

## МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ (НКТД)

*В работе представлены результаты измерений смещений в нанодиапазоне с использованием 2-х частотного гетеродинного интерферометра, а также измерения амплитудно-частотных характеристик преобразователей акустической эмиссии.*

*Ключевые слова: двухчастотный лазерный гетеродинный интерферометр, фазовый сдвиг, наносмещение, преобразователь акустической эмиссии, амплитудно-частотная характеристика.*

S.A. DARZNEK, ZH.E. ZHELKOBAYEV

Joint Stock Company «Center for Surface and Vacuum Research» (JSC «CSVR») zhelkobaev@mail.ru

## METROLOGICAL PROVISION OF NON-DESTRUCTIVE TESTING SYSTEMS AND TECHNICAL DIAGNOSTICS

*The report presents the results of measurements of displacements in the nanometer range using 2-frequency heterodyne interferometer and measurement of amplitude-frequency characteristics of acoustic emission transducers.*

*Keywords: 2-frequency heterodyne interferometer, phase shift, nanodisplacement, acoustic emission transducers, amplitude-frequency characteristics.*

Развитие наукоемких технологий немислимо без создания высокочувствительных методов и высокоточных средств измерений сверхмалых линейных размеров и контроля прецизионных перемещений объектов в нанодиапазоне. При этом должны быть достигнуты предельно возможные степени точности и обеспечен соответствующий метрологический уровень.

Прецизионное измерение сверхмалых перемещений необходимо для проведения фундаментальных работ, связанных с созданием нового поколения взаимосвязанных эталонов в области механических и акустических величин, при исследовании квантово-размерных эффектов, высокостабильных источников когерентного излучения, калибровки актюаторов микро- и нанодиапазона и контроля техногенно-опасных объектов с целью обеспечения экологического баланса окружающей среды.

Оптимальным решением этих проблем может стать внедрение в практику линейных измерений методов и средств оптической (лазерной) интерферометрии-фазометрии (нанометрии), опирающихся на фундаментальные константы и эталоны физических величин [1,2,3]. В этом смысле интересно использование достижений лазерной интерферометрии-фазометрии для обеспечения высокого метрологического уровня при использовании методов неразрушающего контроля и технической диагностики для контроля состояния техногенноопасных объектов. Например, для поверки/калибровки преобразователей акустической эмиссии (ПАЭ), а в дальнейшем и очень высокую степень локализации зарождающегося дефекта (дефектов) в исследуемом объекте.

### 1. Преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ)

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля значительное место занимают акустические методы [1-8], к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии (АЭ)[8-9]. В акустических методах в качестве первичных преобразователей в большинстве случаев используются акустоэлектрические преобразователи, принцип действия которых основан на преобразовании механического (акустического) смещения поверхности в электрический сигнал. Это так называемые преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ).

### 2. Неразрушающая диагностика промышленного оборудования

На современном этапе развития промышленности вопросы обеспечения надежной работы комплектующих изделий, оборудования и энергоснабжения приобретают первостепенное значение. Особое внимание к проблеме обеспечения промышленной безопасности объясняется тем, что современные производственные объекты работают в условиях повышенной нагрузки; возрастают параметры рабочих сред (давление, температура, химическая и радиационная активность), повышаются мощность и производительность отдельных блоков. Отказы в работе изделий, оборудования, коммуникаций, трубопроводов ведут к значительным экономическим потерям, в том числе обусловленными и нарушениями экологического баланса. Все это определяет необходимость системного подхода к оценке надежности работы производственных объектов, когда на первое место выдвигаются методы технической диагностики и неразрушающего контроля.

#### 2.1 Физические основы метода неразрушающего контроля

Пластическая деформация твердых сред, развитие дефектов, трения, прохождение жидких и газообразных сред через узкие отверстия, неизбежно порождают волны, регистрируя которые, можно судить о протекании процессов и их параметрах.

## 2.2 Види акустической эмиссии

1. Акустическая эмиссия материала – акустическая эмиссия, вызванная локальной динамической перестройкой структуры материала;
2. Акустическая эмиссия утечки – акустическая эмиссия, вызванная гидродинамическими и/или аэродинамическими явлениями при протекании жидкости (газа) через сквозную несплошность объекта испытаний;
3. Акустическая эмиссия трения – акустическая эмиссия, вызванная трением поверхностей твердых тел;
4. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях – акустическая эмиссия, связанная с фазовыми превращениями в веществах и материалах;
5. Магнитная акустическая эмиссия – акустическая эмиссия, связанная с излучением звуковых волн при перемагничивании материалов;
6. Акустическая эмиссия радиационного взаимодействия – акустическая эмиссия, возникающая в результате нелинейного взаимодействия излучения с веществами и материалами;
7. Акустическая эмиссия при химических и электрохимических реакциях – акустическая эмиссия, возникающая в результате протекания химических и электрохимических реакций, включая разнообразные коррозионные процессы [1-4, 8-9].

**ПРИМЕЧАНИЕ:** Из перечисленных видов АЭ наибольшее применение для контроля промышленных объектов нашли первые три [9].

## 2.3 Акустоэмиссионный метод неразрушающего контроля

Среди широкого спектра методов и средств неразрушающего контроля (НК) значительное место занимают акустические методы, к которым относятся ультразвуковая дефектоскопия и метод акустической эмиссии (АЭ).

Метод АЭ достаточно успешно применяется для диагностирования промышленных объектов: больших емкостей, металлических строительных конструкций, трубопроводов, мостов, различных узлов и устройств железнодорожного транспорта и т.д. Простейшим бытовым примером АЭ является треск, слышимый ухом при разрушении любого твердого объекта, например, слом ветки дерева или элементов строительных конструкций. Основным макроисточником такой эмиссии в твердом теле выступают фазовые превращения, образование и рост дефектов. Микромеханизмом АЭ является динамический разрыв атомных связей.

**Метод АЭ** – один из наиболее мощных средств обеспечения безаварийной эксплуатации оборудования опасных производственных объектов. Основное достоинство метода – возможность с его помощью выявлять и классифицировать развивающиеся дефекты не по размерам, а по степени их опасности для контролируемого объекта. Возможность работы в реальном времени делает метод АЭ незаменимым при исследовании механизмов перестройки структуры твердого тела и контроле промышленных объектов. Кроме того, метод АЭ обладает рекордно высокой чувствительностью по сравнению с другими методами неразрушающего контроля. При акустической эмиссии амплитуда колебаний поверхности твердого тела, как правило, не превышает нескольких нанометров, поэтому использование лазерного интерферометра для калибровки (поверки) ПАЭ не вызывает сомнений, а абсолютная привязка к Государственному эталону единицы длины – метру, обеспечивает высокую достоверность полученных результатов.

Метод АЭ [2,4;7,9], как неотъемлемая часть информационной технологии, позволяет наблюдать и исследовать динамику процесса деформации, разрушения, перестройки структуры вещества, химических реакций, взаимодействия излучения с веществом и т.п.

При детектировании АЭ эмиссии используется явление пьезоэффекта (прямой - обратный). Для этих целей используются приемники акустической эмиссии (ПАЭ). В России выпускают приемники акустической эмиссии самых различных модификаций в промышленных масштабах, например, фирма «ГлобалТест». Обработку измерительных данных обеспечивает оборудование фирмы «Интерюнис». Качество этих средств находится на хорошем современном уровне, и оборудование имеет возможность обновления.

Объектами тотального контроля являются магистральные нефте- и газопроводы, химические или атомные реакторы, мосты, особо нагруженные элементы железнодорожных систем, оборудование ЖКХ и т.п. ПАЭ выпускают в виде различных модификаций и назначения, с встроенным усилителем или без него. В промышленности наибольшее распространение получили ПАЭ типа GT200, рис. 1.

Есть и другие модификации ПАЭ, работающие в диапазоне частот 0-50 кГц предназначенные для контроля вибропроцессов или контроля процессов, протекающие в диапазоне частот 100-1000 кГц. Поверка ПАЭ проводится с использованием лазерного измерителя наноперемещений и калибратора акустического тракта[6].

## 2.4 Фазовый метод измерения линейных перемещений в нанометровом диапазоне

Фазовые методы измерения, в частности, оптическая интерферометрия-фазометрия, широко внедряются в практику прецизионных измерений, обеспечивая погрешность измерений в долях нанометра. Методы лазерной интерферометрии, обеспечивают высокую чувствительность  $\sim 10^{-12}$  м к смещению объекта,



Рис. 1. Преобразователь акустической эмиссии типа GT200, рабочий диапазон частот (50-250) кГц.

высокую локальность, абсолютный характер калибровки измерений в долях длины волны лазерного излучения и возможность автоматизации и обработки измерительной информации с помощью персонального компьютера [1, 2, 4].

К этому классу измерительных систем относится созданная в АО «НИЦПВ», лазерная измерительная система, двухчастотный лазерный интерферометр-фазометр ЛИС-01М. Измерительная система зарегистрирована в Государственном реестре средств измерений России под №42622-09.

Таблица 1

**Основные технические характеристики ЛИС-01М**

Диапазон линейных перемещений, м	$5 \cdot 10^{-10} \div 10^{-3}$
Дискретность отсчета, нм	0.1
Основная абсолютная погрешность измерений перемещений не более, нм, в зависимости от диапазона	$0.3 \div 3$
Диапазон допустимых скоростей перемещений объекта, м/с	$0 \div 3 \cdot 10^{-3}$
Время преобразования, мкс	10.0

Известно, что при распространении ультразвуковых волн в конденсированных средах образуется высокочастотная пространственная фазовая решетка; при попадании на эту решетку свет испытывает дифракцию. При некоторых условиях (называемых условиями Брэгга) от падающего света выделяется единственный дифрагированный пучок излучения. Величина углового отклонения пучка определяется из

соотношения:  $\sin \theta_B = \frac{\lambda}{2\Lambda}$ , где

$\lambda$  — длина волны падающего излучения,  $\Lambda$  — длина акустической волны,  $\theta_B$  — угол Брэгга.

На рисунке 2  $\Omega_1$  и  $\mathbf{K}_1$  — частота и волновой вектор ультразвуковой волны, проходящей через первый АОМ, а  $\Omega_2$  и  $\mathbf{K}_2$  - частота и волновой вектор ультразвуковой волны, проходящей через второй АОМ. Векторы  $\mathbf{k}_{+1}$  и  $\mathbf{k}_{-1}$  — волновые векторы волн, испытавших брэгговскую дифракцию на двух АОМ. Функциональная схема ЛИС-01М представлена на рисунке 3.

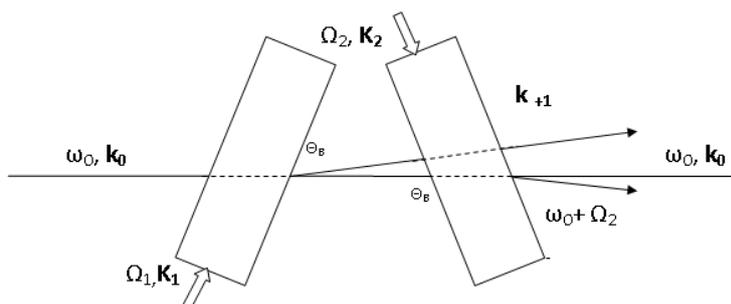


Рис. 2. Брэгговская дифракция при распространении лазерного излучения (с частотой  $\omega_0$  волновым вектором  $k_0$ ) через два акустооптических модулятора (АОМ)

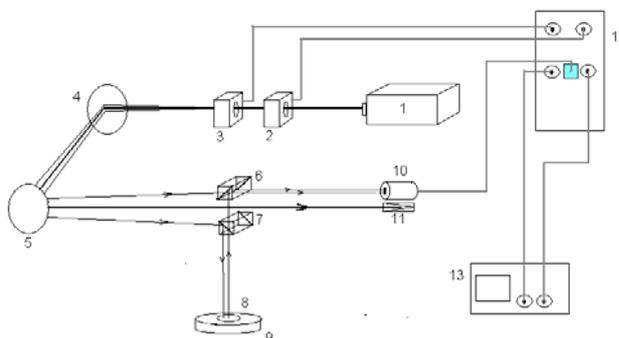


Рис. 3. Структурная схема интерферометра-фазометра ЛИС-01М  
Где: 1-лазер ЛГН-302; 2и3-АОМ-ы; 4,5- зеркала; 6,7- смесительные элементы; 8- фазовый объект (ФО) с отражающим зеркалом; 9-юстировочный столик; 10- фотоприёмное устройств (ФПУ); 11- поглотитель пучка нулевого порядка дифракции; 12- электронно-фазометрическая система (ЭФС); 13- цифровой осциллограф. На рисунках 4(а, б) и 5(а, б) представлены результаты исследований фазосдвигающих устройств (ФСУ), изготовленных из пьезокерамических структур.

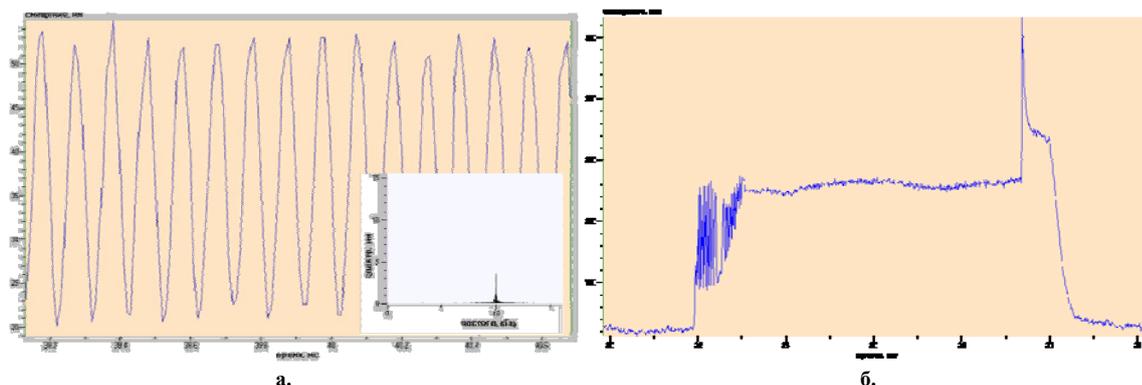


Рис. 4. Отклик ФСУ-1: а. на сигнал с  $f = 10$  кГц и спектр отклика; б. на импульсное напряжение в 20 В

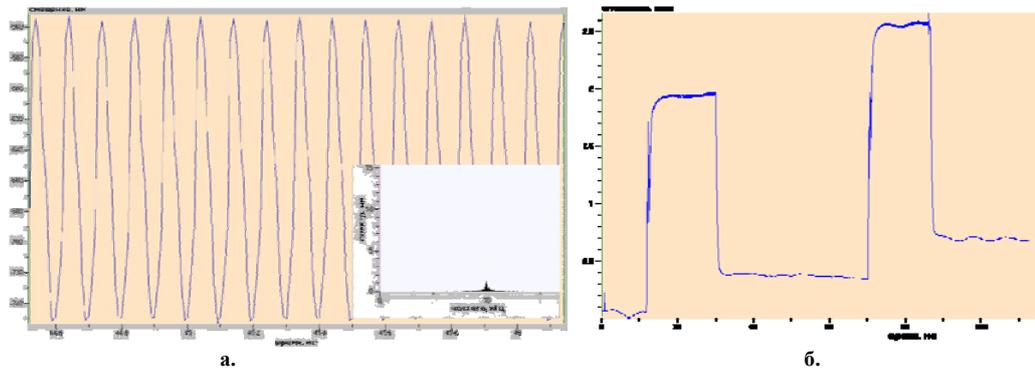


Рис. 5. Отклик ФСУ-2: а. на сигнал с  $f=10$  кГц и спектр отклика; б. на импульсное напряжение в 50 В. Погрешность измерений лежит в диапазоне (6-8)%

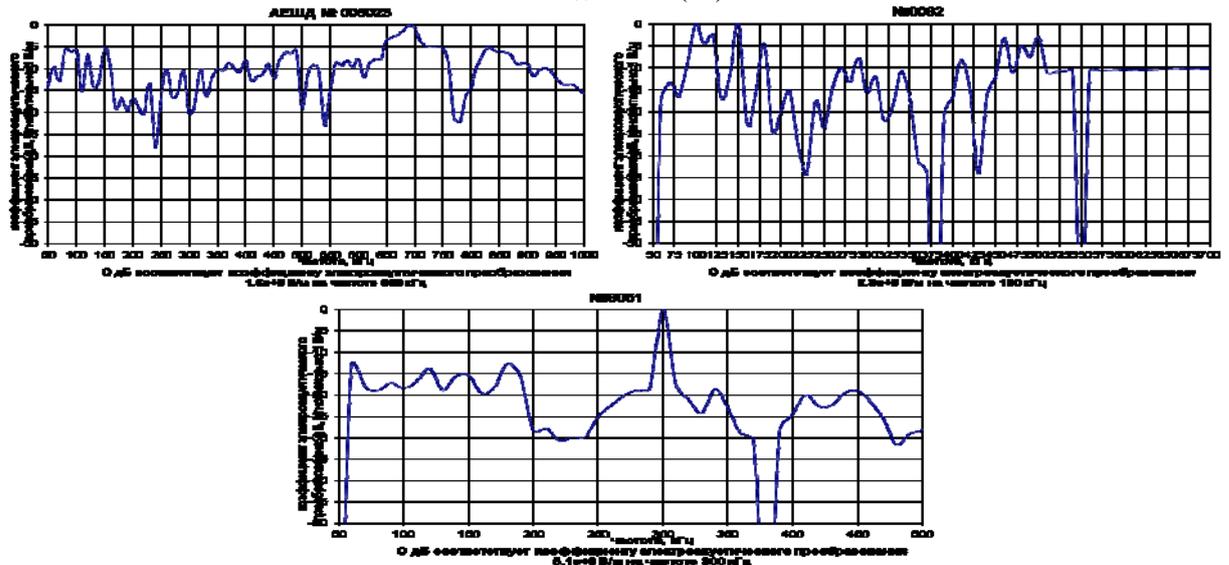


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики ПАЭ, измеренные с использованием лазерного интерферометра



Рис. 7. География предприятий-заказчиков для поверки/калибровки, систем неразрушающего контроля на территории России и ближнего зарубежья

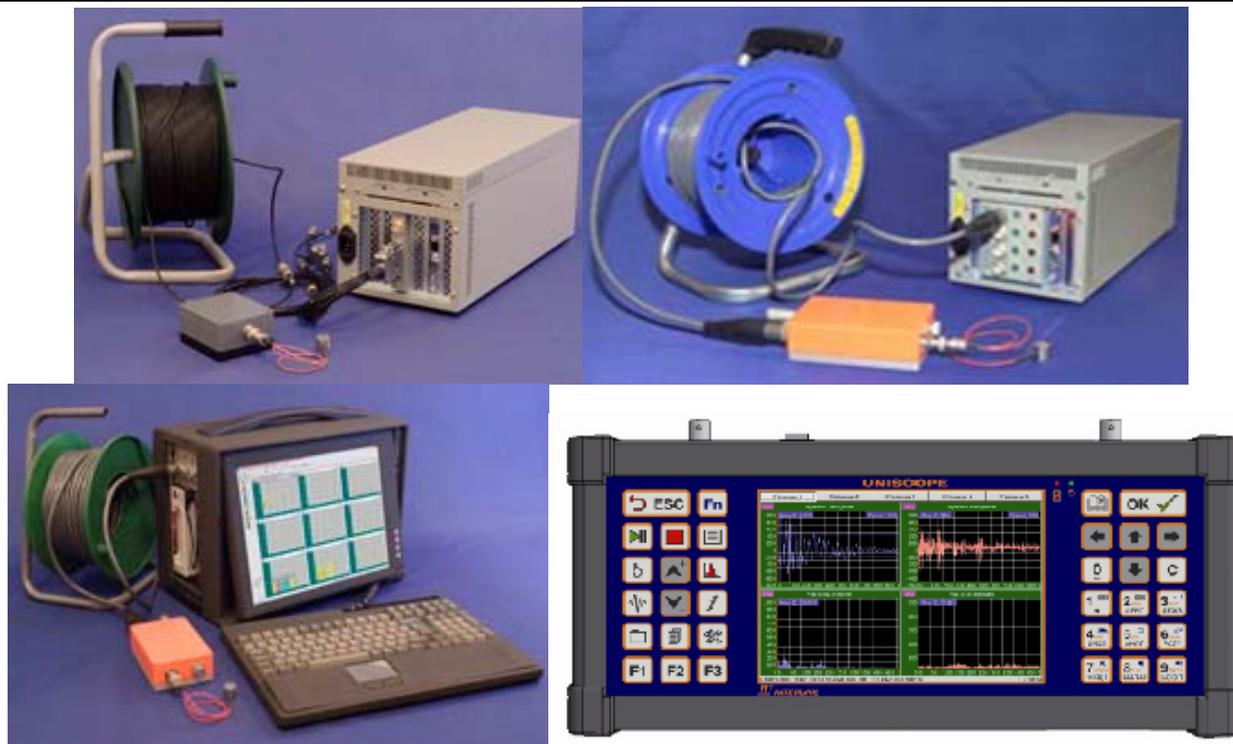


Рис. 8. Комплекс контрольно-измерительной аппаратуры (фирма Интерьюнис, РФ), используемый для получения, обработки и хранения данных при работе с использованием методов НК и ТД

### Литература

1. Валиев К.А. Исследования в области квантовых технологий в информатике и метрологии. // Вестник РАН //, 2003, т.73, № 5, с. 400–405.
2. Лякишев Н.П. Нанокристаллические структуры новое направление развития конструкционных материалов. //Вестник РАН//, 2003, т. 73, № 5, с. 422–425.
3. Иванов В.И., Власов И.Э. Метод акустической эмиссии. В кн.: Неразрушающий контроль. Справочник. / Под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005, кн. 1.
4. С.А. Дарзбек, Ж.Желкобаев, В.В.Календин, Ю.А.Новиков Лазерный интерферометрический измеритель наносмещений / Труды института общей физики им. А.М. Прохорова РАН Том 62 сс 14- 35
5. Григорьев В.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Кухтевич В.И., Супьян В.Я., Фролов Г.Ф., Троцишин И.В. Фазометр оптического диапазона. // Авторское свидетельство № 1411572, 1988 г.
6. Владимиров Б.Г., Желкобаев Ж., Календин В.В., Несмеянов С.С., Тодуа П.А. Способ калибровки преобразователей акустической эмиссии и устройство для его реализации. // Патент № 2321849. 2008 г.
7. РД 03-300-99 “Требования к преобразователям акустической эмиссии, используемым для контроля опасных производственных объектов”, 1999.
8. Ж. Желкобаев, В. Иванов, Ю. Новиков, П.Тодуа. Нанометрология на службе промышленной и экологической безопасности /Наноиндустрия 6/2009 сс. 34-38.
9. Неразрушающий контроль и диагностика. / Справочник. Под редакцией В.В. Клюева, Издание третье, переработанное и дополненное. М. «Машиностроение» 2005.

Рецензія/Peer review : 12.5.2016 р.

Надрукована/Printed :27.6.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією