УДК 620.179

Неразрушающий контроль многослойных сред методом годографа скорости упругих волн

А.И.ПОТАПОВ, А.В.КОНДРАТЬЕВ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрен метод годографа скорости упругих волн, направленный на неразрушающий контроль структурно-неоднородных композиционных материалов и изделий на их основе, а также многослойных изделий и конструкций.

Приведены теоретические основы определения скорости распространения упругих волн в многослойной среде методом годографа. На основе исследований даны рекомендации по определению скорости распространения упругих волн в каждом отдельном слое многослойной среды, что позволяет обеспечить неразрушающий контроль физико-механических характеристик каждого слоя многослойной среды.

Показано, что кроме простых многократных отражений в однородной среде, в многослойной среде с параллельными границами раздела, состоящей из двух и более слоев, могут возникать сложные типы кратных отраженных волн и смешанные волны (отраженно-преломленные и преломленно-отраженные).

Основной задачей применения низкочастотного ультразвукового метода является определение акустических параметров распространения упругих волн (скоростей, амплитуд, спектров). Рассмотрены основные способы определения скоростей упругих волн, исходя из уравнения годографа указанных отраженных волн в многослойной среде.

Ключевые слова: многослойная среда; годограф скорости упругих волн; отраженные волны; преломленные волны

Как цитировать эту статью: Потапов А.И. Неразрушающий контроль многослойных сред методом годографа скорости упругих волн / А.И.Потапов, А.В.Кондратьев // Записки Горного института. 2020. Т. 243. С. 348-356. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.348

Введение. Применение современных высокочастотных ультразвуковых методов для неразрушающего контроля однослойных и многослойных изделий толстостенных крупногабаритных конструкций и сооружений, в том числе из композиционных и крупноструктурных материалов (бетон, асфальтобетон, древесина, горные породы, полимеры, эластомеры, пено- и пороматериалы и др.) весьма затруднено, а чаще не представляется возможным в связи с высоким рассеянием и затуханием упругих волн высокой частоты [5, 6, 9, 10, 12-14]. Это обусловлено тем, что длина волны упругих колебаний (0,1-3 мм) соизмерима с размерами элементов структуры данных материалов. Отражение упругих волн на включениях создает сложные явления взаимодействия упругих волн, обусловленные их реверберацией, интерференцией и дифракцией. Контроль указанных материалов этим способом становится возможным только в том случае, когда длина волны упругих колебаний на порядок больше преобладающего размера включений. Выполнение данного условия возможно в случае использования частотного диапазона в области низких ультразвуковых частот – в диапазоне 20-200 кГц [5].

Широкое распространение получили низкочастотные акустические методы неразрушающего контроля многослойных конструкций [5], протяженность которых в направлении распространения волн в несколько раз превышает толщину слоев. Это ограничивает применение рассматриваемых методов обнаружением относительно неглубоко залегающих дефектов, линейные размеры которых превышают глубину их залегания.

Данные методы можно использовать для толстостенных крупногабаритных конструкций и сооружений (различные дорожные и аэродромные покрытия, теплозащитные покрытия из пено- и пороматериалов, стены зданий и сооружения, несущие конструкции мостов, клееные изделия). Значительный интерес для неразрушающего контроля толстостенных крупногабаритных конструкций и сооружений из композиционных материалов представляют сейсмоакустические методы, получившие широкое распространение в сейсморазведке при поиске полезных ископаемых и изучении горных пород. Основой данных методов является метод годографа скорости упругих волн [7, 8, 11], который наиболее активно развивался в 60-70-е годы прошлого века.

Впервые упоминание о данном методе применительно для неразрушающего контроля толстостенных крупногабаритных конструкций и сооружений из композиционных материалов приводится в работе [16]. Других публикаций по данному методу применительно к неразрушающему контролю указанных объектов нет.

Следует отметить, что скорости распространения продольных и поперечных упругих волн являются важнейшими параметрами для неразрушающего контроля физико-механических характеристик (упругих и прочностных) материалов в конструкции [15].

Методология. Для *двухслойной среды* с параллельной границей раздела сред, в которой скорость распространения упругих волн в первом верхнем слое значительно меньше скорости волн во втором слое (рис.1), уравнение годографа примет следующий вид:

$$v_2^2(t - t_1)^2 = X^2 + 4\delta_2^2, \quad (1)$$

где t_1 – время распространения упругой волны в первом слое среды по вертикали.

В данной среде кроме отраженных волн могут наблюдаться также и преломленные волны, при этом максимальный эффект преломления наблюдается только в случае равенства толщин слоев. Уравнение годографа для преломленных волн Π_{121} будет иметь следующий вид:

$$t = \frac{1}{v} (2\delta_1 \cos \alpha_0 + X \sin \alpha_0), \quad (2)$$

где α_0 – предельный угол преломления,

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{v_{\Pi_1}}{v_{\Pi_2}}.$$

При построении годографа преломленных волн на расстоянии X_1 от начала координат (рис.2) будет наблюдаться излом прямой:

$$X_1 = 2\delta_1 \sqrt{\frac{v_{\Pi_2} + v_{\Pi_1}}{v_{\Pi_2} - v_{\Pi_1}}}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что чем меньше различие в значениях скоростей v_{Π_1} и v_{Π_2} , тем дальше от начала координат отстоит точка перелома годографа преломленных волн. При этом первая часть прямой до перелома годографа соответствует распространению прямой продольной волны в первом слое, вторая – во втором слое.

Из рис.2 и формул (1) и (2) видно, что годографы отраженных и преломленных волн существенно отличаются друг от друга. Пренебрегая границей раздела, можно показать, что форма годографа отраженных волн при этом качественно не изменится (см. рис.1). Так, уравнение годографа для двухслойной среды имеет следующий вид:

Рис.1. Схема построения годографа отраженных волн в двухслойной среде

И – излучатель; Пр – приемник, v_1 – скорость упругих волн в первом слое; v_2 – скорость упругих волн во втором слое

Рис.2. Схема построения годографа преломленных волн в двухслойной среде

Пр1, Пр2 – положение приемников преломленных волн; v_{Π_1} , v_{Π_2} – скорость преломленных волн в первом и во втором слое соответственно

$$t = t_0 + \frac{X^2}{4\delta(v_1 + v_2)}, \quad (4)$$

$$\text{где } \delta = \delta_1 = \delta_2; \quad v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n t_i} = v_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{v_i}}.$$

Ошибку приближения определяем по формуле

$$\Delta t = t' - t = \frac{1}{8} \frac{X^2}{4\delta^2} t_0 \left(\frac{1-n}{1+n} \right)^2,$$

где $n = v_1/v_2$; t_0 – время в точке излучателя.

Обычно значение ошибки приближения Δt принимают равным погрешности измерения времени по прибору. Связав ошибку приближения с отношением расстояния между излучателем и приемником к толщине изделия, получаем

$$\frac{X}{2\delta} \leq \frac{2(1+n)}{1-n} \sqrt{\frac{2\Delta t}{t_0}}. \quad (5)$$

Таким образом, формула (5) выражает область осреднения двухслойной среды в однородную, при которой годографы отраженных волн качественно не будут отличаться.

Для *многослойной изотропной среды* с параллельной границей раздела сред уравнения продольного линейного годографа отраженных волн имеют следующий вид:

$$X = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i v_i \sin \alpha_1}{\sqrt{v_1^2 - v_i^2 \sin^2 \alpha}}; \quad (6)$$

$$t = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i v_i}{v_1^2 - v_i^2 \sin^2 \alpha}, \quad (7)$$

где α_1 – угол между направлением распространения волны (лучом) и нормалью в первом верхнем слое.

Анализ выражений (6) и (7) показывает, что для получения уравнения линейного годографа отраженных волн в явном виде необходимо выражение (7) разложить в ряд, после чего получим:

$$t = t_0 + \frac{1}{2} \frac{X^2}{\sum_{i=1}^n 2\delta_i v_i} - \frac{1}{8} \frac{\sum_{i=1}^n 2\delta_i v_i^3}{(\sum_{i=1}^n 2\delta_i v_i)^4} X^4.$$

Следует отметить, что при $X/(n\delta) < 0,5$ значением третьего члена уравнения можно пренебречь и ограничиться двумя членами разложения.

Значительный интерес представляет также уравнение годографа преломленных волн для многослойной среды:

$$t_n = t_{0n} + \frac{X}{v_n},$$

$$\text{где } t_{0n} = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\delta_i}{v_i} \cos \alpha_{i,n}; \quad \alpha_{i,n} = \arcsin \frac{v_i}{v_n}.$$

В процессе распространения упругих волн, особенно продольных в однослойной и многослойной средах, кроме однократно отраженных, могут наблюдаться также и многократно отраженные, преломленные и смешанные волны. Рассмотрим наиболее характерные особенности распространения кратных волн, основные типы которых приведены на рис.3.

В общем случае однородной среды с параллельными границами раздела сред уравнение годографа кратных отраженных волн (R_{101} , R_{10101} , ..., $R_{(10)n-1}$) имеет следующий вид (рис.3, а):

$$v^2 t^2 = X^2 + 4n^2 \delta^2, \quad (8)$$

где n – количество отражений.

Для того, чтобы правильно отличать нормальные (однократно) отраженные волны от кратных отраженных волн, которые имеют также годограф гиперболической формы (8), необходимо знать некоторые зависимости между этими волнами. Так, абсциссы минимума нормального годографа X_{01} и кратного годографа X_{0n} связаны между собой соотношением $X_{0n} = nx_{01}$, а соотношение времени распространения в точке излучателя для нормальных t_{01} и кратных t_{0n} волн имеет вид $t_{0n} = nt_{01}$. Следует отметить, что основные условия отличия нормальных волн от кратных отраженных волн заключаются в том, что годографы кратных волн, расположенные на тех же временах, что и годографы нормальных отражений от верхних границ раздела сред, будут более крутыми. Эффективным средством распознавания нормальных волн является также анализ амплитуд нормальных и кратных волн при известных коэффициентах отражений от границ раздела сред.

Соотношение амплитуд кратных A_n и нормальных A_1 отражений для среды с одной промежуточной границей раздела может быть записано в следующем виде:

$$A_n/A_1 = (k_1 k_2)^{n-1}, \quad (9)$$

где k_1 и k_2 – коэффициенты отражения соответственно от верхней отражающей границы раздела сред и от промежуточной границы; n – показатель кратности (количество отражений).

Наиболее наглядно зависимость (9) показывает соотношение амплитуд кратных и нормальных волн, если сопоставить графики для различных коэффициентов отражения (рис.4). Так, при $k_x = 0,2$ и $k_2 = 1$ трехкратное отражение должно иметь амплитуду в 25 раз меньшую по сравнению с однократной, а при $k_x = 0,2$ и $k_2 = 0,5$ уже в 100 раз меньшую.

Таким образом, для выделения нормальных волн можно использовать следующие способы:

- прослеживание отражений путем перемещения приемника относительно излучателя;
- оценка соотношения времен прихода волн и форм осей синфазности;
- сопоставление абсцисс минимума нормальных и кратных отраженных волн;
- выбор оптимальных значений X/δ при прослеживании отраженных волн в слоистой и однородной среде;
- анализ соотношений амплитуд нормальных и кратных отражений.

Рис.3. Схемы основных типов кратных отраженных волн

Рис.4. Зависимость соотношения амплитуд кратных и нормальных волн от коэффициентов отражения

Кроме простых многократных отражений в однородной среде, в случае многослойной среды с параллельными границами раздела, состоящей из двух и более слоев, могут возникать сложные типы кратных отраженных волн и смешанные волны (отраженно-преломленные и преломленно-отраженные).

Для двухслойной среды с волной R_{102} (см. рис.3, б), воспользовавшись ранее рассмотренным принципом, т. е. заменяя сложный путь волны более простым и усредняя значения скоростей для каждой из границ раздела v_{cp1} и v_{cp2} , получаем следующие выражения для определения расстояния между излучателем И и приемником Пр и времени распространения волны:

$$X = 2(\delta_1 + \delta_2) \operatorname{tg} \alpha ;$$

$$t = 2 \left(\frac{\delta_1}{v_{cp1}} + \frac{\delta_2}{v_{cp2}} \right) \sec \alpha .$$

где α – угол отражения волны на границе раздела сред.

Исключая α , получаем

$$v_{cp} t = 2(k_v \delta_1 + \delta_2) \sqrt{1 + \frac{x^2}{4(\delta_1 + \delta_2)^2}} , \quad (10)$$

где $k_v = v_{cp2} / v_{cp1}$.

Выражение (10) – гипербола с минимумом в начале координат. При этом время в точке излучения для нормальных и кратных отражений от каждой границы раздела сред связано зависимостью

$$t_0^{(2)} = t_{01}^{(1)} + t_{02}^{(1)} ,$$

где (1) и (2) – границы раздела сред.

Для двухслойной среды с волной R_{212} уравнение годографа отраженных волн имеет следующий вид:

$$v_{cp2} t = 2(\delta_2 + k_v \delta_1) \sqrt{1 + \frac{x^2}{4(2\delta_2 + \delta_1)^2}} ,$$

время в точке излучения для кратных и нормальных волн определяется зависимостью

$$t_0^{(2)} = t_{02}^{(1)} - t_{01}^{(1)} .$$

На основании принципа взаимности годограф волны R_m будет совпадать с годографом волны R_{102} .

Уравнение годографа для волны имеет следующий вид:

$$v_{cp2} t = 2(2k\delta_1 + \delta_2) \sqrt{1 + \frac{x^2}{4(2\delta_1 + \delta_2)^2}} ,$$

зависимость между временами в точке излучения

$$t_0^{(2)} = 2t_{01}^{(1)} + t_{02}^{(1)} .$$

Кроме рассмотренных типов кратных волн, в контролируемой среде могут наблюдаться волны смешанного типа – отраженно-преломленные ($R_{1212} > R_{3231323}$ и др.). Рассмотрим для такого типа волн среду, в которой имеется граница раздела, являющаяся одновременно отражающей и преломляющей (см. рис.3, в). Для такой среды уравнение годографа отраженно-преломленной волны будет иметь следующий вид:

$$t = \frac{2\delta(N+1)}{v_1} \cos \alpha + \frac{X}{v_2},$$

где $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$; N – количество границ раздела сред.

Анализ уравнения годографа отраженно-преломленной волны показывает, что на оси времен (в точке излучения И) годограф преломленной и отраженной волны будет отсекает следующее значение:

$$t_{\text{пр}} = \frac{2\delta \cos \alpha}{v_1}; \quad t_{\text{отр}} = 2\delta / v_1,$$

где $\alpha = \arcsin \frac{v_1}{v_2}$; v_1, v_2 – скорости в верхнем и подстилающем слое.

Таким образом, чем меньше различие между v_1 и v_2 , тем больше разница между $t_{\text{пр}}$ и $t_{\text{отр}}$. В реальных условиях может иметь место случай, когда преломляющая и отражающая границы не совпадают. Это может привести к интерференции волн. Для этого случая условие пересечения годографов отраженной и преломленной волны можно записать в следующем виде:

$$\frac{2\delta_{\text{пр}} \cos \alpha}{v_{\text{ср.пр}}} + \frac{X}{v_2} = \frac{1}{v_{\text{ср.отр}}} \sqrt{X^2 + 4\delta_{\text{отр}}^2},$$

где $\delta_{\text{пр}}$ и $\delta_{\text{отр}}$ – толщина слоя среды, в котором волна преломляется или отражается.

Сделав некоторые преобразования, получим

$$2b \cos \alpha + a \sin \alpha = c \sqrt{a^2 + 4}, \quad (11)$$

где $a = X / \delta_{\text{отр}}$; $b = \delta_{\text{пр}} / \delta_{\text{отр}}$; $c = v_{\text{ср.пр}} / v_{\text{ср.отр}}$.

Решая уравнение (11) относительно a , получаем:

$$a = \frac{2c}{c^2 - \sin^2 \alpha} \left(\frac{b}{c} \sin \alpha \cos \alpha \pm \sqrt{b^2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha - c^2} \right).$$

Таким образом, чтобы имело место пересечение годографов, отраженных и преломленных волн, должно соблюдаться условие

$$a \geq 2b \operatorname{tg} \alpha.$$

При анализе свойств прямых и отраженных волн отмечалось, что для однородной среды годограф прямой волны параллелен асимптотам годографа отраженной волны. Однако в реальных условиях может наблюдаться пересечение годографа прямой и отраженной волны. При этом уравнение для определения расстояния X_x от излучателя, при котором произойдет пересечение, будет иметь вид:

$$X_1 = \frac{2\delta}{\sqrt{v_{\text{ср}}^2 / v_0^2 - 1}}.$$

Основной задачей применения низкочастотного ультразвукового метода является определение акустических параметров распространения упругих волн (скоростей, амплитуд, спектров). Решение задачи позволит уточнить определение координат источников акустической эмиссии (АЭ) или корректного определения ресурса на основе регистрации сигналов АЭ [1-4]. Рассмотрим основные способы определения скоростей упругих волн, исходя из уравнения годографа отраженных волн. Заменяя в нем значения координат на квадратичные координаты $u = (X - X_0)^2$, $w = t^2$, получаем новое уравнение годографа

$$u - v_1^2 w + 4\delta^2 = 0.$$

Данное уравнение является выражением прямой, угловой коэффициент которой определяет квадрат скорости распространения продольных волн в первом слое, а отрезок, отсекаемый этой прямой по оси t , величину 2δ . При этом в случае параллельности внешней и отражающей поверхностей $X_0 = 0$.

Значительный практический интерес при определении скоростей упругих волн в слоях представляет годограф отраженно-преломленных волн. В соответствии с формулой (8) представляется возможным определить скорость продольных или сдвиговых волн практически в каждом слое многослойной изотропной среды (рис.5).

Для расчета скоростей упругих волн в слоях могут быть использованы следующие формулы:

- для двухслойной среды (Π_{121})

$$v_1 = \frac{2\delta_1 \cos \alpha_{1,2}}{t_{02}}; \quad v_2 = \frac{X}{t_2 - t_{02}};$$

- для трехслойной среды (Π_{12321})

$$v_3 = \frac{2\delta_2 \cos \alpha_{2,3}}{t_{03} - \frac{2\delta_1 \sin \alpha_{1,3}}{v_1}};$$

- для четырехслойной среды

$$v_4 = \frac{2\delta_3 \cos \alpha_{3,4}}{t_{04} - \left(\frac{2\delta_1 \cos \alpha_{1,4}}{v_1} + \frac{2\delta_2 \cos \alpha_{3,4}}{v_2} \right)};$$

- для n -слойной среды ($\Pi_{12 \dots n \dots 21}$)

$$v_n = \frac{2\delta_{n-1} \cos \alpha_{n-1,n}}{t_{0n} - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\delta_i \cos \alpha_{i,n}}{v_i}}.$$

Цифры при угле отражения α означают границы раздела сред.

Рис.5. Схема построения годографа отраженно-преломленных волн в многослойной среде

Следует отметить, что для определения скорости в слое n необходимо сначала определить скорости во всех вышележащих слоях, начиная с первого.

Трансверсально-изотропная среда характеризуется изотропией в плоскости и в направлении под углом к плоскости изделия. Степень анизотропии скорости упругих волн будет определяться отношением скорости упругих волн в вертикальном и горизонтальном направлениях. Поскольку время распространения, а, следовательно, и скорость являются функцией угла между направлением распространения и плоскостью упругой симметрии среды, то уравнение линейного годографа отраженных волн для трансверсально-изотропной среды примет следующий вид:

$$t(\alpha) = \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + \alpha_n^2 \cos^2 \alpha} (X^2 + 4\delta_2)}{\alpha_n v_{n90}},$$

где $\alpha_n = v_{n90}/v_{n0}$ и v_{n90} – скорости продольных волн в плоскости слоев и перпендикулярно слоям.

В случае изотропной среды уравнения годографа продольных и поперечных отраженных волн имеют одинаковый вид, заменяются лишь в зависимости от типа волн значения скоростей (продольных или поперечных). В случае трансверсально-изотропной среды годографы продольных отраженных и поперечных отраженных волн существенно отличаются, так как скорость продольных волн при изменении угла отражения α от 0 до 90° уменьшается, а скорость поперечных волн при изменении угла от 0 до 45° увеличивается, от 45° до 90° – уменьшается. Таким образом, скорость продольных волн имеет два экстремальных значения – при 0 и 90°, а скорость поперечных (сдвиговых) волн три экстремальных значения – при 0°, 45° и 90°. При этом $v_{c0} = v_{c90}$, а характеристикой, степени анизотропии скорости будет выражение $a_c = v_{c0}/v_{c45}$. Тогда уравнение годографа поперечных (сдвиговых) отраженных волн примет вид

$$t(\alpha) = \frac{\sqrt{\sin^2 \alpha + a_c^2 \cos^2 \alpha} (X^2 + 4\delta^2)}{a_c v_{c45}}.$$

В практике неразрушающих испытаний значительный интерес представляет контроль двухслойных конструкций, которые могут применяться как комбинация трансверсально-изотропного слоя с изотропным. При этом излучатель И и приемник Пр оптимально располагать со стороны слоя, имеющего меньшую скорость. Годограф и схема распространения упругих волн в такой среде показаны на рис.6.

Перелом линии годографа произойдет тогда, когда время распространения продольных волн в первом слое по профилю ИПр будет равно времени распространения продольных волн в слое по линии ИАВПр, т.е.

$$\frac{l}{v_{n90}} = \frac{2(\sin^2 \alpha + a_n \cos^2 \alpha) \sqrt{\delta_1^2 + X_1^2}}{a_n v_{n90}} + \frac{l - 2X_1}{v_{n2}}.$$

Исходя из принципа Ферма, основанного на минимизации времени распространения, уравнение годографа для преломленных продольных волн в трансверсально-изотропной среде будет иметь следующий вид:

$$t = \frac{2(\sin^2 \alpha + a_n \cos^2 \alpha) \sqrt{\delta_1^2 + X_1^2}}{a_n v_{n90}} + \frac{l - 2X_1}{v_{n2}},$$

где $X_1 = \text{ИА} \sin \alpha$.

Так как $\sin \alpha = v_{n90} / v_{n2}$, то $X_1 = \frac{v_{n90}}{v_{n2}} \sqrt{\delta_1^2 + X_1^2}$ или $X_1 = \frac{v_{n90} \delta}{\sqrt{v_{n2}^2 - v_{n90}^2}}$.

Расстояние, на котором следует ждать перелома линии годографа, определяют по аналогии с выражением (3) по формуле

$$l_0 = 2\delta_1 \sqrt{\frac{v_{n2} + v_{n90}}{v_{n2} - v_{n90}}}.$$

Значения скоростей v_{n90} и v_{n2} могут быть определены по тангенсах углов наклона $\text{tg} x_1$ и $\text{tg} x_2$.

Рис.6. Схема построения годографа и распространения упругих волн в двухслойной среде, верхний слой трансверсально-изотропный, нижний – изотропный

Закключение. Предложенный метод годографа позволяет определять скорость распространения упругих волн в каждом слое многослойной среды, что обеспечивает неразрушающий контроль физико-механических характеристик (упругих и прочностных) материалов в каждом слое многослойной среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов В.В. Акустико-эмиссионный контроль прочности сложно нагруженных металлоконструкций / В.В.Носов, А.И.Потапов // Дефектоскопия. 2015. № 1. С. 61-72.
2. Носов В.В. Контроль прочности неоднородных материалов методом акустической эмиссии // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 469-479.
3. Носов В.В. Оценка удароопасности участка массива горных пород по результатам регистрации его сейсмоакустической активности // Записки Горного института. 2015. Т. 216. С. 62-75.
4. Носов В.В. Принципы оптимизации технологий акустико-эмиссионного контроля прочности промышленных объектов // Дефектоскопия. 2016. № 7. С. 52-67.
5. Потапов А.И. Неразрушающий контроль структурно-неоднородных композиционных материалов методом годографа скорости упругих волн / А.И.Потапов, А.В.Кондратьев, Я.Г.Сморodinский // Дефектоскопия. 2019. № 6. С. 11-19.
6. Потапов А.И. Ультразвуковая низкочастотная дефектоскопия крупногабаритных конструкций из крупноструктурных материалов. Неразрушающий контроль композиционных материалов / А.И.Потапов, В.Е.Поляков // Сб. трудов 1-й дистанционной НТК «Приборы и методы неразрушающего контроля качества изделий и конструкций из композиционных и неоднородных материалов. СПб: Свен, 2015. С. 155-171.
7. Frederickson C.K. Acoustic characterization of rigid-frame air-filled porous media using both reflection and transmission measurement / C.K.Frederickson, J.M.Sabatier, R.Raspet // Journal of the Acoustical Society of America. 1996. Vol. 99. № 3. P. 1326-1332.
8. Geerits T.W. Acoustic wave propagation through porous media revisited // Journal of the Acoustical Society of America. 1996. Vol. 100. № 5. P. 2949-2959.
9. Low_Frequency Broadband Ultrasonic Transducers for Testing Articles Manufactured of Large_Structure and Composite Materials. Part 1. Complete and Partial Degeneracy of Vibration Modes in Piezoelectric Elements of Different Geometric Shapes / A.I.Potapov, V.E.Polyakov, V.A.Syasko, A.A.Popov, P.V.Kuryanova // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol. 51. № 6. P. 338-351.
10. Low_Frequency Broadband Ultrasonic Transducers for Testing Articles that Are Manufactured of Large_Structure and Composite Materials. Part 2. Excitation of Low_Frequency Ultrasonic Wide_Band Signals / A.I.Potapov, V.E.Polyakov, V.A.Syasko, A.A.Popov, P.V.Kuryanova // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2015. Vol. 51. № 7. P. 407-421.
11. Nagy P.B. Local variations of slow wave attenuation in air-filled permeable materials // Journal of the Acoustical Society of America. 1996. Vol. 99. № 2. P. 914-919.
12. Potapov A.I. Experimental Ultrasonic Study of the Elastic Modulus of Glass Fiber Plastics in Constructions / A.I.Potapov, V.E.Makhov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54. № 1. P. 1-16.
13. Potapov A.I. Methods for Nondestructive Testing and Diagnostics of Durability of Articles Made of Polymer Composite Materials / A.I.Potapov, V.E.Makhov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. Vol. 54. № 3. P. 151-163.
14. Potapov A.I. Physical Basics of Evaluating Elastic Characteristics of Anisotropic Composites by Ultrasonic Method / A.I.Potapov, V.E.Makhov // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2017. Vol. 53. № 11. P. 785-799.
15. Sessarego J.-P. Scattering by an elastic sphere embedded in an elastic isotropic medium / J.-P.Sessarego, J.Sageloli, R.Guillermin // Journal of the Acoustical Society of America. 1998. Vol. 104. № 5. P. 2836-3844.
16. Transport parameters for an ultrasonic pulsed wave propagating in a multiple scattering medium / A.Tourin, A.Derode, A.Peyre, M.Fink // Journal of the Acoustical Society of America. 2000. Vol. 108. № 2. P. 503-512.

Авторы: А.И.Потапов, д-р техн. наук, профессор, apot@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.В.Кондратьев, канд. техн. наук, ассистент, kondratev_av@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 24.08.2019.

Статья принята к публикации 05.12.2019.