# **ДИАГНОСТИКА**

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## Ю.Ф. Устинов

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

## Введение

Создание технологических машин, используемых в строительном комплексе, горнорудной промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях с форсированными двигателями, высокими рабочими и транспортными скоростями движения и возросшими при этом динамическими нагрузками, неизбежно приводит к увеличению вибрации и шума как на рабочем месте, так и в окружающем пространстве. В этой связи проблема снижения виброакустических параметров машин является актуальной, так как тесно связана с прочностью конструкций, безопасностью жизнедеятельности и охраной окружающей среды. Вместе с тем соответствие виброакустических характеристик выпускаемых отечественной промышленностью машин требованиям международных норм по шуму и вибрации является важным критерием, определяющим качество, техническое состояние и конкурентоспособность их на международном рынке.

#### Состояние проблемы

Технологические самоходные машины, предназначенные для работы в различных отраслях строительства и промышленности, относятся к сложным разветвлённым динамическим системам, так как имеют несколько одновременно работающих источников виброакустической энергии; две и более несущие рамы; содержат в своей конструкции блочные, плитные, оболочечные и складчатые элементы. При этом на конструкции действуют внутренние и внешние силы полигармонического, ударного, импульсного и случайного характеров.

Анализ литературных источников из области исследований вибрации и шума машин и механизмов показал, что описание быстропеременных процессов в сложных динамических системах с использованием классических теорий колебаний, акустики и статистической физики крайне затруднительно из-за невозможности предугадать искомую форму решения и определить граничные условия [1,4].

Необходимо отметить, что отечественными и зарубежными учёными, НИИ, заводами и фирмами внесён крупный вклад в проблему борьбы с шумом и вибрацией различных машин, изданы фундаментальные научные труды, разработаны эффек-

тивные виброшумозащитные мероприятия и конструкции, но общее развитие науки, создание более совершенных технологических машин, появление мощных вычислительных средств и численных методов решения дифференциальных уравнений в последние десятилетия являются хорошей базой для разработки новых методов описания быстропеременных процессов в сложных динамических системах.

#### Цель и задачи

Целью работы является разработка методологии прогнозирования виброакустических характеристик сложных динамических систем на рабочем месте оператора. При этом определены следующие задачи:

1. На основе системного анализа и физических представлений быстропеременных процессов разработать операционную систему решения проблемы, включающую образование виброакустической энергии в источниках, распространение её по элементам конструкции машины и в окружающей среде, излучение энергии в точке приема. При этом операционная система должна содержать обратные связи с конкретными моделями воздействия на системные объекты.

2. На основании экспериментальных исследований установить характерные конкретные режимы работы, при которых излучение виброакустической энергии будет наибольшим, так как современные стандарты по определению уровней звука и звукового давления в кабинах самоходных технологических машин конкретного режима работы машин не определяют.

3. Разработать способ разделения источников энергии на технологических машинах с целью определения уровней звукового давления и виброскоростей в точке приема в октавных и <sup>1</sup>/<sub>3</sub>-октавных полосах со среднегеометрическими частотами. Эти экспериментальные данные необходимы для оценки вклада каждого источника в общее звуковое поле и выбора виброзвукозащитных мероприятий.

4. Разработка программного комплекса для численных исследований характеристик виброакустического поля в точке приема.

## Решение проблемы

Для решения данной проблемы определены следующие концептуальные принципы:

1. Любой источник виброакустической энергии рассматривается как совокупность независимых источников, один из которых излучает звуковую энергию только в окружающее пространство, а второй только в корпус, опорные и неопорные связи в виде звуковой вибрации. Данное разделение потоков энергии условно и в практическом отношении по утверждению многих ученых-акустиков целесообразно.

2. Для решения уравнений движения элементов конструкций машин используется принцип суперпозиции, когда искомое решение является суммой решений, получаемых от воздействия каждой гармоники ряда Фурье, которым представляется возмущающая периодическая динамическая сила.

3. Матрицы демпфирования представляются в соответствии с гипотезой Фойгта, а конечный элемент, аппроксимирующий воздушную среду, реализует дифференциальные уравнения Навье-Стокса.

Решение проблемы создания малошумных машин на стадии их проектирования возможно на основе проведения тщательного системного анализа и использования современных численных методов исследований на мощных ЭВМ.

В центре системного анализа проблемы создания малошумных машин находится логическая операционная система - комплекс операций количественного и качественного сравнения альтернатив, которые выполняются с целью прогнозирования вибрации и шума на будущей машине и выбора оптимального варианта виброакустической защиты оператора и окружающей среды.

Операционная система определяется заданием системных объектов, свойств и связей. Системные объекты - это вход сигнала, процесс, выход сигнала, обратная связь и ограничение - остановка расчета альтернатив при достижении цели. Например, применительно к транспортным машинам или базовым тягачам системные объекты могут быть интерпретированы следующим образом: ВХОД - возмущающие воздействия двигателя, агрегатов, узлов и рабочего органа на другие структурные составляющие, входящие в конструкцию машины; ВЫХОД - выходной сигнал (динамическая сила, виброскорость, звуковое давление и др.), то есть это результат конечного состояния процесса; ПРОЦЕСС - перевод входного сигнала в выходной. При этом возмущающие воздействия претерпевают изменения. Например, в процессе передачи виброакустической энергии источников какой-либо машины происходит излучение её в окружающее пространство (воздушный шум), рассеяние, поглощение и передача по конструкциям звуковой вибрации (структурный шум); СВЯЗЬ - определение последовательности процессов, то есть выход некоторого процесса в одном агрегате или узле является входом в процесс в другом агрегате, узле, механизме; ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ обеспечивает сравнение и оценку параметров (сигналов) выхода с требуемыми и при необходимости влияние на процесс в любой структурной составляющей конструкцию машины через принятую модель воздействия.

На основе системного анализа [2, 3] разработана операционная система создания малошумной машины, которая в общем случае включает следующие подсистемы: *I* -блок источников виброакустической энергии (двигатели, коробки передач, гидроагрегаты, рабочий орган и др.); *II* - опорные связи источников; *III* - основную раму (остов); *IV* - опорные связи кабины; *V* - оболочку кабины; *VI* - воздушный объем кабины; *VII* - капот двигателя и экраны; *VIII* - окружающее воздушное пространство. *ЦI* - цель 1 - требуемое значение звукового давления в кабине; *Ц2* - цель 2 - требуемое значение звукового давления в окружающем пространстве на определенном расстоянии; "+", "-" - принятие решения о соответствии или несоответствии выходного сигнала требуемому значению при выбранных критериях.

Целью использования обратных связей является управление через модель воздействия альтернативными вариантами прогнозирования виброакустических пара-

метров машин после операции сравнения полученных выходных сигналов вибрации и шума в подсистемах VI и VII с требуемыми значениями.

В данном случае реализация операционной системы возможна с использованием численных интегральных методов, в основу которых положен метод конечных элементов (МКЭ).

Решение проблемы создания малошумных машин с использованием численных методов на основе (МКЭ) и принятой операционной системы представляется алгоритмом, включающим следующие важнейшие операции:

1) дискретизация сплошных сред, разработка топологии сложной динамической системы на основе принятых конечных элементов (КЭ); 2) определение физикогеометрических характеристик расчетной схемы (плотность, коэффициент внутреннего трения, модуль упругости, модуль сдвига, моменты инерции сечения, размеры КЭ и другие характеристики); 3) выбор локальных систем координат (ЛСК) для каждого КЭ и глобальной (абсолютной) системы координат (ГСК), связанной с системой отсчета; 4) формирование матриц масс, жесткости и демпфирования i-го КЭ в ЛСК; 5) построение матрицы связи *i* -ой ЛСК с ГСК; 6) построение матриц масс, жесткости и демпфирования каждого і -го КЭ в ГСК; 7) построение глобальных матриц для ансамбля КЭ, аппроксимирующих топологию машины; 8) формирование вектора действующих сил в правой части динамического уравнения равновесия всего ансамбля КЭ и узлов осуществляется на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований внешних и внутренних возмущающих воздействий гармонического, полигармонического, импульсного, ударного и случайного характеров в источниках виброакустической энергии при характерном режиме работы машины: 9) интегрирование матричного уравнения по времени выполняется прямым пошаговым методом Ньюмарка. Решение системы алгебраических уравнений осуществляется итерационным блочным методом Якоби. Для повышения эффективности итерационного метода решений применяется процедура полиномиального ускорения по Чебышеву. В результате расчета по данному алгоритму получаем векторы звукового давления, виброскоростей, виброускорений, усилия в требуемых узлах расчетной схемы на заданном временном интервале; 10) проверка соответствия расчетных параметров уровня звукового давления в кабине, виброскоростей, виброускорений, динамических сил и других параметров в заданных узлах расчетной схемы значениям нормируемым ГОСТами. В случае их несоответствия в программу вводятся иные значения физико-геометрических характеристик элементов конструкции машины согласно моделям воздействия в обратных связях операционной системы. Варианты расчета повторяются до тех пор, пока расчетные значения виброакустических параметров не будут соответствовать требуемым.

Численные исследования звуковой вибрации на примере тяговых машин изложены в [4, 5]. Исследования выполнялись для различных возмущающих сил, возникающих в двигателе и трансмиссии. Результаты теоретических расчетов звуковой вибрации рамных и плоских конструкций сопоставлялись с экспериментальными данными. Расчетные виброскорости отличаются от экспериментальных на 11,5%. Эксперимент проводился в реальных условиях работы тяговой машины. Запись

вибросигналов осуществлялась на магнитограф типа 7005 с последующей обработкой на двухканальном анализаторе спектра типа 2034 "Брюль и Къер" (Дания) [1, 3, 5].

#### Заключение

Основываясь на экспериментальных и численных исследованиях, отметим наиболее важные результаты для использования их в практике создания малошумных машин различного назначения:

1. На основе системного анализа виброакустических процессов в сложных динамических объектах разработана операционная система решения задач виброакустики, позволяющая на стадии проектирования выяснить пути распространения вибрации и шума по структурным составляющим машины и определить модели воздействия на систему с целью уменьшения вибрации и шума в точках приема.

Используемые технологии прогнозирования позволили получить новые технические решения эффективных устройств виброшумозащиты оператора и окружающей среды, подтвержденные авторскими свидетельствами СССР и патентами России.

3. Разработанные операционная система, алгоритм и программное обеспечение относятся к виду наукоемких технологий создания малошумных машин. Данные технологии позволяют на стадии проектирования решить задачи по снижению виброакустических характеристик машин, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким экспериментальным исследованиям на натурных образцах машин.

Предлагаемые технологии позволяют в несколько раз снизить материальные и трудовые затраты, а также сроки проектирования малошумных машин.

## Литература

- 1. Устинов Ю.Ф. Снижение виброакустической активности землеройнотранспортных машин // Изв. вузов. Строительство, 1994. - №12. - с.117.
- Ustinov Yu.F. Estimation of vibration acoustical parameters of vehicles by means of FEM / Fourth International Congress on Sound and Vibration/ St-Petersburg: Russia, 1996. - p.2067.
- Ustinov Yu. F. Numerical investigations Methodology of Vibroacoustic Dynamics of Transport and Traction Machines /6-th International Congress Sound and Vibration. 5-8 July 1999, Copenhagen, Denmark. - p.1405.
- Устинов Ю.Ф., Петранин. А.А., Петреня Е.Н. Системный анализ и метод конечных элементов в задачах прогнозирования и расчета виброакустических параметров землеройно-транспортных машин //Изв. вузов. Строительство. -1997.- № 3. - с.95.
- 5. Устинов Ю.Ф., Петранин А.А., Петреня Е.Н. Основные концептуальные принципы компьютерных технологий создания малошумных машин //Изв. вузов. Строительство. - 1998. - № 9.- с.86.

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

## С.Ю.Петров, С.Н.Пичков

#### ГУП Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения

## имени И.И Африкантова.

Хорошо известно, что если уже на ранних стадиях проектирования объектов учитывать акустические требования и предусмотреть выполнение комплексного направленного акустического проектирования, то значительный эффект снижения уровней вибрации и шума можно получить с существенно меньшими затратами. Средства снижения вибрации и воздушного шума, применяемые после окончания общего проектирования объекта, во многих случаях лишь частично решают поставленную задачу и требуют больших затрат. Так установка средств акустической защиты на уже построенных судах обходится в 3,5 раза дороже по сравнению с предусмотренными в процессе проектирования [1].

Несмотря на очевидные преимущества примеров реализации методологии комплексного акустического проектирования в полном объеме можно привести очень немного. Сначала мешали сложившиеся стереотипы и межотраслевые барьеры, затем изменившаяся экономическая ситуация. Опыт получения оптимальных характеристик вибрации и шума оборудования судовых ядерных энергетических установок (СЯЭУ) и сложившаяся в ОКБМ к началу 90-х гг. методология направленного акустического проектирования являются, скорее, исключением, чем общим правилом. Положительный результат был получен благодаря многолетнему творческому взаимодействию коллективов ОКБМ, отделения «Гидрофизика» ИПФ РАН и радиофизического факультета НГУ.

Из известного выражения

$$P = \frac{\nu'}{V'}F , \qquad (1)$$

где V' – объемная скорость монопольного источника используемого для акустического возбуждения, v' - наведенная акустическая возбуждаемая скорость, следует, что минимальный уровень излучения механизма в акустическое поле Р достигается при минимизации переменной силы F в источнике и выборе места крепления механизма к конструкции с минимальным коэффициентом передачи v'/V'. Экспериментальное определение коэффициентов передачи позволяет получить однозначную оценку акустического качества конструкции по излучению переменных сил.

При создании современных и перспективных СЯЭУ среди задач акустического проектирования на первом месте проектант - ОКБМ, традиционно, ставил задачу снижения сил в источнике. Это позволило достигнуть предельно низких уровней собственной виброшумоактивности агрегатов паропроизводящих установок (ППУ).

Внедрение в практику акустического проектирования СЯЭУ метода взаимности и масштабных акустических моделей[2] дало проектанту инструмент надежного определения коэффициентов передачи на ранних стадиях эскизных проектов,

проводить оптимизацию размещения наиболее виброактивного оборудования и способов закрепления агрегата. Совместные работы ИПФ РАН и ОКБМ, выполненные на мелкомасштабных акустических моделях и натурных объектах с использованием как внешнего акустического возбуждения, так и прямого возбуждения парогенерирующего агрегата, показали, что массивный, жестко закрепленный на судовом фундаменте, агрегат ППУ оказывает влияние на уровни звукового давления, излучаемые корпусными конструкциями, и на направленность излучения объекта в целом. Среди неоднородностей, из которых состоит корпус: пластины и оболочки с ребрами жесткости, стрингеры и др., в значительной степени определяющих излучательную способность корпуса, влияние агрегата наиболее существенно. Большая масса агрегата ППУ «замораживает» участок корпуса в месте установки, снижает коэффициенты передачи для участков корпуса непосредственно прилегающих к помещению, в котором расположен агрегат. Учет этого явления особенно важен, т.к. именно в соседних помещениях традиционно располагается наиболее виброактивное оборудование. Проводя при акустическом проектировании ППУ оптимизацию динамической системы «агрегат – фундамент – корпус», используя агрегат для размещения на нем наиболее виброактивного оборудования можно добиться дальнейших результатов на пути повышения акустических характеристик объекта. Возможность обеспечения более равномерной диаграммы направленности шумоизлучения открывает перспективу существенного снижения эффективности современных средств обнаружения, в том числе активных низкочастотных.

Составной частью акустического проектирования энергетического оборудования является экспериментальная отработка виброакустических характеристик (BAX) опытных образцов на стендах ОКБМ. Полученная при этом база данных дополняется результатами измерений серийных изделий на стендах изготовителя, а также в объектовых условиях в процессе эксплуатации.

Информация, полученная при оценке стабильности виброакустических характеристик оборудования в процессе ресурсных (до отказа) испытаний электронасосов, не только подтвердила устойчивую стабильность ВАХ, но и дала возможность использовать базу данных для оценки остаточного ресурса и показателей надежности оборудования, для решения задач контроля технического состояния. На сегодня в ОКБМ созданы предпосылки для дальнейшего совершенствования виброакустической диагностики оборудования реакторных установок. Положительным примером могут служить результаты обследования вибросостояния насосов реакторной установки атомного ледокола «Арктика» выполненные в 1999-2000г.г. Измерения показали, что вибрационные характеристики электронасосов не имеют отклонений от величин характеризующих нормальную работоспособность, повысив тем самым степень обоснованности при принятии решений о продлении ресурса.

Простота, надежность и довольно большой накопленный практический опыт исследований ВАХ механизмов и оборудования, входящих в состав реакторных установок, позволяют говорить о приоритетном выборе виброакустической диагностики в качестве составной части методологической базы для экспериментальной оценки и подтверждения возможности продления ресурса и срока службы оборудования и реакторной установки в целом за пределы назначенных показателей.

Опыт реализации методологии комплексного акустического проектирования подтверждает очевидную истину – изделия, имеющие оптимальное соотношение показателей энергетических, массогабаритных характеристик, эргономичности и т.д., имеют, как правило, низкие уровни вибрации и шума. Виброакустические характеристики выступают в качестве комплексного показателя качества. Они, как зеркало, отражают степень культуры выполнения предприятием научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Этот показатель не абстрактен, он может быть измерен и пронормирован.

Дальнейшие перспективы открывает возможность создания единой диагностической сети предприятия. Многоуровневый поэтапный контроль виброакустических характеристик позволяет повысить управляемость качеством оборудования на всех стадиях его создания:

- проектирование (расчетно-экспериментальное обоснование требуемых виброшумовых характеристик от технического предложения до рабочего проекта);
- изготовление (от входного контроля комплектующих доприемосдаточных испытаний);
- эксплуатация (от контрольных измерений после пусконаладочных испытаний до окончания срока обязательств по авторскому надзору).

## Литература

- 1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций: Справочник. Л.: Судостроение, 1990, с.200.
- Коротин П.И. Методы диагностики сложных систем с использованием внешнего акустического возбуждения: Диссертация на соискание ученой степени кандидата фмн. –Горький.: инв.№ 2699 по учету ИПФ АН СССР, 1988, с.158.

## АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИДЕНТИФИКАЦИИ ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ И НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ

## С.С.Наумов, М.Б.Зуев, М.В.Мартынюк

Инженерный Центр Нижегородского Государственного Технического Университета

При измерениях уровней жидкости методом Спектрометрии Временных Задержек излучатель и приёмник ультразвука располагаются под поверхностью жидкости и направлены вверх (см. рис.1). Излучённый ЛЧМ сигнал, отразившись от поверхности, принимается приёмником, после чего его мгновенная частота сравнивается с излучаемой. РЧ – разностная частота определяет время задержки распространения, т.е. дистанции от антенны до поверхности. Спектр РЧ называется ЭВЗ (энерговременной зависимостью) и, будучи сходной по характеру с





(энерговременной зависимостью) и, будучи сходной по характеру с импульсной функцией тракта, имеет вид, показанный на рис.2.

Поскольку скорость звука в жидкости сильно зависит от температуры и состава последней, необходимо постоянно её измерять. Для этого в системе предусмотрен специальный дополнительный отражатель (репер), монтируемый на известном расстоянии от антенны.

Метод CB3, обладая повышенной помехозащищённостью, позволяет получить хорошие точностные характеристики, но при этом система должна уметь автоматически различать приходы от поверхности, от репера, а также нелинейные комбинационные составляющие и переотражения. На рис. 1 репер находится на 1м, Поверх-

ность – на 3.9 м. Пунктиром показана область возможного нахождения репера при разных скоростях звука. По го-

ризонтали – дистанция, м.



При анализе сигнала РЧ производится поиск всех локальных максимумов (ЛМ). ЛМ выстраиваются в порядке убывания их амплитуды. Производится поиск границ прихода для каждого ЛМ. Отдельным приходом считается ЛМ границы которого не попадают в зону уже найденных, и соответственно имеющих большую амплитуду, приходов.

Приход ограничивается ближайшими к вершине локальными минимумами отвечающими одному из двух условий: минимум лежит ниже среднего уровня шумов или следующий за ним локальный максимум является отдельным пиком (т.е. отношение энергии локального максимума (пика) к ближайшему локальному минимуму, превышает некую пороговую величину).

В результате анализ сигнала РЧ сводится к анализу формы локализованных приходов и их взаимного положения. При анализе найденных приходов учитывается тот факт, что спектральный максимум в сигнале РЧ может появиться либо в результате наличия на приёмнике сигналов задержанных относительно излучаемого сигнала, либо в результате воздействия на сигнал РЧ нелинейных искажений. ЛМ энергия которых ниже среднего уровня шумов не рассматриваются.

В стационарных и передвижных резервуарах нефтепродуктов при использовании данной системы существует несколько основных путей распространения зондирующего сигнала (каждому из них соответствует приход в сигнале РЧ).

Первый приход определяется так называемым «прямым прониканием» - прямым акустическим сигналом с излучателя на приёмник. Данный приход к рассмотрению не принимается т.к. соответствующая ему дистанция меньше минимальной рабочей дистанции системы.

Остальные приходы могут быть результатами отражений от находящегося на калиброванной дистанции отражателя – «репера», поверхности или дна и стенок резервуара.

В сигнале РЧ в результате нелинейных искажений могут появиться дополнительные приходы не соответствующие отражениям от реальных объектов. В результате ЭВЗ может принять довольно запутанный для автоматического анализа вид.

Задачей системы измерения уровней является корректная идентификация приходов от поверхности и репера. При создании алгоритма нахождения уровня в автоматическом режиме использовались следующие положения:

Если репер находится в жидкости, приходу от поверхности будет соответствовать большая, чем приходу от репера, частота (задержка). Если репер - над поверхностью, то, естественно, он не даёт отражений.

Область возможных задержек отражений от penepa (зону penepa) можно определить исходя из известной дистанции и диапазона изменения скоростей звука в жидкости. Диапазон изменения скоростей звука определяется диапазоном изменения температуры продукта в резервуаре, а также составом продукта.

Приходы являющиеся результатом нелинейных искажений имеют частоты кратные частоте искажённого гармонического сигнала. В системе используется алгоритм т.н. прореживания приходов – из всех приходов с кратными частотами для рассмотрения остаётся только первый приход. Считается, что приход имеет кратную частоту, если кратная частота просто находится в области прихода.

Вследствие того, что дистанция до репера постоянна, форма соответствующего реперу прихода будет изменяться значительно медленнее отражения от поверхности. В системе используется алгоритм получения образа репера путём постоянного усреднения некоторого количества последних реализаций репера. Разностная энергия между приходами из зоны репера и усредненным репером является основным критерием идентификации репера.

Если ни один приход не соответствует критерию разностной энергии, система анализирует приходы, находящиеся за зоной репера. Если за зоной репера обнаружен приход, который, скорее всего является поверхностью, то в этом случае репе-



ром считается максимальный приход в зоне репера. На Рис.3 пунктиром показаны значения остаточной энергии после вычитания "модели" сигнала репера из его прихода и из прихода поверхности.



Данная система является системой реализующей решающий (в том смысле, что каждая новая реализация сигнала РЧ анализируется без учёта положения репера и поверхности, найденных на предыдущем шаге) и следящий алгоритмы (в том смысле, что решение о том, является ли приход репером, принимается на основании усреднённого образа репера). Таким образом, система сочетает достоинства обеих методов. Использование априорной информации увеличивает вероятность принятия правильного решения, однако, при принятии неверного решения на одном из шагов система не обязательно будет принимать неверные решения в дальнейшем, что характерно для систем следящего типа. Эксплуатация системы «СЛОЙ» показала высокую эффективность предлагаемых решений (точность распознавания 90% без фиксации ложных решений).

## Литература

- Бычков В.Б., Князева Н.И., Наумов С.С. // Всероссийская научно-техническая конференция "Метрологическое обеспечение учета энергетических ресурсов", 1998
- М.Б. Зуев, Н.И. Князева, С.С. Наумов // Сборник научных трудов "Физические технологии в машиностроении", 1998

# АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ СТЕПЕНИ ПОВРЕЖДЕННОСТИ МАТЕРИАЛА

# М.В.Гущин, Д.А.Захаров, А.Л.Углов<sup>1)</sup>, С.Н.Пичков

ОКБ Машиностроения, <sup>1)</sup>АО НИЦ КД Госстандарта РФ

#### Введение

В настоящее время существенно расширился класс объектов, для которых задачи управления ресурсом относятся к основным. В таких отраслях как атомная энергетика проблема определения индивидуального остаточного ресурса агрегатов, отдельных ответственных узлов или конструкционных элементов приобретает особое значение, поскольку их преждевременный выход из строя может привести к недопустимым экологическим последствиям и огромным материальным потерям. Снятие с эксплуатации объектов, формально выработавших свой назначенный ресурс, но не исчерпавших свою фактическую долговечность, приводит к неоправданным дополнительным затратам.

К наиболее перспективным принципам управления ресурсом технических объектов относятся те из них, которые базируются на приемах максимального использования результатов мониторинга технического состояния с применением ителлектуализированных средств неразрушающего контроля.

Среди неразрушающих физических методов контроля прочностного состояния материала к числу наиболее информативных следует отнести акустические методы, в основу которых положены в основном экспериментально установленные связи между акустическими параметрами и повреждаемостью материала.

В данной работе описаны результаты экспериментальной проверки возможности акустического метода контроля накопления повреждений в материале различных образцов, а также элементов трубопроводов атомных энергетических установок.

#### Теоретический анализ

Параметры поврежденности материала и, как следствие, его прочностные параметры находятся в функциональной или корреляционной связи с акустическими характеристиками распространяющихся в материале ультразвуковых волн. Анализ результатов проведенных экспериментов позволил в рамках феноменологической теории предложить следующее выражение для оценки степени поврежденности материала  $\omega$  на базе акустических измерений:

$$ω = \delta τ / \delta τ^*,$$
 (1)

$$\delta \tau = (T - T_0) / T_0, \ \delta \tau^* = (T^* - T_0) / T_0, \tag{2}$$

где  $T_0$  – величина задержки акустического импульса в материале в исходном состоянии, T – величина задержки акустического импульса в материале в текущем состоянии,  $T^*$  - величина задержки акустического импульса в материале в "критиче-

ском" состоянии, непосредственно предшествующем образованию макротрещины и разрушению.

Полученные экспериментальные результаты по определению степени поврежденности материала элементов трубопроводов сравнивались с расчетными данными. Расчетное определение повреждаемости проводилось путем численных исследований напряженно-деформированного состояния и циклической прочности рассматриваемых трубопроводов с учетом всех нагружающих факторов с использованием методики и программ, базирующихся как на уравнениях, описывающих линейную модель деформаций криволинейных стержней, в основе которой лежит гипотеза плоских сечений, так и на аналитических и численных методах механики деформируемых тел, а также уравнений малоцикловой усталости типа Коффина-Мэнсона.

#### Эксперимент

Пробные эксперименты с использованием акустической системы "Астрон" (производитель ООО "Интеллект", г. Н. Новгород) [1,2] показали чувствительность измеряемых акустических характеристик к процессам накопления усталостных повреждений в стали 12Х18Н9Т.

Использовались образцы круглого сечения с плоскими лысками на рабочей части для установки датчиков. Образцы испытывались на малоцикловое усталостное нагружение при растягивающих нагрузках в диапазоне долговечностей 10<sup>3</sup> - 10<sup>4</sup> циклов (жесткое нагружение).

На рисунке 1 приведена типичная кривая, описывающая поведение параметра Т в зависимости от числа циклов N для образцов, нагружаемых с различной амплитудой деформаций.

Кривая имеет три характерные стадии:

 непродолжительная стадия AB, по-видимому соответствующая пластическому деформированию материала на первых циклах нагружения; продолжительность этой стадии тем меньше, чем меньше амплитуда деформации образца;
 основная по продолжительно-

сти стадия ВС, соответствующая накоплению усталостных повреждений;

3. завершающая стадия CD, на которой возникает и развивается до разрушения образца макротрещина.



Анализ закономерностей распространения импульсов при работе с описанными релеевскими малобазными датчиками разных типоразмеров позволил сформулиро-



вать упрощенный «акустический критерий разрушения» следующим образом:  $\delta \tau^* \approx 0.02$ , где  $\delta \tau^*$  - максимальное относительное изменение задержки импульса релеевских волн к моменту появления макротрещины в усталостно нагружаемом материале.

Испытывались на многоцикловое усталостное нагружение плоские образцы равнопрочного сечения из стали 12Х18Н9Т. Эксперимент проводился на вибростенде типа ВЭДС-200. Образцы испытывались на консольный изгиб. Исследовался характер распределения параметра Т вдоль образца в зависимости от числа циклов нагружения.

Полученные результаты показали чувствительность замеряемой акустической характеристики к процессу накопления рассеянных усталостных повреждений. Максимальные значения параметра Т, а, следовательно, и максимальная интенсивность накопления усталостных повреждений наблюдалась в тех зонах образцов, в которых впоследствии и происходило образование макротрещин и разрушение.

Важно отметить, что выше сформулированное критериальное соотношение  $\delta \tau^* \approx 0.02$  для момента, предшествующего образованию макротрещины, и в этих экспериментах приблизительно выполнялось.

Положительные результаты свидетельствуют об информативности предлагаемого метода в задаче оценки накопленной поврежденности при циклическом нагружении образцов.

Были проведены исследования по определению степени накопленной эксплуатационной поврежденности материала  $\omega$  на наружных поверхностях околошовных зон сварных соединений трубопроводов систем компенсации давления атомных паропроизводящих установок атомного ледокола "Арктика" (срок службы порядка 142 тысяч часов). Получены значения степени поврежденности материала в диапазоне от 0,1 до 0,6, что в целом достаточно хорошо коррелирует с расчетными данными. Результаты проведенных исследований будут использованы при принятии решения о продлении ресурса и срока службы атомных паропроизводящих установок ледокола на следующий временной интервал.

## Литература

- Митенков Ф.М., Углов А.Л., Пичков С.Н., Попцов В.М. О новом методе контроля повреждаемости материала оборудования ЯЭУ и аппаратно - программных средствах для ее реализации. // Проблемы машиноведения и надежности машин, 1998, №3, С. 3-9.
- Углов А.Л., Баталин О.Ю., Матвеев Ю.И., Городов Г.Ф., Панов В.А. Особенности конструкции ультразвуковых релеевских пьезопреобразователей для контроля физико-механических характеристик деталей. // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2001, №8, С. 31-32.

## СПЕЦИФИКА ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЗАТУХАНИЯ И СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ИМПУЛЬСНЫМ МЕТОДОМ

## Н.Е. Никитина

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Затухание и скорость распространения ультразвуковых волн являются важнейшими информативными характеристиками неразрушающих методов контроля и диагностики конструкционных материалов. В настоящее время достигнута высокая точность измерения частотных (временных) интервалов, характеризующих частотные (временные) сдвиги электрических сигналов. Однако далеко не такая высокая точность достигается при определении физических параметров колебаний и волн на основе этих измерений. Особенно это относится к использованию импульсного метода - наиболее распространенного в практике неразрушающего ультразвукового контроля материалов и изделий. На распространение акустического сигнала оказывают влияние состояние поверхности, дифракционное расхождение ультразвукового пучка, потери энергии в контактном слое и другие факторы. Характерным отличием распространения акустических импульсов от распространения сигналов в электрических цепях или радиоволн является наличие не только дисперсии, но также и частотно-зависимого затухания волн, причем физические механизмы его могут быть весьма различны в зависимости от структуры материала и длины волны. Рассмотрим проблемы влияния внутренней структуры материала на точность измерения скорости и затухания упругих волн, поскольку обсуждаемый вопрос явно обделен вниманием исследователей.

Что касается «велосиметрических» методов исследования, то здесь наиболее подходящей в качестве информативного параметра является фазовая скорость. Строго говоря, она вообще не связана с перемещением по пространству какой-либо субстанции, если таковой не считать явно бестелесную величину под названием «фаза колебаний». Фазовая скорость ассоциируется с гармонической волной и сравнительно легко определяется в системах стоячей волны и в интерферометрах. Её физический смысл состоит в следующем: если в выбранной точке пространства фаза колебаний частоты f равна  $\varphi$ , то по прошествии времени nT=n/f или в этот же момент времени на расстоянии  $n\Lambda$  она будет равна  $\varphi+2\pi n$ . Отношение про-

странственного и временного периода колебаний среды, естественно, имеет размерность скорости. Но никакого материального движения она не определяет, более того, если фазу отсчитывать не против, как принято, а по часовой стрелке, то и эта величина поменяет свой знак. Поэтому никого не удивляет, что «скорость» распространения электромагнитных волн по волноводу может превышать скорость света, ведь это «кажущееся» движение типа движения «огоньков» на елочной гирлянде или муаровых полос. Величина  $V_f = \Lambda/T = \Lambda f$  для данной частоты возбуждаемых в среде колебаний определяется исключительно свойствами среды. Резонансные методы измерения фазовой скорости основаны на использовании этого определения и фиксировании частоты той волны, длина которой и длина резонатора относятся как

 $n\Lambda$ =2*L*. Однако для поддержания резонансных колебаний твердой среды требуются большие затраты энергии, кроме того, колебания изделий сложной формы требуют довольно громоздкого математического описания.

Наиболее простым и экономичным способом возбуждения упругих волн в твердой среде является ударное возбуждение. В этом случае в среде распространяется цуг волн, то есть нечто уже на самом деле перемещается по пространству. Скорость перемещения максимума огибающей квазигармонической волны в среде без диссипации совпадает с групповой скоростью основной частоты, отвечающей максимуму амплитудного спектра. Если в среде отсутствует не только диссипация, но и дисперсия, фазовая скорость совпадает с групповой, обретая таким опосредованным образом некий физический смысл. При этом любая точка волнового цуга, соответствующая определенной фазе колебаний, «движется» с этой скоростью.

В диспергирующей среде каждой гармонике соответствует своя фазовая скорость, поэтому, привязавшись к определенной фазе колебаний в волновом цуге, не так-то просто предсказать, через какое время и в какой точке пространства мы снова увидим эту фазу. Для узкополосного частотного пакета гауссовой формы  $(R(t) \sim exp(i\omega_0 t - t^2/2t_0^2))$  в среде со слабой дисперсией, полностью характеризуемой дисперсионным параметром  $D = d^2q/d\omega^2$  (*q*-постоянная распространения) в полосе частот, занимаемой импульсом, можно показать, что это только две точки, равноотстоящие от "амплитудного центра" (*R*'(*t*)=0) импульса, определяемые уравнением [1]:

$$(t-t_0)^2 = 2\tau_0^4 (Dx)^{-1} (1+\tau_0^{-4} D^2 x^2) \operatorname{arctg}[0,5\tau_0^{-2} Dx].$$
<sup>(1)</sup>

Здесь  $2\tau_0 >> T_0$  - эффективная длительность волнового цуга. При малой величине параметра  $\tau_0^{-2}Dx$  это точки:  $t \approx t_0 \pm \tau_0$  (здесь огибающая импульса имеет наибольшую производную). Назовем их "фазовыми центрами" импульса (в обзоре [2] это «частотные центры», но здесь это название будет далее «занято»). Их расположение симметрично относительно частотного центра ( $\omega = \omega_0 = 2\pi f_0$ ), совпадающего в среде без диссипации с амплитудным центром. По аналогии можно предположить, что для импульса с огибающей типа "меандра" так называемая "скорость распространения фронта импульса" будет наиболее близка к фазовой скорости основной частоты, если "линией фронта" считать точку перегиба огибающей (R''(t)=0). В принятом приближении длинного импульса расположение фазовых центров определяется только функцией его огибающей.

При наличии в материале и дисперсии, и частотно-зависимого затухания «баланс» гармоник нарушается. В области релеевского рассеяния, где затухание пропорционально четвертой степени частоты, высокочастотная часть спектра импульса затухает существенно быстрее низкочастотной. При распространении импульса амплитудно-частотный центр расщепляется на амплитудный (R'(t)=0) и частотный ( $f=f_0$ ). Однако и в этом случае для достаточно длинного цуга волн можно найти «реперные» точки, перемещающиеся так, как если бы принадлежали гармонической волне частоты  $f_0$  [1]. Поскольку расположение их относительно амплитудного

центра несимметричное, то одна из них при распространении импульса выйдет за его пределы раньше другой, что также важно для построения методики измерений.

Несколько более изучен вопрос о погрешностях измерения коэффициента затухания ультразвука, определяемых формой импульсов и характером затухания волн в материале. Для импульса колоколообразной (гауссовой) формы, прошедшего путь *x* в среде с коэффициентом затухания  $\alpha = \alpha_0 (\alpha / \alpha_0)^4$ , из приближенных выражений Меркуловой [3] следует, что величина коэффициента затухания, измеренного по максимуму амплитуды в импульсе, равна:

$$\alpha(x) = \alpha_0 [1 + 6(\omega_0^2 \tau_0^2)^{-1} - 8(\omega_0^2 \tau_0^2)^{-1} \alpha_0 x].$$
<sup>(2)</sup>

Формула справедлива для импульсов с безразмерной эффективной длительностью 2-20 периодов  $T_0$  основной частоты. Она показывает влияние двух конкурирующих эффектов на измеряемую величину коэффициента затухания: увеличение его за счет расплывания импульса и уменьшение за счет уменьшения основной частоты. Для самого короткого импульса при уменьшении его амплитуды в  $e^5$  раз ( $\alpha_0 x=5$ ) относительная ошибка измерения коэффициента затухания из-за не учета этих факторов достигнет 70 % [3]. При этом измеренное затухание будет меньше действительного, так как величина  $\alpha_0 x$ , при которой измеренный коэффициент затухания совпадает с действительным, равна 0,75. Таким образом, для повышения точности измерений следует выбирать именно такой диапазон сравнения амплитуд, хотя это не всегда возможно при сильном затухании сигнала или больших размерах исследуемых образцов. Для стали в мегагерцовом диапазоне частот  $\alpha \approx 3 m^{-1}$ , и соответствующее расстояние 15-25 см. В то же время для чугуна затухание может быть в 10-20 раз больше, и это расстояние составит 1-2 см.

Итак, в среде с мелкомасштабной неоднородностью (D>0), характерной для металлов и сплавов в мегагерцовом диапазоне частот, для определения фазовой скорости предпочтительнее использовать «реперную» точку, расположенную в области перегиба огибающей в первой половине импульса, так как в этом случае амплитудный центр импульса перемещается быстрее фазового. Динамический диапазон при измерении коэффициента затухания следует выбирать так, чтобы амплитуда сигнала уменьшалась примерно в два раза, если же по условиям эксперимента это осуществить невозможно, то оценивать истинную величину частотнозависимого затухания в материале с помощью формулы (2).

## Литература

- 1. Никитина Н.Е.//Дефектоскопия, 1989, N 8, с. 23.
- 2. Вайнштейн Л.А.//Успехи физических наук, 1976, т. 118, вып. 2, с. 339.
- 3. Меркулова В.М.//Акустический журнал, 1966, т. 12, вып. 4, с. 474.

# К ВОПРОСУ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

## А.М. Ширяев, А.Н. Гречухин

ФГУП «Научно-исследовательская лаборатория испытания материалов»

## Введение

Одной из проблем, возникающих при проведении акустико-эмиссионного (АЭ) контроля линейных участков (труб) магистральных газопроводов (МГ), является высокое затухание акустических колебаний. Так, из экспериментальных данных известно, для основных мод пластинчатых волн Лэмба a<sub>0</sub> и s<sub>0</sub> полное эффективное удельное затухание превышает 1,1 дБ/м. При этом максимальное расстояние между соседними преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) обычно ограничено 30-50 м. Это затрудняет проведение АЭ-контроля протяженных участков МГ, например переходов трубопровода через реки, дороги и т. д.

При проведении АЭ-контроля участков МГ Ду 1400 при расстоянии между соседними ПАЭ, приблизительно равном 50 м, зарегистрирована мода нормальных колебаний, распространяющаяся со скоростью около 150 м/с, эффективное затухание которой существенно меньше указанных выше волн Лэмба, что предположительно соответствует распространению длинноволновых цилиндрических волн. По результатам калибровки величина полного удельного эффективного затухания данных волн не превышает 0,8 дБ/м, что позволяет увеличить расстояния между соседними ПАЭ и протяженность контролируемых участков МГ.

#### Теоретический анализ



$$|c_{ij}|=0,$$

где і и j=1...6, а *с*<sub>*ij*</sub> зависят от параметров δ=h/L и Ω=ω/ω<sub>s</sub>, толщина гле hстенки

n=2 n=1 L mode and F modes n=2 n=0n=1 T mode Рис.1

цилиндра, L - длина волны рассматриваемой моды, ω<sub>s</sub>- частота сдвиговой волны в бесконечной пластине толщиной h.

Задаваясь фиксированным значением  $\delta$  определитель (1) становится функцией единственного параметра  $\Omega$ . Следовательно, частотный спектр (зависимость  $\omega/\omega_s$  от h/L) можно получить одним из численных методов (например, методом "деления отрезка пополам").

В работе [2] приведена классификация «цилиндрических» мод, по трем основным группам: продольные (L), сдвиговые (F) и торсионные (Т) моды. Для их обозначения используются: L(0,m), F(n,m) и Т(n,m), соответственно, где n и т круговой и радиальный параметры моды. На рис. 1 приведена

иллюстрация схематическая основных типов мод колебаний цилиндрической оболочки, а на рис. 2 - дисперсионные кривые для групповой скорости основных мод, полученные для алюминиевой трубы с толщиной стенки 1мм И диаметром 5мм [2].



Зарегистрированная при АЭ-контроле на МГ мода, распространяющаяся со скоростью ~150 м/с, предположительно соответствует основной сдвиговой волне F(1, 1).

Следует отметить, что применение длинноволновых цилиндрических волн для задач традиционного АЭ-контроля затруднено из-за низких скоростей их распространения и связано с увеличением разности времен прихода. При этом возрастает возможность регистрации некоррелированных импульсов от «ложных» источников АЭ и снижается достоверность контроля. Однако использование мультипроцессорных технологий АЭ-контроля с использованием средств корреляционного анализа сигналов позволит использовать преимущества практического применения цилиндрических волн для АЭ-контроля МГ.

## Литература

- Gazis D. C. // The Journal of the Acoustical Society of America, 1959, v.31, №5, p.568.
- Nishino H., Uchida F., Takashina S., Takemoto M., Ono K. // Journal of Acoustic Emission, 2000, v.18, p.102.

## МЕТОДИКА АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ ЛИНЕЙНЫХ УЧАСТКОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ПРОВЕДЕНИЯ АТТЕСТАЦИИ ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ

## А.М.Ширяев, С.И.Смирнов, Н.Ф.Хохлов<sup>1)</sup>,

Научно-исследовательская лаборатория испытания материалов,

<sup>1)</sup>ОАО "Верхневолжскнефтепровод"

### Введение

Представлен проект руководящего документа (РД) по акустико-эмиссионной дефектоскопии (АЭД) линейных участков (труб) магистральных нефтепроводов (МН), выполняемой для оценки работоспособности и проведения аттестации эксплуатирующихся нефтепроводов. РД определяет порядок организации, подготовки и проведения работ, обработки, анализа и оформления результатов, а также границы ответственности за выполнение отдельных этапов указанных работ.

АЭД нефтепроводов проводят с целью выявления и локализации (определение координат) источников акустической эмиссии (АЭ), связанных с наличием развивающихся дефектов в сварных соединениях и в основном металле, которые снижают надежность безопасной эксплуатации нефтепроводов. Понятие «развивающийся дефект» характеризует способность дефекта к увеличению степени опасности от времени и (или) с ростом нагрузки (давления). После выявления и локализации источников АЭ, указывающих на наличие развивающихся дефектов, для контроля последних проводят дополнительный дефектоскопический контроль (ДДК) на базе традиционных методов неразрушающего контроля (НК).

Несмотря на достижения АЭД нефтепроводов, сегодня на передний план выходит проблема повышения достоверности и надежности контроля. В связи с этим, в РД особое внимание уделяется вопросам повышения достоверности и надежности АЭД.

Отмечается, что АЭД проводится при гидравлическом нагружении (испытаниях) нефтепровода водой или рабочей средой (нефтью) по следующим схемам применения:

- для оценки работоспособности и аттестации действующих нефтепроводов на участках со спиральношовными трубами, на которых невозможно в полном объеме комплексное дефектоскопическое обследование внутритрубными дефектоскопами 3-х типов;
- для уточнения местоположения источника АЭ;
- для уточнения необходимости применения и объема ДДК.
- для решения вопроса о допустимости дефектов, найденных традиционным НК;
- для мониторинга за развитием дефекта, найденного традиционным НК.

Работы по АЭД проводятся по Программе, которая разрабатывается и утверждается Исполнителем и согласовывается с Заказчиком работы. Программа работ разрабатывается индивидуально на каждый обследуемый участок трубопровода и регламентирует все этапы проведения АЭД, критерии оценки качества, способы анализа результатов. Отмечается, что условия проведения АЭД нефтепроводов должны соответствовать требованиям промышленной безопасности.

Требованиям к разработке Программы посвящен отдельный раздел РД.

При определении числа каналов и ПАЭ нужно помнить о необходимости обеспечения контроля, как правило, всей поверхности объекта. Схема расстановки ПАЭ и количество антенных групп определяется конфигурацией объекта, алгоритмом локации и максимально допустимым разнесением ПАЭ, связанным с затуханием сигнала и погрешностью определения координат. При этом при разработке такой схемы нужно использовать значения затухания полученные в аналогичных объектах, а также учитывать дополнительное затухание в сварных швах, на отводах, пузырях воздуха, на участках, где имеет место изменение толщины стенки объекта и т.д.

С учетом специфики объекта РД определяет требования к используемой для дефектоскопии аппаратуре. Для АЭД линейной части нефтепроводов следует использовать многоканальные АЭ-системы на базе персональных ЭВМ, позволяющие определять координаты источников и характеристики АЭ с одновременной регистрацией параметров нагружения (давления и др.). При этом указано, что технические характеристики используемой аппаратуры должны обеспечивать необходимую высокую надежность и достоверность при проведении АЭД, соответствующую требованиям действующей НТД.

Критерии активности источников направлены на определение признаков (прямых или расчетных), косвенно характеризующих показатели опасности соответствующих дефектов. Выявленные источники АЭ рекомендуется разделять на четыре класса: источник I класса (пассивный), II класса (активный), III класса (критический активный), IV класса (катастрофический активный). Выбор критериев классификации источников АЭ и соответствующих уровней отбраковки рекомендуется осуществлять каждый раз при разработке Программы работ.

- Рекомендуется использовать следующие критерии активности источников:
- локационный регистрация источника АЭ, т.е. не менее 2 импульсов из зоны, эквивалентной погрешности определения координат;
- амплитудный регистрация в источнике, по меньшей мере, 2 импульсов с амплитудой, удовлетворяющей условию затухания при распространении сигнала от источника;
- кинетический (локально-динамический) ускоренный рост числа импульсов, суммарного счета, либо другого суммарного параметра АЭ в источнике, либо по ближайшему к нему датчику (каналу) относительно параметра нагружения (давление, время и др.);
- по признакам развивающихся усталостных трещин регистрация на первом цикле нагрузки выбросов (значительного мгновенного приращения) АЭ, вос-

производящихся при той же нагрузке на следующем цикле повторностатического нагружения.

Допускается использование других обоснованных критериев активности источников. Рекомендуется комплексное использование разных критериев активности, при этом для окончательных выводов рекомендуется руководствоваться тем из них, для которого получена наибольшая активность источника.

Акустико - эмиссионная дефектоскопия участка нефтепровода проводится в режиме базового контроля с линейной локацией источников АЭ, т.е. при определении одной линейной (по трубе) координаты зоны акустической активности. По результатам базового контроля определяется необходимость, объем и место проведения прецизионной (более точной) АЭД и ДДК.

Результатом АЭД дефектоскопии является идентификация и классификация источников АЭ, указывающих на возможность наличия опасных развивающихся дефектов. В РД приведены критерии, используемые для оценки результатов на месте.

Дефектоскопию участка проводят при одном-двух циклах изменения давления от исходного эксплуатационного P<sub>0</sub> до максимального испытательного давления P<sub>исп</sub>, при ступенчатом нагружении с несколькими ступенями выдержки на заданных уровнях давления. Рекомендуется выбирать ступени выдержки P<sub>0</sub>≈0,5P<sub>pa6</sub>, 1,0P<sub>pa6</sub> и P<sub>исп</sub>, где P<sub>pa6</sub> - рабочее давление (максимальная допускаемая эксплуатационная на-грузка). Испытательное давление должно удовлетворять условию: P<sub>исп</sub>≥P<sub>pa6</sub>.

Первичная экспресс обработка результатов проводится в ходе проведения и по окончании дефектоскопии участка трубопровода с использованием всех средств, имеющихся в распоряжении бригады специалистов. Задачей первичной обработки и анализа результатов является определение необходимости повторения АЭД объекта в целом, либо его фрагмента, по прецизионной (более точной) схеме, а также анализ возможности наличия дефектов, представляющих угрозу безопасной эксплуатации нефтепровода на момент проведения дефектоскопии.

Окончательная обработка, анализ результатов и разработка заключения проводится специалистами Исполнителя работы после проведения натурной составляющей АЭД.

Заключение по результатам дефектоскопии имеет право выдавать специалист, имеющий II или III уровень квалификации. Для обеспечения высокого качества выполнения работ и повышения оперативности допускается проведение дефектоскопии одним специалистом, а обработка результатов и разработка заключения – другим.

Разработчики руководящего документа выражают уверенность в его актуальности и полезности для специалистов в области технической диагностики магистральных нефтепроводов и приглашают их принять участие в его обсуждении.

# ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕЧЕИСКАНИЯ В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

## Р.Ц. Гулиянц, Л.Д.Войтасик, Н.С. Каришнев, В.В. Усов, Л.Е. Шейнман

ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор», Санкт-Петербург

При скоростях движения газа в трубопроводах меньших скорости звука можно при решении гидромеханических задач использовать гидромеханическое уравнение Бернулли. Анализ работ показывает, что для определения скорости истечения газа через отверстие  $V_2$  можно использовать формулу Сен-Венана, которую для нашего случая запишем в виде

$$V_{2} = \sqrt{\frac{2qk}{k-1}P_{1}\gamma^{-1}} \left[1 - \left(\frac{P_{2}\gamma_{2}}{P_{1}\gamma_{1}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] + V_{1}^{2}},$$
 (1)

где  $k = \frac{c_P}{c_V}$  - отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении к удель-

ной теплоемкости при постоянном объеме; q – ускорение силы тяжести; P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> – соответственно статические давления в трубопроводе и в окружающей среде;  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ - удельный вес газа в трубопроводе и в окружающей среде соответственно; V<sub>1</sub> – скорость движения газа в трубопроводе.

Основной особенностью звукоизлучения звука холодными сверхзвуковыми струями является наличие дискретной составляющей в частотном спектре этих струй.

При истечении газовых струй в открытое пространство наблюдается излучение звука высокой интенсивности. Это явление характерно как для дозвуковых так и для сверхзвуковых струй. Причиной шума струи является неустойчивость тангенциального скачка скорости, т. е. неустойчивость границы между струей и окружающей средой, которая проявляется в усилении малых возмущений, возникающих у основания струи, по мере их распространения вдоль струи. Это приводит к образованию пограничного слоя, постепенно развивающегося в турбулентную область, которая в конце концов, поглощает струю. В сверхзвуковой струе шумит как дозвуковая ее часть, так и сверхзвуковое ядро. Первый механизм обуславливает появление дискретной составляющей, а также второй, третьей и четвертой гармоники.

Зависимость частоты основного тока от давления в трубе приведена на рис. 1.





Рис. 1 Зависимость частоты основного тона от давления в трубе

Зависимость интенсивности дискретного звука в зависимости от давления в трубе на расстоянии 4,5 см от отверстия приведена на рис. 2 (в дБ относительно  $2 \cdot 10^5$  Па).



Рис. 2 Интенсивность дискретного звука в зависимости от давления в трубе

При этом, явления, наблюдаемые при истечении струи из большого и малого отверстия полностью подобны с коэффициентом  $k = \frac{L_1}{L_2}$ , где  $L_1$  и  $L_2$  – размеры

большого и малого отверстия. С уменьшением размеров отверстия во столько же раз увеличивается частота. Дискретный тон создает концентрические сферические волны.

Звуковые волны второго типа образуются при наличии развитого сверхзвукового ядра при давлениях. Они излучаются под углом к оси струи

$$\varphi = \arccos \frac{c}{V},\tag{2}$$

где с – скорость звука в окружающей струе; V – скорость распространения возмущения, близкая к скорости самой струи около ее границы.



Максимум первой моды соответствует числам Струхаля 0,2÷0,3, где число Струхаля определяется соотношением

$$St = \frac{2Df}{V_2} \frac{c_1}{c_0},\tag{3}$$

здесь D – размер отверстия;

f – частота;

V<sub>2</sub> – скорость истечения струи;

с<sub>1</sub>, с<sub>0</sub> – скорости звука соответственно в окружающей струе и в газе в трубе.

Частота дискретной составляющей падает с ростом скорости и хорошо описывается формулой [6]

$$f_n = \frac{1}{D} \frac{V_2 \cdot c_0}{V_2 + c_0} n \,, \tag{4}$$

где n – номер гармоники.

Можно принять, что скорость возмущения вдоль струи определяется выражением

$$V = V_1 \bigg/ R_e \bigg( \frac{kV}{\omega} \bigg), \tag{5}$$

где V – скорость движения возмущения вдоль струи. Для примера приведены данные в таблице № 1.

Таблица № 1

М	1,2	1,6	2,0	2,4
$S_1$	0,48	0,2	0,12	0,085

Определение расстояния до течи определяется по времени задержки  $t_{_{3ad}} = \frac{1}{2\pi f_1} \frac{J_m[G_{12}(f_1)]}{R_e[G_{12}(f_1)]}, \ rge \ J_m[G_{12}], \ R_e[G_{12}]$ - мнимая и действительная части вза-

имного спектра на частоте основного тона.

Выделения основного тона f1 и его узкополосной фильтрации позволяют с одной стороны повысить помехоустойчивость течеискателя, отфильтровав этот тон от помех. Кроме того, появляется возможность определить диаметр повреждения, так как, согласно формулы (4)  $D = \frac{1}{f_1} \frac{V_2 c_0}{V_2 + c_0}$ , скорость струи  $V_2$  может быть рассчи-

тана по формуле (1). Кроме того, учитывая, что максимум первой моды лежит при  $St \cong 0,25$  можно найти размер повреждения D из решения уравнений.

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА И РАЗМЕРОВ ТЕЧИ В ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ И В ДЮКЕРАХ

## Р.Ц. Гулиянц, Л.Д.Войтасик, Н.С. Каришнев, В.В. Усов, Л.Е. Шейнман

ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор», Санкт-Петербург

Непрерывное наращивание трубопроводных систем, в том числе и подводных, требует совершенствования контроля этих систем для своевременного обнаружения места течи. Причем, это особенно необходимо в труднодоступных или недоступных техническому надзору районах прокладки напорных трубопроводов, в частности, в подводных трубопроводах и в дюкерах. При этом основным неконтактным методом обнаружения места течи является акустический метод. Газоискатели различных видов непригодны для подводных трубопроводов.

Акустические методы в своей основе предусматривают установку двух приемных акустических датчиков располагаемых на возможно большем расстоянии друг от друга вдоль трассы трубопровода. Обнаружение и локализация течи осуществляется по акустическому шуму течи тем или иным способом.

Помехоустойчивость приема шума течи может быть существенно повышена за счет оптимальной фильтрации.

Зависимость определяющая число Струхаля имеет вид:

$$Sh = \frac{fD}{U_c},\tag{1}$$

где f – частота, Гц; D – диаметр отверстия;  $U_c$  – скорость истечения струи на срезе стенки трубопровода.

Скорость истечения струи определяется как

$$U_c = \sqrt{\frac{2F_1}{\rho_1} + V_1^2 - \frac{2F_2}{\rho_2}},$$
 (2)

где  $F_1$ ,  $\rho_1$ , V – соответственно давление, плотность жидкости и скорость ее движения в трубопроводе;  $F_2$ ,  $\rho_2$  - соответственно давление и плотность жидкости в окружающей среде.

Таким образом, исходя из формулы (1), нижнюю частоту полосового фильтра целесообразно выбрать

$$f_{\mu} = \alpha \frac{Sh_{\max}U_c}{D_a} = 0,275\alpha \frac{U_c}{D},$$
(3)

а верхнюю частоту полосового фильтра целесообразно выбрать

$$f_e = \beta \frac{Sh_{\max}U_e}{D_e} = 0.275 \beta \frac{U_e}{D}$$
(4)

При этом,  $D_0$  – минимальный диаметр повреждения, которое нужно обнаружить;  $\alpha$ ,  $\beta$  - коэффициенты, выбираемые на уровне – 8 дБ кривой спектральной плотно-







Вторым мероприятием для повышения помехоустойчивости может явиться использование взаимно-спектрального анализа. В случае объемного шума энергетический спектр помех

$$G_n(\omega) = G_u(\omega) \frac{\sin kd}{kd}, \qquad (5)$$

где  $k = \frac{\omega}{c}$  - волновое число в среде со скоростью звука "c".

На частотах, например, выше 100 Гц и при расстоянии между точками приема  $d \le 500$  м значение  $\frac{\sin kd}{kd} \le 5 \cdot 10^{-3}$  и, следовательно, уровень помех может быть

существенно снижен. При взаимно-спектральном анализе

$$G_{12}(\omega) = \frac{1}{r_1 r_2} G_o(\omega) [\cos \omega t_3 - i \sin \omega t_3] + G_n(\omega), \tag{6}$$

где г<sub>1</sub>, г<sub>2</sub> – расстояние между повреждением в трубопроводе и первым и вторым, датчиками, причем  $r_1 + r_2 = d$ ;  $G_o(\omega)$  - энергетический спектр шума струи, вытекающей из трубопровода в месте повреждения;  $t_3 = \frac{r_2 - r_1}{c}$  - задержка в приеме

шума струи в среде со скоростью звука "с".

Расстояние до места течи путем определения времени задержки из соотношения

$$t_{3a\partial} = \frac{1}{\omega} \operatorname{arctq} \frac{J_m[G_{12}(\omega)]}{R_e[G_{12}(\omega)]},\tag{7}$$

где  $J_m[.]$  и  $R_e[.]$  - символы мнимой и действительной частей взаимного спектра. Далее, расстояние  $r_1$  и  $r_2$  от приемников до места течи находится из решения системы уравнений

$$\begin{array}{c} r_1 + r_2 = d \\ r_2 - r_1 = t_{sao} \cdot c \end{array}$$

$$(8)$$

Время задержки определится как

$$t_{3a\partial} = i \frac{\pi}{2} \omega_i^{-1}, i = 1, 2, \dots$$
 (9)

Предлагаемый подход позволяет не только определить расстояние до течи, но и оценить размер повреждения. Для этого учитывается, что спектральная плотность излучения шума дозвуковой струей имеет максимум при числе Струхаля

$$Sh_{\max} \cong 0,275. \tag{10}$$

Следовательно, можно определить частоту  $\omega_0$ , при которой  $G_0(\omega) = r_1 r_2 |G_{12}(\omega)|$  имеет максимум. Тогда размер повреждения

$$D = \frac{2\pi Sh_{\max} \cdot U_c}{\omega_0}, \qquad (11)$$

где  $U_c$  – скорость истечения струи на срезе стенки трубопровода, определяемая формулой (2).

Расстояние d между приемниками определяется из соотношения

$$d = \frac{P_c}{P_n} \delta^{-1} \chi^{\frac{1}{2}},$$
 (12)

где  $P_c^2 = \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) d\omega$  - квадрат акустического давления, обусловленного шумом

струи, вызывающейся из трубопровода, приведенное к расстоянию 1 м;  $P_n^2 = \int_{-\infty}^{\infty} G_n(\omega) d\omega$  - уровень акустических помех;  $\chi$  - коэффициент помехоустойчи-

вости приемника;  $\delta$  - коэффициент распознавания, т. е. отношение сигнала к помехе на входе тракта обработки, обеспечивающее регистрацию шума от вырывающейся из трубопровода струи с заданными значениями вероятности правильного обнаружения  $W_{np}$  и вероятности ложных тревог  $W_{n.t.}$ .

Таким образом, описанные выше мероприятия позволяют повысить эффективность определения места течи. Кроме того, позволяют оценивать размеры повреждения в трубопроводе.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНО РАССЕЯННОГО СИГНАЛА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

## П.Н.Вьюгин, И.Н.Диденкулов<sup>1)</sup>, Л.М.Кустов, А.И.Мартьянов, Н.В.Прончатов-Рубцов

## Нижегородский государственный университет,

<sup>1)</sup>Институт прикладной физики РАН

Методы построения и визуализации акустических изображений разрабатываются достаточно давно и, при различных физико-технических решениях, они базируются либо на методе апертурного синтеза, либо на использовании звуковых фокусирующих линз. Как в том, так и в другом случае обрабатывается линейно рассеянный на исследуемом объекте или группе объектов сигнал. В настоящей работе экспериментально реализуется построение акустического изображения рассеивателей с использованием комбинационно рассеянного сигнала. Эксперименты проведены в гидроакустическом бассейне на автоматизированном измерительном комплексе. В качестве наблюдаемых объектов использовались стальные цилиндры. Построение акустического изображения осуществлялось построчно-угловым сканированием эхолокатора со сферическим зеркалом. Озвучивание цилиндров проводилось двумя неколлинеарными ультразвуковыми пучками. Поверхность цилиндров была специально "окрашена" газовыми электролизными микропузырьками. Сферическое зеркало диаметром 35 см с фокусным расстоянием 27,5 см было изготовлено из пенопласта. Сканирование по углу осуществлялось с помощью сельсин-пары. Сфокусированные зеркалом сигналы после детектирования считываются АЦП и поступают в компьютер, на экран монитора которого выводится изображение рассеивателей в яркостном виде.

Геометрия описываемого эксперимента изображена на рисунке 1, где 1,2 - цилиндры, 3, 4 - излучатели ( $f_1$ =195кГц,  $f_2$ =130кГц), 5-приемный гидрофон, 6-сферическое зеркало, 7 - блок электронно-компьютерной обработки. Расстояние между зеркалом и цилиндрами равнялась 2м.



На рис. 2 представлено синтезированное изображение, полученное на разностной частоте равной 65 кГц. ¢CM

Наблюдаемыми объектами были два вертикально расположенных цилиндра диаметром 40 мм и длиной 300 мм, находящиеся на расстоянии 20 см друг от друга. Ha рис.3 представлена в амплитудном виде одна горизонтальная строка изображения, полученная в линейном



режиме на высокой частоте при

акустическими пучками. На рис. 4 приведена горизонтальная строка изображения на разностной частоте 65 кГц. На вертикальных осях указаны нормированные на единицу значения амплитуд.





Таким образом, в данной работе продемонстрированы возможности получения изображений нелинейно-рассеивающих объектов в акустических полях на разностной частоте. Показано, что использование волн разностной частоты для получения акустического изображения может оказаться эффективным приемом при исследовании различных подводных объектов, которые весьма часто покрыты микроорганизмами и газовыми микропузырьками с высоким коэффициентом акустической нелинейности. Проведенный лабораторный эксперимент продемонстрировал, что пространственное разрешение и четкость изображения, полученного на волнах разностной частоты, выше, чем при использовании линейно рассеянного сигнала.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (01-02-16938, 01-02-17653).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРИВАРКИ ПРОВОДА ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКЕ

## В.В.Казаков

#### Институт прикладной физики РАН

Ультразвуковая приварка контактов в микросхемах осуществляется двумя способами: с предварительным созданием шарика в капилляре или путем непосредственной «притирки» провода. Большое количество контактов и дороговизна конечного продукта привели к необходимости контроля качества приварки непосредственно в процессе сварки. Это возможно сделать различными методами: путем контроля колебаний концентратора или наконечника сварочного аппарата в нескольких плоскостях, измерением импеданса системы «концентратор-наконечник» и др. [1-4]. Однако контроля самого процесса сварки оказывается недостаточным, поскольку качество приварки в значительной степени зависит от подготовки подложки. Поэтому представляется важным не только контролировать процесс сварки, но и проводить контроль качества соединения уже приваренной проволоки.

Суть предлагаемого метода заключается в контроле места соединения путем исследования параметров изгибных ультразвуковых волн распространяющихся по проволоке. Изменение качества приварки контакта приводит к изменению граничных условий для распространяющейся ультразвуковой волны. Цель работы заключалась в исследовании принципиальной возможности контроля качества приварки провода таким методом. Для приваривания алюминиевой проволоки толщиной 0,25 мм использовался сварочный аппарат Orthodyne Model 20. Возбуждение и прием ультразвуковых волн осуществлялся с помощью пьезокерамических дисков диаметром 8,5 мм и толщиной 4 мм. Через фторопластовое переходное устройство провод поджимался к торцу пьезопреобразователя, возбуждаемого на радиальных модах колебаний в диапазоне частот 0,1-1 МГц. Для проведения исследований использовались различные комбинации принимающих и возбуждающего преобразователей (с использованием канала для нормирования амплитуды возбуждаемой

волны и без него), при различной длительности возбуждаемой волны, мощности и времени приварки, диаметре провода и др. Типичные схемы проведения экспериментов для локации на просвет (а) и отражение (б) приведены на рис.1.



Рис.1

Алюминиевая проволока приваривалась к дюралюминиевой подложке и полученный одиночный контакт подвергался исследованию на качество приварки. Моделирование «хороших» и «плохих» контактов осуществлялось или путем изменения качества подготовки подложки или изменением параметров сварки - мощности или времени. После проведения измерений амплитуды принятой ультразвуковой волны, осуществлялся контроль качества приварки. Для этого с помощью датчика силы проводился сдвиг приваренного провода до его отрыва от подложки. Максимальная сила, которая была необходима для его отрыва, соответствовала качеству приварки.

На рис.2 приведены осциллограммы, полученные при локации на просвет и соответствующие следующим условиям: а – перед сваркой (первый импульс соответствует отражению от контакта), б – отражение от «хорошего» контакта и в – от «плохого». Частота ультразвуковой волны – 238 кГц.



Из рис.2 хорошо видно, что «хороший» контакт характеризуется тем, что ультразвуковая волна через него не проходит. На рис.3 приведены данные для нормированного значения амплитуды прошедшей ультразвуковой волны при различных частотах возбуждения. Области соответствующие различным качествам контакта условно показаны на рис.3, в. Сплошной линией показана среднеквадратическая аппроксимация данных. Из рис.3 хорошо видно, что существует частотная зависимость в проявлении контактом своих акустических характеристик.



Рис.3

На рис.4 приведены данные, полученные при локации на отражение. Если предыдущие данные, полученные при локации на просвет, демонстрировали принципиальную возможность контроля качества приварки, то данные на рис.4, полученные при локации на отражение, более приближены к практическим условиям сварки и показывают возможность контроля уже в технологическом процессе. Следует отметить, что изменение амплитуды принятого сигнала, полученные при локации на отражение, существенно меньше чем при локации на просвет.

Таким образом, в результате выполнения работы была показана принципиальная возможность контроля качества привар-

ная возможность контроля качества приварки провода с помощью измерения параметров изгибных ультразвуковых волн. «Хороший» и «плохой» контакт отличаются по амплитуде отраженной (прошедшей) ультразвуковой волны. Было определено, что в ряде случаев изменение огибающей ультразвукового импульса, может характеризовать положение провода в наконечнике непосредственно перед процессом приваривания. Показано, что контроль приваривания возможен и путем проведения импедансных



измерений. Качество приварки влияет не только на параметры распространяющейся ультразвуковой волны, но и на условия ее возбуждения, которые также могут быть измерены. Чувствительность используемого метода диагностики является частотно зависимой и может быть оптимизирована для конкретного диаметра провода и площади контакта.

## Литература

- 1. Tsujino J., Ueoka T., Kashino T., Sugahara F. // Ultrasonics, 2000, Vol.38, pp.67-71.
- 2. Tsujino J., Yoshihara H., Sano T., Ihara S. // Ultrasonics, 2000, Vol.38, pp.77-80.
- Tsujino J., Yoshihara H., Kamimoto K., Osada Y. // Ultrasonics,1998,Vol.36, pp.59-65.
- 4. Tsujino J., Ueoka T., Hasegawa K. // Ultrasonics, 1996, Vol.34, pp.177-185.

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТА РЕЗЬБОВОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ НЕЛИНЕЙНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА

## В.В.Казаков, А.М.Сутин, Н.В.Прончатов-Рубцов<sup>1)</sup>

Институт прикладной физики РАН,

<sup>1)</sup>Нижегородский госуниверситет

Известно, что с использованием нелинейного акустического метода можно легко отличить дефект в виде трещины от полости [1-5]. Модуляция параметров трещины изгибными колебаниями объекта приводит к изменению ее акустических характеристик и, как следствие, к модуляции, распространяющейся в объекте ультразвуковой волны. Резьбовое соединение также можно рассматривать как сложный набор микротрещин, и, в связи с этим, представляется интересным использовать нелинейный акустический метод для исследования акустических характеристик такого дефекта. Очевидно, что модуляция ультразвуковой волны будет минимальна для двух крайних случаев: когда соединение «очень хорошее» (контакт не меняется под действием изгибных колебаний) и когда «очень плохое» (болт свободно входит в отверстие и площадь изменяемого контакта минимальна).

В качестве объекта исследования использовалась металлическая пластина размером 50х305х6 мм<sup>3</sup>. Один торец пластины жестко прикреплялся к металлической плите. Другой ее конец соединялся с платформой вибростенда. При возбуждении вибростенда с частотой 10 Гц пластина изгибалась. В закрепленный конец вдоль оси пластины излучался ультразвуковой импульс частоты 3 МГц. Принятый сигнал, соответствующий различным фазам изгиба, записывался через плату АЦП в компьютер. На каждой дальности локации определялась модуляция принятого сигнала, после чего строилась зависимость «дальность локации - амплитуда модуляци».

Пластина имела два дефекта, расположенных на расстоянии 101,5 мм от торцов. С одной стороны это была искусственно созданная трещина. С другой стороны, ближней к ультразвуковому датчику, по центру пластины было просверлено сквозное отверстие, в котором была нарезана резьба М4. После проведения всех экспериментов с резьбой М4, была нарезана резьба М6 и эксперименты повторены.

На рис.1, а-г приведены характерные осциллограммы принятого сигнала (а, в) и его модуляции (б, г) для различных резьб: М4 (а, б) и М6 (в, г). Время 110 µс соответствует отражению от противоположного конца пластины. Из представленных рисунков хорошо видно, что при линейной локации видны оба дефекта - резьбовое соединение и трещина. Отражение от соединения существенно больше, чем от трещины. Модуляция сигналов показывает, что трещина изменяет свои акустические характеристики гораздо сильнее, чем резьбовое соединение. В то же время, увеличение размера резьбы приводит к повышению уровня модуляции.

Для измерения зависимости амплитуды модуляции от амплитуды изгиба, амплитуда колебаний пластины изменялась в пределах от 0 до 1 мм с шагом 0,04 мм. После проведения одной серии измерений болт был повернут на пол-оборота, чтобы изменить существующий контакт и иметь возможность оценить разброс возможных уровней модуляции.







На рис.2 приведены: а осциллограмма принятого сигнала ультразвуковой волны и амплитудные характеристики (б-г), соответствующие указанным дальностям (б – для 1, в – 2, г – 3). Данные, отмеченные ▲, приведены для М4, ● - для М6. Из рисунков следует, что увеличение резьбы приводит к увеличению уровня модуляции. По-видимому, это объясняется изменением общей площади контакта, а также тем, что число витков резьбы уменьшается и, следовательно, изменяется качество завинчивания - оно становится более «податливым». Сложный характер отражения от резьбового соединения в данном случае проявляется в том, что закон изменения амплитуды модуляции в зависимости от дальности локации различен. Для сигнала, отраженного от трещины, он остается линейным. Это



может быть связано с тем, что модуляция, вызываемая изменением резьбового со-

единения, рассредоточена в пространстве. Это может приводить к интерференционным эффектам в ультразвуковом датчике, использующем для локации несколько периодов ультразвуковых колебаний.

Изменение положения болта в резьбе существенно изменило уровень флуктуации модуляции для дальности, отмеченной как 1, хотя их пиковые значения не изменились. Для дальности 2 сохранилась тенденция к увеличению амплитуды модуляции для обеих резьб. Для резьбы М4 его изменение не превысило 7%, для М6 – 20%. Используемая техника для проведения эксперимента не позволила создать амплитуды изгибных колебаний, при которых прекращается рост уровня модуляции. Деформации пластины, возникающие в месте резьбового соединения, малы. Качественно было отмечено, что с ухудшением контакта уровень модуляции увеличивался.

#### Литература

- 1. Руденко О.В. // Дефектоскопия, 1993, № 8, с. 24.
- 2. Сутин А.М., Назаров В.Е. // Изв. Вузов. Радиофизика, 1995, т. 38, № 3-4, с. 109.
- 3. Nagy P.B. // Ultrasonics, 1998, Vol. 36, p. 375.
- 4. Казаков В.В., Сутин А.М. / Препринт № 534, Н.Новгород: ИПФ РАН, 2000, 28 с. 5.
- 5. Казаков В.В., Сутин А.М. // Акустический журнал, 2001, т.47, №3, с. 364.

#### АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РОСТЕ ТРЕЩИН В СТАЛЯХ

## А.М.Ширяев, А.В.Камышев, А.А.Миронов<sup>1)</sup>

ФГУП «Научно-исследовательская лаборатория испытания материалов»

<sup>1)</sup>Нижегородский государственный технический университет

#### Ведение

Метод акустической эмиссии (АЭ) в последние годы широко используется для исследования разрушения материалов и для неразрушающего контроля материалов конструкций, поскольку позволяет контролировать энергетику этих процессов в реальном масштабе времени без какого-либо дополнительного воздействия на сам процесс. Результаты таких исследований находят свое применение в понимании микро- и макромеханизмов разрушения и в задачах диагностирования прочностного состояния конструкций. В докладе представлены результаты исследования акустической эмиссии при устойчивом (докритическом) росте трещины в низкоуглеродистых сталях, получивших широкое распространение в машиностроении.

#### Эксперимент

Эксперименты проводились при нормальных условиях в режиме однократного статического и повторно-статического циклического нагружения. Для исследования использовались два вида плоских образцов: в форме двухконсольных балок и на осевое растяжение. Выбор формы и размеров образцов обеспечивали реализацию в вершине трещины условий плоского напряженного состояния и возможность регистрации акустического излучения в условиях пластинчатых волн.

Регистрацию и анализ акустического излучения проводили с помощью различных многоканальных автоматизированных АЭ-систем («Фестан», «Локус», «Эксперт»). Регистрировали суммарный счет, время прихода импульса АЭ, суммарное число импульсов и пиковые амплитуды импульсов и др. По разности времен прихода импульсов определяли координаты источников, при этом из анализа исключались те сигналы, для которых координаты находились за пределами локационной ячейки.

Как выяснилось, независимо от марки стали и вида нагружения, акустическое излучение характеризуется двумя составляющими: дискретной высокоамплитудной и непрерывной низкоамплитудной АЭ. Непрерывная АЭ связана преимущественно с процессами пластического деформирования в вершине трещины. Основным параметром, отражающим ее закономерности, является суммарный счет. Он линейно возрастает при циклическом нагружении и экспоненциально - при развитии трещины в условиях монотонного статического нагружения. Дискретная эмиссия регистрируется из окрестности вершины трещины, соответствующей погрешности определения координат. Амплитуда и активность импульсов в среднем постоянны, по крайней мере, на начальном этапе устойчивого роста трещины. Однако с переходом к неустойчивому катастрофическому росту трещины отмечается их резкое увеличение. Амплитуда импульсов дискретной эмиссии, является случайной величиной с распределением Вейбулла.

#### Теоретический анализ

Для интерпретации полученных результатов предложена модель [1] структурной микромеханики разрушения, учитывающей особенности реальной структуры материала, объясняющая полученные закономерности и, в частности, особенности устойчивого роста трещины в условиях развитой пластичности. Основным постулатом предлагаемой модели является влияние структурной неоднородности реального материала на скачкообразный устойчивый роста трещины. По мнению авторов, в условиях развитой пластичности структурная неоднородность приводит к возникновению в однородном пластически деформируемом объеме в вершине трещины зон локального упрочнения. В окрестности этих зон прорастание трещины затруднено и ее фронт закреплен на «структурных элементах». Разрушение структурных элементов снимает закрепление и провоцирует скачки трещины, которые сопровождаются дискретной высокоамплитудной акустической эмиссией и проявляются на изломе в виде периодических полос.

Чем выше «прочность» сдерживающего фронт элемента, тем больше энергия излучается. Отсюда следует, что с увеличением длины фронта трещины, т.е. с ростом выборки элементов, прогнозируется смещение функции распределения в сторону больших амплитуд (масштабный эффект). Используя теоретический подход к концепции наислабейшего звена, можно показать, что применительно к амплитудному распределению масштабный эффект приводит к сдвигу А-кривой вдоль оси ординат на величину логарифма отношения длин фронтов трещин.

Сопоставление данных, полученных на образцах различной толщины, подтверждает этот вывод.

Используя полученные результаты можно оценить вероятность регистрации развивающейся трещины, которая, в конечном итоге, определяет эффективность контроля. В общем случае, эта вероятность зависит от материала и других особенностей объекта контроля, а также от условий его нагружения, расстояния между датчиками и т.д. При использовании *А-кривых* для оценки эффективности АЭконтроля тонкостенных металлоконструкций следует учитывать особенности распространения и затухания упругих волн.

#### Литература

1. Ширяев А.М., Камышев А.В., Миронов А.А. Исследование вязкого развития трещин в низкоуглеродистых сталях при статическом нагружении. // Проблемы прочности, 1997, №4, с. 64-73.

## НЕКОТОРЫЕ ПУТИ ПОСТРОЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕИСКАТЕЛЕЙ ПРИ РАСПОЛОЖЕНИИ ЗВУКОПРИЕМНИКОВ В ОДНОЙ ТОЧКЕ ТРУБОПРОВОДА

## Р.Ц.Гулиянц, Л.Д.Войтасик, Н.С.Каришнев, В.В.Усов, Л.Е.Шейнман

## ФГУП «ЦНИИ «Морфизприбор», Санкт-Петербург

В настоящее время все известные нам акустические течеискатели имеют два приемника, разнесенные друг от друга на возможно большее расстояние. Так как информация о возникновении повреждения в трубопроводе должна обрабатываться по данным с обеих приемников, например, взаимокорреляционным методом, необходимы линии электрических коммуникаций, связывающие оба приемника с аппаратурой обработки информации. Эти линии коммуникаций дорогостоящие. Кроме того, в ряде случаев вторая точка установки приемника недоступна или труднодоступна.

Для определения места течи из одной точки необходимо, чтобы шум вырывающейся струи достигал этой точки либо по двум трассам, либо по одной трассе, но имеющей какую либо физическую зависимость от расстояния до течи.

Ниже обсуждаются следующие пути определения расстояния до шумящей струи из одной точки:

- за счет одновременного измерения акустического давления и колебательной скорости в одной точке по одной трассе;

- за счет одновременного приема в одной точке шума струи, распространяющегося по двум трассам в металле трубопровода и в окружающей среде.

В первом варианте способа используется следующее: в одно место контроля на трубопроводе помещают два приемника: приемник акустического давления и приемник колебательной скорости. При этом, шум от струи распространяется в окружающей среде, например, в воде.

При прорыве трубопровода вытекающая струя создает стационарный шумовой процесс. Причем шум из отверстия трубопровода ненаправлен, то есть акустический источник шума является сферическим.

После усиления сигнала от течи, фильтрации, дискретизации, в двухканальном спектроанализаторе вырабатываются спектральные плотности:

$$S_{P}(\omega, r) = \frac{r_{o}^{2}}{r^{2}} \bullet S_{o}(\omega);$$
  
$$S_{v}(\omega, r) = \frac{r_{o}^{2}}{r^{2}(\rho c)^{2}} \left[ 1 + \frac{c^{2}}{\omega^{2} r^{2}} \right] \bullet S_{o}(\omega).$$

Отношение этих спектральных плотностей, имеет вид:

$$\frac{S_{\rm p}(\omega,r)}{S_{\rm v}(\omega,r)} = \left(\rho_{\rm o}c\right)^2 \left[1 + \frac{c^2}{\omega^2 r^2}\right]^{-1}$$

В последнем выражении все величины кроме расстояния г известны (плотность среды  $\rho_o$ , скорость звука в среде *с* и частота  $\omega$ , а спектральные плотности  $S_P(\omega, r)$ 

и  $S_{\nu}(\omega, r)$  определены с помощью спектроанализатора. В качестве частоты  $\omega$  целесообразно использовать частоту максимального излучения струи

$$\omega_o = \frac{2\pi U}{D} Sh_{\max},$$

где U - скорость вытекающей струи, зависящая только от плотностей и статических давлений в трубе и в окружающем пространстве.

D - диаметр повреждения,

Sh - число Струхаля.

Максимум излучения происходит при числе Струхаля Sh<sub>max</sub>=0,275. Вычисление расстояния г выполняется по алгоритму:

$$r = \frac{c}{\omega_o} \left[ \left( \rho_o c \right)^2 \frac{S_v(\omega_o, r)}{S_{\rm P}(\omega_o, r)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}.$$

Таким образом, измерение в одной точке трубопровода полностью обеспечивается.

Второй путь определения места течи из одной точки на трубопроводе, как уже отмечалось, обеспечивается двумя акустическими датчиками установленными на трубопроводе рядом.

Первый акустический датчик имеет акустический контакт с трубопроводом, и акустически заэкранирован от акустических волн в окружающей трубопровод среде. Второй датчик – имеет акустический контакт с окружающей средой, но он заэкранирован от акустических волн, распространяющихся по трубопроводу.

Групповую скорость распространения акустического сигнала по трубе необходимо определить экспериментально, тем более, что в дюкере может быть разное крепление трубы.

Для этого на известном расстоянии  $R_o$  от точки расположения акустических датчиков создают искусственное акустическое возбуждение в трубе и в среде с частотами, лежащими в диапазоне от  $f_o$  до  $f_в$  фильтров.

Сигналы искусственного шумоизлучения принимают первым и вторым акустическими датчиками; первым – акустически изолированным от шума в среде, и вторым – принимающим шум в среде.

С помощью фильтров производят фильтрацию принятых сигналов искусственного шумоизлучения.

Фильтры выбраны так, чтобы обеспечить выделение шума струи из некоторого минимального повреждения, например, с диаметром  $D = 5 \cdot 10^{-3} M$ . Максимум шума струи течи, вырывающейся из трубопровода наблюдается при числе Струхаля

$$Ch = \frac{fD}{U} = 0,275$$

где f - частота в Гц, U - скорость истечения струи  $_{M/c^{-1}}$ . Основная энергия шумоизлучения струи сосредоточена в диапазоне от fD = 0,21 до  $\frac{fD}{U} = 0,3$ .

Следовательно, нижнюю границу фильтра можно выбрать  $f_u = 0.21 \frac{U}{D}$ , а верх-

нюю границу фильтра  $f_B = 0.3 \frac{U}{D}$ .

Усиливают принятые датчиками отфильтрованные сигналы, преобразуют их в цифровые сигналы с помощью АЦП.

Определяют взаимный спектр этих сигналов,

$$G_{12}(f) = \frac{1}{R_0^2} G_0(f) \quad \left( \cos 2\pi f t_{3,\mu} - i \sin 2\pi f t_{3,\mu} \right)$$

где  $G_0(f)$  – энергетический спектр искусственного шума на единичном расстоянии;  $t_{3,\mu}$  – время задержки искусственного сигнала в среде, относительно сигнала распространяющегося по трубе.

Время задержки определяют по частотам нулевых значений действительной или мнимой частей взаимного спектра или в виде:

$$t_{3,u} = \frac{1}{2\pi f} \ arc \ tg \ \frac{\text{Im}[G_{12}(f)]}{R_e[G_{12}(f)]} \quad ,$$

где Im[•], Re[•] - символы мнимой и действительной частей. Определяют скорость распространения групповых волн, распространяющихся по трубопроводу. Учитывая, что время задержки между искусственно созданными сигналами:

 $t_{3,\mu} = R_0 \frac{C_{mp} - C_{cp}}{C_{mp} \cdot C_{cp}}$ , где,  $C_{mp}$ ,  $C_{cp}$  - соответственно скорости распространения акусти-

ческих волн по трубопроводу и в окружающей среде. При известных значениях  $R_o$ ,  $t_3$  и  $C_{cp}$  нетрудно найти:

$$C_{mp} = \left(\frac{1}{C_{cp}} - \frac{t_3}{R_0}\right)^{-1}$$

После выполненной калибровки устройства прекращают излучение искусственного сигнала и ведут наблюдение за сигналами, принимаемыми датчиками. При появлении сигналов течи, производят процедуры дискретизации, фильтрации, усиления, и взаимоспектральной обработки сигналов шума течи, по той же процедуре, что и для сигналов искусственного излучения.

Определяют время задержки по частотам нулевых значений действительной или мнимой частей взаимного спектра или в виде:

$$t_3 = \frac{1}{2\pi f} \alpha \pi c f g \frac{\mathrm{Im}[G_{12}(f)]}{\mathrm{Re}[G_{12}(f)]},$$

где – Im[•], <sub>Re</sub>[•] - символы мнимой и действительной части

Находят расстояние г до места течи по времени задержки t<sub>3</sub> между акустическими сигналами распространяющимися по трубе и в среде, в виде

$$\gamma = t_3 \frac{C_{mp} \cdot C_{cp}}{C_{mp} - C_{cp}}.$$

## О ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ ТЕЧЕИСКАНИИ В ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ПРИ НАЛИЧИИ ШУМОВ МЕШАЮЩЕГО СУДОХОДСТВА

## Р.Ц.Гулиянц, Л.Д.Войтасик, Н.С.Каришнев, В.В.Усов, Л.Е.Шейнман

ФГУП «ЦНИИ «Морфизприбор», Санкт-Петербург

Подводные трубопроводы в ряде случае проходят вблизи судоходных трасс. Возникающие при этом шумы могут явиться причинами ложных тревог для акустических систем определения места течи в трубопроводе или, наоборот, маскировать наличие течи.

Обычно, акустические течеискатели имеют два приемника, разнесенные друг от друга на некоторое расстояние d. При появлении течи ее шум принимается и формируется взаимокорреляционная функция, по максимуму которой определяют положение течи относительно первого и второго датчиков.

Необходимо найти пути определения места течи при наличии мешающих шумов, например, шумов судов, проходящих над магистральным трубопроводом, проложенным по дну акватории, или над дюкером, т.е. участком трубопровода, прокладываемым ниже дна моря, озера, реки.

В предлагаемом методе также используется два приемника, преобразующих акустические сигналы в электрические. В трактах производится усиление, фильтрация и выделение низкочастотных и высокочастотных сигналов. Используется определение с двух разнесенных вдоль трубопровода приемников взаимной спектральной плотности, с выделением действительной части (коспектра) и мнимой части взаимного спектра (квадратурного спектра) во всем рабочем диапазоне частот включающем и низкочастотные и высокочастотные сигналы. Вводят временную задержку такую, что максимум характеристики направленности коспектра направляется на источник мешающего шума, выделяя только низкочастотный сигнал и, используя то обстоятельство, что при этом характеристика направленности квадратурного спектра в этом направлении имеет нулевое значение на всех частотах, осуществляют автосопровождение источника мешающего шума, изменяя соответствующим образом искусственно вводимую временную задержку. Далее анализируют квадратурный спектр сигналов в высокочастотной части спектра, не содержащей мешающего шума; определяют по осцилляциям этого квадратурного спектра суммарную временную задержку от шума струи, вырывающейся из повреждения трубопровода. Известную величину искусственной задержки вычитают из суммарной задержки и находят расстояния от места повреждения до приемников.

Дискретизация сигналов выполняется в двух позициях с помощью двух приемников и АЦП. В анализаторе взаимного спектра вычисляется взаимный спектр

$$G_{12}(f) = \frac{1}{r_1 r_2} G_T(f) [Cos 2\pi f(t_T + t_{MIII}) - iSin 2\pi f(t_T + t_{MIII})] + \frac{1}{R^2} G_{MIII}(f) \cdot [Cos [KdCos(\theta - \theta_0)] - iSin [KdSin(\theta - \theta_0)]],$$

где *r*<sub>1</sub> и *r*<sub>2</sub>- соответственно расстояния от места повреждения трубопровода до первого и второго акустических приемников,

 $d=r_1+r_2$ - расстояние вдоль трубопровода между акустическими приемниками,

 $t_T$  - временная задержка между сигналом от течи, принятым акустическими приемниками,

*t<sub>MIII.</sub>* - временная задержка, искусственно вводимая с помощью блока временной задержки,

 $G_T(f)$  - энергетический спектр шума течи в трубопроводе,

*G<sub>MШ</sub>(f)* - энергетический спектр мешающего шума,

*R*- расстояние до источника мешающего шума, например, судна.

К - волновое число,

$$K = \frac{2\pi f}{c}$$
, *с* - скорость звука в среде,

9- угол между перпендикуляром к базе  $_d$  в ее середине и направлением на источник мешающего шума.

В блоке выделения низкочастотного сигнала осуществляется выделение состав-

ляющих взаимного спектра ниже  $f_B = 0,1 \frac{U}{D_{\text{max}}}$ . Это обусловлено тем, что макси-

мум шума струи наблюдается при  $f_{\rm max}=0,275 \frac{U}{D_{\rm max}}$ , а на частоте  $f_0=0,1 \frac{U}{D_{\rm max}}$ 

он меньше примерно на 12 дБ. Скорость истечения струи:

$$U = \sqrt{\frac{2P_1}{\rho_1} + V_C - \frac{2P_2}{\rho_2}}$$

где  $P_I$ ,  $P_2$  - статические давления в трубопроводе и в окружающей среде соответственно,

 $\rho_1$  и  $\rho_2$  - плотности продукта в трубопроводе и в окружающей среде соответственно:

*V<sub>C</sub>* - скорость движения продукта в трубе.

При  $P_1$ =17 Мпа,  $P_2$ =0,5 Мпа,  $V_C = 10 mc^{-1}$ ,  $\rho \cong 800 \kappa e.m^{-3}$  скорость течения

струи составляет  $U = 42,5 M \cdot c^{-1}$ . Обычно принимают  $D_{\max} = 5 M M$ . Поэтому  $f_{\max} \cong 2,33 \kappa \Gamma \mu$ ,  $f_B \cong 850 \Gamma \mu$ .

В блоке сопровождения мешающего шума обеспечивается автосопровождение спектра источника мешающего шума, при этом шум струи, вытекающей из трубопровода, в высокой степени отфильтрован. Это автосопровождение основано на том, что на всех частотах коспектр

$$\operatorname{Re}\left\{G_{1,2,MIII}(f)\right\} = \frac{1}{R^2} G_{MIII}(f) \times \operatorname{Cos}\left[Kd\operatorname{Cos}(\theta - \theta_0)\right] \text{имеет максимум при } \theta - \theta_0 = 0, \text{ a}$$

## квадратурный спектр

r<sub>2</sub> из уравнения:

 $\operatorname{Im}\left\{G_{1.2,MIII.}(f)\right\} = \frac{1}{R^2} G_{MIII.}(f) \times \operatorname{Sin}\left[Kd\operatorname{Sin}(\theta - \theta_0)\right] \operatorname{при} \quad \theta - \theta_0 = 0 \quad \text{равен нулю на всех частотах } f_{hc}.$  При этом, обычно интегрируют сигнал в диапазоне частот от  $f_h$  до  $f_b$ .

частотах  $f_{\mu c}$ . При этом, обычно интегрируют сигнал в диапазоне частот от  $f_{\mu}$  до  $f_{e}$ . После этого управляют величиной времени задержки  $t_{MIII}$ .

Наличие источника мешающего шума и его перемещения отображаются на индикаторе оператора.

Далее идет анализ квадратурного спектра при  $\theta - \theta_0 = 0$ , то есть

$$\operatorname{Im}\{G_{1,2}(f)\} = \frac{1}{r_1 r_2} G_T(f) \times \operatorname{Sin} 2\pi f(t_T + t_{MIII})$$

при выделении высокочастотных составляющих от

$$0,1\frac{U}{D_{\min}}$$
 до  $0,5\frac{U}{D_{\min}}$ 

Если  $G_T(f) = 0$  на частотах этого высокочастотного диапазона, сигнал тревоги не подается. Если  $G_T(f) \neq 0$ , то по осцилляциям синуса на одной из частот, обычно, на частоте  $f_{\text{max}} = 0,275 \frac{U}{D_{\text{min}}}$ , или на нескольких частотах определяют значение суммарной задержки  $t_T + t_{MIII}$ . Далее по данным из блока задержки  $t_T$  находят  $r_I$  и

$$\left.\begin{array}{c} r_1 + r_2 = d \\ \left|r_1 - r_2\right| = c \cdot t_T \end{array}\right\}$$

Результаты определения  $r_1$  и  $r_2$  подаются на индикатор места течи. Таким образом, можно обеспечить режекцию мешающего шума и определить место течи.

# ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ГИДРОЛОКАТОРА В МНОГОЛУЧЕВОМ КАНАЛЕ

## Е.Б.Либенсон, К.П.Львов, Т.Б.Стреленко

ФГУП ЦНИИ «Морфизприбор», Санкт-Петербург

В ряде задач прикладной гидроакустики производится определение радиальной длины объекта [1]. Метод измерения основывается на измерении временного положения крайних элементарных откликов, соответствующих бликовой структуре эхосигнала, на выходе устройства обработки в приемном тракте гидролокатора (ГЛ). Существенное влияние на точность измерения радиальной длины (Lp) могут оказывать ошибки, связанные с многолучевым распространением сигнала. В связи с этим важно оценить конкретные величины ошибок измерения радиальной длины объекта в условиях многолучевости.

В докладе представлены результаты имитационного эксперимента. Особенность данного эксперимента состоит в использовании для имитации структуры многолучевости известной и хорошо апробированной программы расчета поля Ray 001. Имитационная модель решает следующие задачи: формирование сигнала s(t) с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ); формирование многолучевых и многобликовых отраженных сигналов; согласованная фильтрация (СФ) сформированного входного процесса, частотная характеристика  $C\Phi - H(\omega) = S^*(\omega)$ ,  $S(\omega)$  – спектр сигнала s(t); автоматизированное измерение радиальной длины и оценка точности измерения при различных параметрах многолучевости для конкретных значений дистанции до объекта, глубины погружения антенны ГЛ и глубины отражающего объекта. Далее производилось осреднение результатов ошибок измерения радиальной длины *δLp* по выборке, полученной при 20 различных дистанциях вблизи некоторой средней дистанции. При оценке точности измерения вычислялись следующие величины: математическое ожидание (MO –  $m(\delta Lp)$ ), среднеквадратическое отклонение (СКО –  $\sigma(\delta Lp)$ ) и среднеквадратическая погрешность (СКП –  $S(\delta Lp)$ ) измерения радиальной длины.

Ниже приводятся результаты экспериментов для одного из вариантов гидрологоакустических условий (ГАУ) в Баренцевом море (глубина 200м), зима, условия положительной рефракции. Глубина погружения приемоизлучающей антенны 70м, глубина отражающего объекта – 110м. Ширина характеристики направленности в вертикальной плоскости при излучении ≈50°, прием – ненаправленный. Оценки по-

казывают, что для указанных условий количество энергонесущих лучей  $n_{\pi}$  и время затягивания сигнала  $\tau_3$  (по уровню -(14)дБ от уровня максимального луча) составляет:  $n_{\pi} = 3...8$ ,  $\tau_3 < 80$ мс. 0.04 На рис. 1 представлены зависимости  $\tau_3$  от дистанции.

Некоторые результаты эксперимента приведены на рис. 2-7. Модель бликовой структуры: 3 блика с относительными уровнями *a* – 1.0, 0.5,





0.25; сдвиг по времени между соседними бликами (в локационном смысле) – 30мс, что соответствует радиальной длине объекта – 45м. Представлено 4 модели взаимного расположения бликов: М1 – a(1)=0.5, a(2)=1.0, a(3)=0.25; М2 – a(1)=0.25, a(2)=1.0, a(3)=0.5; М3 – a(1)=1.0, a(2)=0.5, a(3)=0.25; М4 – a(1)=0.25, a(2)=0.5, a(3)=1.0; цифры в скобках соответствует порядку следования бликов во времени. Ширина полосы ЛЧМ сигнала – 100Гц. Порог измерения –(2)дБ относительно уровня минимального блика.

На рис. 2-4 представлены результаты оценки точности измерения для различных моделей бликовых структур при двух структурах многолучевости, соответствующих дистанциям 2км и 10 км. Времена затягивания сигнала для принятого порога измерения: при 2км –  $\tau_3 < 25$ мс, при 10км –  $\tau_2 < 60$ мс. На рис. 5-7 приводятся ошибки измерения радиальной длины для различных структур многолучевости (дистанций) при двух моделях бликовых структур (с наименьшими и наибольшими величинами ошибок измерения – М1 и М4, соответственно).

Погрешности измерения радиальной длины определяются как инструментальными ошибками измерения, так и факторами, связанными с многолучевым распространением сигнала. Инструментальные ошибки в данном случае, как показывают оценки, составляют величину <0.5м. Следствием многолучевого распространения является возникновение ошибок, обязанных появлению элементарных откликов, превышающих порог измерения, вне основной бликовой структуры эхо-сигнала, а также флюктуациям амплитуды откликов, связанным, в частности, с интерференцией многобликового многолучевого сигнала [2]. Конкретные величины ошибок определяются теми или иными структурами многолучевости и взаимным расположением бликов с различными амплитудами друг относительно друга. Например, в данных ГАУ большая часть лучей запаздывает относительно луча с максимальной амплитудой, поэтому большие величины ошибок соответствуют бликовой модели М4.

Анализ результатов имитационного моделирования с учетом многолучевости показал, что для условий эксперимента:

- диапазон ошибок измерения радиальной длины при  $Lp = 45_M - m(\delta Lp) = (3 \div 45)_M$ ,  $\sigma(\delta Lp) = (4.5 \div 16)_M$ ,  $S(\delta Lp) = (12 \div 45)_M$ ; при  $Lp = 180_M - m(\delta Lp) = (0.5 \div 50)_M$ ,  $\sigma(\delta Lp) = (1 \div 45)_M$ ,  $S(\delta Lp) = (12 \div 50)_M$ ;

 ошибки за счет многолучевости существенно больше инструментальных ошибок и увеличиваются с ростом времени затягивания сигнала;

 значительную часть в суммарной погрешности измерения составляют систематические ошибки;

- относительные ошибки (нормированные к величине *Lp*) уменьшаются с увеличением *Lp*.

В заключение отметим, что проведенное моделирование позволило оценить характерные величины ошибок измерения радиальной длины в условиях многолучевого распространения и получить конкретные зависимости ошибок от параметров бликовой структуры эхосигнала и многолучевости.

Результаты работы могут быть использованы при разработке гидролокаторов.





## Литература

- Доммермут Φ. Оценка радиальной протяженности цели при помощи сигналов с высокой разрешающей способностью // В кн.: Подводная акустика и обработка сигналов, М.: Мир, 1985, с.439.
- 2. Либенсон Е.Б., Львов К.П. Бликовая структура гидролокационного эхосигнала в многолучевом канале // Сборник трудов VI Международной конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», С-Петербург, 2002.

# КОНСТРУКЦИЯ ДЕМПФИРОВАННОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ПОВЕРНУТЫМ СРЕЗОМ

## Л.А.Яковлев, М.М.Шевелько, Н.Н.Перегудов, М.В.Ковалевский

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический университет

#### Введение

Одним из перспективных направлений в современной акустической измерительной аппаратуре является использование в акустической системе пластинчатых преобразователей с повернутым срезом на основе пьезокерамики. Ранее было предложено использовать повернутые срезы пьезокристаллов для возможности одновременного возбуждения продольных *l* и поперечных *t* волн [1]. Существуют расчеты и разработаны конструкции двумодовых преобразователей на основе недемпфированных пьезопластин повернутых срезов (LiNbO<sub>3</sub>) и пьезокерамики [2]. В процессе изготовления преобразователей для акустической системы прибора типа УЗИС-ГЭТУ был выявлен ряд недостатков конструкции. Так, в процессе изготовления преобразователей из повернутых срезов пьезокерамики проявилась проблема металлизации пластины. Это связано с тем, что для изготовления повернутых срезов, образец пьезокерамики необходимо разрезать под требуемым углом. При этом рабочие грани будут неметаллизированны. Для возобновления металлизации, можно использовать такие технологические процессы как: вжигание серебра; вакуумное напыление металлическим слоем; химическое осаждение серебра. Но все методы имеют недостатки. В первых двух случаях необходим нагрев, что может привести к частичной располяризации керамики. Для третьего метода основная проблема связана с очисткой поверхности (пористость материала, следовательно, трудно удалить загрязнения). Возможным путем преодоления данной проблемы, может служить использование проводимости сред контактирующих с пьезопластиной. Со стороны образца пьезопластина контактирует с буферным стержнем. Он может быть изготовлен из металла (сталь, титан), либо металлизированных диэлектрических материалов (плавленый кварц). С тыльной же стороны пластины можно использовать демпфер. Однако тыльная нагрузка изменяет характеристики работы пьезопластины. Поэтому такой метод решения проблемы требует дополнительного анализа работы демпфированных двурезонансных преобразователей.

## Теоретический анализ

Задача нахождения коэффициентов решалась в одномерном приближении используя волновой метод (рассматривались колебания в системе, как совокупность встречно распространяющихся волн различных типов). В результате проведенных расчетов были получены системы уравнений для режима излучения и режима приема. Для расчёта частотных характеристик, разрабатываемых преобразователей и анализа влияния параметров конструкции на характеристики акустической системы измерительного устройства, был предложен алгоритм и составлена программа на языке C++. Был проведен численный анализ частотных зависимостей коэффици-

ента передачи для продольных и поперечных волн при различных параметрах конструкции элементов акустической системы. При толщине пьезопластины (кера-



мика ЦТС–19) d=1.5мм резонансные частоты для поперечной и продольной волны составляют соответственно 0.6 и 1.2 МГц. На рис.1 представлены сравнительные зависимости коэффициентов передачи при различных углах поворота пьезопластины: а)-30<sup>0</sup>; б)-45<sup>0</sup>; в)-60<sup>0</sup>. На графиках кривые 1 и 2–частотные зависимости передачи *l*- и *t*- волн недемпфированной пьезопластины, 3 и 4-частотные зависимости передачи *l*- и *t*-волн для демпфированного преобразователя (материал буферного стержня и демпфера – плавленый кварц) при нулевой толщине контактного слоя. В случае угла поворота среза пьезопластины 45<sup>0</sup> получаются наиболее приемлемые характеристики. Для угла поворота 60<sup>0</sup> слабый коэффициент передачи продольных



волн, для угла поворота  $30^{0}$  мало соотношение между амплитудами волн основной поперечной и паразитной продольной мод колебаний. Из графиков видно, что демпфирование приводит к уменьшению коэффициентов передачи и расширению резонансной кривой, особенно для продольной волны, что ухудшает разделение мод при работе на поперечной волне. Рис.2,а) иллюстрирует влияние толщины слоя на получаемые характеристики, где кривые 1 и 2–соответствуют толщине контактного слоя 5 мкм, 3 и 4 соответствуют толщине контактного слоя 30 мкм. Можно сказать, что увеличение толщины слоя приводит к обострению резонансных кривых и повышению коэффициента передачи, а следовательно и улучшению разделения мод. Это является положительной тенденцией, т.е. при изготовлении преобразователя не стоит стремиться к уменьшению толщины слоя. Для проверки возможности использования других материалов буферных стержней были выполнены расчеты конструкции с буферным стержнем из титана. Соответствующие зависимости

представлены на рис.2,6, где кривые 1 и 2 – l- и t-волны, в случае недемпфированной пьезопластины, 3 и 4 – l- и t-волны при демпфировании плавленым кварцем (толщина слоя 5 мкм). Возможности улучшения характеристик (титановый буферный стержень) проверены путем расчета в более широком диапазоне контактных слоев (рис.2,в), где кривые 1 и 2 – l- и t-волна при толщине слоя 5 мкм, 3 и 4 - l- и t-волна при толщине слоя 30 мкм. Увеличение толщины контактного слоя улучшает зависимости, однако сравнение с аналогичными характеристиками для плавленого кварца (рис.2,а) свидетельствует о том, что буферный стержень изготовленный из плавленого кварца является более предпочтительным.

#### Конструкция акустического датчика



На основании указанных выводов была разработана конструкция акустического датчика Параметры конструкции выбирались исходя из требований к измеряемым образцам, заданного частотного диапазона и оптимального режима возбуждения как продольной, так и поперечной моды. Размеры элементов конструкции определяются размерами исследуемого образца и рабочими частотами. Пьезопластина 1 является активным элементом акустического датчика, изготовляется из пьезокерамики, например ЦТС–19. Возможность работы в двух резонансном режиме определяется углом поворота среза

пьезопластины относительно кристаллографических осей. Как показали приведенные расчеты, наиболее оптимальный режим достигается при угле повороте приблизительно 45<sup>0</sup> и небольшие погрешности в углах поворота оказывают несущественное влияние на характеристики датчика. Материалом демпфера 2 является предварительно металлизируемая пирамида из плавленого кварца, боковые грани которой обладают большой шероховатостью для рассеянья ультразвуковых волн. Буферный стержень 3, пьезопластина и демпфер соединены между собой с помощью эпоксидной смолы, толщина слоя может быть достаточно существенна, порядка 20–30 мкм. Вся конструкция расположена в металлическом корпусе, состоящем из элементов 4,5,6. Электрический сигнал подводится через разъем 7. Толщина пьезопластины определяется рабочими частотами измерителя скорости. В разрабатываемой конструкции, для частот 0.6, 1.2 МГц, соответственно для *l-* и *t-* волн, толщина пьезопластины должна быть ~1,5 мм.

## Литература

- 1. Яковлев Л.А., Работы кафедры ЭУТ в области высокочастотных пластинчатых преобразователей // Известия ГЭТУ, вып.505, 1997.
- 2. Яковлев Л.А. Распространение и отражение упругих волн в звукопроводах акустоэлектронных устройств // ЛЭТИ. Л., 1980.

# ИЗМЕРИТЕЛЬ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКА ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ УЗИС-ГЭТУ

#### М.М.Шевелько, Н.Н.Перегудов, Л.А.Яковлев, М.В.Ковалевский

Санкт-Петербургский Государственный Электротехнический университет

#### Введение

Определение упругих характеристик твердых сред является актуальной задачей во многих областях современной науки и техники. Одним из способов такого определения является измерение скоростей распространения продольных и поперечных ультразвуковых волн. В настоящее время разработано множество методов и устройств, позволяющих с высокой точностью измерять скорость ультразвука в твердотельных образцах. Одним из таких устройств является прибор УЗИС-ЛЭТИ [1], разработанный еще в 50-ых годах на кафедре электроакустики и ультразвуковой техники Ленинградского электротехнического института. Этот прибор получил широкое распространение в практике акустических исследований твердых сред во многих научно-исследовательских подразделениях и производственных лабораториях страны и более 30 лет выпускался учебно-экспериментальными мастерскими института. Основными достоинствами этого прибора являются достаточно высокая точность (~0,5%), незначительное время, затрачиваемое на процедуру измерений (несколько минут), возможность работы с акустическими системами как для продольных, так и поперечных волн, наглядность процесса измерений [AH1]. Все это позволяет с успехом применять прибор и в настоящее время. Настоящая разработка - УЗИС-ГЭТУ, представляет собой результат попытки создания аппаратуры, которая по своим возможностям не уступала бы прибору УЗИС-ЛЭТИ, и была бы лишена ряда недостатков, присущих прототипу. В отличие от прототипа в разработанном устройстве:

- Нет необходимости смены акустической системы при изменении типа используемых волн;
- Отсчетное устройство реализовано электронным способом, а не на основе микрометрического винта;
- Отсутствие эталонной жидкостной линии делает результат независимым от ее параметров. Погрешности отсчета определяются точностными характеристиками частотомера.

## Конструкция устройства

Устройство УЗИС-ГЭТУ состоит из: акустической системы (АС) и электронного блока (ЭБ). Акустическая система (рис.1) обеспечивает излучение ультразвуковых волн в исследуемый образец и их прием. Ее конструкция такова, что позволяет достаточно легко расположить в ней образец. В качестве преобразователей 1 используются двумодовые пьезопластины. Излучение и прием ведется через буферные стержни, выполненные из плавленого кварца [2]. Электрический сигнал подводится через разъемы 2. Конструкция АС позволяет с помощью ручки 3 изменять



расстояние между преобразователями для размещения между ними образцов различных размеров и обеспечивает необходимый прижим преобразователей к образцу.





Рис. 2

Электронный блок вырабатывает все необходимые для проведения измерения сигналы:

1. Основной сигнал (зондирующий) – представляет собой периодическую последовательность радиоимпульсов в несколько полупериодов заданных частот;

2. Сигнал строба – одиночный прямоугольный импульс длительностью в полупериод основного сигнала. Момент выработки сигнала строба относительно основного сигнала может регулироваться с высокой стпенью точности. Это обеспечивается схемой, которая задерживает строб на заданное число периодов высокочастотного сигнала (~24 МГц). Это число выводится на цифровой трех-разрядный индикатор, расположенный на передней панели ЭБ. С помощью клавиш значение этого числа может увеличиваться или уменьшаться в пределах 000-999. Кроме такой дискретной регулировки возможная и плавная регулировка путем подстройки частоты высокочастотного сигнала в незначительных пределах.

 Импульс синхронизации – одиночный короткий импульс вырабатываемый в момент генерации каждой посылки основного сигнала.

Электронный блок, выполнен на базе однокристальной микро-ЭВМ ATMEL 89C51. Его конструкция такова, что достаточна просто позволяет изменять период следования импульсов их длительность, регулировать задержку строба и его длительность.

#### Состав и принцип работы измерительного стенда

В состав измерительного стенда входят (рис.2): акустическая система; электронный блок; сетевой блок питания (БП). Для проведения измерений необходима работа в комплекте со стандартным двухканальным осциллографом (Осц) и электронным частотомером Ч.

В акустическую систему АС посылается радиоимпульс с заданной частотой заполнения (~0,6 или ~1,2 МГц, соответственно поперечные и продольные волны). Принятый приемным преобразователем сигнал подается на вход (Y<sub>1</sub>) двухканального осциллографа. На другой вход осциллографа Y<sub>2</sub> подается импульс строба, вырабатываемый ЭБ на выходе «Ст». Осциллограф устанавливается в режим суммирования каналов. Синхронизация осуществляется синхроимпульсами, формируемыми электронным блоком ЭБ на вход «С» осциллографа.

С помощью клавиш дискретной перестройки времени задержки строба УЗИС и ручки потенциометра для плавной регулировки времени задержки строба (изменение тактовой частоты), на экране осциллографа достигают совмещения строба с одной из полуволн принятого из AC сигнала. Время задержки строба  $\tau_x$  будет соответствовать произведению числа n (значение, фиксируемое на цифровом табло УЗИС) на период T=1/f, где f – частота шкалы меток, измеряемая с помощью электронного частотомера, т.е.  $\tau = n/f$ . Полученное время  $\tau$  будет соответствовать задержке во всех участках тракта, включающего акустическую линию. Время распространения акустического сигнала через исследуемый образец определяется двумя аналогичными измерениями – с образцом  $\tau_{\rm ofp}$  и без образца  $\tau_{\rm ac}$ . Тогда время распространения сигнала через образец тобр=тобр-тас. Выбор типа возбуждаемых волн осуществляется при помощи кнопки и определяется частотой заполнения генерируемых импульсов (в акустической системе используются двухрезонансные преобразователи). Скорость распространения ультразвуковых волн через образец v, находится как v=L<sub>обр</sub>/  $\tau_{oбp}$ . Точность определения времени прохождения сигнала через образец зависит от точности измерения частоты и точности совмещения строба и полупериода импульса. Эксперимент показал, что погрешность может быть <0,5%.

#### Литература

1. К.С.Александров, О.В.Носиков. Прибор для измерения упругих модулей кристаллов // Акустический журнал, 1956, 2 №3, с.244-247

2. Л.А.Яковлев, М.М.Шевелько, Н.Н.Перегудов, М.В.Ковалевский. Конструкция демпфированного пластинчатого преобразователя с повернутым срезом. // сборник тезисов докладов настоящего издания.

3. Л.А.Яковлев. Акустическая система для измерения скоростей распространения продольных и поперечный волн в твердых телах // Известия ГЭТУ, вып. 485, 1995.

4. М.М.Шевелько, Л.А.Яковлев, С.Г.Яковлев. Ультразвуковая аппаратура для измерения упругих характеристик горных пород // Сборник научных трудов. Выпуск 2. Радиоэлектроника в СПбГЭТУ, 1996. С. 126.

# ЗАДАЧИ ДИСТАНЦИОННОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В ВОДЕ

# И.Н.Диденкулов, Л.М.Кустов<sup>1)</sup>, А.И.Мартьянов<sup>1)</sup>, Н.В.Прончатов-Рубцов<sup>1)</sup>

Институт прикладной физики РАН, <sup>1)</sup>Нижегородский госуниверситет

#### Введение

Газовые пузырьки играют важную роль в газообмене между океаном и атмосферой, в процессах жизнедеятельности живых организмов в воде [1]. Газовые пузырьки служат индикатором некоторых болезней, например кессонной болезни у водолазов. В последние годы они начинают использоваться в медицинской диагностике. Таким образом круг явлений, где обнаружение и диагностика пузырьков важны постоянно расширяется. Пузырьки можно достаточно надежно обнаружить акустическими методами [2-11]. Так как пузырьки являются осцилляторами и хорошо рассеивают и поглощают звук на резонансных частотах были предложены разнообразные линейные акустические методы их диагностики, основанные на этих свойствах [2,3]. Пузырьки обладают также ярко выраженными нелинейными акустическими свойствами. В рассеянном пузырьком поле наблюдаются высшие гармоники и комбинационные частоты падающих на пузырек акустических волн. Жидкость, содержащая множество пузырьков, обладает высоким уровнем акустической нелинейности. На этом свойстве пузырьковых сред основаны различные нелинейные акустические методы обнаружения и измерения параметров газовых пузырьков [4-12].

Исследования нелинейного рассеяния звука на движущихся газовых пузырьках выявили существование специфического эффекта Допплера [13]. Этот эффект можно использовать для измерений параметров потока жидкости, в котором присутствуют газовые пузырьки. В простейшем варианте при равномерной концентрации пузырьков в потоке спектр рассеянного поля будет содержать информацию о движении жидкости в различных частях потока. Таким образом, измерение доплероских спектров поля комбинационного рассеяния может позволить определить характеристики потока жидкости [13]. Однако сами пузырьки воздействуют на акустические волны распространяющиеся в пузырьковой среде. Если концентрация пузырьков мала, то этим влиянием можно пренебречь и решать задачу в приближении заданного внешнего поля. Однако если концентрация пузырьков становится не малой, то необходимо учитывать этот эффект.

В настоящей работе рассматривается именно такая ситуация. Исследуется поле комбинационно-рассеянного звука на затопленной струе воды в режиме гидродинамической кавитации. В работе представлены результаты сравнения экспериментально полученных спектров комбинационно рассеянного на затопленной кавитирующей струе сигнала с численно рассчитанной формой спектра. Такое сравнение позволяет определить параметры потока жидкости с пузырьками. Теоретическая модель строится с учетом известных свойств о связи распределения пузырьков по сечению потока с распределением скорости [14]. Использованная в работе парамет-



ризация задачи позволяет надеяться на дальнейшее развитие нелинейных акустических методов диагностики движущихся потоков жидкости с газовыми пузырьками, которые могут найти разнообразные применения.

#### Эффект Доплера при комбинационном рассеянии звука на пузырьках

В работе [12] показано, что частота комбинационно рассеянного сигнала от движущегося нелинейного рассеивателя определяется доплеровским эффектом волн накачки по отношению к движущемуся рассеивателю, а также доплеровским сдвигом частоты комбинационно-преобразованного сигнала. При определенной геометрии задачи первый эффект может во много раз превышать второй, и таким образом, доплеровский сдвиг частоты в рассеянном сигнале может быть очень большим. В общем случае частота  $F_s$  комбинационно-рассеянного сигнала на одиночном пузырьке

$$F_s = F - \frac{V}{C_0} [f_1 \cos \theta_1 - f_2 \cos \theta_2 - F \cos \theta_3], \qquad (1)$$

где  $f_1$  и  $f_2$  – частоты волн накачки,  $\theta_1$  и  $\theta_2$  - углы между направлением распространения волн накачки и вектором  $\vec{V}$  скорости движения пузырька,  $\theta_3$  - угол между направлением распространения рассеянной на пузырьке волны на разностной частоте в сторону приемника и вектором  $\vec{V}$  скорости движения пузырька,  $F=f_1 - f_2 -$ разность частот между волнами накачки, c - скорость звука. Если  $\theta_2 - \theta_1 > \pi/2$ , то как нетрудно видеть из (1) и происходит суммирование доплеровских сдвигов частот (первые два члена в квадратной скобке). При этом вклад третьего члена в сдвиг частоты рассеянного поля становится малым и им в таких случаях можно пренебречь. Это свойство позволяет с высокой точностью определять скорость движения пузырьков в потоке жидкости.

#### Эксперимент

Схема эксперимента показана на рисунке 1. Экспериментальные исследования выполнялись на автоматизированном комплексе гидроакустического бассейна кафедры акустики ННГУ. Экспериментальные спектры комбинационно рассеянного сигнала снимались на затопленной струе воды при озвучивании ее участка ультразвуковыми пучками, как показано на рисунке 1. Поток воды создавался центробежным насосом, с диаметром сопла 1 см, причем скорость струи на срезе сопла была равна 25 м/с, а озвучиваемый участок струи находился на расстоянии 60 см от среза сопла. Диаметр струи в области акустической засветки был равен 11 см. Первичные пучки накачки формировались плоскими пьезокерамическими излучателями. Диаметры пучков накачки в области засветки струи были больше диаметра струи, что позволяло считать фронт падающей волны квазиплоским.

Комбинационно рассеянный сигнал на разностной частоте принимался приемной системой, находящейся вне струи. Ось приемной системы была перпендикулярна к оси потока. В качестве приемной системы использовалась антенна гидро-



акустического локатора со сферическим зеркалом. Это позволяло выделить комбинационно рассеянный сигнал от ограниченного по длине рабочего участка струи.





Гетеродинированием спектр рассеянного сигнала переносился в низкочастотную область. Частоты первичных пучков могли перестраиваться в некоторой окрестности 1 МГц. Это позволяло варьировать разностную частоту. В использованном в данной работе примере частоты волн накачки  $f_1$  и  $f_2$  были равны 1000 кГц и 1100 кГц, соответственно, а частота гетеродина составляла 97,5 кГц. Таким образом, разностной частоте F=100 кГц соответствует частота 2500 Гц.

### Нелинейная доплеровская томография струи жидкости с пузырьками

Рассмотренная в настоящей работе модель основана на следующих предположениях: поток и распределение пузырьков в нем считались осесимметричными, предполагалось, что в рабочей зоне поля накачек имеют квазиплоские фронт. Предполагалось также, что пузырьки захвачены потоком и двигаются со средней локальной скоростью струи. В численном эксперименте учитывается ослабление интенсивности первичных ультразвуковых лучей из-за резонансного поглощения микропузырьками и резонансное поглощение волны разностной частоты при распространении сигналов внутри потока. Геометрия задачи, использовавшаяся при численном моделировании представлена на рис. 2.

Численный эксперимент проведен путем расчета амплитуд спектральных компонент комбинационно рассеянных сигналов. Элементарный объем рассеяния, находящийся в точке С, излучает волну разностной частоты, интенсивность которой пропорциональна квадрату произведения амплитуд волн накачки и концентрации пузырьков в области рассеяния. При расчете амплитуд волн накачки в области взаимодействия учитывается затухание высокочастотных волн на частотах  $f_2$  и  $f_1$ вдоль геометроакустических лучей B<sub>1</sub>C и B<sub>2</sub>C. Озвученный участок струи в теоретической модели представляет собой цилиндрический объем, заполненный микро-



пузырьками, увлекаемыми жидкостью. Интенсивность комбинационно рассеянного на элементарном объеме сигнала в окрестности точки С и его амплитуду в точке приема можно вычислить в приближении вышеизложенной модели.



Полагая, что комбинационные сигналы, излучаемые элементарными объемами, являются некогерентными, и учитывая затухание волн накачки и волны разностной частоты при ее распространении внутри потока на участке СА, запишем выражение для интенсивности сигнала разностной частоты в точке приема:

$$\Delta W(\rho_i) \sim \exp(-2\beta\rho_i^2) \int_0^{2\pi} \exp\left[-2\sigma_\omega \int_B^C n(\xi) d\xi - \sigma_\Omega \int_C^A n(x) dx\right] d\varphi .$$
(2)

Зесь  $\sigma_f$ ,  $\sigma_{\Omega}$  - сечения погашения пузырьков на частоте накачки и на комбинационной частоте, соответственно,  $n(\xi)$ , n(x) - законы изменения концентрации микропузырьков вдоль распространения волн накачки и волны комбинационной частоты. Приведенное выражение позволяет вычислить интенсивность компоненты спектра сигнала разностной частоты в выбранном частотном окне. Это, фактически, сумма интенсивностей комбинационно рассеянных сигналов элементарными объемами, находящимися на одном расстоянии от центра потока. Полагая, что средняя скорость потока по сечению струи зависит от расстояния до оси по закону

$$V = V_0 \exp(-\beta \rho^2), \qquad (3)$$

можно записать выражение для частоты комбинационно рассеянного элементарным объемом сигнала при данной геометрии эксперимента:

$$F_i = 2f \, Sin\theta \cdot \frac{V_0}{C_0} \exp(-\beta \rho_i^2) \,. \tag{4}$$

Здесь  $V_0$  –скорость потока в центре струи,  $\rho_i$  - расстояние от центра потока до точки рассеяния,  $\beta$  - размерный коэффициент, характеризующий эффективный радиус струи,  $C_0$  – скорость звука.

Как уже было сказано выше, основной задачей данной работы является исследование возможности дистанционного определения пространственного распределения нелинейных рассеивателей по сечению потока. В работе [15] было показано,

что формы экспериментального и теоретически рассчитанного спектров линейно рассеянного на затопленной струе сигнала удовлетворительно согласуются в случае, когда функция распределения газовых микропузырьков по сечению потока имеет вид:

$$n = n_0 \exp(-2\beta \rho_i^2) . \tag{5}$$

Другими словами, распределение концентрации пузырьков по сечению струи пропорционально квадрату распределения скорости потока.

В настоящей работе форма спектра рассчитывалась численно на основе аналогичной модели в приближении однократного нелинейного рассеяния. В этой модели не учтены турбулентные пульсации скорости потока. Пренебрежение турбулентными пульсациями особенно сильно проявляется в низкочастотной области спектра, которая формируется при рассеянии на периферийных участках потока, где значения средней скорости потока и пульсационной скорости близки. Относительно большая амплитуда пульсационной скорости приводит к появлению "отрицательных" спектральных компонент, которые, естественно, отсутствуют в теоретической модели. Свободные подбираемые параметры – показатели экспонент функций распределения скорости потока и пространственного распределения концентрации микропузырьков. Кроме того, варьировались величины максимальной скорости и концентрации рассеивателей. Благодаря близости значений частот высокочастотных волн при численном моделировании предполагалось, что волны накачки одинаково затухают при распространении внутри потока до элементарного объема рассеяния.

На рис. 3 представлены экспериментально полученный спектр комбинационно рассеянного сигнала (сплошная жирная линия), и теоретически рассчитанные спектры. Сплошная тонкая линия – численно рассчитанная форма спектра при заданной максимальной скорости потока  $V_0 = 3,2$  м/с и значении коэффициента  $\beta = 0,2$  см<sup>-2</sup>. Пунктирная линия – форма теоретического спектра при увеличении максимальной скорости до 4м/с и при том же значении показателя экспоненты  $\beta$ . Точками представлен теоретический вид спектра при значении показателя экспоненты  $\beta=0,3$  см<sup>-2</sup> и скорости  $V_0 = 3,2$ м/с. Приведенные примеры формы экспериментально полученного спектра и форм, теоретически рассчитанных спектров комбинационно рассеянных сигналов позволяют сделать вывод о возможности проведения дистанционного нелинейного зондирования пространственного распределения движущихся акустических рассеивателей при наличии априорной информации о геометрии потока, позволяющей параметризовать задачу.

#### Заключение

Таким образом, экспериментально и численно показано, что применение рассеяния на разностной частоте для диагностики движущихся неоднородностей оказывается более предпочтительным, чем линейного, как из-за практически полного отсутствия реверберационных помех, так и из-за большей чувствительности формы спектра нелинейно рассеянного сигнала к изменению значений диагностируемых параметров. Выполненное исследование показало, что данный метод нелинейной



доплеровской акустической томографии позволяет с хорошей точностью измерять параметры потока жидкости с пузырьками.



Работа выполнена при поддержке РФФИ (01-02 17653, 01-02-16938, 00-15-96741, 00-15-96619).

## Литература

- 1. C. Clay, H. Medwin, Acoustical oceanography: principles and applications, John Wiley & Sons, New York, 1977.
- 2. H. Medwin, Counting bubbles acoustically. Review, Ultrasonics, 1977, v.15, p.7-13.
- 3. V.N. Glotov, P.A. Kolobaev, G.G. Neiumin, Investigation of sound scattering by bubbles, produced by artificial wind in sea water, and statistic distribution of bubble sizes, Sov. Phys. Acoust., 1961, v.7, p.421-427.
- 4. E. Neppiras, Subharmonic and other low-frequency emission from bubbles in soundirradiated liquids, J. Acoust. Soc. Am., 1969, v.46, p.587-601.
- 5. E. Zabolotskaya, S. Soluyan, Emission of harmonic and combination frequency waves by air bubbles, Sov. Phys. Acoust., 1972, v.18, p.396-398.
- F. Fenlon, J. Wohn, On the Amplification of Modulated Acoustic Waves in Gas-Liquid Mixtures, in Cavitation and Inhomogeneities in Underwater Acoustics (Ed. W.Lauterborn), Springer-Verlag, Heidelberg, 1980, pp.141-150.
- 7. L. Ostrovsky, A. Sutin, Nonlinear acoustic diagnostics of discrete inhomogeneities in liquids and solids, Proc. 11th Int. Congr. Acoust. Paris, 1983, v.2, pp.137-140.
- 8. V. Zverev, Yu. Kobelev, D. Selivanovsky, A. Sokolov, On a method of detection of gas bubbles in a liquid, Sov. Tech. Phys., 1980, v.50, p.1544-1545.
- V. Newhouse, P. Shankar, Bubble size measurement using the nonlinear mixing of two frequencies, J. Acoust. Soc. Am., 1984, v.75, p.1473-1477.
- Eller, H. Flynn, Generation of subharmonics of order one-half by bubbles in a sound field, J.Acoust.Soc.Am., 1969, v.46, p.722-727.

- 11. T. Leighton, A. Walton, J. Field, Acoustic bubble sizing by combination of subharmonic emission with imaging frequency, Ultrasonics, 1991, v.29, p.319-323.
- Sutin A.M., Yoon S.W., Kim E.J., Didenkulov I.N. Nonlinear acoustic method for bubble density measurements. // J. Acoust. Soc. Amer., 1998, v.103, p.2377-2384.
- Didenkulov I.N., Yoon S.W., Sutin A.M., Kim E.J. Nonlinear acoustic Doppler effect and its use for bubble flow velocity measurement. // J. Acoust. Soc. Amer., 1999, V. 106, No 5, p.2431-2435.
- 14. И.Н.Диденкулов, Л.М.Кустов, А.И.Мартьянов, Н.В.Прончатов-Рубцов, П.Н.Вьюгин, С.В.Юн. Нелинейная акустическая диагностика пространственного распределения рассеивателей в кавитирующей среде. Сборник трудов 11 Сессии РАО, РАО, Москва, 2001, т.1, с.299-302.
- Бархатов А.Н., Гавриленко В.Г., Мартьянов А.И. О спектре сигнала рассеянного на поглощающей звук турбулентной струе. // Акуст. журн. 1979, т.25, № 1, с.32-35.

## ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОАКУСТИКИ И ИХ РЕШЕНИЕ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБРАЗЦОВ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ И АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### В.Н. Носов

Московский Автомобильно-дорожный институт (ГТУ)

#### Электродинамические громкоговорители (ЭДГ)

Основным узлом всех излучающих громкоговорящих систем является громкоговоритель электродинамического типа, который из-за хорошего качества воспроизведения звука широко применяется во всём мире с момента изобретения в 1920 г. в США. Электроакустический коэффициент полезного действия Kea=Pa/Pe ЭДГ, используемых в бытовых акустических системах (АС) в среднем равен 0,2% и менее. Фактически ЭДГ и АС, построенная на нём, является тепловым прибором, несмотря на многочисленные проведённые исследования множества фирм и специалистов. Американец Вильчур своим предложением утяжелить подвижную систему ЭДГ ещё более уменьшил Кеа с целью расширить диапазон воспроизведения низких частот, что и завело электроакустику в тупик, из которого несмотря на интенсивные исследования множества фирм и отдельных исследователей – звукотехников во всём мире выбраться не удаётся. Есть "высококачественные" АС, у которых Кеа достигает 0.05%. Низкой энергетике способствует также повсеместно принятая тенденция к использованию динамиков с маленьким диаметром диффузора, что не позволяет никоим образом, даже теоретически, рассчитывать на увеличение энергетической продуктивности АС. Это привело к необходимости использовать УНЧ большой мощности и малой энергетической эффективности.

При анализе общеизвестной и принятой в звукотехнике эквивалентной электромеханической схемы ЭДГ нами было обнаружено, что известная схема является во многом неправильной и не отражающей сущность получения таких низких энергетических параметров [2].

Оказалось, что по своей сущности ЭДГ представляет собой многообмоточный электромеханический трансформатор, преобразующий входную электрическую мощность в механическую. Магнитная цепь в нём является общей как для постоянного поперечного магнитного потока так и для переменного, создаваемого звуковой катушкой. Трансформатор содержит 3 короткозамкнутые обмотки, которые сильно уменьшают возникающую в процессе преобразования механическую мощность и Kea. Потери магнитной энергии постоянного магнита составляют 90%, и это увеличивает его массу и объём.

Наличие гистерезисных и вихревых потерь в железе и уменьшение его магнитной проницаемости на низких частотах является причиной возникновения нелинейных искажений. Большие нелинейные искажения динамиков обусловлены вследствие возникновения во фланце и керне магнитной системы, являющимися короткозамкнутыми витками звуковой катушки, вихревых и гистерезисных потерь, величина которых, равна:

$$P_f = (k_v \cdot t^2 \cdot B_m^2 \cdot f^2 \cdot 10^{-10} + k_g \cdot B_m^2 \cdot f \cdot 10^{-8}) \cdot V \cdot 10^{-3},$$

где: f – частота звуковых колебаний, Гц, V- приведённый объём магнитопровода,  $cm^3$  V=St, S – площадь поперечного сечения магнитопровода,  $cm^2$ ,  $k_g$  - коэффициент, определяющий потери на гистерезис,  $k_v$  - коэффициент, определяющий потери на вихревые токи и дополнительные потери, пропорциональные частоте, t – толщина фланца и части керна /вдоль его продольной оси/, по которой проходит

на полицина фланца и части керна /вдоль его продольной оси/, по которой проходит магнитный звуковой поток  $\Phi_2$ 

Коэффициенты  $k_g$  и  $k_v$  зависят от напряжённости, создаваемой постоянным магнитом, и переменной магнитной индукции  $B_m$ . Так как звуковой сигнал представляет собой ансамбль сигналов случайной формы, частоты и фазы, а также амплитуды, то то можно сделать вывод, что нелинейные искажения значительно возрастают при увеличении выходной мощности звукового тракта и зависят от спектра излучаемого звука, что и наблюдается на практике. Однако указанные выше искажения нельзя скомпенсировать никакими приёмами в УНЧ. Необходимо изменение конструкции ЭДГ. Некоторые конструктивные приёмы для уменьшения нелинейных искажений были нами разработаны и проверены экспериментально с положительным результатом.

Автором предложено выполнять звуковые катушки с большей индуктивностью, достигаемый при этом выигрыш составляет:

$$P = (L_1 + L_2 + 2 \cdot M) / L_0,$$

где  $L_1, L_2$  - индуктивности соответственно первой и второй звуковых катушек,

М – индуктивность, образованная в следствие взаимоиндукции,

- дополнительно получить индуктивность в виде взаимоиндукции, что увеличивает число ампервитков звуковой катушки без необходимости физически иметь дополнительный каркас и витки /провода/,
- использовать такой динамик в безтрансформаторных УНЧ, имеющих двухтактный выход, даже на одном элементе, например на транзисторе или радиолампе,
- компенсация вышеуказанных нелинейных искажений,
- широкая частота воспроизводимых частот, начиная от 0 Гц.
- чрезвычайное упрощение выходного каскада УНЧ,
- прекрасное демпфирование э.д.с., возникающей при движении звуковой катушки,
- минимум нелинейных искажений,
- управление частотной характеристикой динамика и др.

Как показал эксперимент с ЭДГ типа 4А32, увеличить Кеа до 30 раз. Чтобы использовать такие ЭДГ, нужно использовать УНЧ тока. В этом случае влияние активного сопротивления звуковой катушки не имеет большого значения. Получена эффективность ЭДГ 105-110 Па/√1Вт,м и расширение полосы частот в сторону НЧ на октаву.

Исключение акустического короткого замыкания из AC представляет собой пока не решённую в электроакустике проблему. Это приводит к большим колебательным потерям мощности ЭДГ и AC в целом до 75 - 85% мощности. Все используемые типы акустического оформления ЭДГ (фазоинвертор, закрытый корпус, лабиринт, щит и др. [1]) энергетически несовершенны, устарели и требуют замены, чтобы исключить указанные большие потери. Нами предложено и экспериментально подтверждено, что колебательную мощность тыльного излучения ЭДГ из корпусов AC можно вывести в озвучиваемое пространство в виде волн, имеющих круговую или элептическую поляризацию, образуемых с помощью дополнительного внешнего волновода (основным волноводом при этом является корпус). Это позволило сделать звук объёмным и увеличить колебательную мощность в озвучиваемом пространстве до 6 раз по сравнению с типовой AC 35ГД-4.

На основе этого предложения нами выполнены AC типа ЦУНАМИ, имеющие эффективность 110 дБ/√1Вт,м и др., имеющие Kea до 35% [3].

## Литература

- 1. Прокофьев В.Г. Бытовая радиотехника М.: Радио и связь, 1988 г.
- 2. Носов В.Н. Новый подход к проектированию звуковых систем // М.: АКИН, X сессия РАО, т. 2, 2000 г.
- 3. Носов В.Н. Акустическое короткое замыкание и его исключение из звуковых систем // М.: АКИН, XI сессия РАО, т. 2, 2001 г.

Труды Нижегородской акустической научной сессии, ННГУ, 2002

L<sub>0</sub> - индуктивность магнитной катушки в обычном ЭДГ.

Это даёт следующие возможности:

# ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТЕЙ В ПОТОКЕ СРЕДЫ

# Л.К.Олонов, Е.В.Прокофьев

## НИИ механики Нижегородского госуниверситета

Измерение скоростей в потоке движущейся среды актуально в связи с возросшей ролью расходометрии движущихся по трубопроводам энергоносителей (нефть, газ, пар и т.п.) [1]. Предлагается новый способ измерения скоростей в потоке среды, основанный на измерении времен запаздывания в распространении звука в среде между непрерывным излучателем звука и двумя приемниками звука, расположенными симметрично излучателю [2,3] (рис.1).



Рис. 1

По направлению движения потока среды 1 со скоростью Vc на жестком основании располагают излучатель звука 2 и два приемника звука 3, 4, отстоящие от излучателя на базовые расстояния Do и Dn. Гармоническую звуковую волну излучают вдоль и против направления движения среды 1 (рис.1 а). Волна распространяется вдоль потока среды со скоростью  $V_3+Vc$ , а против потока со скоростью  $V_3-Vc$ . К приемнику 3, расположенному в прямом направлении волна подходит с временем запаздывания Tn (рис.1 б). В обратном направлении к приемнику 4 подходит проинвертированная волна с временем запаздывания To (рис.1 в). Принятые звуковые сигналы преобразуются в электрические и усиливаются. В моменты переходов излучаемых и принятых сигналов через нуль производится формирование узких импульсов (рис.1 г, д, е). Измерения времен запаздывания To и Tn (рис.1 ж, з), а затем измерении их цифровым способом путем счета числа стробируемых высокочастотных импульсов и запоминании результатов счета на время вычисления Te (рис.1 и, к).

Предполагая плавные, постепенные изменения скоростей *Vc* и *Vз* на участке *Do+Dn*, упрощенные (полученные без операции интегрирования) выражения для скоростей принимают вид:

$$Vc = 0.5(Dn / Tn - Do / To)$$
<sup>(1)</sup>

$$V_3 = 0,5(Dn/Tn + Do/To)$$
 (2)

Для современной расходометрии представляют интерес следующие особенности предлагаемого способа измерения скоростей:

- Текущие значения скоростей определяются через измерения текущих интервалов времени с последующими вычислениями по формулам (1) и (2). Высокая стабильность базовых расстояний и высокая точность современных средств измерения временных интервалов обеспечивают высокую точность измерений скоростей.
- 2. Обеспечивается одновременное измерение текущих значений скорости движения потока среды и скорости распространения звуку, что открывает перспективу создания нового поколения расходомеров, измеряющих объемный и массовый расход контролируемых сред, поскольку по текущему значению скорости звука может быть вычислена текущая плотность контролируемой среды.
- Диапазон измеряемых скоростей широкий с нулевой скоростью по середине, что позволяет одним и тем же расходомером измерять как расход, так и приход контролируемых сред (резервуары и т.п.).
- Наличие микропроцессора обеспечивает современный сервис для пользователя и оперативную сопрягаемость с системами контроля и автоматизации.
- 5. Высокое быстродействие процесса измерения.

Измеритель скоростей состоит из электромеханического блока (ЭМБ), включающего три штуцера, укрепленные на жестком основании, с излучателем и приемниками звука и измерительно-вычислительного блока (ИВБ), который может быть реализован на микросхемах широкого применения (К155, К561, К176). Мик-



ропроцессор может быть реализован на микросхемах наборов К1802 или 1810. Индикаторы целесообразно выполнить на ИЖК.

С целью разработки оптимальных конструкций реальных измерителей скоростей и расходомеров целесообразно применение машинного моделирования на аналого-цифровой (гибридной) вычислительной системе [4]. Так в случае применения гибридной вычислительной системы (ГВС) "Русалка" ЭМБ целесообразно применить реальный с возбудителем звука, расположенным на ЭМБ, а электрические сигналы с приемников звука подать на аналоговую часть ГВС, на которой целесообразно вести отработку усилителей, формирователей узких импульсов и временных интервалов, а также счетчиков, цепей стробирования и калибровки. Цифровую часть ГВС (ІВМ РС) целесообразно использовать для отработки программ, вводимых в микропроцессор. Машинное моделирование полезно также для учета реальных зависимостей плотности перемещаемой среды от скорости звука как в виде известных математических зависимостей [5], так и в виде графических зависимостей, снятых экспериментально на реальных средах. По результатам отладки и оптимизации на ГВС структур измерителей и их отдельных узлов в реальном масштабе времени изготовляется действующий образец ИВБ, в микропроцессор которого вводится отлаженная программа, учитываются рекомендации по совершенствованию ЭМБ и проводятся испытания опытных образцов измерителей на реальных средах.

#### Литература

- Ультразвуковые приборы для технологических процессов при транспортировке и хранении нефти и нефтепродуктов. Тематические научно-технические обзоры. - М.: ВНИИОНГ, 1971, с.5-31.
- 2. Прокофьев Е.В., Сибирякова Л.Л. Способ измерения расстояния, Пат. RU, №2121699, кл. G 01 S 13/76, 1998 г.
- 3. Прокофьев Е.В., Олонов Л.К. Способ измерения скоростей в движущейся среде, Пат. RU, № 2167433, G 01 S 15/00, G 01 F 1/66, 2001 г
- Шор И.Я., Левин М.Г. Справочник пользователя аналоговых и аналоговоцифровых вычислительных систем. – Кишинев: Штиница, 1985.
- 5. Эберт Г., Краткий справочник по физике. М.: 1963 г.