

Воздействие низкочастотной вибрации на процесс акустической эмиссииА.А. Догадов¹, И.И. Конопацкая,* М.А. Миронов,[†] П.А. Пятаков[‡]АО «Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева», Россия, 117036, Москва, Шверника ул., 4
(Статья поступила 02.12.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

Представлены результаты экспериментов по воздействию низкочастотной вибрации на процесс акустической эмиссии (АЭ). Акустическая эмиссия возникает в объекте с искусственным дефектом под действием нарастающего механического напряжения. Эксперименты проводились на поллой тонкостенной трубе с искусственной трещиной, залитой эпоксидной смолой. При совместном действии механической нагрузки и вибрации наблюдался эффект низкочастотной амплитудной модуляции сигналов АЭ. Кроме того экспериментально зарегистрирован эффект интенсификации АЭ при действии на образец сторонней вибрации. Предложена простая аппаратная реализация метода выделения модуляционных компонент в низкочастотном спектре.

РАС: 43.25.+y

УДК: 534.8:620

Ключевые слова: акустическая эмиссия, вибрация.

ВВЕДЕНИЕ

Акустическая эмиссия (АЭ) — это явление генерации акустических волн в твердотельном материале вследствие развития в нем под воздействием внешней нагрузки дефектов. На регистрации этих волн построен метод контроля, который находит всё более широкое применение в различных областях науки и техники [1]. Преимуществами метода являются его дистанционность, интегральность, т.е. возможность наблюдать одновременно за состоянием всего объекта в целом, без активного воздействия на объект, способность обнаруживать малые дефекты на ранней стадии их развития. При использовании АЭ метода должны быть решены две различные задачи: фиксация самого существования дефекта, являющегося источником АЭ сигнала, и его локализация. Стандартная процедура предэксплуатационных испытаний технических устройств АЭ методом предусматривает создание внешней механической нагрузки, под действием которой зародыши дефектов, существующих в материале конструкций, начинают расти, что сопровождается возбуждением акустических сигналов, распространяющихся по испытываемому объекту.

Амплитуда АЭ сигналов тем больше, чем сильнее скачкообразные изменения состояния трещины при нагрузке (изменение размера) и в общем случае не отражает степень развитости трещины (ее размер). В то же время размер отдельной трещины или суммарная поверхность совокупности группы трещин существенно влияет на эффективность нелинейных акустических взаимодействий в контролируемой области. Поэтому, проводя наряду с традиционными для АЭ-метода измерениями дополнительные наблюдения какого-либо процесса нелинейного взаимодействия акустических

волн и колебаний, принципиально можно получать дополнительную информацию о состоянии объекта. Чтобы не усложнять процесс контроля, было бы удобно в качестве акустических волн использовать сами АЭ сигналы. В простейшем варианте предлагается наблюдать модуляцию последовательности АЭ сигналов под действием низкочастотной вибрации.

Существует достаточно много публикаций, в которых исследовалось взаимодействие акустических волн различных диапазонов частот на трещинах с целью получения дополнительных информационных признаков, повышающих эффективность акустических методов контроля в дефектоскопии, например [2–4]. В работе [2] приводятся результаты экспериментального исследования эффекта модуляции ультразвука вибрациями и предложен метод его использования в ультразвуковой дефектоскопии для локализации трещин. В работе [5] описано появление гармоник, кратных частоте вибрации, на стадии, предшествующей усталостному разрушению образца.

В настоящей работе представлены результаты исследования воздействия низкочастотной вибрации на акустическую эмиссию модели, представляющей собой эпоксидную вставку в стальной тонкостенной трубе. Целью работы было поиск возможных новых диагностических признаков обнаружения дефектов на ранних стадиях их развития.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА И УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на поллой тонкостенной стальной трубе с искусственной трещиной, залитой эпоксидной смолой. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1. АЭ возникла в процессе поперечного сжатия трубы в губках тисков, вибрационное воздействие обеспечивалось электромотором с эксцентриком, закреплённым на трубе. Кроме того, была проведена серия экспериментов, в которых образец подвергался одновременно как стороннему виб-

*E-mail: irina.konopatskaya@mail.ru

†E-mail: mirovov_ma@mail.ru

‡E-mail: ppyatakov@mail.ru

рационному воздействию, так и слабым периодическим ударам по его поверхности.

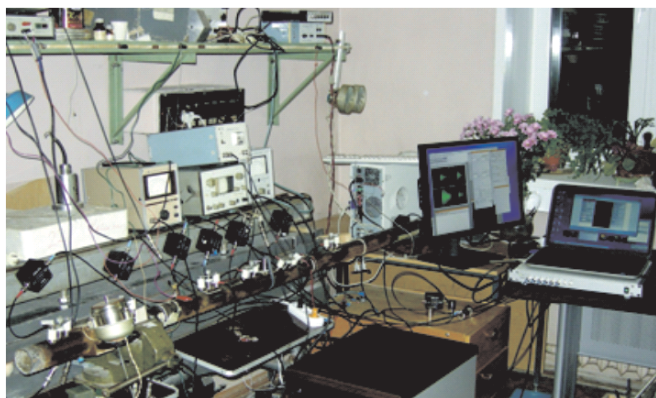


Рис. 1: Общий вид экспериментальной установки

Параметры трубы были следующие: длина 216 см, внутренний диаметр 60 мм, толщина стенки — 4,2 мм. Частота вращения электромотора с эксцентриком варьировалась в пределах 960 – 1200 об/мин (16 – 20 Гц).

Измерение акустических сигналов проводилось как в общепринятом в АЭ методе диапазоне частот от десятков до сотен кГц, так и в низкочастотном диапазоне, от единиц до 150 Гц. Для приёма сигналов использовали пьезокерамические датчики, разработанные компанией ООО «ФорТехЛэб» (г. Троицк) [6] RS150L и RS30L с резонансной частотой 150 кГц и 110 кГц и площадью поверхности 2,27 см² и 4,15 см², соответственно. Датчики крепились непосредственно на поверхности трубы с помощью резиновых жгутов либо магнитных прижимных устройств. Для улучшения акустического согласования датчик приклеивался к трубе тонким слоем резинового клея. Электрический сигнал с выхода пьезодатчиков проходил через установленные в непосредственной близости предусилители RPA-05 с полосой пропускания 12–630 кГц.

Регистрация электрических сигналов, принятых пьезодатчиками в рабочем диапазоне частот канала датчик + предусилитель (ВЧ канал), производилась с помощью многофункционального программно-измерительного комплекса «РАНИС» (ООО «ФорТехЛэб») [6]. Число датчиков, задействованных в эксперименте, варьировалось от 3-х до 8-и. Оцифровка сигнала производилась с частотой дискретизации 3 МГц и разрядностью квантования 16 бит. Принципиальная блок-схема установки приведена на рис. 2. Сигнал в низкочастотный канал (НЧ) поступал с выхода предусилителя одного из приёмных каналов. Здесь он последовательно проходил следующие преобразования: усиливался широкополосным усилителем М60 (1Гц – 100кГц, 40 дБ), подвергался детектированию с помощью специально разработанного демодулятора (ДМД), проходил через усилитель У7-1 (0,01 – 1 кГц, 40 дБ) и поступал на вход звуковой карты компьютера (частота дискретизации 4 кГц, разрядность квантова-

ния 16 бит). Регистрация сигнала в НЧ тракте производилась с помощью программы SpectraLAB, позволявшей производить спектральный анализ принятого сигнала, как в режиме реального времени, так и в режиме постпроцессорной обработки.

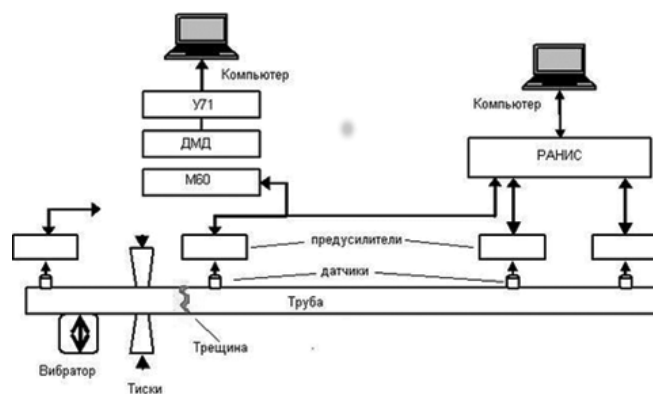


Рис. 2: Блок-схема экспериментальной установки

На стадии подготовки основного эксперимента были проведены исследования эволюции сигнала АЭ при распространении его по трубе. Возбуждение сигналов осуществлялось так называемым методом Су Нильсена, при котором акустический сигнал — это треск ломающегося грифельного стержня. Типичная запись сигналов, зарегистрированных при этом, представлена на рис. 3. Алгоритм регистрации эмиссионных событий был построен таким образом, что из всего потока импульсов, принятых датчиками, отбирались и записывались в память только те, которые превышали некоторое пороговое значение (см. рис. 4), которое в большинстве экспериментов устанавливалось равным 600 мкВ, что в 1,5 раза превышало уровень шума на выходе ВЧ канала. Скорость распространения волны в образце определялась по времени задержки переднего фронта сигнала, регистрируемого различными парами датчиков, расположенных на известных расстояниях друг от друга. Проведённые измерения скорости дали значение 5046 м/сек (с погрешностью $\pm 10\%$), что хорошо согласуется со скоростью в тонком стальном стержне. Имея такую скорость распространения, сигнал эмиссии, порождённый растущей трещиной в образце, способен преодолеть расстояние от одного конца трубы до другого за 43 мкс, а вернувшись к месту возникновения, вновь провзаимодействовать с трещиной.

При этом время реверберации АЭ импульса, т. е. зарегистрированная системой продолжительность его звучания, составляет порядка 4800 мкс. Это время соответствует длине пробега (скорость распространения, умноженная на время реверберации) 24 м, т. е. в 10 раз больше длины трубы.

На рис. 5 видна сложная картина АЭ импульса, отражающая особенности объекта, по которому он распространяется.

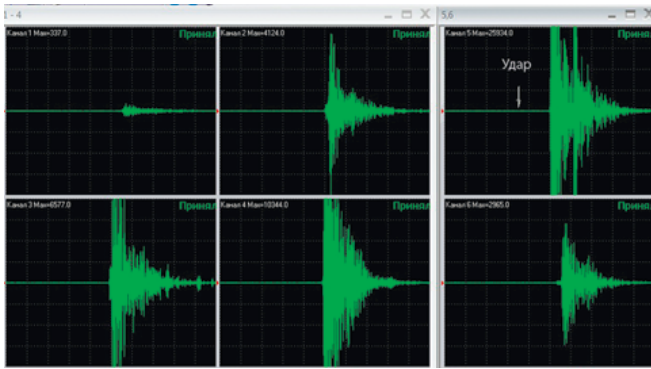


Рис. 3: Импульсы, зарегистрированные на поверхности трубы датчиками 1–6, при возбуждении методом Су Нильсен сигнала рядом с датчиком 5 (фотокопия с экрана «РАНИС»)

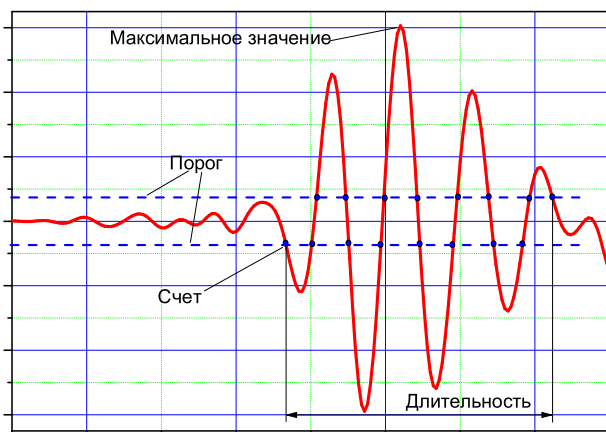


Рис. 4: Параметры АЭ импульса, регистрируемые, в соответствии со стандартами АЭ метода [1] по ВЧ каналу. Пунктиром отмечен уровень порога, точки пересечения графика с пунктирными пороговыми прямыми регистрируются как «счет»

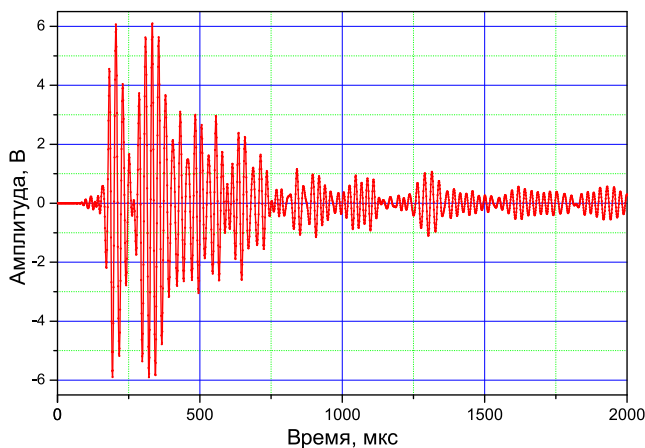


Рис. 5: АЭ импульс (порог 600 мкВ), зарегистрированный по ВЧ каналу

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Основной эксперимент проводился таким образом: к образцу — отрезку трубы с искусственной трещиной, заклеенной эпоксидной смолой, — прикладывали механическую нагрузку путём сдавливания её локального участка в районе, прилегающем к трещине, в губках тисков. Нагрузку увеличивали порциями (фиксировали её величину по значению угла поворота рычага тисков) и доводили до критического значения, при котором происходило разрушение целостности эпоксидной вставки.

На рис. 6 представлен фрагмент протокола, записанного системой «РАНИС» (в согласии со стандартами [1]) в процессе одного из экспериментов

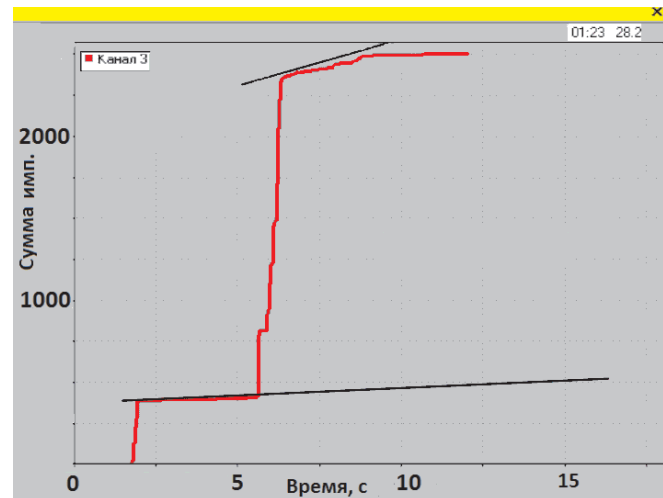


Рис. 6: Суммарный счет импульсов в условиях непрерывной работы вибратора. Наклон отрезков прямых показывает скорость роста АЭ событий на участках, соответствующих различным уровням стабильной нагрузки Н1 и Н2 у. е.

На рис. 7а представлен спектр сигнала, зарегистрированного в данном эксперименте в НЧ канале в интервале времени 7–9 с при работающем вибраторе (частота 19,8 Гц) и для сравнения (рис. 7б) спектр НЧ сигнала в том же эксперименте, в условиях выключенного вибратора. Подчеркнём, что это спектр сигналов, полученных на выходе НЧ канала путём детектирования [7] сигналов, принятых на поверхности образца высокочастотным датчиком RS150L с предусилителем RPA-05, результирующая полоса пропускания которых лежит в диапазоне 50–350 кГц. Гребенчатый спектр демонстрирует возможность выделения из сложной картины сигналов, распространяющихся по объекту с дефектом в условиях механической и вибрационной нагрузки, спектральных компонент модуляционных частот, соответствующих основной и дополнительным гармоникам вибрационного сигнала. Количество и амплитуда этих гармоник свидетельствует о «степени нелинейности» объекта в целом и даёт косвенную информацию о свойствах трещин (инте-

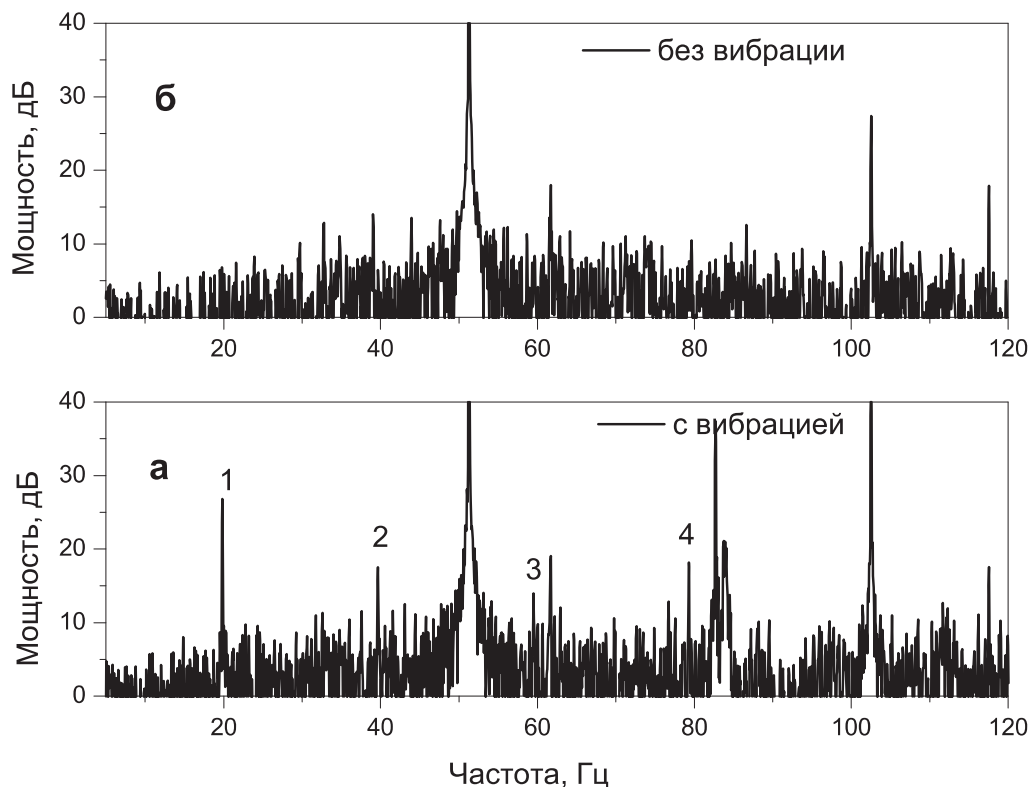


Рис. 7: Спектр сигнала, зарегистрированного по НЧ каналу с датчика RS15L при значении внешней механической нагрузки в условиях как работающего вибратора (а), так и не работающего (б). Цифрами отмечены первые 4 модуляционные гармоники (частота вибрации — 19,8 Гц)

гральной площади разрывов сплошности), имеющих в объекте исследования.

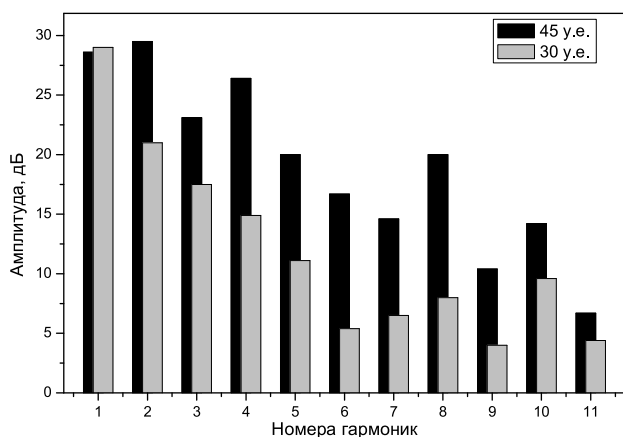


Рис. 8: Превышение (дБ) уровня модуляционных гармоник над уровнем шума при двух различных значениях внешней механической нагрузки, приложенной к образцу. По оси абсцисс отложены номера гармоник

На рис. 8 приведено сравнение амплитуд модуляционных гармоник, зарегистрированных в аналогичном эксперименте, при двух различных уровнях механиче-

ской нагрузки, приложенной к образцу. По оси абсцисс — номера гармоник, по оси ординат — превышение соответствующих гармоник над уровнем шума (дБ). Видно, что амплитуда высших модуляционных гармоник, существенно возрастает при увеличении сторонней механической нагрузки на образец, что, как известно, сопровождается увеличением эмиссионной активности дефектов. Таким образом, значение амплитуд этих гармоник, регистрируемых на выходе демодулятора, может не только быть индикатором существования самого акустоэмиссионного процесса в образце, но и служить показателем развитости этого процесса.

Приведём далее результаты методического эксперимента (на том же образце с искусственной трещиной), в котором осуществлялось одновременно воздействие как периодической последовательности слабых ударов по поверхности образца, так и вибрации. Изначально образец находился в стационарном, слабо нагруженном состоянии (сохранялось умеренное поджатие в тисках, которое было осуществлено за несколько дней до эксперимента, так что за это время уже могла пройти частичная релаксация материала). На один из пьезоэлектрических датчиков, установленных на поверхности образца, подавались (с выхода генератора Г6-27) прямоугольные электрические импульсы длительностью в 0,5 мс, частотой следования

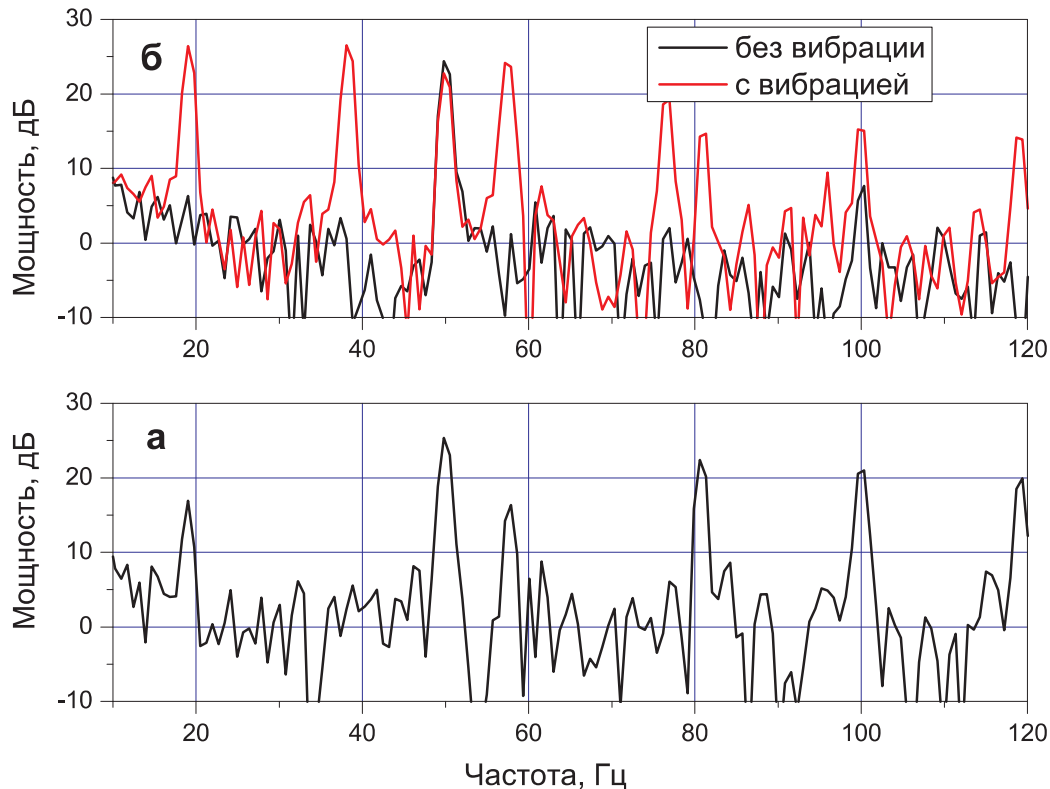


Рис. 9: Спектр сигналов при воздействии на образец чистой вибрации (а) и сочетанного воздействия вибрации и периодической (с частотой 1 кГц) последовательности акустических импульсов (б)

в 1 кГц и частотой заполнения 6,7 кГц. Последовательность возбуждаемых сигналов имитировала АЭ события. Вибрационные колебания на частоте 19,6 Гц возбуждались описанным выше способом. Проводившаяся с помощью «РАНИС» многоканальная регистрация сигналов, принятых датчиками, подтвердила наличие имитационных «эмиссионных» событий в образце, инициированных сочетанным воздействием периодической последовательности акустических импульсов и вибрации. Одновременно, сигнал, принятый датчиком RS150L и усиленный RPA-05, подвергался детектированию и регистрировался с выхода НЧ канала, как описано выше. Результирующие спектры сигналов с выхода НЧ канала представлены на рис. 9.

Наличие гармоник на рис. 9а (1, 2 и 3) можно объяснить тем, что приложение вибрации к образцу, находящемуся в слабонагруженном состоянии, приводило к активизации слабых истинных (не имитационных) АЭ событий. В то же время, сравнение спектров, представленных на рис. 9а и 9б, демонстрирует существенное увеличение амплитуды гармоник в случае сочетанного воздействия на образец вибрации и периодической последовательности акустических импульсов по сравнению со случаем чисто вибрационного воздействия. В частности, амплитуда первой увеличилась на 10 дБ, второй — на 15 дБ, третьей — на 10 дБ, четвертой и пятой — на 15 дБ. При этом все они, в среднем на 42 дБ, превышали уровень ампли-

туды шумового спектра, зарегистрированного с выхода НЧ в условиях, когда на слабо нагруженный механическим поджатием образец действовала только периодическая последовательность акустических импульсов (см. рис. 9б). Полученные результаты свидетельствуют о наличии здесь сильного нелинейного взаимодействия различных акустических сигналов: периодической последовательности акустических импульсов, имитирующей последовательность АЭ сигналов, и сигнала вибрационного воздействия, который можно считать близким к синусоидальному с частотой, много меньшей характерной частоты АЭ сигнала.

В заключение обсудим результаты эксперимента (графический протокол представлен на рис. 10), позволяющие проследить воздействие вибрации на интенсивность процесса акустической эмиссии в образце с искусственной трещиной. На образец в течение длительного времени производилось воздействие механической нагрузки в виде поперечного сжатия, дозированно увеличиваемого от нулевого уровня до максимального, при котором происходило разрушение трещины. В моменты, отмеченные черными стрелочками с меткой «Н», происходило дозированное увеличение механической нагрузки, прикладываемой к образцу. Это вызывало резкое возрастание числа эмиссионных событий, что демонстрируется на рис. 10 увеличением наклона кривой счета. Затем следовал период постепенного выполаживания кривой, что можно интерпре-

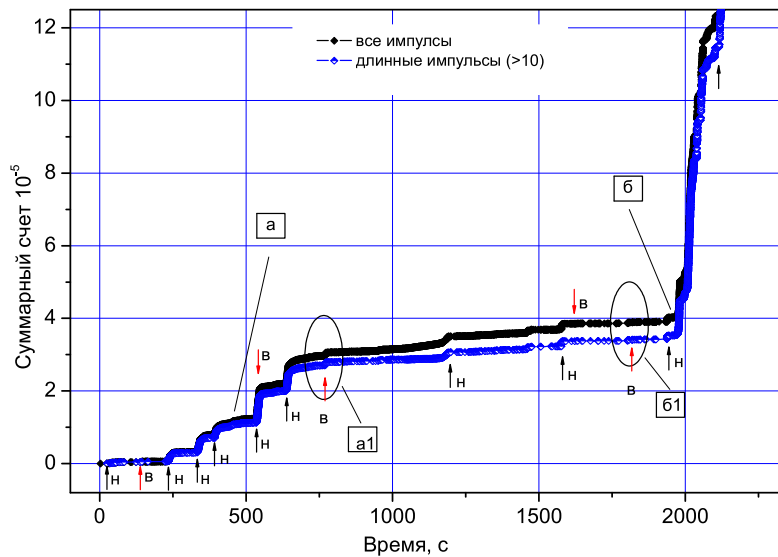


Рис. 10: График суммарного счета с накоплением по результатам обработки АЭ сигналов, зарегистрированных системой РА-НИС с помощью датчика RS150L. Стрелки с меткой «Н» указывают моменты, когда осуществлялось увеличение механической нагрузки, стрелки с меткой «В» — моменты включения и выключения вибратора

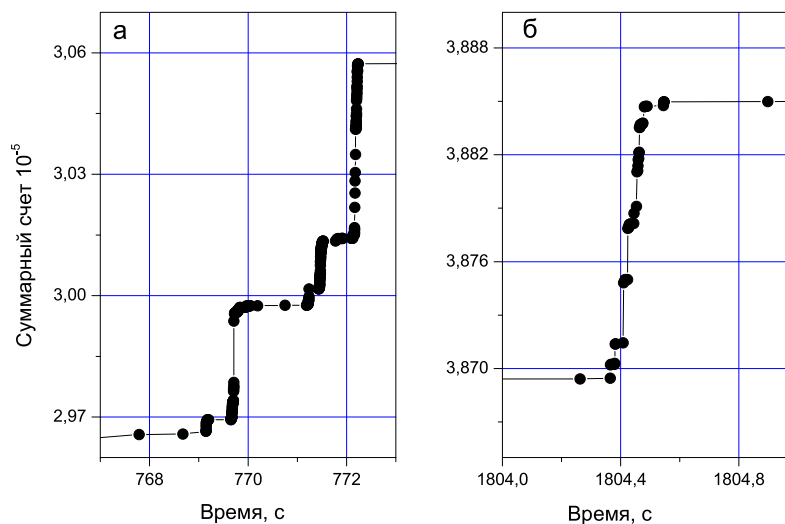


Рис. 11: Поведение графика счета общего числа эмиссионных событий в ответ на включение вибратора, соответственно, в моменты $t = 769$ с (а) и $t = 1804$ с (б)

тировать как свидетельство эффекта релаксации материала. Наконец (приблизительно через 2000 с с начала эксперимента) наблюдался резкий рост числа эмиссионных событий, что совпало по времени с моментом окончательного разлома трещины, с последующим периодом, когда эмиссионная активность полностью прекратилась. На рис. 11 показаны в увеличенном масштабе участки кривой суммарного счета, соответствующие моментам времени, в которые включали вибратор (на рис. 10 отмечены стрелочками с меткой «В» и выде-

лены овальной кривой а1 и б1). Видно, что наличие вибраций вызывает в образце, находящемся под действием механической нагрузки, дополнительный рост числа эмиссионных событий.

Спектры сигналов, зарегистрированных по НЧ каналу в процессе данного эксперимента в два момента времени (а, б) представлены на рис. 12. Спектр сигнала на рис. 12а относится к интервалу времени, когда после приложения к образцу очередной порции механической нагрузки, сопровождавшегося скачкообразным

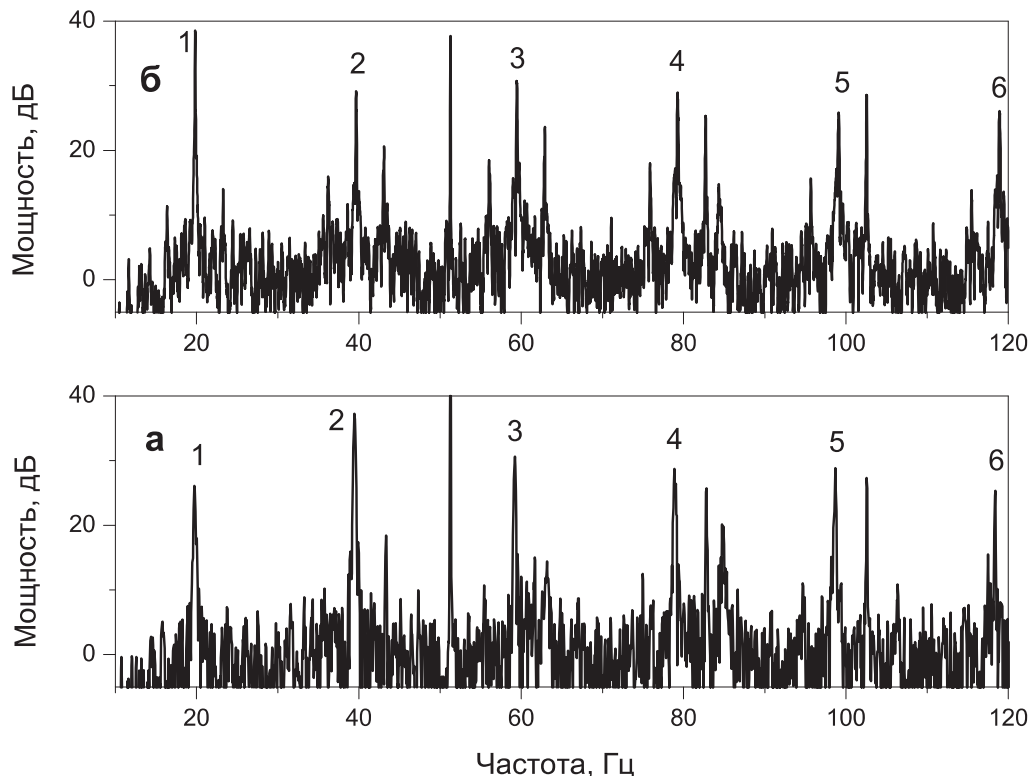


Рис. 12: Спектры сигналов, принятых по НЧ каналу в различные моменты времени, соответственно : а – 420 с с начала эксперимента (средняя скорость роста числа эмиссионных событий $dN/dt = 197$ событий/с), б – 1960 с ($dN/dt = 118$ событий/с)

повышением АЭ активности, образец находился в процессе релаксации ($t = 420$ с). Средняя скорость роста эмиссионных событий на этом участке была довольно высокой и составляла $dN/dt = 197$ событий/с. При этом в соответствующем спектре НЧ сигнала отчетливо выделяются, по крайней мере, 6 первых модуляционных гармоник с амплитудой, превышающей уровень шума более чем на 20 дБ.

Спектр, представленный на рис.12б, относится к моменту времени ($t = 1960$ с), когда значение эмиссионной активности ещё достаточно умеренно ($dN/dt = 118$ с⁻¹), но этот период непосредственно предшествует началу катастрофического события — разлому трещины — сопровождающемуся гигантским ростом числа эмиссионных событий. При этом в спектре НЧ сигнала присутствуют, по крайней мере, 10 гармоник с довольно высокой амплитудой.

Таким образом, совместный анализ интенсивности АЭ сигналов (оцениваемый нами по суммарному счету) и спектров сигналов, принятых по НЧ каналу, указывает на наличие во всех вышеприведённых временных участках процесса сильной корреляции между числом модуляционных гармоник и их амплитудой с одной стороны и интенсивностью акустоэмиссионного процесса, регистрируемого стандартными методами, с другой стороны.

Отметим, что в анализе мы производили счет АЭ импульсов, амплитуда которых превышала пороговое зна-

чение в 1,5 раза, а длительность лежала в интервале от 6 до 4800 мкс, в то время, как в стандартной АЭ методике учитываются, как правило, только относительно длинные АЭ импульсы. Число же коротких импульсов, попадающих на период вибрационного сигнала (50 мс), как показано в наших измерениях, достаточно велико. Поэтому разумно предположить, что выделяемые нами по НЧ каналу гармоники являются модуляционными частотами, возникающими в результате нелинейного взаимодействия шумоподобных сигналов АЭ, в том числе и подпорогового уровня, с гармоническим сигналом, возбуждаемым в образце вибратором. При этом, интересным фактом является то, что в интервале времени, непосредственно предшествующем разлому, мы наблюдали опережающий рост амплитуды модуляционных гармоник росту числа эмиссионных событий. Показательно в этом отношении сравнение рис. 12а и 12б. Активность процесса эмиссии в начале процесса наблюдений (рис.12а) была выше, чем на другой стадии наблюдений, перед разломом трещины (рис.12б), соответственно, 197 событий/с и 118 событий/с. Однако, нормированная амплитуда, вычисленная в расчете на одно событие и усредненная по первым десяти модуляционным гармоникам, наоборот, перед разломом трещины (рис.12б) была более чем в 2 раза выше средней амплитуды на начальном этапе наблюдений (рис.12а). Этот факт указывает на существенное увеличение глубины модуляции последовательно-

сти АЭ сигналов в момент перед разломом. Так как, по-видимому, основным механизмом взаимодействия вибрации и АЭ сигналов является контактная нелинейность на берегах трещин, естественно предположить, что увеличение глубины модуляции связано с увеличением суммарной площади поверхности трещины или группы трещин. Отсюда следует вывод: эффект модуляции АЭ сигналов под вибрационным воздействием и его существенное усиление перед разломом трещины, может служить дополнительным диагностическим признаком приближения момента разрушения объекта при его испытании или мониторинге.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследован эффект модуляции последовательности акустико-эмиссионных сигналов низкочастотной вибрацией в образце с модельной трещиной. Устройство обработки АЭ сигналов позволя-

ет выделять модуляционные гармоники в низкочастотной части спектра, кратные частоте вибрации. Предполагается, что сведения об амплитудах и количестве наблюдаемых модуляционных гармоник могут давать дополнительную информацию о состоянии трещины, не содержащуюся в данных традиционного метода АЭ контроля.

Наряду с эффектом модуляции зарегистрирован также эффект интенсификации акустико-эмиссионного процесса, происходящего при механической нагрузке, под воздействием низкочастотной вибрации. Интенсификация может быть следствием активизации под действием вибрации зарождающихся дефектов.

Наконец, экспериментально наблюдалось появление гармоник, кратных частоте вибрации при сочетании действия на образец с искусственной трещиной периодической последовательности (с частотой 1кГц) акустических импульсов и низкочастотной (20 Гц) вибрации.

- [1] *В.И. Иванов, И.Э. Власов.* Метод акустической эмиссии. Неразрушающий контроль. Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. 7 в 2 кн. Кн.1; (М.: Машиностроение, 2005). 340 с.
- [2] *Казаков В.В., Сутин А.М.* Акуст. журн. **47**, №3. С. 364. (2001).
- [3] *Зайцев В.Ю., Гусев В.Ю., Назаров В.Е., Кастаньеде Б.* Акуст. журн. Доп. выпуск. «Геофизика» **51**, С. 80. (2005).
- [4] *Kazakov V.V.* XIX Session of the Russian Acoustical

- Society. Nizhny Novgorod. September 24-28, С.247. (2007).
- [5] *Shiwa, Yoshiyu ki Furuya, Kaita Ito, Hisashi Yamawaki, Manabu Enoki.* Materials Transactions, **51**, N 8. P.1404. (2010).
- [6] Документация к системам акустикоэмиссионным «РА-НИС11», <http://www.e-mission.ru>.
- [7] *Харкевич А.А.* Спектры и анализ. (М.: Физматгиз, 1962).

The effect of low frequency vibration on acoustic emission

A. A. Dogadov, I. I. Konopatskaya^a, M. A. Mironov^b, P. A. Pyatakov^c

N.N. Andreyev Acoustics Institute, Shvernika 4, Moscow 117036, Russia
E-mail: ^a*irina.konopatskaya@mail.ru*, ^b*mironov_ma@mail.ru*, ^c*ppyatakov@mail.ru*

Results of experiments on influence of low-frequency vibration on acoustic emission (AE) are presented. Experiments were carried out on the hollow thin-walled pipe with the artificial crack which has been filled by epoxide. At joint action of mechanical pressure and low-frequency vibration the effect of amplitude modulation of AE signals was observed. Simple hardware realization of modulating component extraction is proposed. Besides the effect of intensification of AE by the influence of extraneous vibration on the sample has been experimentally registered.

PACS: 43.25.+y

Keywords: acoustic emission, vibration.

Received 02.12.2014.

Сведения об авторах

1. Догодаов Альберт Алексеевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, доцент, старший научный сотрудник.
2. Конопацкая Ирина Ивановна — старший научный сотрудник; тел.: (916) 738-73-95, e-mail: *irina.konopatskaya@mail.ru*, *ikonopatskaya@gmail.com*.
3. Миронов Михаил Арсеньевич — канд.физ.-мат.наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории; тел.: (906) 759-50-40, e-mail: *mironov_ma@mail.ru*.
4. Пятаков Павел Александрович — канд.физ.-мат.наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории; тел.: (916) 903-58-57, e-mail: *ppyatakov@mail.ru*.