

## ВЛИЯНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ИМПУЛЬСОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2019 г. Н.А. Махутов<sup>1</sup>, И.Е. Васильев<sup>2,\*</sup>, Д.В. Чернов<sup>2,\*\*</sup>, В.И. Иванов<sup>3</sup>, С.В. Елизаров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ООО «НИИ Транснефть», Россия 117186 Москва, Севастопольский пр-т, 47а

<sup>2</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Россия 101990 Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

<sup>3</sup>МНПО «Спектр», Россия 119048 Москва, ул. Усачева, 35а

<sup>4</sup>ООО «Интерюнис-ИТ», Россия 111024 Москва, шоссе Энтузиастов, 20б

E-mail: \*vie01@rambler.ru; \*\*chernovdv@inbox.ru

Поступила в редакцию 16.08.2018; после доработки 08.11.2018;  
принята к публикации 30.11.2018

С целью изучения влияния полосы пропускания цифрового фильтра на характер затухания амплитуды импульса акустической эмиссии (АЭ) и изменение групповой скорости волнового пакета в ближней зоне на расстоянии до 300 мм от источника излучения проводились исследования на многослойной панели из полимерного композитного материала (ПКМ) и пластине из алюминиевого сплава АМГ-2 толщиной 6 мм. В ходе проводимых экспериментов было установлено, что сужение полосы пропускания цифрового фильтра с 30—500 до 100—200 кГц существенным образом может сказаться на точности координатной локации источников излучения событий АЭ, находящихся вблизи от преобразователей АЭ на расстоянии, меньшем 100 мм. По мере сужения полосы пропускания цифрового фильтра и отсеечения низкочастотных и высокочастотных компонентов спектра фронт волны регистрируемого импульса становится более пологим, в результате чего возрастает РВП — разность времени прихода импульсов на преобразователи АЭ, и снижается значение вычисляемой групповой скорости волнового пакета. При этом возникающая погрешность тем больше, чем уже полоса пропускания применяемого фильтра.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, импульс АЭ, волновой пакет, амплитуда, групповая скорость, полоса пропускания, цифровой фильтр, частотная фильтрация, порог дискриминации, композитная панель.

DOI:10.1134/S0130308219030023

### ВВЕДЕНИЕ

Распространяющийся в анизотропной диспергирующей среде композитного материала импульс АЭ представляет собой волновой пакет интерферирующих продольных, поперечных, сдвиговых и поверхностных мод волн, групповая скорость, форма осциллограммы и спектр которого изменяются по мере удаления от источника. Каждая волновая компонента имеет свою скорость распространения волны, несущую частоту и фазу, а, следовательно, обладает свойственным ей максимумом в волновом пакете. Поэтому определение координат источников излучения при помощи стандартного алгоритма локации по разности времени прихода импульса АЭ на преобразователи локационной решетки при пороговом способе регистрации сигналов, когда амплитуда приходящего сигнала должна превысить уровень, установленного порогового напряжения ( $u_{th}$ ), может привести к существенным погрешностям. Особенно погрешность возрастает, когда для отделения механических и электромагнитных шумов от «полезных» сигналов, возникающих в процессе деградации и разрушения структуры композитного материала, применяют цифровые фильтры с урезанной полосой пропускания.

С целью изучения влияния частотного диапазона фильтрации сигнала на характер затухания амплитуды и изменение групповой скорости акустической волны импульса АЭ на панели из композитного материала и пластине из сплава АМГ-2 в ИМАШ РАН были проведены экспериментальные исследования, рассмотренные в настоящей статье.

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ДИСПЕРГИРУЮЩЕЙ СРЕДЕ

Согласно принципа Гюйгенса, каждая точка тела, вовлеченная в волновое движение, становится источником новой элементарной волны. Возникающий в результате наложения множества элементарных волн волновой фронт представляет собой геометрическое место частиц, смещающихся с одинаковой скоростью перпендикулярно к направлению волнового вектора.

У поверхностных и пространственных волн, распространяющихся из точечного центра возбуждения, векторы направлены радиально, а волновые фронты представляют собой окружности и сферы. В случае плоского или удаленного источника возникают плоские волны, в которых волно-

вые векторы параллельны, а волновые фронты представляют собой плоскости. Расстояние между соседними волновыми фронтами, колеблющимися с одинаковой фазой, представляет собой длину волны  $\lambda$ . Если плоскую волну представить в виде гармонической функции

$$u(r; \tau) = \sin [2\pi \cdot (r - c \cdot \tau) / \lambda], \quad (1)$$

которая отражает профиль волны в момент  $\tau$  на расстоянии  $r$  вдоль волнового фронта, движущегося с постоянной скоростью  $c$ , то видеорегистратор, перемещаемый с той же скоростью, будет фиксировать одну и ту же фазу волны [1]

$$\varphi = 2\pi \cdot (r - c \cdot \tau) / \lambda = \text{const}, \quad (2)$$

о чем и свидетельствует термин «фазовая скорость». Если в поперечных волнах направление скорости движения частиц перпендикулярно направлению волнового вектора  $k = 2\pi/\lambda$ , то в продольных волнах направление скорости движения частиц и волнового вектора совпадает. Распространение продольных волн сопровождается попеременным чередованием зон сгущения и разрежения частиц, тогда как в поперечных волнах происходит последовательное чередование горбов и впадин.

При математическом моделировании волну импульса АЭ удобно рассматривать как интеграл Фурье для ряда монохроматических синусоидальных составляющих — нормальных мод, которые имеют свою фазовую скорость распространения, длину и частоту колебаний. Разложение негармонических колебаний на синусоидальные гармоники представляет операцию разложения импульса по нормальным модам. Волновой анализ состоит в нахождении решений волновых уравнений для смещений, возникающих в упругой среде (волноводе), гармонически изменяющихся во времени и удовлетворяющих определенным граничным условиям. При анализе дисперсии необходимо определить изменения фазовых скоростей нормальных мод импульса АЭ в зависимости от длины волны или частоты колебаний среды.

В тонкостенной пластине или оболочке источники АЭ возбуждают продольные, поперечные и поверхностные смещения упругой среды, которые распространяются в виде симметричных и антисимметричных мод волн Лэмба [5—10], каждая из которых при данных конкретных условиях имеет свою фазовую скорость, частоту, волновое число. Решения волновых уравнений для фазовых скоростей различных мод симметричных (3) и антисимметричных (4) волн Лэмба, полученные в характеристической форме:

$$\frac{\text{tg}(\beta \cdot h)}{\text{tg}(\xi \cdot h)} = -\frac{4 \cdot k^2 \cdot \beta \cdot \xi}{(k^2 - \beta^2)^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\text{tg}(\beta \cdot h)}{\text{tg}(\xi \cdot h)} = -\frac{(k^2 - \beta^2)^2}{4 \cdot k^2 \cdot \beta \cdot \xi}, \quad (4)$$

для безразмерных квадратичных параметров:  $\beta^2 = k^2(1 - \frac{c^2}{c_l^2})$  и  $\xi^2 = k^2(1 - \frac{c^2}{c_t^2})$ , где  $c_l$  и  $c_t$  — скорости

продольной и поперечной волн в безграничной среде, могут быть найдены с применением функций Бесселя [5—7]. Результаты таких решений отображаются на графиках в виде дисперсионных кривых, которые представляют зависимости соотношений фазовых скоростей различных мод  $c/c_p$ ,  $c/c_t$  от параметров  $h/\lambda$  или  $h/k$ , где  $h$  — толщина пластины.

Как показывает анализ дисперсионных кривых, представленных в публикациях [3—10], дисперсия фазовой скорости возникает, лишь когда толщина диспергирующей среды становится сопоставима с длиной распространяющихся волн, при соотношении  $h/\lambda = 0,1—2,0$ . При соотношении  $h/\lambda < 0,1$  напряженное состояние по толщине пластины становится однородным и упругие волны распространяются с постоянной фазовой скоростью, близкой к скорости продольной волны в безграничной среде. В случае, если длина волны существенно меньше толщины пластины  $h/\lambda > 2,0$ , напряжения по толщине пластины (за исключением поверхностного слоя) будут распределены достаточно равномерно. При этом в пластине с обеих сторон возникнут поверхностные волны Релея, в которых дисперсия отсутствует. Таким образом, дисперсия фазовой скорости мод нормальных волн в тонкостенных пластинах и оболочках возникает лишь в условиях неравномерного распределения напряжений в поперечном сечении, когда соотношение толщины пластины к длине волны составляет  $h/\lambda = 0,1—2,0$ .

При распространении импульса АЭ в диспергирующей среде в каждый момент времени возникает цуг интерферирующих между собой мод волн. По мере удаления импульса АЭ от источни-

ка излучения происходит рассеивание мод волнового пакета, сопровождаемое изменением формы импульса, фазы и скорости интерферирующих компонентов. Энергия волн Лэмба в основном локализована в сгустках основных антисимметричных ( $A_0$ ) и симметричных ( $S_0$ ) мод волнового пакета и переносится групповой скоростью, отражающей процесс передачи энергии интерферирующих мод, длины волн которых близки или совпадают, и представляет собой скорость перемещения огибающей волнового пакета [1, 9]

$$V_g = d\omega/dk = c^2 \cdot k/\omega. \quad (5)$$

В общем виде связь между групповой и фазовой скоростями может быть представлена следующим образом [3—7]:

$$V_g = c + k \cdot (dV_f/dk) \text{ или } V_g = c - \lambda \cdot (dV_f/d\lambda) \text{ — формула Релея.} \quad (6)$$

В диспергирующей среде фиксированное значение групповой скорости имеет ограниченный временной интервал. При распространении импульса в многослойной структуре пакета композитной панели в результате многократных отражений и преломлений на границах скрепления слоев форма цуга интерферирующих волн существенно изменяется. На осциллограммах рис. 1 показано

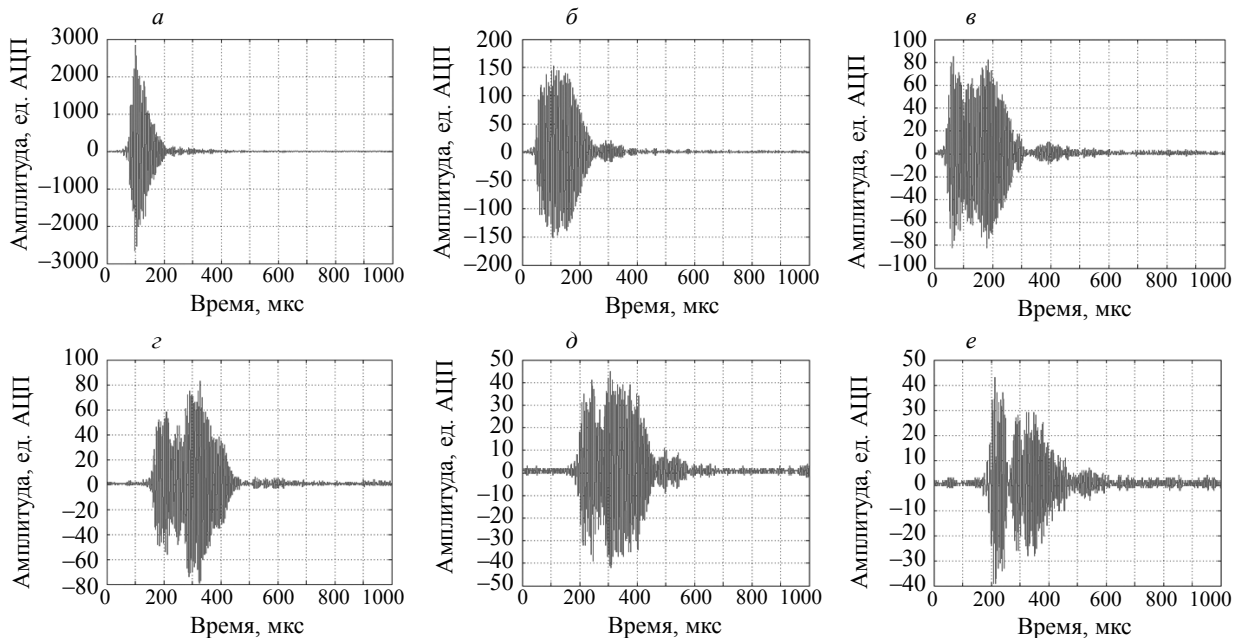


Рис. 1. Осциллограммы импульса АЭ, зарегистрированного ПАЭ № 1 (а) и № 2 при  $\Delta L_1 = 100$  мм (б),  $\Delta L_2 = 200$  мм (в),  $\Delta L_3 = 300$  мм (г),  $\Delta L_4 = 400$  мм (д),  $\Delta L_5 = 500$  мм (е).

изменение формы волнового пакета импульса АЭ в панели многослойного композита 6 мм по мере удаления от источника излучения, в качестве которого использовался широкополосный преобразователь SE-1000Н, производства фирмы «Dunegan». Приемниками импульсов АЭ служили резонансные преобразователи R15α фирмы «Mistras». Для регистрации и обработки данных АЭ использовалась многопараметрическая восьмиканальная система A-line 32D производства ООО «Интерюнис-ИТ». Схема расположения излучателя сигналов и приемников импульсов АЭ — ПАЭ № 1 и № 2 на композитной панели показана на рис. 2.

Как следует из рисунка, по мере удаления от источника излучения в результате процессов диссипации энергии и реверберации интерферирующих мод волн происходит изменение как формы волны, так и ее групповой скорости, представляющей собой скорость перемещения огибающей, сформировавшегося на данный момент времени в конкретной точке среды волнового пакета. Начальный компактный импульс расплывается и разделяется на несколько отдельных цугов, скорость которых определяется динамическими свойствами упругой среды (волновода). При этом каждая волновая компонента имеет свою скорость распространения, несущую частоту

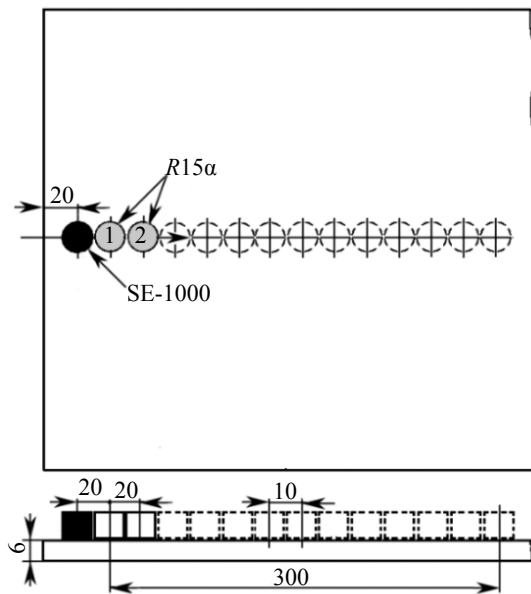


Рис. 2. Схема расположения излучателя импульсов — SE-1000 и ПАЭ № 1 и № 2 — R15a при измерении групповой скорости и затухания амплитуды сигналов АЭ на композитной панели и металлической пластине в интервале  $\Delta L = 20\text{—}300$  мм.

и фазу, следовательно, обладает свойственным ей максимумом в волновом пакете. Таким образом, единой скорости распространения упругих волн в диспергирующей среде волновода фактически не существует.

Преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) регистрируют моменты прихода различных мод в зависимости от того, какая из них имеет большую скорость нарастания переднего фронта и амплитуду. Это значительно осложняет определение времени прихода сигналов АЭ на преобразователи локационной решетки, из-за чего планарная локация, осуществляемая, как правило, по разности времен прихода импульса на преобразователи, затруднена и приводит к существенным погрешностям при определении координат источников сигналов.

Как правило, основанием для записи сигнала является регистрация ПАЭ момента превышения амплитудой импульса АЭ заданного уровня порога дискриминации сигналов  $u_{th}$ . Порог устанавливается для локационных групп ПАЭ в зависимости от уровня шумов (помех), регистрируемых при настройке системы АЭ в условиях испытания или эксплуатации исследуемого объекта. Преобразователи АЭ позволяют регистрировать не только приход разных мод упругих волн, но и разных фаз этих мод в зависимости от частотного диапазона  $\Delta f$  применяемого фильтра и уровня порога  $u_{th}$ , что также влияет на значение вычисляемой скорости групповой волны регистрируемого импульса.

Современные методики определения координат источников событий АЭ основаны на статистической обработке регистрируемых локационных импульсов с использованием специально разработанного программного обеспечения. Например, в [11—13] приведено построение карты значений РВП, полученных при излучении акустических сигналов на поверхности пластины из ПКМ с помощью имитатора Су-Нильсена. Такой подход позволяет определить местоположение источника АЭ по известным значениям РВП без использования дополнительных измерений параметра групповой скорости. В публикации [14] координаты источников событий АЭ уточняют с применением функции Гаусса на основании зарегистрированных значений РВП. В ходе проводимых тестовых испытаний оценивается разброс значений РВП и рассчитывается параметр ошибки, применяемый для обучения системы АЭ алгоритму локации. Необходимо отметить, что приведенные выше методики не учитывают дисперсионные свойства акустической среды, спектральные характеристики используемых преобразователей и цифровых фильтров системы АЭ, влияние которых существенным образом может сказаться на результатах проводимых измерений.

## ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В современном авиастроении активно используются элементы конструкций из алюминиевых сплавов и композитных материалов, а также сэндвич-панелей и ПКМ с комбинированной структурой, включающей ячеистую структуру из алюминиевых сот с полимерным наполнителем. Поэтому изучение распространения акустических волн в этих типах конструкционных материалов с учетом явления дисперсии представляет особый интерес на данном этапе развития метода акустической эмиссии.

Исследования влияния частотного диапазона фильтрации сигнала на характер затухания амплитуды и изменение величины групповой скорости импульса АЭ проводились в ближней зоне от источника излучения на расстоянии от 20 до 300 мм на многослойной панели из полимерного композитного материала (ПКМ) толщиной 6 мм с габаритными размерами 960×600 мм, полученной по технологии инфузионной пропитки слоев, и пластине из алюминиевого сплава АМГ-2 толщиной 6 мм с габаритными размерами 1200×800 мм. Для генерации импульсов АЭ применялся электронный имитатор ООО «Интерюнис», а в качестве излучателя — широкополосный преоб-

разователь SE-1000 фирмы «Dunegan». Приемниками импульсов АЭ служили резонансные преобразователи R15α фирмы «Mistras». Для регистрации и обработки данных АЭ использовалась многопараметрическая восьмиканальная система A-line 32D производства ООО «Интерюнис-ИТ». Схема расположения излучателя сигналов — преобразователя SE-1000 и приемников импульсов АЭ — преобразователей R15α (ПАЭ № 1 и № 2) на объектах исследования в ходе проводимых экспериментов приведена на рис. 2.

Ближайший к излучателю преобразователь на схеме обозначен, как ПАЭ № 1, удаленный — ПАЭ № 2. Для крепления излучателя — преобразователя SE-1000 и приемника — ПАЭ № 1 к объектам исследования использовались стальные трубины. Перемещаемый преобразователь ПАЭ № 2 прижимался к поверхности исследуемых объектов калиброванным грузом весом 20 Н, что позволяло создать стабильный уровень внешнего давления порядка 0,15 МПа. Для создания надежного акустического контакта между ПАЭ и поверхностью исследуемой пластины использовалась смазка «Литол».

В ходе экспериментов минимальное расстояние между ПАЭ № 1 и № 2 составляло 20, максимальное — 300 мм. Такой выбор границ интервала проводимых измерений обусловлен тем обстоятельством, что максимальный размер локационной решетки при планарной локации событий АЭ в элементах конструкций из композитных материалов, при котором возможна надежная локация источников АЭ составляет не более 300 мм. При дальнейшем увеличении базового размера ( $L$ ) локационной решетки, количество регистрируемых событий АЭ резко сокращается (практически на порядок), а при размерах  $L > 500$  мм источники сигналов АЭ практически не регистрируются. К тому же при таком удалении ПАЭ от источника излучения на расстояниях  $L > 300$  мм параметры акустической волны изменяются в значительно меньшей степени, чем в интервале 20—300 мм.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились с использованием цифровых фильтров, полоса пропускания которых  $\Delta f$  составляла: 30—100, 100—200, 100—300, 150—300, 200—500 кГц и 30—500 кГц. Согласно существующих нормативных правил контроля АЭ (см. ПБ 03-593-03), устанавливаемый порог дискриминации  $u_{th}$  должен превышать максимальную амплитуду шумовых сигналов не менее, чем на 6 дБ. В ходе тестирования условий проведения испытаний максимальная амплитуда помех составляла 36 дБ, а максимальная амплитуда отраженных импульсов достигала 40 дБ. Поэтому для исключения влияния помех и отраженных импульсов на результаты проводимых экспериментальных исследований уровень порога дискриминации был повышен до 42 дБ.

На рис. 3 по данным измерения разности прихода импульсов (РВИ) на преобразователи построены графики изменения групповой скорости акустической волны ( $V_g$ ) при пошаговом удалении ПАЭ № 2 от ПАЭ № 1 через 10 мм в интервале  $\Delta L = 20$ —300 мм при использовании цифровых фильтров с полосой пропускания  $\Delta f$ : 30—100 (1), 100—200 (2), 100—300 (3), 150—300 (4), 200—500 (5), 30—500 кГц (6), полученные на панели из ПКМ (а) и пластине из алюминиевого сплава АМГ-2 (б) толщиной 6 мм.

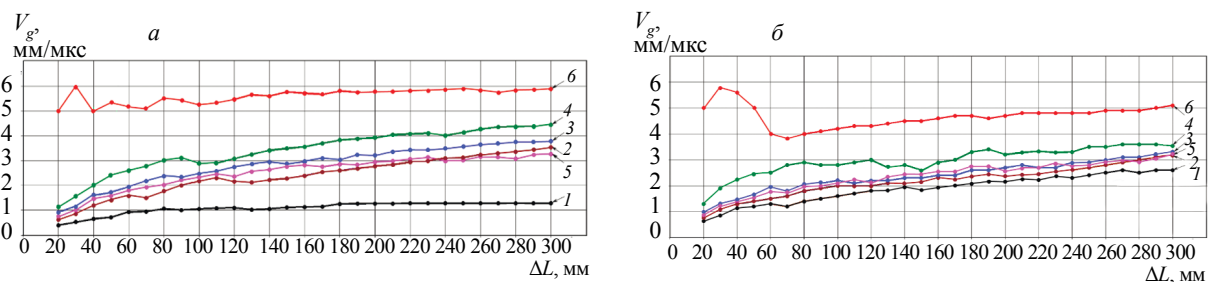


Рис. 3. Сопоставление изменения групповых скоростей акустической волны ( $V_g$ ) при пошаговом удалении ПАЭ № 2 от ПАЭ № 1 через 10 мм в интервале  $\Delta L = 20$ —300 мм, зарегистрированные при использовании фильтров с полосой пропускания  $\Delta f$ : 30—100 (1), 100—200 (2), 100—300 (3), 150—300 (4), 200—500 (5), 30—500 кГц (6) в панели из ПКМ (а) и пластине из сплава АМГ-2 (б).

Как следует из графиков рис. 3, характер изменения групповых скоростей на композитной панели и металлической пластине в интервале 20—300 мм достаточно похож для всех сопоставляемых фильтров. Наибольшие колебания групповой скорости возникают в ближней зоне от источника излучения, когда расстояние между преобразователями изменяется от 20 до 80 мм.

Такой характер изменения скорости волны импульсов АЭ был свойственен для всех фильтров, использованных при проведении измерений, как на панели из ПКМ, так и на пластине из сплава АМГ-2. При увеличении расстояния между ПАЭ свыше 100 мм приращение РВП и изменение групповой скорости импульса АЭ происходит более равномерно. Так, для фильтров при максимальной полосе пропускания сигналов  $\Delta f = 30\text{—}500$  кГц в интервале 100—300 мм регистрировалось достаточно стабильное приращение РВП, составляющее примерно 2 мкс на каждые 10 мм приращения расстояния между ПАЭ. При этом среднее значение групповой скорости в интервале  $\Delta L = 100\text{—}300$  мм составляло  $V_g = 5,76$  мм/мкс на панели из ПКМ и  $V_g = 4,65$  мм/мкс на пластине из АМГ-2. По мере сужения частотного диапазона цифровых фильтров, как следует из рис. 3, регистрировался рост РВП и снижение значения групповой скорости при увеличении расстояния между ПАЭ в интервале  $\Delta L = 20\text{—}300$  мм. Наибольшие изменения групповой скорости при увеличении расстояния между ПАЭ от 20 до 300 мм, практически в пять раз, регистрировались при использовании фильтра с полосой пропускания сигналов  $\Delta f = 100\text{—}200$  кГц. На фоне представленных результатов исследования, полученных для фильтров с урезанной полосой пропускания сигналов, на графиках рис. 3 выделяются кривые 4 изменения групповой скорости импульса АЭ, полученные при использовании фильтра с полосой пропускания  $\Delta f = 150\text{—}300$  кГц. Характер изменения этих кривых также, как и уровень значений групповых скоростей в интервале  $\Delta L = 80\text{—}300$  мм, наиболее близок к кривым 6, полученным при использовании фильтров с полосой пропускания импульсов  $\Delta f = 30\text{—}500$  кГц. Максимальные отклонения групповой скорости в интервале 100—300 мм не превышали 23 % относительно средних значений, составляющих в панели из ПКМ  $V_g = 3,87$  и  $3,14$  мм/мкс в пластине из сплава АМГ-2.

Применение фильтров с более узкой полосой пропускания приводит к урезанию спектра, в результате чего высокочастотные и низкочастотные моды не регистрируются, энергия сигнала снижается, а фронт импульса АЭ становится более пологим. Поэтому при пороговом способе, когда запись регистрации сигнала происходит при превышении фронтом импульса уровня порога  $u_{th}$ , наблюдается запаздывание момента его регистрации, что приводит к возрастанию РВП — разности времени прихода импульсов на преобразователи АЭ, следовательно, снижению вычисляемой скорости волны. В наибольшей степени влияние эффекта сглаживания волны для фильтров с урезанной полосой пропускания сигналов, как видно из графиков рис. 3, проявляется в ближней зоне от излучателя при  $\Delta L = 20\text{—}80$  мм. Такая особенность регистрации сигналов АЭ с урезанным спектром хорошо просматривается на осциллограммах рис. 4, где сопоставлены моменты пересечения фронтом нарастающей амплитуды импульса уровня порога дискриминации  $u_{th}$  для сигналов, зарегистрированных ПАЭ № 2 на расстоянии 100 мм от ПАЭ № 1 при полосе пропускания фильтра  $\Delta f: 30\text{—}500$  (а), 100—200 кГц (б) на пластине из сплава АМГ-2.

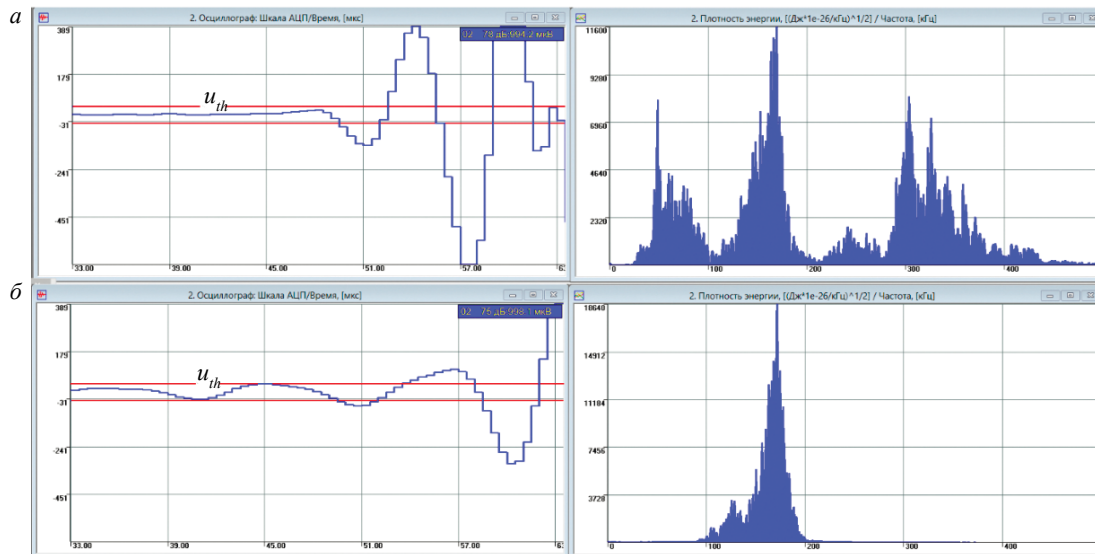


Рис. 4. Моменты превышения фронтом нарастающей амплитуды импульса АЭ уровня порога дискриминации сигналов ( $u_{th}$ ), регистрируемые ПАЭ № 2 на расстоянии 100 мм от ПАЭ № 1 при полосе пропускания фильтра  $\Delta f: 30\text{—}500$  кГц (а), 100—200 кГц (б) на пластине из сплава АМГ-2.

Возникающая погрешность при измерении групповой скорости волны тем больше, чем уже полоса пропускания применяемого фильтра. Так, для фильтра с полосой пропускания сигналов  $\Delta f = 100\text{—}200$  кГц групповая скорость акустической волны, регистрируемая вблизи излучателя на расстоянии 20—80 мм от ПАЭ № 1, отличалась от скорости  $V_g$ , регистрируемой на расстоянии 240—300 мм, в 3-5 раз. Причем такие результаты были получены не только на панели из ПКМ, но и пластине из сплава АМГ-2.

В ходе проведенных экспериментов при разности потенциалов  $U = 60$  В, подаваемой электронным имитатором на излучатель SE-1000, уровень максимальной амплитуды, регистрируемый ПАЭ № 1, при использовании применяемых фильтров изменялся в пределах 75—90 дБ. На рис. 5 приведены кривые изменения максимальной амплитуды импульса ( $u_m$ ), регистрируемые ПАЭ № 2 при пошаговом удалении от ПАЭ № 1 через 10 мм в интервале  $\Delta L = 20\text{—}300$  мм, при использовании цифровых фильтров с полосой пропускания сигналов  $\Delta f$ : 30—100 (1), 100—200 (2), 100—300 (3), 150—300 (4), 200—500 (5), 30—500 кГц (6).

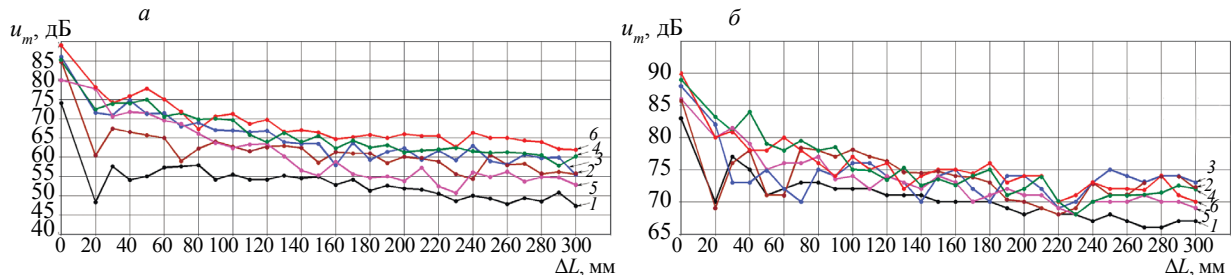


Рис. 5. Сопоставление изменения максимальной амплитуды импульса ( $u_m$ ), регистрируемые ПАЭ № 2 при пошаговом удалении от ПАЭ № 1 через 10 мм в интервале  $\Delta L = 20\text{—}300$  мм, при использовании фильтров с полосой пропускания  $\Delta f$ : 30—100 (1), 100—200 (2), 100—300 (3), 150—300 (4), 200—500 (5), 30—500 кГц (6) в панели из ПКМ (а) и пластине из сплава АМГ-2 (б).

Для всех исследованных частотных диапазонов по мере удаления ПАЭ № 2 от ПАЭ № 1 в интервале  $\Delta L = 20\text{—}300$  мм наблюдалось снижение максимальной амплитуды регистрируемого импульса. Как следует из графиков рис. 5, максимальное падение амплитуды регистрировалось в первом измерении на расстоянии 20 мм от ПАЭ № 1. На этом участке максимальное падение амплитуды акустической волны, достигающее  $\Delta u_m = 25$  дБ на композитной панели и  $\Delta u_m = 15$  дБ на пластине из сплава АМГ-2, регистрировалось для фильтров с полосой пропускания сигналов  $\Delta f$ : 30—100 и 100—200 кГц. Минимальное затухание амплитуды сигнала, не превышающее  $\Delta u_m = 5\text{—}7$  дБ на этом участке, регистрировалось при полосе пропускания  $\Delta f = 200\text{—}500$  кГц.

Характер затухания амплитуды импульсов АЭ по мере удаления ПАЭ № 2 от ПАЭ № 1 в интервале 20—300 мм на композитной панели и металлической пластине достаточно похож для всех сопоставляемых фильтров. Максимальное затухание амплитуды сигналов в интервале  $\Delta L = 20\text{—}300$  мм, как видно из графиков на рис. 5, составляло порядка  $\Delta u_m = 25\text{—}35$  дБ на композитной панели и  $\Delta u_m = 15\text{—}20$  дБ на пластине из сплава АМГ-2.

## ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования показали зависимость значений вычисляемой групповой скорости волнового пакета от полосы пропускания цифровых фильтров в ближней зоне от источника излучения в интервале  $\Delta L = 20\text{—}300$  мм. В результате сужения полосы пропускания происходит урезание спектральных характеристик акустических сигналов, вследствие чего передний фронт импульса АЭ становится более пологим. Поэтому при использовании порогового метода, когда запись сигнала происходит при превышении амплитудой импульса порога дискриминации  $u_{th}$ , наблюдается запаздывание момента регистрации, что приводит к росту РВП и снижению значения групповой скорости волны.

2. Как показали экспериментальные исследования, погрешность построения планарной локации источников АЭ напрямую зависит от спектральных характеристик используемых фильтров. При сужении полосы пропускания частотных фильтров до значения  $\Delta f = 100\text{—}200$  кГц уровень погрешности может достигать 20—25 % относительно базового размера локационной решетки, то есть при размере антенной решетки  $L = 300$  мм погрешность измерения составит 60—75 мм от истинного значения.

3. Сужение полосы пропускания цифровых фильтров оказывает существенное влияние не только на значения групповой скорости распространения акустических сигналов, но и на характер изменения амплитуды импульсов АЭ в зависимости от координаты излучения. Согласно результатам проведенного исследования, наиболее интенсивное падение амплитуды наблюдается в условно ближней зоне на расстоянии 20 мм от источника акустических сигналов. Причем наибольшая величина падения амплитуды, достигающая  $\Delta u_m = 25$  дБ, регистрировалась при использовании фильтров с наиболее узкой полосой пропускания сигналов  $\Delta f$ : 30—100 и 100—200 кГц. Для всех остальных используемых фильтров падение амплитуды импульсов АЭ в этой зоне не превышало  $\Delta u_m = 10$ —15 дБ. Следует отметить, что в металлической пластине затухание амплитуды импульсов АЭ, зарегистрированных при тестировании всех сопоставляемых фильтров в интервале  $\Delta L = 20$ —300 мм, происходило менее интенсивно, чем в композитной панели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения рассмотренной выше экспериментальной работы возникли дополнительные вопросы, относящиеся к выбору ПАЭ для проведения исследований при мониторинге АЭ элементов конструкций из ПКМ, определению РВП между преобразователями АЭ в ближней зоне от источника излучения при  $\Delta L \leq 100$  мм, выбору оптимального частотного диапазона фильтрации сигнала АЭ, пороговому критерию регистрации импульсов АЭ.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методики, алгоритмов и программных продуктов, обеспечивающих достижение требуемой точности локации источников событий АЭ в элементах конструкций из ПКМ, допускающей погрешность не более 10 % от базового размера локационной решетки. Их актуальность обусловлена отсутствием нормативных документов, методических разработок и недостаточной теоретической проработкой проведения контроля АЭ изделий из композиционных материалов.

Главным недостатком стандартного алгоритма локации является отсутствие взаимосвязей между триангуляционным методом определения координаты источника АЭ и процессами распространения акустических сигналов в многослойных слоистоструктурированных пакетах ПКМ, используемых при изготовлении панелей и оболочек с регулярными или локальными усилениями жесткости тонкостенных элементов конструкций. Основные проблемы диагностики АЭ таких изделий связаны с пороговым способом регистрации импульсов АЭ, быстрым затуханием амплитуды акустического сигнала в композитных материалах, неравномерным изменением групповой скорости волнового пакета при нахождении источника АЭ в ближней зоне от ПАЭ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 14-19-00776.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карлов Н.В., Кириченко Н.А. Колебания, волны, структуры. М.: Изд-во Физматлит, 2003. 496 с.
2. Иванов В.И., Барат В.А. Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Изд-во «Спектр», 2017. 368 с.
3. Kolsky H. Stress waves in solids. Oxford: Oxford University Press, 1953. P. 192.
4. Davies R.M. Stress waves in solids. Cambridge: Cambridge University Press, 1959. P. 103.
5. Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Релея и Лэмба в технике. М.: Изд-во «Наука», 1966. 169 с.
6. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Изд-во «Наука», 1981. 287 с.
7. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во «Наука», 1973. С. 343.
8. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонические колебания и волны в упругих телах. Киев: Наукова думка, 1981. 283 с.
9. Rose J.L. Ultrasonic Waves in Solid Media. New York: Cambridge University Press, 1999. P. 296.
10. Zhongqing Su, Lin Ye, Ye Lu. Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: (A review) // Journal of Sound and Vibration. 2006. V. 295. P. 753—780.
11. Eaton M.J., Pullin R., Holford K.M. Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. V. 43. № 6. P. 856—863.
12. Baxter M.G., Pullin R., Holford K.M., Evans S.L. Delta T source location for acoustic emission // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. V. 21. № 3. P. 1512—1520.
13. Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M. J., Pullin R. Acoustic emission source location in complex structures using full automatic delta T mapping technique // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. V. 72—73. P. 513—524.
14. Hensman J., Mills R., Pierce S.G., Worden K., Eaton M. Locating acoustic emission sources in complex structures using Gaussian processes // Mechanical Systems and Signal Processing. 2010. V. 24. № 1. P. 211—223.