

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛНОВОГО ПАКЕТА В КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

© 2020 г. Ю. Г. Матвиенко^а, В. И. Иванов^б, И. Е. Васильев^а,
Д. В. Чернов^{а,*}, И. В. Мищенко^с

^а Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., 4

^б НИИИИ МНПО “Спектр”
Россия, Москва, 119048, ул. Усачева, 35, стр. 1

^с Национальный исследовательский университет “МЭИ”
Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

*e-mail: chernovdv@inbox.ru

Поступила в редакцию 02.09.2019 г.

После доработки 17.09.2019 г.

Принята к публикации 25.09.2019 г.

Изучены причины колебаний скорости распространения акустического импульса в композитной пластине при изменении расстояния между источником излучения и приемным преобразователем от 30 до 300 мм. Разработаны способы минимизации этих колебаний путем уменьшения влияния высокочастотных мод волнового пакета на момент регистрации импульсов преобразователями акустической эмиссии. Применение последних при определении скорости распространения волнового пакета способствовало снижению флуктуаций и стабилизации замеров в зонах диагностики композитной пластины. Используемые способы позволили более чем на 30% снизить колебания скорости по сравнению со стандартной методикой расчета.

DOI: 10.31857/S0032816220010231

ВВЕДЕНИЕ

Своевременное и точное определение координат источников акустической эмиссии (а.э.), генерируемой динамической перестройкой структурных связей конструкционного материала в процессе его деформации в местах развивающихся дефектов и повреждений, находящихся в зонах концентраторов напряжений несущих элементов конструкций, является чрезвычайно важной задачей.

Расчет координат источника а.э.-событий осуществляется по двум параметрам: разности времен прихода (р.в.п.) акустического сигнала на преобразователи а.э. антенной решетки и скорости распространения V_g волнового пакета в стенке исследуемого изделия [1]. Согласно нормативному документу [2], значение V_g определяется из предварительных испытаний, а значение порога дискриминации импульсов а.э. (u_{th}) – из условия $u_{th} \geq u_n + 6$ дБ, где u_n – максимальный уровень механических и электромагнитных шумов.

Одной из основных проблем, возникающих при построении координатной локации, является высокая активность шумовых сигналов. Корректная настройка параметров а.э.-системы, в том

числе выбор частотных характеристик цифровых фильтров [3], исключает влияние большей части механических и электромагнитных помех на результаты а.э.-диагностики [4, 5], что повышает вероятность выявления развивающихся повреждений.

На результаты вычисления координат а.э.-событий существенное влияние оказывает корректность определения параметра V_g . Стандартный алгоритм расчета скорости распространения акустического сигнала не учитывает такие факторы, как уровень диссипации энергии а.э.-импульса в композитном материале, геометрию изделия, а также явления дисперсии, интерференции и реверберации.

В результате совместного воздействия указанных факторов импульс а.э. в процессе прохождения акустического канала от источника до приемного преобразователя “расплывается”, трансформируясь в волновой пакет различных мод, каждая из которых имеет свою частоту и скорость распространения в стенке объекта [1]. Изменение формы, времени нарастания и амплитуды осциллирующего импульса а.э., регистрация которого осуществляется пороговым методом, приводит к

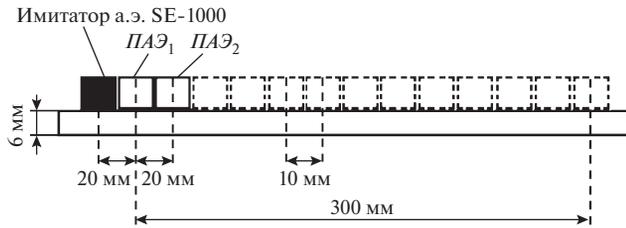


Рис. 1. Схема расположения источника генерации акустических сигналов (преобразователя SE-1000) и приемных преобразователей R15α ($ПАЭ_1$ и $ПАЭ_2$) при определении скорости распространения а.э.-импульса.

повышению погрешности при расчете параметра V_g , а следовательно, к снижению точности координатной локации источников а.э.-событий.

Одним из возможных способов повышения точности локации источников а.э.-событий является применение методики Δt -mapping [6–8]. Эта методика предусматривает предварительное тестирование исследуемого элемента изделия с применением имитатора Су-Нильсена. По результатам такого тестирования строится корреляционная зависимость, связывающая значения р.в.п. и координат источников а.э.-событий. При этом для корректной работы такого алгоритма и достижения требуемой точности локации на этапе предварительного тестирования необходимо накопить большой объем экспериментальных данных, что существенно повышает трудоемкость и увеличивает время а.э.-контроля.

Задача данной работы заключалась в изучении причин значительных колебаний скорости распространения волнового пакета в ближней зоне от источника излучения при пороговом методе регистрации импульсов преобразователями а.э., а также в разработке способов их минимизации при проведении а.э.-диагностики изделий из композитных материалов.

МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на панели размером $960 \times 600 \times 6$ мм из полимерного композитного материала (ПКМ), полученной по технологии вакуумной инфузии. На рис. 1 показана схема расположения источника а.э.-импульсов и двух приемных преобразователей ($ПАЭ_1$ и $ПАЭ_2$), используемая при измерении времени прихода импульсов на $ПАЭ$ и вычислении скорости распространения а.э.-импульса в композитной панели.

В качестве источника излучения а.э.-импульсов использовался электронный имитатор “Интерюнис” с широкополосным преобразователем SE-1000 фирмы “Dunegan”, имеющий усеченный конический излучатель диаметром 2 мм. Прием-

никами а.э.-импульсов служили резонансные преобразователи R15α фирмы “Mistras”. Сбор и обработка регистрируемых а.э.-импульсов осуществлялись с помощью восьмиканальной системы A-line 32D производства ООО “ИнтерюнисИТ”.

В ходе проводимых экспериментов источник излучения а.э.-импульсов и приемный преобразователь $ПАЭ_1$ неподвижно закрепляли на поверхности панели, а $ПАЭ_2$ смещали относительно последнего на 10 мм в каждом новом измерении р.в.п. При измерениях параметра Δt $ПАЭ_2$ прижимали к поверхности композитной пластины грузом весом 20 Н. Исследования проводили при изменении расстояния между $ПАЭ_1$ и $ПАЭ_2$ в интервале от 20 до 300 мм. Такой выбор верхней границы интервала проводимых измерений обусловлен тем, что наибольший размер локационной решетки в условиях проведения планарной локации а.э.-событий в изделиях из ПКМ не превышает 300 мм [3]. При дальнейшем увеличении базового размера (ΔX) локационной решетки амплитуда основного массива импульсов снижается до порогового уровня u_{th} , вследствие чего количество регистрируемых а.э.-событий резко сокращается (практически на порядок), а при размерах $\Delta X > 500$ мм источники а.э.-событий практически не регистрируются.

На рис. 2 представлены графики изменения параметров Δt (рис. 2а) и V_g (рис. 2б) при увеличении расстояния ΔX между преобразователями от 20 до 300 мм. Экспериментальные данные изменения параметра Δt в интервале $\Delta X = 20\text{--}300$ мм на рис. 2а могут быть аппроксимированы следующей линейной зависимостью:

$$\Delta t = 0.168\Delta X + 0.0899. \quad (1)$$

Из анализа этих данных следует, что область проводимых измерений $\Delta X = 20\text{--}300$ мм может быть разбита на две зоны: ближнюю к а.э.-источнику – $\Delta X \leq 110$ мм и дальнюю – $X \geq 120$ мм. Такое разделение связано с влиянием высокочастотных мод волнового пакета а.э.-импульса на момент пересечения фронтом нарастающего импульса порога дискриминации сигналов. При малом расстоянии между $ПАЭ$ ($\Delta X = 20\text{--}110$ мм) даже незначительные колебания приращения параметра Δt существенным образом сказываются на вычисляемых значениях V_g . Это хорошо прослеживается на графике 1 рис. 2б, где в интервале $\Delta X = 20\text{--}110$ мм наблюдаются флуктуации скорости распространения волнового пакета от $V_g = 7.5$ мм/мкс при 30 мм до $V_g = 5.45$ мм/мкс при 110 мм, возникающие вследствие колебаний приращения параметра Δt в пределах 1–2 мм/мкс (см. рис. 2а). Увеличение расстояния между приемными преобразователями, $\Delta X \geq 120$ мм, и быстрое затухание высокочастотных составляющих в дальней зоне приводят к снижению колебаний приращения

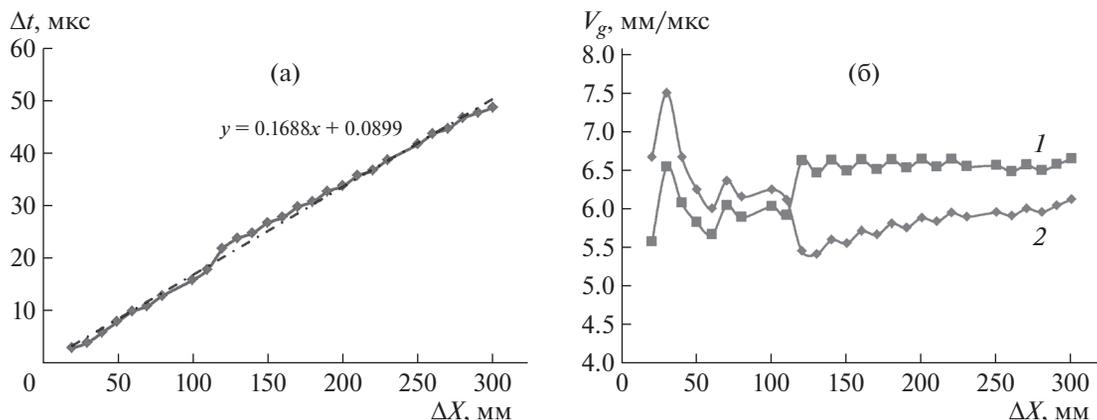


Рис. 2. Графики изменения разности времени прихода Δt (а) и скорости распространения волнового пакета V_g (б) при смещении положения $ПАЭ_2$ относительно $ПАЭ_1$ в интервале от 20 до 300 мм. 1 – по результатам разделения ближней и дальней зон; 2 – по исходным данным.

параметра Δt , а следовательно, и к уменьшению флуктуаций скорости в интервале $\Delta X = 120\text{--}300$ мм. Как следует из графика 1 на рис. 2б, в дальней зоне, по мере удаления $ПАЭ_2$ от источника излучения, значение скорости постепенно возрастает, достигая $V_g = 6$ мм/мкс и стабилизируясь в интервале 250–300 мм.

Для снижения флуктуаций скорости распространения волнового пакета в области проводимых исследований были применены такие зависимости для аппроксимации зарегистрированных значений р.в.п. в исследуемых зонах, согласно которым переменная составляющая Δt_k колебаний приращений параметра Δt , вызванных воздействием высокочастотных мод а.э.-импульса, при $\Delta X \rightarrow 0$ также стремилась к нулю. Линейная аппроксимация зарегистрированных значений р.в.п. в ближней и дальней зонах позволила получить следующие зависимости:

$$\Delta t = 0.1648X - 0.5882 \text{ (для } \Delta X = 20\text{--}110 \text{ мм)}, \quad (2)$$

$$\Delta t = 0.1523X + 3.8748 \text{ (для } \Delta X = 120\text{--}300 \text{ мм)}. \quad (3)$$

Согласно графику 2 на рис. 2б, разделение исследуемого интервала $\Delta X = 20\text{--}300$ мм на ближнюю и дальнюю зоны позволило заметно улучшить корреляцию замеров параметра Δt за счет снижения влияния переменной составляющей Δt_k колебаний приращения параметра Δt на шагах проводимых измерений и, следовательно, уменьшить флуктуации скорости в исследуемых зонах. При этом расхождение между максимальным и минимальным значениями скорости в ближней зоне не превышало $\Delta V_g = 6.62\text{--}5.57 = 1.05$ мм/мкс, т.е. 15% от максимального уровня.

В дальней зоне при $\Delta X = 120\text{--}300$ мм флуктуации скорости распространения волнового пакета не превышали 4.5% от среднего выборочного зна-

чения, составляющего $V_g = 6.57$ мм/мкс. Необходимо отметить, что применение такого способа повышения точности расчета скорости распространения волнового пакета возможно лишь в том случае, когда известны геометрические размеры ближней и дальней зон в стенке исследуемого изделия.

Для подтверждения сказанного на рис. 3 приведены формы волн и вейвлет-спектрограммы импульсов а.э., зарегистрированных $ПАЭ_1$ и $ПАЭ_2$ на различных расстояниях от источника излучения – преобразователя SE-1000.

Для сигнала, зарегистрированного на расстоянии 30 мм от источника а.э., характерно сильное влияние высокочастотных мод (рис. 3б), поэтому основная энергия спектра регистрируется в интервале 200–350 кГц. При удалении приемника $ПАЭ_2$ на расстояние 90 мм от источника а.э. (рис. 3г) доля высокочастотных составляющих спектра заметно снижается. При дальнейшем увеличении расстояния до 130 мм высокочастотные составляющие существенно затухают. Основная энергия импульса а.э., как следует из рис. 3е, регистрируется в диапазоне частот 100–200 кГц.

Следствием такого интенсивного затухания высокочастотных составляющих волнового пакета в композитной пластине является заметно меньшая флуктуация вычисляемых значений скорости, которая на расстоянии 250–300 мм стабилизируется и, как показали проведенные эксперименты, при дальнейшем увеличении расстояния до $\Delta X > 300$ мм практически не изменяется.

Как правило, при определении скорости в условиях проведения а.э.-диагностики натуральных конструкций из ПКМ геометрические размеры ближней и дальней зон затухания а.э.-импульса могут существенным образом изменяться в зависимости от толщины стенки изделия, наличия и расположения ребер жесткости и многих других

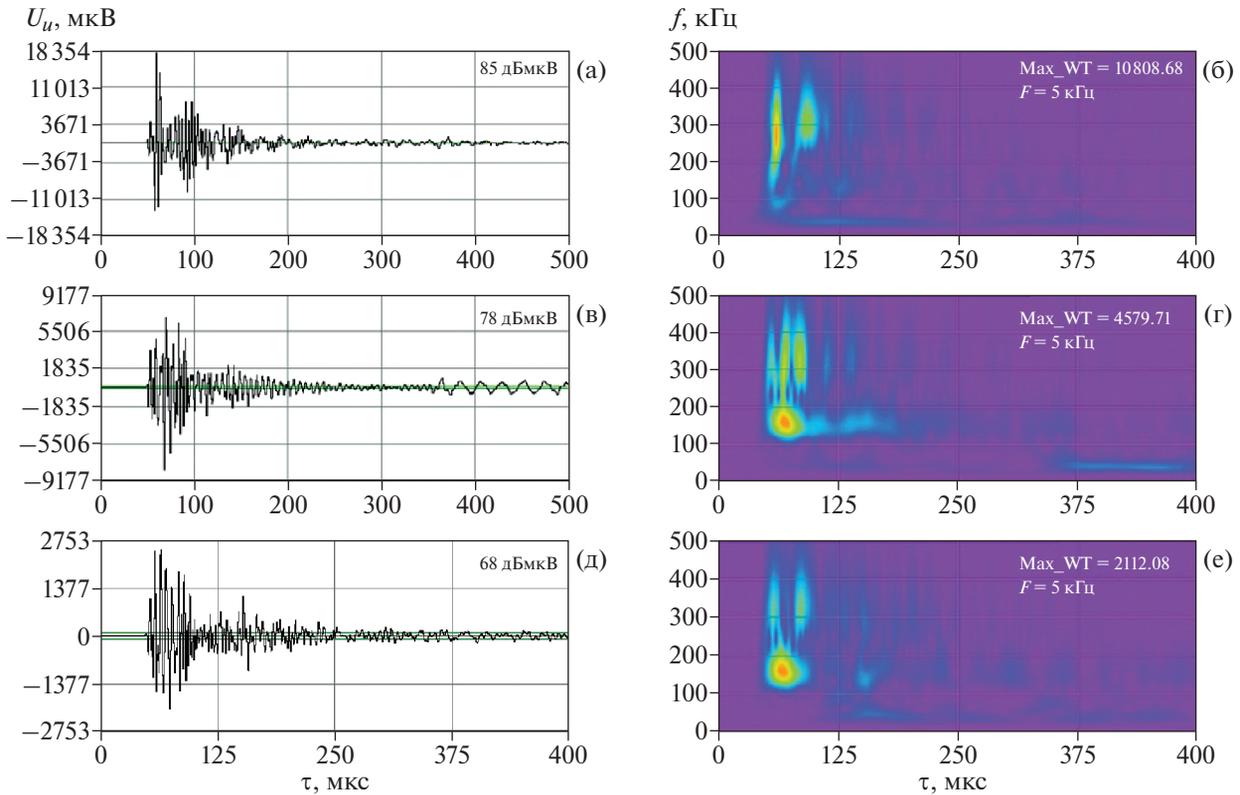


Рис. 3. Формы волн (а, в, д) и вейвлет-спектрограммы импульсов а.э. (б, г, е), зарегистрированных ПДЭ₂ на расстояниях: 30 мм (а, б), 90 мм (в, г) и 130 мм (д, е) — от источника а.э.

факторов. Поэтому рассмотренный выше способ определения скорости распространения волнового пакета имеет достаточно ограниченное применение.

Для уточнения времени прихода импульса на преобразователи а.э. и вычисления скорости распространения волнового пакета применен спо-

соб, заключающийся в подборе уровня порога дискриминации сигналов, при котором временные колебания пересечения фронтом нарастающего импульса порога u_{th} минимальны. На рис. 4 показана схема действия алгоритма такого способа, реализуемого посредством вычисления оптимального уровня порога u_{th} дискриминации сигнала.

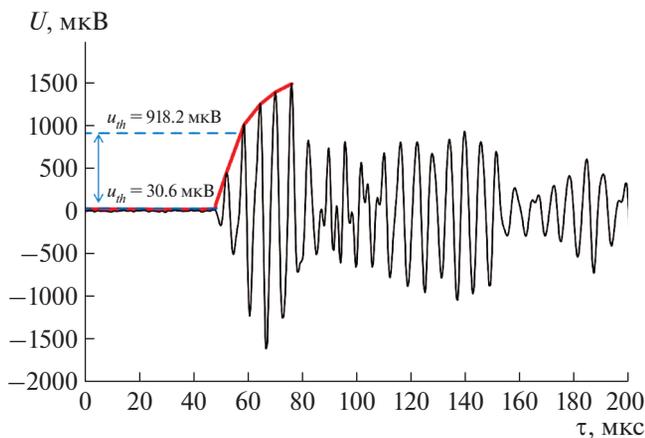


Рис. 4. Схема уменьшения погрешности измерения р.в.п. за счет выбора оптимального уровня порога дискриминации сигналов а.э.

На первом этапе разработанного алгоритма осуществляется построение огибающей при помощи кусочно-линейной аппроксимации локальных максимумов переднего фронта импульса а.э. Далее вычисляется уровень порога u_{th} , при котором колебания параметра Δt в ближней зоне от источника будут минимальными. Для этого определяются моменты τ' пересечения аппроксимирующей функции порога дискриминации при изменении уровня u_{th} от 30 дБ (30.6 мкВ) до 60 дБ (918.2 мкВ). На основании установленных значений τ' проводится пересчет параметра Δt и рассчитываются новые значения скорости в заданном интервале ΔX . Статистическая оценка уровня флуктуации вычисляемых значений скорости осуществляется по среднеквадратическому отклонению (с.к.о.) для полученной выборки значений V_g . На рис. 5 показано изменение с.к.о. скоро-

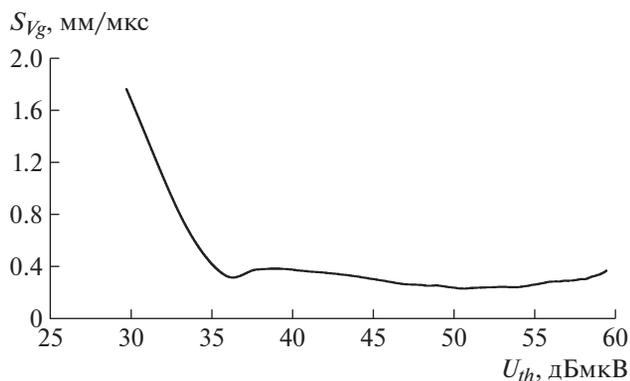


Рис. 5. Зависимость изменения с.к.о. скорости распространения S_{V_g} импульса а.э. от уровня порога u_{th} дискриминации сигналов.

сти распространения импульса а.э. (S_{V_g}) в зависимости от уровня порога дискриминации сигналов.

В ходе тестирования разработанного алгоритма значение u_{th} повышалось от 30 до 60 дБ с шагом 0.5 дБ. Наибольший разброс параметра V_g был зафиксирован при уровне порога $u_{th} = 30$ дБмкВ. Этот результат обусловлен тем, что при таком уровне порога регистрируемые импульсы содержат значительную долю высокочастотных составляющих, влияющих на величину приращения параметра Δt . Увеличение уровня порога u_{th} вызывает снижение переменной составляющей Δt_k , влияющей на приращение параметра Δt на шагах проводимых измерений, и соответственно уменьшает флуктуации значений скорости распространения а.э.-импульса. Минимальный уровень с.к.о., равный $S_{V_g} = 0.238$ мм/мкс, был получен при величине порога дискриминации $u_{th} = 50.5$ дБмкВ.

Рассматриваемая методика, предназначенная для корректного определения групповой скорости волнового пакета, используется на этапе тестовых испытаний при выборе оптимальных настроек акустико-эмиссионной системы перед проведением а.э.-диагностики композитных изделий. При этом следует отметить, что при испытаниях элементов конструкций композитных изделий на разрушение [9, 10] основной массив импульсов а.э.-событий, вызванных нарушением структурных связей в пакете ПКМ, имеет уровень максимальной амплитуды, значительно больший 50 дБмкВ.

На рис. 6 показан результат применения разработанного способа расчета параметра V_g , реализуемого за счет уменьшения колебаний приращения параметра Δt при повышении уровня порога дискриминации сигналов до 50.5 дБмкВ.

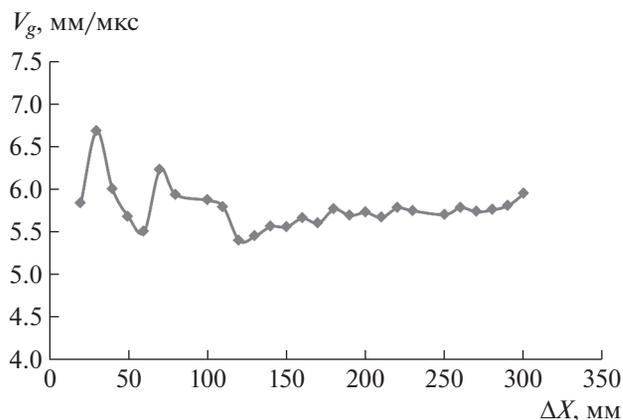


Рис. 6. Флуктуации скорости распространения волнового пакета в интервале $\Delta X = 30\text{--}300$ мм, определенные в ходе пошаговых замеров параметра Δt при уровне порога $u_{th} = 50.5$ дБмкВ.

Значение S_{V_g} , полученное с применением стандартного порогового алгоритма вычисления р.в.п., составило 0.373 мм/мкс. Повышение уровня порога позволило снизить S_{V_g} до 0.238, что соответствует снижению уровня разброса на 36% относительно среднего выборочного значения $V_g = 5.77$ мм/мкс.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенных исследований изучены причины разброса значений при вычислении скорости распространения акустического импульса в ближней и дальней зонах относительно источника а.э. Рассмотрены два способа минимизации колебаний приращения параметра Δt , обеспечивающие значительное снижение флуктуаций при вычислении скорости распространения волнового пакета в интервале проводимых измерений на композитной пластине.

Первый способ, применяемый в частном случае, при известных геометрических размерах ближней и дальней зон относительно источника а.э., заключается в раздельном вычислении V_g с применением различных аналитических зависимостей для каждой из зон. Его апробация позволила снизить влияние переменной составляющей Δt_k , вызванной наличием высокочастотных мод а.э.-импульса, на приращение параметра Δt и практически в два раза уменьшить флуктуации V_g в ближней зоне от источника. При этом в дальней зоне флуктуации скорости распространения импульса а.э. не превышали 5% от среднего выборочного значения.

Второй способ заключается в определении уровня порога дискриминации сигналов, при котором регистрируются минимальные колебания

приращения параметра Δt , а следовательно, снижается уровень флуктуации при вычислении скорости распространения волнового пакета в интервале проводимых измерений. Его апробация при диагностике исследуемой композитной панели позволила на 36% снизить уровень флуктуаций параметра V_g по сравнению со стандартной методикой расчета [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные способы снижения флуктуаций скорости регистрируемых акустических импульсов направлены на повышение точности вычисления координатной локации источников а.э.-событий. Дальнейшие исследования, проводимые в ИМАШ РАН в рамках выполнения научного проекта РНФ, связаны с совершенствованием методик, алгоритмов и программных продуктов, позволяющих минимизировать уровень погрешностей, вносимых в ходе локации а.э.-событий при диагностике образцов и изделий из различных конструкционных материалов, в том числе из ПКМ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-19-00351.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.И., Барат В.А.* Акустико-эмиссионная диагностика. М.: Спектр, 2017.
2. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов (ПБ 03-593-03). Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Серия 03. Вып. 38. М.: НТЦ Промышленная безопасность, 2003.
3. *Махутов Н.А., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Иванов В.И., Елизаров С.В.* // Дефектоскопия. 2019. № 3. С. 7. <https://doi.org/10.1134/S0130308219030023>
4. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Елизаров С.В.* // Дефектоскопия. 2018. № 12. С. 3. <https://doi.org/10.1134/S0130308218120011>
5. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В.* // Приводы и компоненты машин. 2018. № 5. С. 13.
6. *Eaton M.J., Pullin R., Holford K.M.* // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012. V. 43. № 6. P. 856. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.01.023>
7. *Baxter M.G., Pullin R., Holford K.M., Evans S.L.* // Mechanical Systems and Signal Processing. 2007. V. 21. № 3. P. 1512. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2006.05.003>
8. *Al-Jumaili S.K., Pearson M.R., Holford K.M., Eaton M.J., Pullin R.* // Mechanical Systems and Signal Processing. 2016. V. 72–73. P. 513. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.11.026>
9. *Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Панков В.А., Калинин А.Г.* // Заводская лаборатория. 2019. Т. 85. № 6. С. 53. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-6-53-63>
10. *Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Чернов Д.В., Панков В.А.* // Дефектоскопия. 2019. № 8. С. 24. <https://doi.org/10.1134/S0130308219080037>