

УДК 535.326; 535.361.22; 535.326; 620.186.5
EDN: RRSVRR

PACS: 42.79.Ls

Оптическая когерентная томография в качестве метода обнаружения дефектов в полимерных композиционных материалах© И. В. Злобина^{1*}, М. В. Алонова¹, Н. В. Бекренев¹, Д. А. Зимняков^{1,2}, А. В. Пасечная¹,
В. О. Нефедов¹¹ СГТУ имени Гагарина Ю. А., г. Саратов, 410054 Россия

* E-mail: irinka_7@mail.ru

² Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов, 410028 Россия

Статья поступила в редакцию 8.12.2025; после доработки 5.03.2026; принята к публикации 5.06.2026

Шифр научной специальности: 1.3.2

В работе изучено применение оптической когерентной томографии для обнаружения дефектов на границе «матрица–волокно» в полимерных композиционных материалах (ПКМ) из непрерывного углеродного волокна и суперконструкционного термопласта полиэфирэфиркетона. На полученных В-сканах обнаружены дефектные участки. Проведена бинаризация различной степени. Выявлен процент бинаризации, обеспечивающий визуальную информативность с одновременным снижением артефактов и шумов, характерных для В-сканов. Для графического выражения и дальнейшей количественной оценки полученных результатов бинаризованных В-сканов были сформированы А-сканы. Выявлено, что бинаризация В-сканов на уровне 40 % позволяет информативно отобразить слой полимера, определить его толщину, снизить проявление и оценить сплошность на границе полимера и наполнителя.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, полимерные композиционные материалы, бинаризация, дефекты структуры, граница «матрица–волокно».

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-3-68-74

Введение

В процессе производства волокнистых ПКМ могут возникать различные дефекты, включая поверхностные повреждения, вызванные контактом с направляющими роликами, а также проблемы, связанные со статическим электричеством и неравномерностью покрытия [1, 2]. К другим важным дефектам относятся проблемы с агрегацией наночастиц на границе раздела «наполнитель–матрица», вызванные различиями в химической природе и поверхностных свойствах волокон и матрицы, а также неравномерное распределение волокон в матрице [3]. Они напрямую влияют на конечные свойства изделия. Агрегация частиц

приводит к сложности полноценной пропитки волокна связующим и формированию зон с пониженной прочностью [3]. Неравномерное распределение волокон в объеме матрицы создает локальные концентрации напряжений, тем самым вызывая снижение прочности и ударной вязкости, а также повышение склонности к расслоению. Следствием дефектов является снижение эксплуатационных характеристик под нагрузкой. Даже материалы с высокими прочностными показателями – такие, как углепластики, критически чувствительны к этому фактору в силу своей низкой ударной вязкости [3, 4].

В связи с тем, что структура ПКМ сложна, а сами материалы многокомпонентны, ак-

туальным представляется контроль деталей, изготовленных из них, не только на этапе производства и выпуска, но и во время эксплуатации. Наличие дефектов различного происхождения, размеров и локализации оказывают значительное влияние на формирование комплекса физико-механических характеристик ПКМ [5].

В настоящее время активное развитие получают методы диагностики и поиск путей повышения их информативности. Последнее обеспечивается повышением чувствительности соответствующих элементов исследовательского оборудования, использованием уточненных зависимостей, применяющихся для обработки сигналов, и алгоритмов анализа информации.

Одним из перспективных методов диагностики наличия дефектов в виде воздушных включений (пор, трещин) в ПКМ является метод оптической когерентной рефлектометрии (ОКТ). Необходимо отметить, что многолетний опыт применения данного метода по отношению к биологическим объектам широко применяется в медицине [6–10]. Благодаря микрометровому разрешению и возможности осуществлять кросс-секционную визуализацию в объеме материала, ОКТ предоставляет уникальные данные о морфологии внутренних структур, распределении армирующих элементов, дефектоскопии на субповерхностном уровне и качестве адгезионных соединений [8].

Главным вектором исследований по применению ОКТ для ПКМ является переход от качественной визуализации к количественному, высокоскоростному анализу и прогнозированию свойств, а также к неинвазивному методу исследований КМ. Так в [11–16] применили ОКТ для обследования эпоксидной смеси из стекловолокна, которая обычно используется для изготовления лопастей ветряных турбин. Через ОКТ-изображения, полученные при статическом испытании расслаивающегося стекловолоконного композиционного материала, были обнаружены трещины и места расслоения.

Фундаментальный принцип ОКТ базируется на интерферометрии Майкельсона с использованием источника низкокогерентного света, который от источника разделяется све-

тоделителем на эталонный и пробный пучки [12]. Ключевым параметром для анализа ПКМ является рассеивающая способность. Различные компоненты таких материалов (полимерная матрица, стеклянные/углеродные волокна, границы раздела) обладают разными показателями преломления, что приводит к частичному обратному рассеянию света. Регистрируя амплитуду и временную задержку этого сигнала, ОКТ-система строит одномерный А-скан. Последовательное сканирование по двум координатам позволяет реконструировать двумерное изображение В-скана (поперечное сечение) или трехмерный объем.

В настоящее время в литературе крайне мало материалов, описывающих опыт применения данного метода относительно широкого круга ПКМ, что обуславливает актуальность данного направления. В связи с этим актуальным представляется определение возможностей ОКТ применительно к ПКМ, изготовленным методом послойного наплавления из углеродных волокон и термопластов, что обусловлено развитой морфологией поверхности наполнителя и коротким периодом повышенной вязкости расплава термопласта, в частности – полиэфирэфиркетона (ПЭЭК).

Материалы и методы

В данной работе исследовались образцы монослоя, сформированного на 3D принтере Anisoprint Composer A4 из препрега, армированного жгутом из непрерывных углеродных волокон, пропитанного эпоксидной смолой марки ЭД-20 и покрытого полиэфирэфиркетонном (ПЭЭК). Верхний слой образцов был представлен слоем ПЭЭК. Ниже него располагался тонкий слой реактопластичного полимера (эпоксидная смола марки ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамин (ПЭПА)), в средней части располагались углеродные волокна. Особенности структуры используемого композитного материала приведены в работах [17].

Для исследования были использованы 2 группы образцов с размерами $30 \times 10 \times 1,2$ мм – контрольные и опытные, подвергнутые электрофизическому воздействию, в частности – прошедшие СВЧ обработку на частоте

2450 МГц. Обработку образцов в СВЧ электромагнитном поле осуществляли на лабораторных СВЧ технологических установках производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.).

Для инструментальной реализации метода низкокогерентной рефлектометрии был использован оптический когерентный томограф OSC 1300 SS (ThorLabs, США) с длиной волны зондирующего излучения 1300 нм, максимальной глубиной зондирования 3 мм, длиной трека сканирования 5 мм с размером изображения 512 на 720 пикселей в режиме В-сканирования.

После получения набора экспериментальных данных проводился анализ В-сканов и А-сканов.

Результаты и обсуждение

Анализ полученных изображений В-сканов позволяет выявить характерные особенности контрольных образцов (рис. 1), прошедших модификацию. Волокна углепластика в значительной мере поглощают зондирующее излучение. Верхний слой исследуемого материала, представленный полимером, прозрачен для него, что позволяет использовать ОКТ для контроля состояния верхнего слоя полимера и области примыкания полимера к матрице.

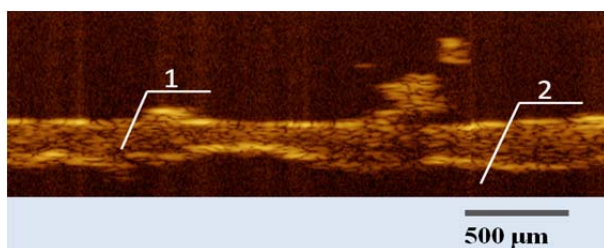


Рис. 1. В-скан контрольного образца:
1 – матрица, 2 – волокно

Отмечено, что для контрольных образцов ярко выражено наличие области скачка показателя преломления на границе «полимер-волокно», что визуально отображается как яркая горизонтальная линия. В обработанных образцах размеры области со скачком показателя преломления значительно менее протяженные.

При анализе В-сканов выявлен схожий характер ярких линий при переходе зондирующего излучения через границы «воздух–полимер» и «матрица–наполнитель», что определило целесообразность поиска объективных методов для их сравнения.

В качестве количественной оценки полученных результатов была проведена бинаризация сформированных В-сканов (рис. 2).

Рассматривалась максимальная интенсивность пикселя изображения и вводилось граничное условие. Пикселям с меньшей интенсивностью назначалось нулевое значение, с большей – единичное. Полученные изображения имеют больший контраст, выделяют области с нужными значениями величин отклика и отображают области с резкими скачками показателя преломления. Образована система уравнений (1)

$$\begin{cases} I_{\text{бин}}(i, j) = 1, & \text{если } I(i, j) \geq I_b, \\ I_{\text{бин}}(i, j) = 0, & \text{если } I(i, j) < I_b, \end{cases} \quad (1)$$

где $I(i, j)$ – интенсивность пикселя исходного В-скана, $I_{\text{бин}}(i, j)$ – бинаризованное значение интенсивности В-скана, I_b – граничное условие бинаризации.

Граничное условие бинаризации определяется долей от максимальной интенсивности I_{max} исходного В-скана:

$$I_b = K \times I_{\text{max}}, \quad (2)$$

где K – коэффициент бинаризации.

Небольшие значения граничных условий – $K = 30\%$ бинаризации – сохраняют информацию о неоднородностях, сформированных в В-скане в слое полимера (рис. 2), а большие значения – $K = 50\%$ бинаризации – оставляют только самые яркие участки границ и не позволяют получить информацию о слое полимера (рис. 2). Промежуточные варианты, соответственно, оставляют часть неоднородности в слое полимера.

Также осуществлялась оценка исходных и бинаризованных А-сканов. Оценка единичного А-скана вдоль вертикальной линии тоже проводится в соответствии с граничными условиями бинаризации, которая позволяет выделить границы и распределение интенсивности сигнала в объеме полимера.

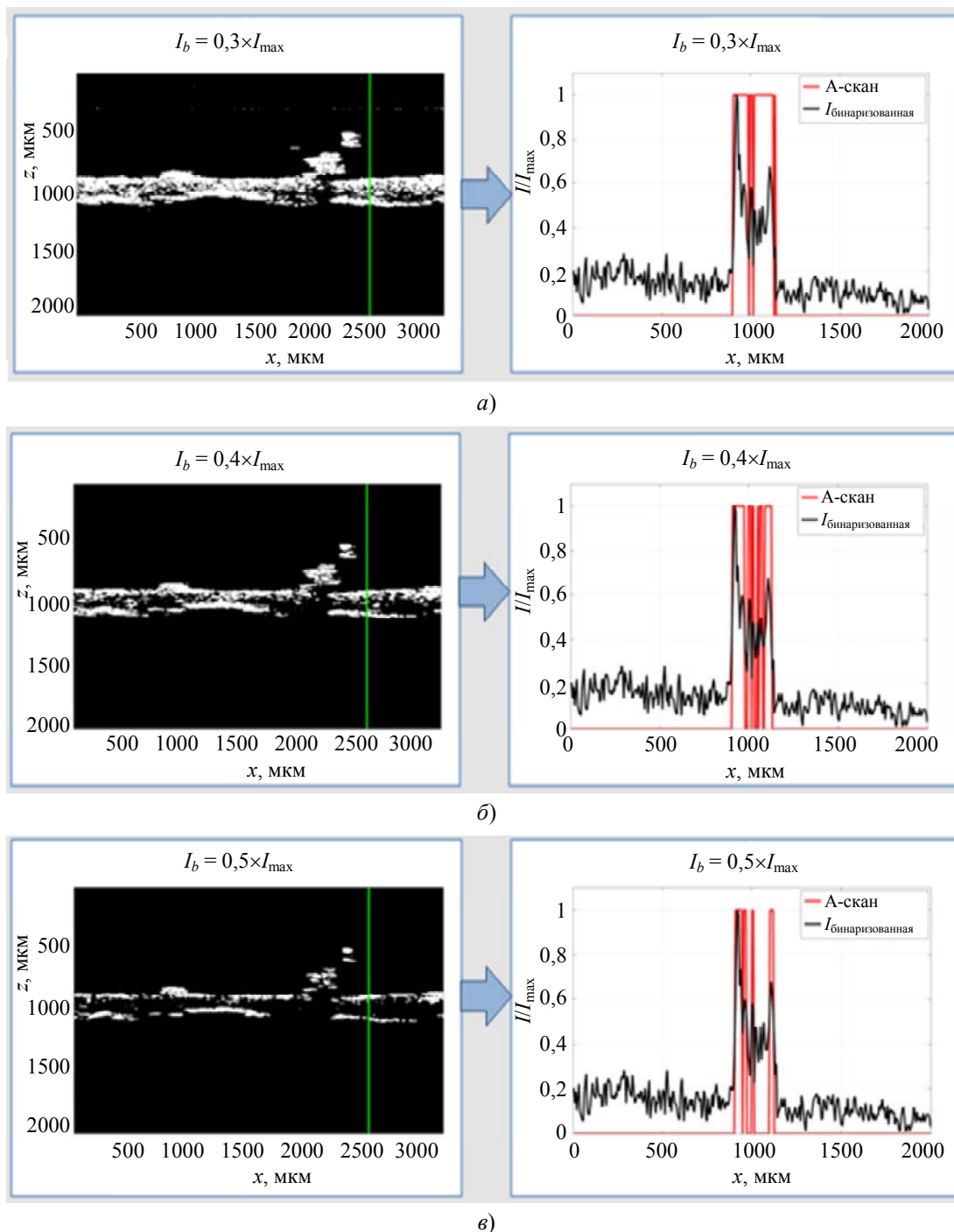


Рис. 2. Результаты бинаризации В-сканов (слева) и соответствующие им А-сканы (справа). Бинаризация 30 % (а), 40 % (б) и 50 % (в)

Для получения графического выражения, позволяющего произвести количественную оценку полученных результатов бинаризованных В-сканов, были выделены А-сканы.

Наиболее информативным является А-скан, соответствующий В-скану, бинаризованному на 40 % – отчетливо показаны границы полимера, контрастная область границы «полимер-волокно». Условием данной бина-

ризации было уменьшение интенсивности в e раз относительно максимального значения. Среднее значение условия бинаризации порядка 40 % от максимальной интенсивности обеспечивает информативное отображение границы «матрица–волокно» (без потери информации, возникающей при $I_b = 0,5 \times I_{max}$, и без лишних шумов, которые сохраняются при низком пороге бинаризации.

Высокое значение пика отклика на границе «полимер–волокно» характеризует скачок показателя преломления вещества до величин, порядка показателя преломления воздуха. С учетом технологии изготовления подобных композитных материалов и специфики структуры поверхности углеродных волокон можно заключить, что часть области контакта матрицы и наполнителя содержит воздух, который частично растворяется в полимере при модифицирующем воздействии на образцы, что согласуется с результатами сравнительного анализа физико-механических характеристик образцов аналогичного состава [17, 18].

Заключение

Бинаризация В-сканов с низким порогом позволяет информативно отобразить слой полимера, определить толщину слоя полимера и оценить её распределение по поверхности исследуемого ПКМ.

Бинаризация В-сканов с высоким порогом позволяет выделить области с резким скачком показателя преломления и определять дефекты соединения полимера и углеродного волокна.

Средний уровень бинаризации сохраняет информацию о толщине слоя полимера и о наличии контрастных фрагментов в области контакта «матрица–волокно», что позволяет произвести комплексную оценку указанных параметров.

С учетом распределения интенсивности сигнала с экспоненциальным затуханием в качестве граничных условий бинаризации предлагается использовать падение значения интенсивности в e раз от максимального.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ
23-79-00039.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муравский А. А., Аликин М. Б., Дворко И. М., Лавров Н. А. / Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2023. Т. 64. № 90. С. 58–66.
2. Biggham C. J. / Resinate. 2018. № 5.
3. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А., Торлова А. С., Никалов Е. С. / Фундаментальные науки. 2018. № 5. С. 459–465.
4. Mahboubizadeh S., Sadeq A., Arzaqi Z., Ashkani O., Samadoghi M. / Discover Materials. 2024. Vol. 4. № 1. P. 47.
5. Дегтярева М. А., Журнова Е. А. / Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 2. С. 78–80.
6. Гришианов В. Н. Оптическая когерентная томография в медицинской диагностике: электрон. метод. указания. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015.
7. Зайцев В. Ю., Виткин И. А., Матвеев Л. А., Геликонов В. М., Матвеев А. Л., Геликонов Г. В. / Известия вузов. Радиофизика. 2014. Т. 57. № 3. С. 231–250.
8. Stifter D. / Applied Physics B. 2007. Vol. 88. № 3. P. 337–357.
9. Лю П., Яо Л., Groves R. / Труды 7-го Международного симпозиума по неразрушающему контролю в аэрокосмической промышленности. 2015. С. 2–5.
10. Huang D., Swanson E., Lin C. et al. / Science. 1991. Vol. 254. № 5035. P. 1178–1181.
11. Dunkers J. P. / Оптика и лазеры в технике. 2001. Т. 35. № 3. С. 135–147.
12. Liu P., Groves R. M., Benedictus R. / NDT & E International. 2014. Vol. 65. P. 2–9.
13. Гуров И. П., Жукова Е. В., Маргарянц Н. Б. / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. Т. 12. № 3. С. 40–45.
14. Fercher A. F. / Z. Med. Phys. 2010. Vol. 20. № 4. P. 251–276.
15. Гуров И. П. / Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2005. Т. 5. № 21. С. 5–20.
16. Wenninger M., Marschik C., Felbermayer K., Heise B. / AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2884. P. 6.
17. Бекренев Н. В., Злобина И. В. / Материалы XIV Всерос. науч. и студ. конф. с междунар. участием. — Санкт-Петербург, 14–18 мая 2024 г. – СПб.: СПбГУПТД, 2024. С. 11–12.
18. Злобина И. В., Бекренев Н. В., Чуриков Д. О., Пасечная А. А. / Целостность и ресурс в экстремальных условиях: сб. материалов Всерос. конф., посв. 75-летию ЯНЦ СО РАН, Якутск, 19–23 сентября 2024 г. – Киров: МЦИТО, 2024. С. 217–219.

The possibilities of using optical coherence tomography as a method for detecting defects in polymer composites

I. V. Zlobina^{1*}, M. V. Alonova¹, N. V. Bekrenev¹, D. A. Zimnyakov^{1,2}, A. V. Pasechnaya¹, and V. O. Nefedov¹

¹ Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, 410054 Russia

* E-mail: irinka_7_@mail.ru

² Institute of Precision Mechanics and Control Problems of the Russian Academy of Sciences, Saratov, 410028 Russia

Received 8.12.2025; revised 5.03.2026; accepted 5.06.2026

Research has been carried out in the field of using optical coherence tomography to detect defects at the "matrix-fiber" interface in polymer composite materials based on continuous carbon fiber and superconstructive thermoplastic polyesteresterketone. Defective areas were recorded on the received B-scans. Binarization of various degrees has been carried out. The percentage of binarization has been identified, providing visual information content while reducing artifacts and noise typical of B-scans. To form a graphical expression and further quantify the results obtained from binarized B-scans, A-scans were generated. It was found that the binarization of B-scans at the level of 40 % makes it possible to informatively display the polymer layer, determine its thickness, reduce the appearance and evaluate the continuity at the polymer-filler boundary.

Keywords: optical coherence tomography, polymer composite materials, binarization, structural defects, matrix-fiber boundary.

REFERENCES

1. Muravskii A. A., Alikin M. B., Dvorko I. M., and Lavrov N. A., Proc. St. Petersburg State Institute of Technology, № 90, 58–66 (2023).
2. Biggham C. J., Resinate, № 5, (2018).
3. Kolosova A. S., Sokol'skaya M. K., Vitkalova I. A., Torlova A. S., and Nikalov E. S., Fundamental Research, № 5, 459 (2018) [in Russian].
4. Mahboubzadeh S., Sadeq A., Arzaqi Z., Ashkani O., and Samadoghi M., Discover Materials **4** (1), 47 (2024).
5. Dektiareva M. A. and Zhirnova E. A., Aktualnye Problemy Aviatsii i Kosmonavtiki – Actual Problems of Aviation and Cosmonautics **2**, 78–80 (2015) [in Russian].
6. Grishanov V. N. Optical Coherence Tomography in Medical Diagnostics [Electronic Methodological Guidelines]. Samara: Samara State Aerospace University Press, 2015 [in Russian].
7. Zaitsev V. Yu., Vitkin I. A., Matveev L. A., Gelikonov V. M., Matveev A. L., and Gelikonov G. V., Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Radiofizika [Radiophysics and Quantum Electronics] **57** (3), 231–250 (2014).
8. Stifter D., Applied Physics B **88** (3), 337–357.
9. Liu P., Yao L., and Groves R., Proc. 7th Int. Symp. on NDT in Aerospace, 2015, pp. 2–5.
10. Huang D., Swanson E., Lin C. et al., Science **254** (5035), 1178–1181 (1991).
11. Dunkers J. P., Optika i Lazery v Tekhnike [Optics and Lasers in Engineering] **35** (3), 135–147 (2001) [in Russian].
12. Liu P., Groves R. M., and Benedictus R., NDT & E International **65**, 2–9 (2014).
13. Gurov I. P., Zhukova E. V., and Margaryants N. B., Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics **12** (3), 40–45 (2012).
14. Fercher A. F., Z. Med. Phys. **20** (4), 251–276 (2010).
15. Gurov I. P., Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics **5** (21), 5–20 (2005).

16. Wenninger M., Marschik C., Felbermayer K., and Heise B., AIP Conf. Proc. **2884**, 6 (2023).
17. Bekrenev N. V. and Zlobina I. V. Proc. XIV All-Russ. Sci. and Student Conf. with Int. Participation, St. Petersburg, 14–18 May 2024. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, 2024, pp. 11–12 [in Russian].
18. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Churikov D. O., and Pasechnaya A. A., Proc. All-Russ. Conf. Dedicated to the 75th Anniv. of the Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, 19–23 Sept. 2024. Kirov: MTSITO, 2024, pp. 217–219 [in Russian].

Об авторах

Злобина Ирина Владимировна, к.т.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: irinka_7_@mail.ru SPIN-код: 6730-8099, AuthorID: 686083

Алонова Марина Васильевна, к.ф.-м.н., доцент, СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: alonova_marina@mail.ru SPIN-код: 3059-2174, AuthorID: 667431

Бекренев Николай Валерьевич, д.т.н., профессор, СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru SPIN-код: 8948-8116, AuthorID: 271817

Зимняков Дмитрий Александрович, доктор наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77); Институт проблем точной механики и управления РАН (410028, Россия, г. Саратов, ул. Рабочая, д. 24). E-mail: zimnykov@mail.ru SPIN-код: 1918-5220, AuthorID: 29094

Пасечная Алина Владимировна, студент кафедры «Техническая механика и мехатроника» СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: pasechnaya_alina_15.07.03@mail.ru

Нефедов Владислав Олегович, студент кафедры «Техническая механика и мехатроника» СГТУ имени Гагарина Ю. А. (410054, Россия, г. Саратов, Политехническая ул., 77). E-mail: b640018968@gmail.com SPIN-код: 4115-8463, AuthorID: 1334364