Исследование распространения изгибных волн в конструкции плитного типа в различных диапазонах частот

Статья № 1002006, Том 10 (2), 2024 год

DOI 10.15826/rjcst.2024.2.006 УДК 69.04

Фан Чунг Дык [1], *С. Н. Савин* [2]
[1,2] Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
e-mail: [1] phanchungduc@gmail.com, [2] savinsn@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗГИБНЫХ ВОЛН В КОНСТРУКЦИИ ПЛИТНОГО ТИПА В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ

Аннотация. В статье предлагается теоретический подход к моделированию годографов фазовых скоростей распространения изгибных волн в конструкции плитного типа. Выявлена связь между скоростями изгибных волн, упруго-механическими характеристиками материалов, коэффициентом Пуассона и размерами конструкции. Предложенный путь позволяет определить скорости распространения изгибных волн на различных диапазонах частот. Полученные результаты играют большую роль для решения обратных задач при обследовании зданий и сооружения с целью контроля качества материалов строительных конструкций и обнаружения дефектов и повреждений путем оценки снижения распространения изгибных волн.

Ключевые слова: изгибные волны, коэффициент Пуассона, физико-механические характеристики, конструкция плитного типа, дефекты и повреждения

Для цитирования: *Фан Ч. Д., Савин С. Н.* Исследование распространения изгибных волн в конструкции плитного типа в различных диапазонах частот // Russian Journal of Construction Science and Technology. – 2024.– Т. 10. – № 2. – 1002006. – DOI 10.15826/rjcst.2024.2.006.

Fan Chung D. [1], *S. N. Savin* [2]
[1,2] St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia
e-mail: [1] phanchungduc@gmail.com, [2] savinsn@gmail.com

STUDY OF BENDING WAVE PROPAGATION IN A SLAB-TYPE STRUCTURE AT DIFFERENT FREQUENCY RANGES

Abstract. The paper proposes a theoretical approach to modelling of phase velocity hodographs of bending wave propagation in a slab-type structure. The relationship between bending wave velocities, elastic-mechanical characteristics of materials, Poisson's ratio and dimensions of the structure is revealed. The proposed way allows to determine the velocities of bending wave propagation at different frequency ranges. The obtained results play a great role for solving inverse problems in the inspection of buildings and structures in order to control the quality of materials of building structures and to detect defects and damages by estimating the reduction of bending wave propagation.

Key words: bending waves, Poisson's ratio, physical and mechanical characteristics, plate type construction, defects and damage

For citation: Fan Chung D., Savin S. N. (2024) Study of bending wave propagation in a slab-type structure at different frequency ranges. *Russian Journal of Construction Science and Technology.* 10(2). 1002006. (In Russ.) DOI 10.15826/rjcst.2024.2.006.

1. Введение

В настоящее время существует множество старых зданий и сооружений, которые необходимо обследовать, но при этом специалисты сталкиваются с большими трудностями, пытаясь получить доступ к конструкциям для оценки физико-механических характеристик материалов, из которых они выполнены. При этом использование традиционных методов неразрушающего контроля затруднено, как правило, из-за высокого затухания зондирующих ультразвуковых волн и невозможности получить доступ к конструкции с противоположных сторон для проведения сквозного зондирования. Поэтому разработка новых методов с применением современной аппаратуры и измерительных средств приобретает особую актуальность.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать не только неразрушающие методы контроля прочности строительных материалов, широко известных авторов [1–5], но и методы, заимствованные из геофизики, где используется теория Лэмба в приложении к изгибным волнам [6–8]. Волна Лэмба считается перспективным инструментом для обнаружения повреждений в пластинчатых конструкциях, поскольку она может распространяться на большие расстояния с низким затуханием и чувствительна к изменениям структурных свойств [9–12]. Однако применение этой теории в области неразрушающего контроля строительных конструкций практически не известно.

2. Теоретический анализ

Метод основан на связи скоростей распространения упругих волн с физико-механическими характеристиками материалов строительных конструкций. По теории упругости зависимости между скоростями распространения волн и жесткостными характеристиками определяются по следующими формулами:

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}}; \quad (1)$$

$$\frac{V_R}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}} \cdot \frac{0{,}87+1{,}12\mu}{1+\mu}; \quad (2)$$

$$V_R = \sqrt{\frac{E_d}{2\rho(1+\mu)}} \cdot \frac{0{,}87+1{,}12\mu}{1+\mu}; \quad (3)$$

$$G_R = \frac{E_d}{2(1+\mu)}, \quad (4)$$

где V_p – скорость продольной волны; V_s – скорость поперечной волны; V_R – скорость рэлеевской волны; E_d – модуль упругости; G_d – модуль сдвига; μ – коэффициент Пуассона, r – плотность.

Из литературных источников дисперсионные кривые основных колебаний изгибных волн определяются из уравнения [13–15], полученного Лэмбом:

$$\frac{\text{th}(\beta_1 H/2)}{\text{th}(\beta_2 H/2)} = \frac{4\beta_1\beta_2}{\eta^2\xi^2}, \quad (5)$$

в котором $\xi = 2\pi/\lambda$ – номер моды колебания;

$$\beta_1 = \xi\sqrt{1-\frac{V_u^2}{V_p^2}};$$

$$\beta_2 = \xi\sqrt{1-\frac{V_u^2}{V_s^2}};$$

$$\eta = 2-\frac{V_u^2}{V_s^2};$$

V_u – фазовая скорость изгибных волн;

Для решения уравнения (5) рассмотрим его в таком виде:

$$(p-1)\alpha^{g+h} - (p+1)\alpha^g + (p+1)\alpha^h - (p-1) = 0, \quad (6)$$

где $\alpha = e^{2\pi H/\lambda}$;

$$p = \frac{4gh}{\left(1+h^2\right)^2};$$

$$g = \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{2V_R^2} \cdot \frac{(1-2\mu)(0,87+1,12\mu)^2}{(1-\mu)(1+\mu)^2}};$$

$$h = \sqrt{1 - \frac{V_u^2}{V_R^2} \cdot \frac{(0,87+1,12\mu)^2}{(1+\mu)^2}};$$

λ – длина волны.

При решении уравнения (6) с учетом коэффициента Пуассона, жесткостных характеристик материалов конструкций получены результаты прямых задач для определения теоретических годографов скоростей изгибных волн. Эти результаты играют роль теоретических моделей для контроля качества материалов плитных конструкций, обнаружения дефектов и повреждения при решении обратных задач на реальных объектах.

3. Примеры расчета и обсуждение

При решении задачи обнаружения дефекта с использованием изгибных волн в однородной плите из бетона толщиной 1 метр со скоростью продольной волны в ненарушенном бетоне V_p = 4000 м/с, примем, что имеющийся дефект снижает скорости продольной волны до 3000 м/с (соответственно динамический модуль упругости E = 19000 МПа) на участке от 0 до 1,5 метров (рис. 1):

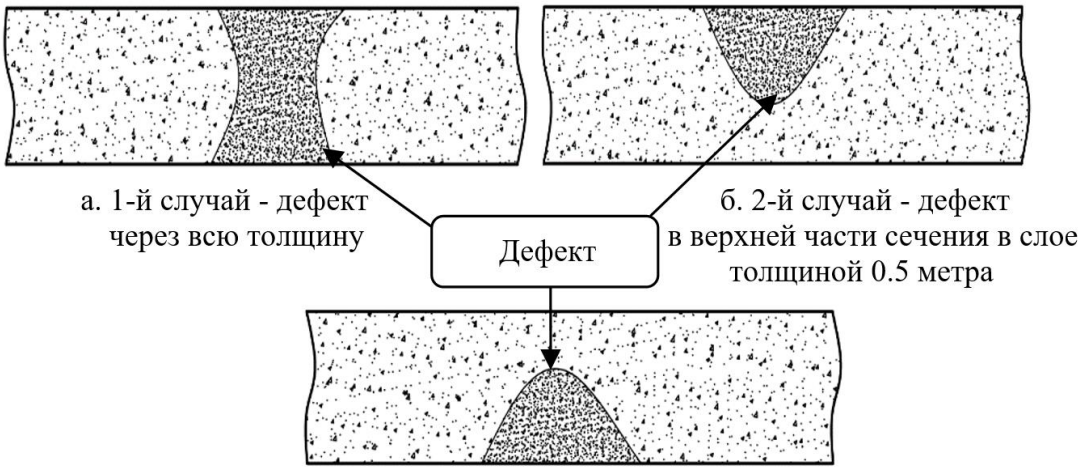

Рис. 1. Плиты с дефектами (рисунок авторов)

Из уравнения (6) легко можно доказать, что, когда длина волны стремится к нулю, скорость поверхностных волн $V_и$ равна скорости Рэлеевской волны V_R. При этом сильно влияет на результаты испытания только свойство материалов поверхностных конструкций. Для таких случаев можно найти дефекты на поверхности плиты, но совершенно невозможно обнаружить дефекты в нижней части сечения. Кроме того, невозможно отличить дефект в верхней части сечения от дефекта «на всю толщину». Когда длина волны стремится к бесконечности, тогда скорость поверхностных волн $V_и$ приближается к нулю. Тогда вообще невозможно решить задачу обнаружения дефекта при использовании таких низких частот.

Согласно аддитивному правилу или правилу смещения, упругие константы и плотность определяются по следующим формулам [16–17]:

$$\frac{1}{E}=\frac{1}{H}\left(\frac{h_1}{E_1}+\frac{h_2}{E_2}\right);$$

$$\upsilon=\frac{1}{H}\left(\upsilon_1 h_1+\upsilon_2 h_2\right); \qquad (7)$$

$$\rho=\frac{1}{H}\left(\rho_1 h_1+\rho_2 h_2\right).$$

Подставляя известные значения модулей упругости, толщину и коэффициент Пуассона в уравнения (6) получаем результат, при котором множество решений скоростей изгибных волн $V_и^1$, $V_и^2$, $V_и^3$ в зоне имеющих дефектов соответствует значениям длин волн $\lambda_в$.

Конечные результаты расчета показаны на рисунках 2–5, где приведены годографы изменения скоростей изгибных волн для однородной плиты толщиной 1 м со скоростью продольной волны $V_p = 4000$ м/с, имеющий дефект со снижением скорости продольной волны до 3000 м/с на участке 0–1,5 м.

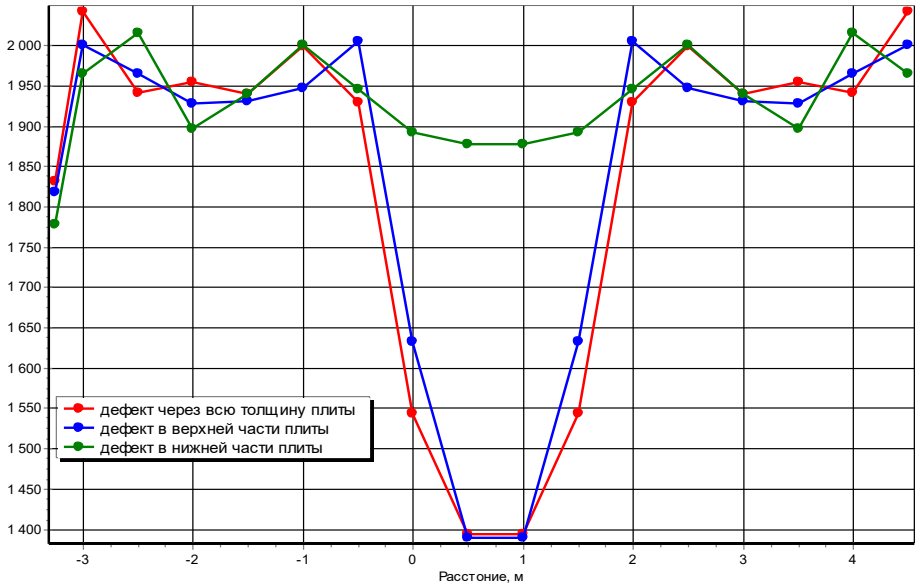

Рис. 2. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот 2000 – 5000 Гц (длины волн до 1 м) (рисунок авторов)

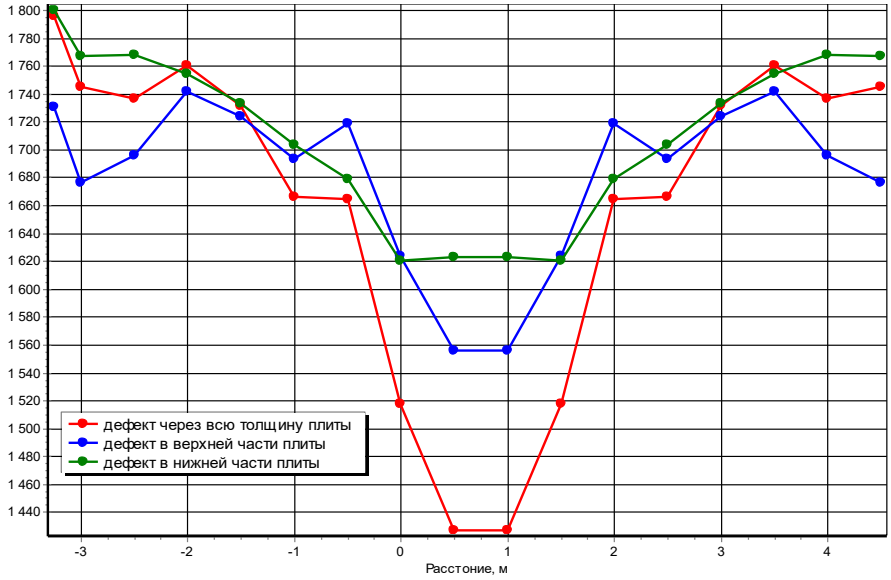

Рис. 3. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот 2000

– 5000 Гц (длины волн до 1 м) (рисунок авторов)

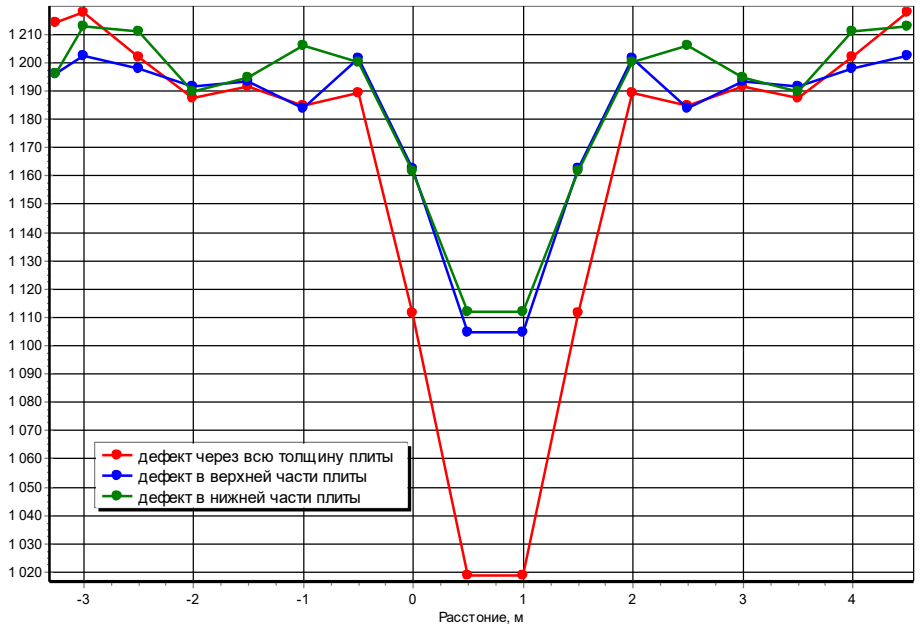

Рис. 4. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот 200 – 500 Гц (длины волн от 3 до 5 м) (рисунок авторов)

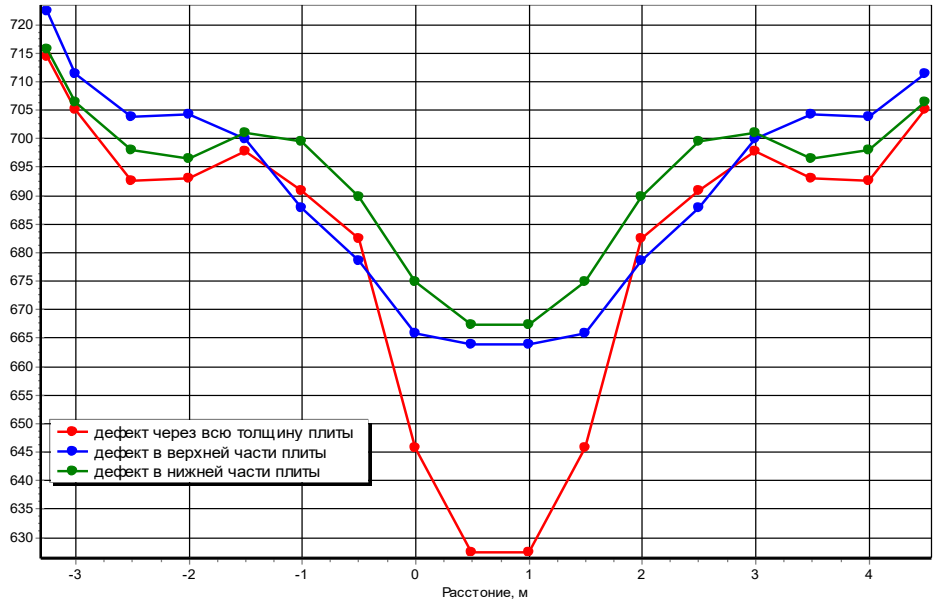

Рис. 5. Годографы изменения скоростей изгибных волн в плите в диапазоне частот менее 200 Гц (длины волн более 5 м) (рисунок авторов)

Анализ полученных результатов позволяет утверждать, что:

1. При использовании волн с высокими частотами (короткие длины волн) скорость распространения волн на измеряемой поверхности практически не изменяется для третьего случая. В остальных двух случаях скорость распространения волны на дефектном участке значительно снижается и имеет постоянное значение.

2. С другой стороны, при использовании волн с длиной волны более 5 м скорость волны во всех случаях снижается в месте повреждения. Но разница между случаями 1, 2 и 3 невелика (35–40 м/с) и на практике очень сложно обнаружить и различить характеристики повреждения при использовании таких низкочастотных волн.

3. При увеличении длины волны от 1 м до 5 м, в области имеющихся дефектов скорость волны в случаях 2, 3 снижается и отличается от значения скорости распространения волны в случае 1. При этом смогут оценить состояние материалов и выявить дефекты и повреждения для разных случаев.

4. Вывод

На основе теории Лэмба в приложении к изгибным волнам предложенный способ позволяет обнаружить дефекты, повреждения, определить их размеры и ориентировочное положение путем оценки снижения скорости распространения волны. По полученным результатам при использовании различных диапазонов частот можно достичь высокой эффективности оценки физико-механических характеристик и выявления дефектов, повреждений строительных конструкций. В дальнейшем на основе этих исследований можно разработать методику испытания и обработки данных с целью определению физико-механических характеристик и контроля качества строительных конструкций.

Список используемых источников

1. *Абашин Е. Г.* Определение класса бетона железобетонных балок по коэффициенту затухания колебаний / Е. Г. Абашин // Теория инженерных сооружений. Строительные конструкции. – 2019. – № 4 (84). – С. 3–9.
2. *Деркач. В. Н.* Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений / В. Н. Деркач, Н. М. Жерносек // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2010. – № 3 (28). – С. 135-142.
3. *Улыбин А. В.* О выборе методов контроля прочности бетона построенных сооружений / А. В. Улыбин // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – №4. – С. 10-15.
4. *Несветаев Г. В.* Особенности неразрушающего контроля прочности бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций / Г. В. Несветаев, А. В. Коллеганов, Н. А. Коллеганов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2017. – №2 (9).
5. *Байбурин А. Х.* Исследование неоднородности прочности бетона монолитных конструкций / А. Х. Байбурин, С. Н. Погорелов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – №3. – С. 12-20.
6. *Захаров Д. Д.* Параметрический анализ комплексных дисперсионных кривых изгибных волн Лэмба для слоистых пластин в низкочастотном диапазоне / Д. Д. Захаров // Акустический журнал. – 2018. – № 4 (64). – С. 395–410.
7. *Коробов А. И.* Нелинейные волны Лэмба в металлической пластинке с дефектами / А. И. Коробов, М. Ю. Изосимова // Акустический журнал. – 2006. – № 5 (52). – С. 683-692.
8. *Золотова О. П.* Распространение волн Лэмба и SH-волн в пластине пьезоэлектрического кубического кристалла / О. П. Золотова, С. И. Бурков, Б. П. Сорокин // Журнал Сибирского федерального университета. Математика и физика. – 2010. – №2 (3). – С. 185-204.
9. Pagneux V. Determination of Lamb mode eigenvalues / V. Pagneux, A. Maurel. // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2001. – Volume 110(3). –P. 1307-1314.
10. Poddar B. Complex modes expansion with vector projection using power flow to simulate Lamb waves scattering from horizontal cracks and disbonds. / B. Poddar, V. Giurgiutiu. // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2016. –Volume 140(3). – P. 2123-2133.
11. Rose J. L. Ultrasonic guided waves in solid media. / J. L. Rose. – Cambridge University Press, 2014. – 530 p.
12. Moreno E. Thickness measurement in composite materials using Lamb waves. / E. Moreno, P. Acevedo. // Ultrasonics. – 1998. – Volume 35(8). – P. 581-586.
13. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. / Л. М. Бреховских – Москва: Наука, 1973. – 343 р.

14. Achenbach J. D. Wave propagation in elastic solid. / J. D. Achenbach – Amsterdam-London: North-Holland PubliCo, 1973. - 430 p.
15. Kolsky H. Stress waves in solids. / H. Kolsky. – Oxford: Clarendon press, 1953. – 211 p.
16. Баев А. Р. Особенности распространения волн Лэмба в тонких двухслойных материалах / А. Р. Баев, П. П. Прохоренко // Вестник БНТУ. – 2008. –№4. – С. 52-55.
17. Ibadov A. A. Investigation of the relationship between the Lamb waves phase velocity and the technical condition of housing and utilities pipelines / A. A. Ibadov, A. E. Kondrat'ev, D. A. Makueva and D. V. Sergeeva. // E3S Web of Conferences. – 2020. – 216, 01080.

References

1. Abashin, E. G. (2019). Determination of the concrete class of reinforced concrete beams by the attenuation coefficient of oscillations. *Theory of Engineering Structures. Building Structures*, (4), 3–9.
2. Derkach, V. N., & Zhernosek, N. M. (2010). Methods for assessing the strength of masonry in domestic and foreign practice of surveying buildings and structures. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, (3), 135–142.
3. Ulybin, A. V. (2011). On the choice of methods for controlling the strength of concrete of constructed structures. *Engineering and Construction Journal*, (4), 10–15.
4. Nesvetaev, G. V., Kolleganov, A. V., & Kolleganov, N. A. (2017). Features of non-destructive testing of concrete strength of operated reinforced concrete structures. *Internet Journal "Naukovedenie"*, (2).
5. Baiburin, A. Kh., & Pogorelov, S. N. (2012). Study of the heterogeneity of concrete strength in monolithic structures. *Engineering and Construction Journal*, (3), 12–20.
6. Zakharov, D. D. (2018). Parametric analysis of complex dispersion curves of Lamb bending waves for layered plates in the low-frequency range. *Acoustic Journal*, (4), 395–410.
7. Korobov, A. I., & Izosimova, M. Yu. (2006). Nonlinear Lamb waves in a metal plate with defects. *Acoustic Journal*, (5), 683–692.
8. Zolotova, O. P., Burkov, S. I., & Sorokin, B. P. (2010). Propagation of Lamb and SH waves in a plate of a piezoelectric cubic crystal. *Journal of the Siberian Federal University. Mathematics and Physics*, (2), 185–204.
9. Pagneux, V., & Maurel, A. (2001). Determination of Lamb mode eigenvalues. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 110(3), 1307–1314.
10. Poddar, B., & Giurgiutiu, V. (2016). Complex modes expansion with vector projection using power flow to simulate Lamb waves scattering from horizontal cracks and disbonds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(3), 2123–2133.
11. Rose, J. L. (2014). *Ultrasonic guided waves in solid media*. Cambridge University Press.
12. Moreno, E., & Acevedo, P. (1998). Thickness measurement in composite materials using Lamb waves. *Ultrasonics*, 35(8), 581–586.
13. Brekhovskikh, L. M. (1973). *Waves in layered media*. Nauka.
14. Achenbach, J. D. (1973). *Wave propagation in elastic solid*. North-Holland PubliCo.
15. Kolsky, H. (1953). *Stress waves in solids*. Clarendon press.
16. Baev, A. R., & Prokhorenko, P. P. (2008). Features of the propagation of Lamb waves in thin two-layer materials. *Bulletin of BNTU*, (4), 52–55.
17. Ibadov, A. A., Kondrat'ev, A. E., Makueva, D. A., & Sergeeva, D. V. (2020). Investigation of the relationship between the Lamb waves phase velocity and the technical condition of housing and utilities pipelines. *E3S Web of Conferences*, 216, 01080.

Получено: 20.11.24
Прошла рецензирование: 27.11.24
Принята к публикации: 30.11.24
Доступно он-лайн: 17.01.25

Received: 20.11.24
Revised: 27.11.24
Accepted: 30.11.24
Available on-line: 17.01.25