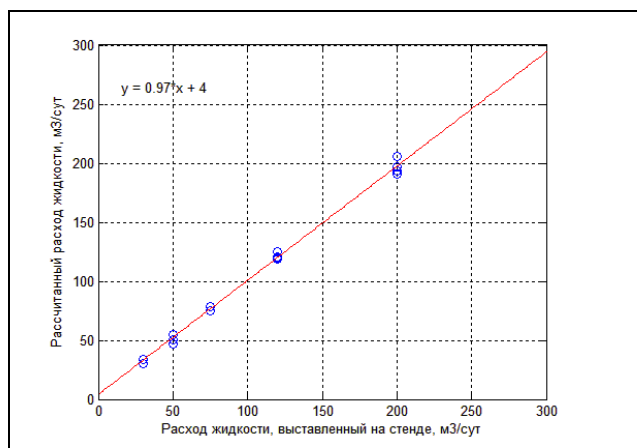


Рис.16 Результаты восстановления расхода жидкости. «Снарядный» р-м.

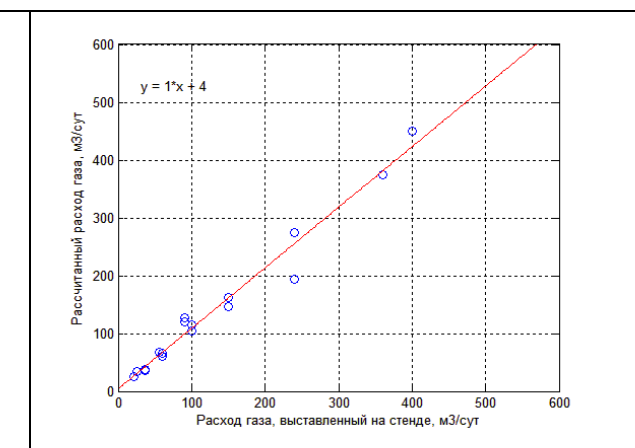


Рис.17 Результаты восстановления расхода газа. «Снарядный» р-м.

использовании для их определения среднего ДСЧ ( $P_1=Dp$ ), и координаты «центра масс» профиля энергии ( $P_2=Xcm$ ). Результаты восстановления расходов жидкости и газа с использованием этих параметров показаны на рис.14 и рис.15 соответственно.

В «снарядном» режиме течения наименьшая погрешность одновременного определения расходов жидкости ( $\pm 1,3\%$ ) и газа ( $\pm 1,7\%$ ) получается при использовании для их определения скорости потока, измеряемой корреляционным методом ( $P_1=U$ ), и среднего значения ДСЧ ( $P_2=Dp$ ). Результаты восстановления расходов жидкости и газа с использованием этих параметров показаны на рис.16 и рис.17 соответственно.

В **заключении** приводятся основные результаты работы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Разработана упрощенная модель формирования профилей энергии рассеянных ультразвуковых сигналов в потоке, переносящем дискретные неоднородности. Результаты расчетов по этой модели находятся в согласии с данными опытов.

2. Экспериментально реализован метод определения размеров и количества всплывающих газовых пузырьков в разреженном потоке, основанный на фильтрации их собственных колебаний, возникающих в результате их возбуждения короткими импульсами.

3. В «снарядном» режиме течения, при прохождении мимо датчика жидкой перемычки, рассеяние происходит на содержащихся в ней пузырьках газа, а при прохождении газовой полости – на неоднородностях толщины стекающей пленки. Неоднородности толщины пленки движутся относительно стенки со скоростью близкой к скорости стекания пленки. Поэтому доплеровский сдвиг частоты рассеянного на пленке сигнала соответствует средней скорости ее стекания.

4. Выявлено, что уровень сигнала, рассеянного стекающей пленкой, увеличивается при росте интенсивности гидродинамических возмущений жидкости, в которой происходит всплытие газовой полости. В эксперименте гидродинамические возмущения жидкости возникали вследствие всплытия первого пузыря в невозмущенной жидкости, последующие пузыри всплывали уже в жидкости, возмущенной движением предыдущего.

5. На основании модели, связывающей параметры сигналов, рассеянных в газожидкостном потоке, с расходами фаз потока выяснено, что для определения расходов, в «пузырьковом» режиме течения, наиболее информативными являются зависимости от дальности энергии и средней частоты рассеянного в потоке сигнала. В «снарядном» режиме наиболее информативными являются временные реализации средней частоты сигнала, получаемые с различных удалений от датчика.

6. В «пузырьковом» режиме течения, наименьшая погрешность одновременного определения расходов жидкости и газа, с применением одного приемно-излучающего датчика, получается при использовании для их определения



среднего доплеровского сдвига частоты (ДСЧ), и координаты «центра масс» профиля энергии рассеянного сигнала. В «снарядном» режиме течения наименьшая погрешность получается при использовании для их определения скорости потока, измеряемой корреляционным методом, и среднего значения ДСЧ.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / П.П. Кремлевский - СПб.: Политехника, 2004.
2. Фролов А.И. Проблемы измерения продукции скважин нефтяных месторождений // Датчики и системы, 2001, № 9, с. 37-40.
3. Муякшин С.И., Односецев В.А., Орлов И.Я. О возможности использования изгибных волн при создании акустических преобразователей для систем неразрушающего контроля // Изв. вузов. Радиофизика, 2000, т. XLIII, № 12, с. 1100-1108
4. В.И. Косарев, Л.Н. Мухин, С.И. Муякшин и др. Способ определения расхода компонентов двухфазного потока и система для его осуществления // Патент на изобретение № RU 2339915 С1. Опубликовано 2008.11.27 Бюл. № 33
5. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах, т. 1 // А. Исимару - М., Мир, 1981.-280 с.
6. Keller J.B., Miksis M., Bubble oscillation of large amplitude. J. Acoust. Soc. Am., 1980, 68 pp. 628-633.
7. Уоллис, Г. Одномерные двухфазные течения / Г. Уоллис - М., Мир, 1972.-440 с.
8. Р. Довиак, Д. Зрнич. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения -Л., Гидрометеоздат, 1988 г.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ДИССЕРТАЦИИ

*Список публикаций в журналах, рекомендованных ВАК:*

1. Муякшин С.И., **Владимиров И.А.** Ультразвуковая доплеровская система для измерения расхода газожидкостных потоков // «Датчики и системы», 2009, №8, с. 26-30.
2. Мансфельд А.Д., Волков Г.П., Санин А. Г., **Владимиров И.А.** Импульсная ультразвуковая спектроскопия газовых пузырьков // «Акустический Журнал», 2010, том 56, № 3, с. 323-332
3. **Владимиров И.А.**, Муякшин С.И. Экспериментальное исследование рассеяния ультразвуковых волн Лэмба в пластине, покрытой стекающей пленкой жидкости переменной толщины // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, 2011, № 5(3), с. 67-74.

*Публикация статей в трудах конференций:*

4. **Владимиров И.А.**, Волков Г.П., Мансфельд А.Д. Импульсные ультразвуковые методы обнаружения газовых пузырьков // Труды XII научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2008
5. Муякшин С. И., **Владимиров И.А.** Метод определения расхода фаз газожидкостного потока в вертикальной трубе при "снарядном" режиме течения // Труды XIII научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2009
6. Муякшин С. И., **Владимиров И.А.** Ультразвуковая система диагностики газожидкостных потоков в закрытой трубе // Труды XIV научной конференции по радиофизике, ННГУ, 2010

7. **Владимиров И.А.**, Муякшин С.И. Ультразвуковые методы диагностики газожидкостных потоков // Сборник трудов XII Всероссийской школы семинара «Волновые явления в неоднородных средах», 2010г., Звенигород, В электронном виде на CD – диске
8. **Владимиров И.А.**, Муякшин С.И. Об особенностях рассеяния звука на потоке пузырьков в трубе, заполненной жидкостью // XV Нижегородская сессия молодых ученых. Труды молодых ученых по естественнонаучным дисциплинам, Нижний Новгород, 2010

*Отчеты о НИР*

9. Отчет о НИР № 02201153204 от 09.03.2011 «Разработка перспективных ультразвуковых методов определения параметров трехкомпонентных двухфазовых потоков», рук. **И.А. Владимир**

## **СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Введение

ГЛАВА 1 Двухфазные потоки в технике: обзор гидродинамики и методов измерения

- 1.1 Классификация
- 1.2 Количественное описание
- 1.3 Режимы течения
- 1.4 Методы измерения расходных характеристик

Основные результаты главы 1

ГЛАВА 2 Описание измерительной системы, экспериментальных установок и методов измерения

- 2.1 Принцип работы датчика с фазированной антенной решеткой
- 2.2 Блок-схема измерительной системы
- 2.3 Экспериментальная установка для изучения «пузырькового» потока
- 2.4 Экспериментальная установка для изучения рассеяния волн Лэмба в пластине, покрытой стекающей пленкой жидкости
- 2.5 Проливной стенд ООО «АЗМИП»
- 2.6 Когерентно-импульсный метод измерения скорости потока
- 2.7 Исследование акустического поля, создаваемого накладной ФАР в круглой трубе с однородной жидкостью

Основные результаты главы 2

ГЛАВА 3 Теоретическое и экспериментальное исследование процессов рассеяния ультразвука в «пузырьковом» потоке и стекающей пленке жидкости

- 3.1 Исследование процессов рассеяния ультразвуковых импульсов в потоке пузырьков
  - 3.1.1 Задача определения интенсивности рассеянного сигнала, принимаемого ФАР
  - 3.1.2 Экспериментальные исследования процессов рассеяния ультразвуковых импульсов в потоке пузырьков, сравнение эксперимента с теорией
  - 3.1.3 Определение размеров мелких газовых пузырьков в разреженном потоке с помощью частотной полосовой фильтрации
- 3.2 Исследование процессов рассеяния ультразвуковых волн Лэмба в пластине, покрытой стекающей пленкой жидкости
  - 3.2.1 Объяснение механизма рассеяния ультразвуковых волн Лэмба, распространяющихся в пластине, покрытой деформированной пленкой жидкости
  - 3.2.2 Экспериментальные исследования рассеяния ультразвуковых волн Лэмба в пластинке, покрытой стекающей пленкой жидкости. Сравнение эксперимента с теорией

Основные результаты главы 3

ГЛАВА 4 Определение расходов газа и жидкости в двухфазном потоке

- 4.1 Общий подход к определению расходов фаз потока
- 4.2 Определение расходов при «пузырьковом» режиме течения
  - 4.2.1 Анализ информативных характеристик рассеянных и прошедших сигналов для «пузырькового» потока
  - 4.2.2 Решение обратной задачи – определение расходов фаз потока по характеристикам сигналов
- 4.3 Определение расходов при «снарядном» режиме течения
  - 4.3.1 Особенности гидродинамики «снарядного» режима течения и временная изменчивость рассеянных сигналов
  - 4.3.2 Анализ информативных характеристик рассеянных сигналов для «снарядного» потока
  - 4.3.3 Решение обратной задачи – определение расходов фаз потока по характеристикам сигналов

Основные результаты главы 4

Заключение

Список использованной литературы