

<https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-1-164-173>

УДК 615.47

Анализ и разработка вязкоупругой модели биотканей для оценки их нелинейных свойств

М. В. Лагута¹✉, Д. А. Кравчук¹¹ Южный федеральный университет

ул. Шевченко, д. 2/Е, Ростовская область, г. Таганрог 347922, Российская Федерация

✉ e-mail: laguta@sfedu.ru

Резюме

Целью исследования является анализ существующих вязкоупругих моделей биологических тканей, учитывающих как физическую, так и геометрическую нелинейности процессов деформации при распространении поперечных акустических волн.

Методы. Акустическая эластография представляет собой группу методов, основанных на анализе процессов взаимодействия низкочастотных поперечных акустических волн с биологическими тканями. Физической основой таких методов являются вязкоупругие модели биотканей, учитывающие изменение параметров их деформации при воздействии на них силы с переменной амплитудой и направлением. Учет нелинейности процессов деформации биологических тканей при распространении поперечных акустических волн позволит ввести новую информативную характеристику для анализа процессов их структурных изменений – нелинейный параметр. Одновременный учет линейных и нелинейных свойств биотканей позволит повысить качество диагностики заболеваний, протекающих в организме человека, в том числе на ранних стадиях. В рамках исследования были проведен анализ двухэлементной вязкоупругой модели биотканей, позволяющих учитывать как физическую нелинейность, так и линейные характеристики. Также рассмотрены модель, позволяющая учитывать геометрическую нелинейность процессов деформации и процессы деформации моделей при изменении параметров воздействующей силы.

Результаты. Предложена вязкоупругая модель биологических тканей, позволяющая учитывать как физическую, так и геометрическую нелинейность. Выведены основные математические выражения, описывающие данную модель. Получены результаты математического моделирования процессов деформации разработанной вязкоупругой модели при изменении воздействующей силы и модели, учитывающей только физическую нелинейность.

Заключение. Предложенная математическая модель позволяет учитывать отклонении процессов деформации биотканей от линейных законов как за счет физической, так и геометрической нелинейности. Применение такой модели позволит повысить точность оценки процессов взаимодействия низкочастотного акустического излучения с биологическими тканями, что может быть использовано для разработки новых высокоточных методов оценки процессов их изменения при протекающих заболеваниях, в том числе на ранних стадиях.

Ключевые слова: эластография; акустический нелинейный параметр; свойства биоткани.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Лагута М. В., Кравчук Д. А. Анализ и разработка вязкоупругой модели биотканей для оценки их нелинейных свойств // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2026. Т. 16, № 1. С. 164–173. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-1-164-173>

Поступила в редакцию 21.01.2026

Подписана в печать 20.02.2026

Опубликована 31.03.2026

Analysis and development of a viscoelastic model of biological tissues to assess their nonlinear properties

Margarita V. Laguta¹✉, Denis A. Kravchuk¹

¹ Southern Federal University
2/E Shevchenko Str., Rostov region, Taganrog 347922, Russian Federation

✉ e-mail:

Abstract

The purpose of the research is to analyze existing viscoelastic models of biological tissues to develop a model that takes into account the nonlinearity of deformation processes during the propagation of transverse acoustic waves.

Methods. Acoustic elastography is a group of methods based on the analysis of the interaction of low-frequency transverse acoustic waves with biological tissues. The physical basis of such methods are viscoelastic models of biological fabrics that take into account changes in their deformation parameters when they are subjected to forces with variable amplitude and direction. Taking into account the nonlinearity of the processes of deformation of biological tissues during the propagation of transverse acoustic waves will allow us to introduce a new informative characteristic for analyzing the processes of their structural changes – a nonlinear parameter. Simultaneous consideration of linear and nonlinear properties of biological tissues will improve the quality of diagnosis of diseases occurring in the human body, including in the early stages. As part of the study, a two-element viscoelastic model of biological tissues was analyzed, allowing for both physical nonlinearity and linear characteristics. A model is also considered that allows taking into account the geometric nonlinearity of the deformation processes and the deformation processes of the models when changing the parameters of the acting force.

Results. We have proposed a viscoelastic model of biological tissues that accounts for both physical and geometric nonlinearity. The key mathematical expressions describing this model have been derived. Results have been obtained from mathematical modeling of deformation processes for the developed viscoelastic model under varying applied forces and for a model that accounts only for physical nonlinearity.

Conclusion. The proposed mathematical model allows for the deviation of biological tissue deformation processes from linear laws due to both physical and geometric nonlinearity. Application of this model will improve the accuracy of assessing the interaction of low-frequency acoustic radiation with biological tissue, which can be used to develop new, high-precision methods for assessing tissue changes during ongoing diseases, including in the early stages.

Keywords: elastography; acoustic nonlinear parameter; properties of biological tissue.

Conflict of interest: The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Laguta M.V., Kravchuk D.A. Analysis and development of a viscoelastic model of biological tissues to assess their nonlinear properties. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naja tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2026;16(1):164–173. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2026-16-1-164-173>

Received 21.01.2026

Accepted 20.02.2026

Published 31.03.2026

Введение

Большое количество заболеваний, протекающих в организме человека, сопровождаются структурными изменениями органов и тканей. Чаще всего происходит замещение функциональных клеток фиброзной или жировой тканью [1]. Возникающие при этом новообразования (даже доброкачественного характера) могут со временем переходить в злокачественную форму [2]. Наиболее точным способом оценки типа изменений биотканей является биопсия, которая предполагает забор пробы с выбранного участка тела человека. Однако ввиду небезопасности метода важной задачей является разработка неинвазивных высокоточных методов диагностики, позволяющих диагностировать эти изменения на ранних стадиях заболеваний [3]. Акустическая эластография может стать путем решения данной проблемы, однако ввиду того, что большинство существующих методов ограничиваются принципами линейной акустики, их точность ограничена [4].

В основе данной группы методов лежат физические модели биотканей, позволяющие оценивать изменение процессов их деформации при воздействии механических сил с различными параметрами, в зависимости от их вязкоупругих свойств [5]. Повышение информативности и точности методов эластографии возможно за счет введения в линейные вязкоупругие модели нелинейных поправок, позволяющих получать новые информационные ха-

рактеристики биотканей, такие как нелинейный параметр [6].

Материалы и методы

Ранее проведенный анализ линейных вязкоупругих моделей показал, что при разработке метода исследования вязкоупругих свойств биотканей на основе распространения упругой низкочастотной акустической волны наибольший интерес представляет собой модель, в которой деформация больше всего зависит от величины жесткости упругого элемента по сравнению с текучестью [7]. Связано это в первую очередь с тем, что к таким тканям относятся злокачественные опухоли [8]. Также стоит отметить, что для учета физической нелинейности достаточно остановиться на двухэлементной модели, так как повышение числа элементов в этом случае может привести к возникновению дополнительных ошибок при введении нелинейных поправок. Всем этим условиям удовлетворяет модель Кельвина – Фойгта (рис. 1).

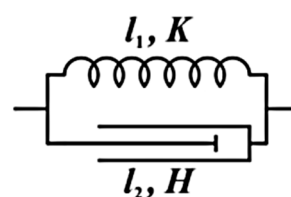


Рис. 1. Модель Кельвина – Фойгта [9]

Fig. 1. Kelvin – Voigt model [9]

Далее мы будем говорить о нелинейных эффектах, возникающих при распространении низкочастотных поперечных волн в биотканях. В модели, отражающей зависимость деформации от

напряжений, необходимо учесть ее нелинейность [10].

Согласно этому модель Кельвина – Фойгта с учетом физической нелинейности будет описываться выражением [11]:

$$F_k = \left(K (l - l_0) - K\Gamma (l - l_0)^2 \right) + H \frac{dl}{dt} = (k\varepsilon - k\Gamma \varepsilon^2) + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1)$$

где $K\Gamma(l - l_0)^2$ – член, отражающий нелинейность деформации упругого элемента; Γ – нелинейный параметр среды, обусловленный физической нелинейностью [12].

При этом важно понимать, что в нелинейность процессов распространения низкочастотных акустических волн также вносят вклад особенности геометрического строения клеток, что приводит к возникновению так называемой геометрической нелинейности [13].

Для учета поправки, вносимой геометрической нелинейностью, нами была предложена модель, представленная ниже (рис. 2).

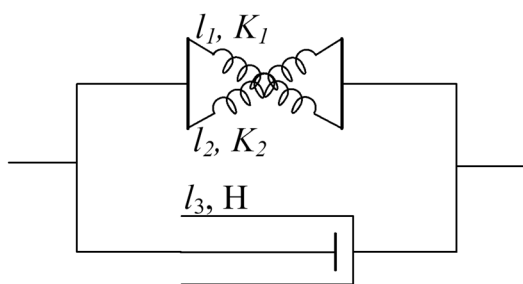


Рис. 2. Вязкоупругая модель с учетом геометрической и физической нелинейности

Fig. 2. Viscoelastic model taking into account geometric and physical nonlinearity

Учет геометрической нелинейности в системе, представленной на рисунке 1, происходит за счет введения двух

упругих элементов с разной жесткостью, соединенных двумя жесткими пластинами под разными углами [14].

Такое дополнение системы позволяет также учитывать нелинейность деформации в различных направлениях [15]. Это приводит к тому, что при горизонтальном смещении изменение длины пружины, соединенной с пластиной под углом α_i , равно [16]:

$$\Delta l_i = x \cos(\alpha_i). \quad (2)$$

При этом горизонтальная проекция силы в пружине находится согласно выражению

$$F_{i,x} = F_i \cos(\alpha_i) = K_i x \cos^2(\alpha_i). \quad (3)$$

Эквивалентная жесткость для двух пружин, соединенных под разными углами, определяется согласно выражению

$$K_{\text{экв}} = K_1 \cos^2(\alpha_1) + K_2 \cos^2(\alpha_2), \quad (4)$$

где α_1 и α_2 – углы, под которыми соединены первая и вторая пружины соответственно.

В этом случае уравнение, описывающее модель, выглядит следующим образом:

$$F_k = (K_1 \cos^2(\alpha_1) + K_2 \cos^2(\alpha_2)) \times ((l - l_0) - \Gamma(l - l_0)^2) + H \frac{dl}{dt} = (k_1 \cos^2(\alpha_1) + k_2 \cos^2(\alpha_2))(\varepsilon - \Gamma \varepsilon^2) + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (5)$$

Полученные соотношения позволяют оценить нелинейность изменения деформации при изменении параметров воздействующей силы [17].

Результаты и их обсуждение

Из уравнений (2) и (5) можно отметить, что учет нелинейности, связанной с физическими и геометрическими особенностями биотканей, происходит в члене уравнения, отражающем деформацию упругого элемента [18]. Поэтому для сравнения процессов деформации с учетом нелинейных эффектов и без целесообразно рассмотреть процесс деформации именно упругого элемента [19].

На рисунке 3 представлены результаты математического моделирования изменения величины деформации упругого элемента в зависимости от величины воздействующей силы F для случая с учетом только физической нелинейности, с физической и геометрической нелинейностью и без учета нелинейности процесса, при следующих параметрах системы: $K_1 = 2$, $K_2 = 3$, $\alpha_1 = 45/\pi$, $\alpha_2 = 50/\pi$, $\Gamma = 5$ [20].

Согласно полученным результатам для линейной модели с заданными выше параметрами деформация увеличивается в 2 раза при увеличении амплитуды воздействующей силы в 4 раза, для нелинейных моделей наблюдается значительная меньшая деформация. Так для модели с физической нелинейностью это изменение составило около 10%, а для модели, также учитывающей геометрическую нелинейность, – 8%. Это говорит о том, что в реальных случаях, где присутствует нелинейность, деформация будет нарастать значительно медленнее по сравнению с увеличением прикладываемой силы, что важно

учитывать при оценке процессов распространения поперечных низкочастотных волн.

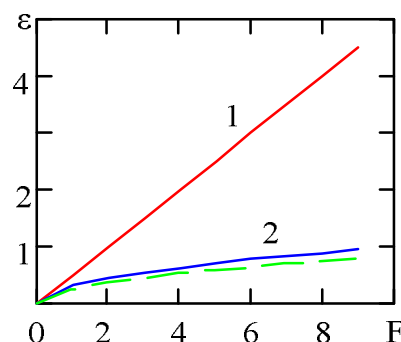


Рис. 3. Изменение величины деформации при изменении величины воздействующей силы: 1 – деформация упругого элемента без учета нелинейности; 2 – с учетом физической нелинейности; 3 – с учетом физической и геометрической нелинейности процесса

Fig. 3. Change in deformation value when the applied force changes: 1 – deformation of the elastic element without taking into account the nonlinearity; 2 – taking into account the physical nonlinearity, 3 – taking into account the physical and geometric nonlinearity of the process

Выводы

Полученные результаты показали, что введение, кроме нелинейного параметра Γ , поправки, отражающей геометрическую нелинейность в уравнение (1), позволяет оценивать, помимо временной задержки деформации (что учитывается вязким элементом), также более точно учитывать нелинейность изменения ее амплитуды при изменении амплитуды силы воздействия.

Как результат – такое описание модели Кельвина – Фойгта позволяет более точно оценивать изменения вязкоупругих свойств биотканей по сравнению с линейной моделью.

Список литературы

1. Диагностика фиброза печени: акцент на эластографию / И. И. Жирков, А. В. Гордиенко, И. М. Павлович, Б. А. Чумак, В. В. Яковлев // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. 2021. № 194 (10). С. 72-81.
2. Беляева А. В., Беляева О. А., Розинов В. М. Диагностический потенциал ультразвуковой эластографии у пациентов с хирургическими заболеваниями и травмами // Российский вестник детской хирургии, анестезиологии и реаниматологии. 2023. Т. 13, № 3. С. 373–384. <https://doi.org/10.17816/psaic1523>
3. Эффективность эластографии сдвиговой волной в оценке поражения печени у пациентов с постковидным синдромом / В. Н. Диомидова, Е. А. Разбанина, О. Н. Валеева, Л. Н. Васильева // Acta medica eurasica. 2022. № 3. С. 99–113.
4. Кравчук Д. А., Чернов Н. Н., Михралиева А. И. Аналитическое моделирование эластографии молочной железы // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2024. Т. 14, № 1. С. 104-113.
5. King's College London. New research explores non-invasive MR elastography as an alternative to liver biopsy in obese patients // Medical Xpress. 2023. P. 104-113. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-104-113>. EDN SHBQKL
6. Шевкина С. П., Жестовская С. И., Лебедева Е. В. Двумерная эластография сдвиговой волны: рациональное значение в системе bi-rads // Кремлевская медицина. Клинический вестник. 2024. № 2. С. 54-57.
7. Park S. Y., Kang B. J. Combination of shear-wave elastography with ultrasonography for detection of breast cancer and reduction of unnecessary biopsies: a systematic review and meta-analysis // Ultrasonography. 2021. N 40 (3). P. 318–332.
8. Двумерная эластография сдвиговой волной в оценке наличия и степени выраженности фиброза печени в сравнении с данными транзистентной эластографии / О. М. Процык, С. Л. Швырев, М. Д. Митькова, В. В. Капустин // Ультразвуковая и функциональная диагностика. 2022. № 4. С. 10-22.
9. Звягин А. В. О существовании слабых решений дробной модели Кельвина-Фойгта // Математические заметки. 2024. Т. 116, № 1. С. 152–157.
10. Экспериментальные исследования акустического поля поперечных волн в модели биологической ткани / Д. А. Кравчук, Н. Н. Чернов, С. А. Переселков, А. И. Михралиева // Радиотехника. Наносистемы. Информационные технологии. 2024. Т. 16, № 3. С. 381-386. <https://doi.org/10.17725/rensit.2024.16.381>. EDN HJAPTZ

11. Лагута М. В., Кравчук Д. А., Чернов Н. Н. Исследование нелинейного взаимодействия акустической волны с биотканями для целей акустической эластографии // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2025. Т. 15, № 1. С. 131–143.
12. Турбин М. В., Устюжанинова А. С. Solvability of an Initial–Boundary Value Problem for the Modified Kelvin–Voigt Model with Memory along Fluid Motion Trajectories // Differential Equations. 2024. Vol. 60, N 2. P. 180–203. <https://doi.org/10.1134/S0012266124020046>
13. Брацун Д. А., Красняков И. В., Брацун А. Д. Биомеханические модели живой ткани // Российский журнал биомеханики. 2023. № 4. <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2023.4.04>
14. Зависимости между напряжениями и деформациями в нелинейнодеформируемом теле. Часть 1. Основные принципы и соотношения механики деформируемого твердого тела / В. М. Круглов, С. В. Бакушев, А. И. Шеин, В. Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман, А. А. Томилов // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 154–163.
15. Чернов Н. Н., Вареникова А. Ю., Лагута М. В. Использование относительного нелинейного параметра для создания систем – ультразвуковой визуализации биотканей // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10, № 1(36).
16. Шамаев А. С., Шумилова В. В. Усреднение уравнений движения среды, состоящей из упругого материала и несжимаемой жидкости Кельвина-Фойгта // Уфимский математический журнал. 2024. № 1. С. 98–110.
17. Concretization of nonlinear constitutive relations by results of uniaxial compression and indentation experiments / Y. Astapov, A. Markin, M. Sokolova, D. Khristich // Journal of Physics: Conference Series. 2021. N 1902(1). P. 012002.
18. Ахметшин Л. Р., Смолин И. Ю. Программируемое поведение метаматериала при изменении способа соединения элементарных ячеек // Вестник ПНИПУ. Механика. 2023. № 1. С. 26–32.
19. Mizzi L., Spaggiari A. Novel chiral honeycombs based on octahedral and dodecahedral Euclidean polygonal tessellations // International Journal of Solids and Structures. 2022. Vol. 238. P. 111428. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111428>
20. Аспекты численного моделирования процессов разрушения упруго-хрупких тел / В. Э. Вильдеман, Е. В. Феклистова, А. И. Мугатаров, М. Н. Муллахметов, А. М. Кучуков // Вычислительная механика сплошных сред. 2023. Т. 16, № 4. С. 420–429. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.4.35>

References

1. Zhirkov I.I., Gordienko A.V., Pavlovich I.M., Chumak B.A., Yakovlev V.V. Diagnosis of liver fibrosis: emphasis on elastography. *E`ksperimental'naya i klinicheskaya gastroe`nterologiya = Experimental and Clinical Gastroenterology*. 2020;(194):72-81. (In Russ.)
2. Belyaeva A.V., Belyaeva O.A., Rozinov V.M. Diagnostic potential of ultrasound elastography in patients with surgical diseases and injuries. *Rossijskij vestnik detskoj xirurgii, anesteziologii i reanimatologii = Russian Bulletin of Pediatric Surgery, Anesthesiology and Intensive Care*. 2023;13(3):373-384. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/psaic1523>
3. Diomidova V.N., Razbinina E.A., Valeeva O.N., Vasilyeva L.N. The effectiveness of shear wave elastography in assessing liver damage in patients with postcovid syndrome. *Acta Medica Eurasica*. 2022;(3):99-113. (In Russ.)
4. Kravchuk D.A., Chernov N.N., Mikhralieva A.I. Analytical modeling of breast elastography. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2024;14(1). (In Russ.)
5. King's College London. New research explores non-invasive MR elastography as an alternative to liver biopsy in obese patients. *Medical Xpress*. 2023:104-113. <https://doi.org/10.21869/2223-1536-2024-14-1-104-113>. EDN SHBQKL
6. Shevkina S.P., Zhestovskaya S.I., Lebedeva E.V. Two-dimensional shear wave elastography: rational value in the bi-rads system. *Kremlevskaya medicina. Klinicheskij vestnik = Kremlin Medicine. Clinical Bulletin*. 2024;(2):54-57 (In Russ.)
7. Park S.Y., Kang B.J. Combination of shear-wave elastography with ultrasonography for detection of breast cancer and reduction of unnecessary biopsies: a systematic review and meta-analysis. *Ultrasonography*. 2021;(40):318–332.
8. Protsyk O.M., Shvyrev S.L., Mitkova M.D., Kapustin V.V. Two-dimensional shear wave elastography in assessing the presence and severity of liver fibrosis in comparison with transient elastography data. *Ul'trazvukovaya i funkcional'naya diagnostika = Ultrasound and Functional Diagnostics*. 2022;(4):10-22. (In Russ.)
9. Zvyagin A.V. On the existence of weak solutions of the fractional Kelvin-Voigt model. *Matematicheskie zametki = Mathematical Notes*. 2024;116(1):152-157. (In Russ.)
10. Kravchuk D.A., Chernov N.N., Perestelkov S.A., Mikhralieva A.I. Experimental studies of the acoustic field of transverse waves in a biological tissue model. *Radi-oe`lektronika. Nanosistemy`. Informacionny'e texnologii = Radioelectronics. Nanosystems. Information Technology*. 2024;16(3):381-386. (In Russ.) <https://doi.org/10.17725/rensit.2024.16.381>. EDN HJAPTZ

11. Laguta M.V., Kravchuk D.A., Chernov N.N. Study of nonlinear interaction of an acoustic wave with biological tissues for the purposes of acoustic elastography. *Izvestiya Yu-go-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoe priborostroenie = Proceedings of the Southwest State University. Series: Control, Computer Engineering, Information Science. Medical Instruments Engineering*. 2025;15(1):131-143. (In Russ.)
12. Turbin M.V., Ustyuzhaninova A.S. Solvability of an Initial–Boundary Value Problem for the Modified Kelvin–Voigt Model with Memory along Fluid Motion Trajectories. *Differential Equations*. 2024;60(2):180–203. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0012266124020046>
13. Bratsun D.A., Krasnyakov I.V., Bratsun A.D. Biomechanical models of living tissue. *Rossiiskij zhurnal biomexaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2023;(4). (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/RZhBiomeh/2023.4.04>
14. Kruglov V.M., Bakushev S.V., Shein A.I., Erofeev V.T., Al Dulaimi Salman, Dawud Salman, Tomilov A.A. Dependencies between stresses and deformations in a nonlinearly deformable body. Part 1. Basic principles and relations of deformable solid mechanics. *E`kspert: teoriya i praktika = Expert: Theory and Practice*. 2023;(4):154-163. (In Russ.)
15. Chernov N.N., Varenikova A.Yu., Laguta M.V. Using a relative nonlinear parameter to create systems for ultrasound imaging of biological tissues. *Modelirovanie, optimizatsiya i informacionny`e texnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(1). (In Russ.)
16. Shamaev A.S., Shumilova V.V. Averaging the equations of motion of a medium consisting of an elastic material and an incompressible Kelvin-Voigt fluid. *Ufimskij matematicheskij zhurnal = Ufa Mathematical Journal*. 2024;(1):98-110. (In Russ.)
17. Astapov Y., Markin A., Sokolova M., Khristich D. Concretization of nonlinear constitutive relations by results of uniaxial compression and indentation experiments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;(1902):012002.
18. Akhmetshin L.R., Smolin I.Yu. Programmable behavior of a metamaterial when changing the method of connecting elementary cells. *Vestnik PNIPU. Mexanika = PNIPU Mechanics Bulletin*. 2023;(1):26-32. (In Russ.)
19. Mizzi L., Spaggiari A. Novel chiral honeycombs based on octahedral and dodecahedral Euclidean polygonal tessellations. *International Journal of Solids and Structures*. 2022;238:111428. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2022.111428>
20. Wildeman V.E., Feklistova E.V., Mugatarov A.I., Mullakhmetov M.N., Kuchukov A.M. Aspects of numerical modeling of fracture processes in elastic-brittle bodies. *Vy`chislitel'naya mexanika sploshny`x sred = Computational Continuum Mechanics*. 2023;16(4):420–429. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.4.35>

Информация об авторах / Information about the Authors

Лагута Маргарита Владимировна, ассистент, Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, г. Таганрог, Российская Федерация,
e-mail: laguta@sfnedu.ru,
ORCID: 0000-0001-7833-6055

Margarita V. Laguta, Assistant, Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Taganrog, Russian Federation,
e-mail: laguta@sfnedu.ru,
ORCID: 0000-0001-7833-6055

Кравчук Денис Александрович, доктор технических наук, профессор, Южный федеральный университет, Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения, г. Таганрог, Российская Федерация,
e-mail: kravchukda@sfnedu.ru,
ORCID: 0000-0002-4220-3928

Denis A. Kravchuk, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Southern Federal University, Institute of Nanotechnology, Electronics and Instrumentation, Taganrog, Russian Federation,
e-mail: kravchukda@sfnedu.ru,
ORCID: 0000-0002-4220-3928