

Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 165–171.
Forests of Russia and economy in them. 2025. № 4 (95). P. 165–171.

Научная статья

УДК 678.674.32:535.34:621.3.038.78

DOI: 10.51318/FRET.2025.95.4.016

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АЦЕТИЛЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПЛЕНОК ПОСЛЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Н. С. Штабнов¹, Р. А. Вазиров², М. Е. Котельников³,
А. Е. Шкуро⁴, В. Г. Бурындина⁵

^{1, 4, 5} Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

^{2, 3} Уральский федеральный университет имени первого президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Алексей Евгеньевич Шкуро,
shkuroae@m.usfeu.ru

Аннотация. Актуальные проблемы радиационного контроля, обеспечения радиационной безопасности и дозиметрии диктуют необходимость создания надежных, высокочувствительных и экономически целесообразных датчиков ионизирующего излучения. В настоящем исследовании изучено влияние ионизирующего излучения на оптические свойства пленок из ацетата целлюлозы (АЦ) для оценки их применимости в радиационной дозиметрии. Образцы были облучены электронным пучком (10 МэВ) в диапазоне поглощенных доз 10–90 кГр. Анализ спектров поглощения выявил два выраженных максимума при 260 и 305 нм, интенсивность которых коррелирует с дозой. Регрессионный анализ показал квадратичную зависимость оптической плотности от дозы: в интервале 10–50 кГр наблюдается снижение оптической плотности, тогда как при 50–90 кГр – ее увеличение. Установлено, что изменения при дозах < 50 кГр статистически не значимы. Механизмы трансформации свойств связаны с радиационно-индуцированной деструкцией макромолекул АЦ (разрыв цепей, образование радикалов, карбонильных групп и газов), а также накоплением дефектов и сопряженных связей в полимерной матрице. Снижение оптической плотности в низкодозовой области объясняется ростом степени кристалличности АЦ, а ее увеличение при высоких дозах – накоплением продуктов деструкции. Результаты подтверждают высокую радиационную чувствительность материала и его потенциал в качестве экологичного, биосовместимого и экономически эффективного чувствительного элемента для дозиметров, особенно в диапазоне доз > 50 кГр. Использование возобновляемого полимера решает задачи устойчивого развития и расширяет возможности радиационного мониторинга.

Ключевые слова: пленки, поглощенная доза, оптическая плотность, ацетат целлюлозы, ионизирующее излучение

Благодарности: авторский коллектив выражает благодарность Т. А. Захаровой за помощь в обработке и интерпретации экспериментальных данных.

Для цитирования: Исследование оптических свойств ацетилцеллюлозных пленок после облучения электронным пучком / Н. С. Штабнов, Р. А. Вазиров, М. Е. Котельников [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 165–171.

Original article

RESEARCH OF OPTICAL PROPERTIES OF ACETYLCELLULOSE FILMS AFTER ELECTRON BEAM IRRADIATION

**Nikita S. Shtabnov¹, Ruslan A. Vazirov², Maxim E. Kotelnikov³,
Alexey E. Shkuro⁴, Victor G. Buryindin⁵**

^{1, 4, 5} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

^{2, 3} Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Alexey E. Shkuro,
shkuroae@m.usfeu.ru

Abstract. Current problems of radiation control, radiation safety, and dosimetry dictate the need to create reliable, highly sensitive, and cost-effective detectors for ionizing radiation. This research investigates the effect of ionizing radiation on the optical properties of cellulose acetate (CA) films was studied to assess their applicability in radiation dosimetry. Samples were irradiated with a 10 MeV electron beam at absorbed doses of 10–90 kGy. Absorption spectra analysis revealed two distinct maxima at 260 nm and 305 nm, whose intensity correlates with the dose. Regression analysis confirmed a quadratic dependence of optical density on dose: a decrease was observed in the 10–50 kGy range, followed by an increase at 50–90 kGy. Changes below 50 kGy were statistically insignificant. The mechanisms of property transformation are associated with radiation-induced macromolecular destruction CA (chain scission, radical formation, carbonyl groups, gas evolution) and the accumulation of defects/conjugated bonds in the polymer matrix. The initial decrease in optical density is attributed to increased crystallinity CA, while the rise at higher doses stems from accumulated degradation products. The results demonstrate high radiation sensitivity and confirm the potential of CA as an eco-friendly, biocompatible, and cost-effective sensing material for dosimeters, particularly at doses > 50 kGy. The use of this renewable polymer addresses sustainability goals and expands options for radiation monitoring.

Keywords: films, absorbed dose, optical density, cellulose acetate, ionizing radiation

Acknowledgements: The author's team expresses its gratitude to T. A. Zakharova for assistance in processing and interpreting experimental data.

For citation: Research of optical properties of acetylcellulose films after electron beam irradiation / N. S. Shtabnov, R. A. Vazirov, M. E. Kotelnikov [et al.] // Forests of Russia and economy in them. 2025. № 4 (95). P. 165–171.

Введение

Современные задачи радиационного контроля, радиационной безопасности и дозиметрии требуют разработки надежных, чувствительных и экономически эффективных детекторов ионизирующего излучения. Среди различных типов детекторов особый интерес представляют полимерные пленки, способные изменять свои физико-химические свойства под действием радиационного облучения (Uses of polymer-alanine..., 1993; Сухих и др.,

2013; Тенишев, 2020; Polymer Film..., 2021). Эти изменения, такие как разрушение макромолекул, сшивка цепей, образование треков и свободных радикалов, могут быть зафиксированы с использованием различных аналитических методов, что делает полимерные материалы удобными для количественной и качественной оценки дозы облучения.

Одним из наиболее изученных и широко применяемых полимеров в данной области является

CR-39 (Optimization of CR-39..., 1999), используемый для регистрации треков тяжелых заряженных частиц. Наряду с ним также активно применяются полиэтилен, поликарбонат, полиметилметакрилат и другие полимеры, демонстрирующие хорошую радиационную стойкость и воспроизводимость дозиметрических характеристик. Простота технологии изготовления, возможность создания многоразовых дозиметров, а также устойчивость к внешним воздействиям обуславливают высокий потенциал применения полимерных детекторов в различных отраслях: от медицинской радиологии до радиационного мониторинга в космическом пространстве.

Тем не менее существующие пленочные детекторы обладают и рядом существенных недостатков (Chaikh и др., 2014). К ним относятся ограниченная чувствительность к мягкому гамма- и рентгеновскому излучению, зависимость отклика от условий окружающей среды (температуры, влажности, УФ-излучения), а также необходимость в сложной или длительной процедуре постобработки (например, химическое травление треков). Кроме того, многие полимерные дозиметры не обеспечивают возможности мгновенного или многократного считывания данных, что ограничивает их применение в задачах реального времени. Все это обуславливает необходимость дальнейших исследований, направленных на улучшение чувствительности, стабильности и удобства эксплуатации таких детекторов.

В связи с этим возрастает актуальность поиска и разработки новых полимерных материалов с улучшенными радиационно чувствительными свойствами. Идеальные кандидаты должны обладать высокой чувствительностью к широкому диапазону излучений, стабильностью в различных условиях окружающей среды, минимальной инерцией отклика и возможностью быстрой регистрации дозы. Кроме того, большое значение имеет совместимость новых полимеров с современными методами аналитики и автоматизированными средствами считывания информации, что особенно важно для задач персонального дозиметрического мониторинга и детекторов следующего поколения.

На фоне растущего внимания к вопросам устойчивого развития и экологической безопасности все большую актуальность приобретает использование возобновляемых природных полимеров в технологически значимых областях, включая радиационную дозиметрию. Одним из перспективных классов таких материалов являются эфиры целлюлозы – производные самого распространенного природного полимера, отличающиеся широким разнообразием структур и свойств.

Эфиры целлюлозы, такие как нитроцеллюлоза, ацетилцеллюлоза (McLaughlin and Ba, 1988; Algethami, 2025), карбоксиметилцеллюлоза и др., обладают рядом характеристик, которые делают их потенциально пригодными для использования в качестве радиационно чувствительных материалов:

- высокая чувствительность к воздействию ионизирующего излучения, проявляющаяся в изменении оптических, механических и электрохимических свойств;
- возможность модификации химического состава и структуры для управления радиационным откликом;
- хорошая пленкообразующая способность и совместимость с различными добавками (индикаторами, стабилизаторами и т. д.);
- экологичность, биосовместимость и биоразлагаемость, что делает их безопасными для использования в медицине и снижает воздействие на окружающую среду при утилизации.

Кроме того, благодаря доступности и низкой стоимости, природные полимеры представляют собой экономически привлекательную альтернативу синтетическим аналогам. Это особенно важно для широкомасштабного применения дозиметров: например в персональной радиационной защите или мониторинге окружающей среды.

Таким образом, использование эфиров целлюлозы и других возобновляемых биополимеров в качестве основы для дозиметрических материалов представляет собой не только научно обоснованное, но и социально значимое направление исследований. Это открывает новые возможности для создания экологичных, чувствительных и недорогих детекторов радиации, соответствующих

современным требованиям к функциональности и устойчивому развитию.

Целью настоящего исследования является изучение влияния поглощенной дозы ионизирующего излучения на оптические свойства пленок, изготовленных из ацетата целлюлозы, для оценки перспективы применения данного материала в качестве радиационно чувствительного элемента в дозиметрии.

Методика и объекты исследования

Для приготовления пленочных образцов использовали ацетат целлюлозы (ТУ 6-05-943-75). В коническую колбу объемом 100 мл помещали навеску полимера массой от 3,00 до 5,00 г, предварительно взвешенную на аналитических весах с точностью $\pm 0,01$ г. К полимеру добавляли ацетон в количестве 42,0–55,0 г, после чего смесь оставляли при комнатной температуре на 24 ч для набухания материала.

По завершении набухания колбу помещали на магнитную мешалку и проводили перемешивание раствора в течение 3–4 ч. Затем в систему вводили этилацетат в количестве, составляющем 25 % от массы использованного ацетона. Перемешивание продолжалось дополнительно в течение 3–5 ч. После этого раствор оставляли в покое на 12 ч. Конечная концентрация раствора эфира целлюлозы составляла 5,5–7,0 % по массе.

Полученный раствор подвергали фильтрованию с целью удаления гелеобразных фракций полимера и последующему вакуумированию для удаления пузырьков воздуха. Очищенный раствор заливали в чашки Петри, при этом толщина пленки регулировалась объемом раствора. Формирование пленок происходило при комнатной температуре в течение 24 ч.

Образцы облучались электронным пучком 10 МэВ согласно следующему плану. Облучение образцов проводилось на линейном ускорителе УЭЛР-10-10С2 (10 МэВ, 13,5 мкс) в Центре радиационной стерилизации УрФУ (г. Екатеринбург). Для определения мощности поглощенной дозы облучения использовались пленочные детекторы СО ПД(Ф)Р-5/50 (ТУ 2379-006-1327176-00).

Измерение оптической плотности пленок производилось на спектрофотометре ПЭ-5400УФ ЭКРОСХИМ (регистрационный номер в Госреестре СИ 44866-10). Погрешность измерения поглощенной дозы составляла не более 7 % при доверительной вероятности 0,95. Варьирование дозы достигалось путем изменения экспозиции облучения. Образцы пленок на основе ацетата целлюлозы подвергались облучению в диапазоне от 10 до 90 кГр. Ввиду наличия геометрической гетерогенности вносились поправка на толщину образцов.

Результаты и их обсуждение

Результаты измерения относительной оптической плотности (отношения оптической плотности к толщине образца) облученных ацетатных пленок представлены на рис. 1.

На представленном спектре поглощения регистрируются два ярко выраженных пика при 260 и 305 нм. Интенсивность поглощения (оптическая плотность) в максимумах этих пиков демонстрирует зависимость от величины поглощенной дозы. В длинноволновой области спектра (> 400 нм) кривые для различных доз совпадают, указывая на отсутствие дозовой зависимости оптических свойств образцов в этом спектральном диапазоне. Однако данное расхождение может быть вызвано отличием геометрии образцов и гетерогенностью, а также временем проведения измерения после облучения (Matsuda and Nagai, 1991).

Для выявления характера зависимости оптической плотности образца от величины поглощенной дозы ионизирующего излучения был проведен регрессионный анализ. По результатам регрессионного анализа получена квадратичная зависимость, показывающая, что в диапазоне от 10 до 50 кГр оптическая плотность образцов уменьшается, а в диапазоне от 50 до 100 кГр увеличивается (рис. 2).

С увеличением поглощенной дозы ионизирующего излучения степень полимеризации ацетата целлюлозы уменьшается, т. е. целлюлоза подвергается деструкции (Ершов, 1998). Она обусловливается как разрывом основной углеводородной цепи, так и образованием радикалов, карбонильных и карбоксильных групп, а также газов (H_2 , CO_2 , CO).

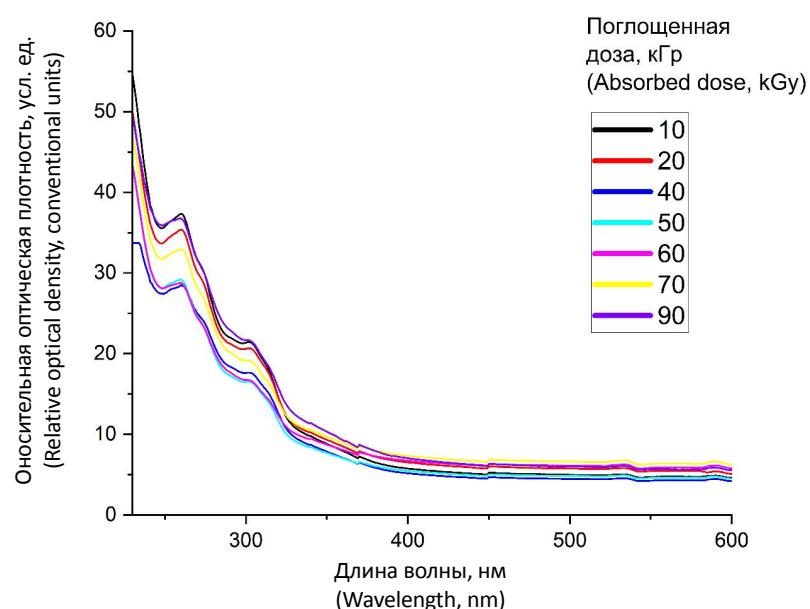


Рис. 1. Спектры поглощения образцов пленок на основе ацетата целлюлозы
Fig. 1. Absorption spectra of film samples based on cellulose acetate

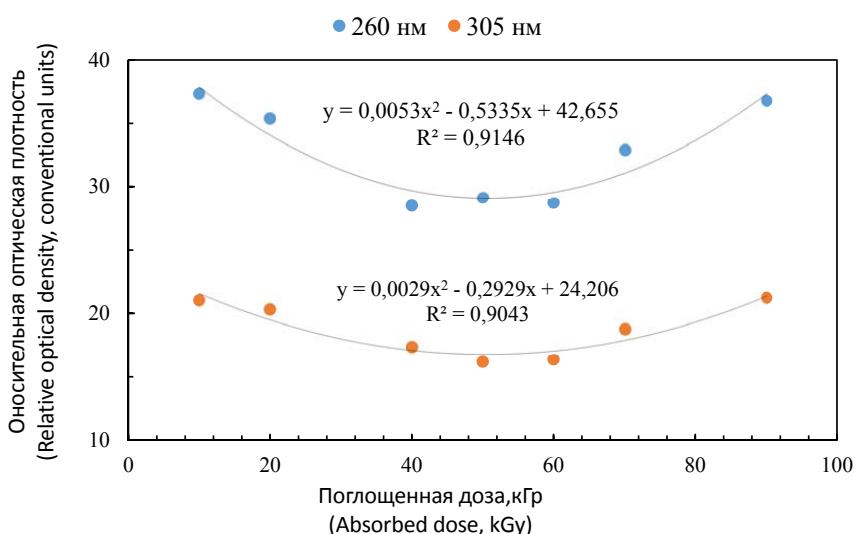


Рис. 2. Зависимость оптической плотности образцов от величины поглощенной дозы излучения на длинах волн 260 и 305 нм
Fig. 2. Dependence of the optical density of samples on the value of the absorbed radiation dose at wavelengths of 260 and 305 nm

По-видимому, увеличение оптической плотности можно объяснить накоплением продуктов деструкции (Действие различных видов..., 1991). В то же время степень кристалличности АЦ в интервале доз от 0 до 50 кГр возрастает (Thermal and optical properties..., 2008), поэтому оптическая плотность исследуемых пленок снижается. При увеличении поглощенной дозы в структуре полимеров накапливаются дефекты и сопряженные связи, затрудняющие прохождение световых

волн, и оптическая плотность материала начинает возрастать.

Выводы

Результаты исследования свидетельствуют о наличии линейной зависимости оптической плотности пленочных образцов на основе ацетата целлюлозы (АЦ) от величины поглощенной дозы ионизирующего излучения. Установлено, что изменения оптической плотности при дозах ниже

50 кГр статистически незначимы. В связи с этим дальнейшее изучение радиационно-индуцированных изменений оптических свойств данных образцов целесообразно проводить в диапазоне доз

от 50 кГр и выше. Полученная зависимость подтверждает потенциал применения пленок на основе АЦ в качестве радиационно чувствительного элемента в дозиметрических системах.

Список источников

- Действие различных видов ионизирующего излучения на политрифтхлорэтилен и поливинилхлорид / *Б. Пасальский, Д. Сачук, Л. Гребинская, Я. Лаврентович* // ВМС. 1991. Сер. А, № 5. С. 55–65.
- Ершов Б.* Радиационно-химическая деструкция целлюлозы и других полисахаридов // Russian Chem. 1998. С. 353–375, 315–334.
- Сухих Е., Филатов П., Маликов Е.* Калибровка полимерной пленки Gafchromic EBT-3 на электронном и фотонном пучках // Медицинская физика. 2013. № 2 (58). С. 50–60.
- Тенишев В.* Спектральные, дозиметрические и метрологические характеристики радиохромных радиационно чувствительных композиций // Измерительная техника. 2020. № 8. С. 59–65. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-8-59-65
- Algethami M.* Effect of gamma radiation on the optical and color properties of cellulose triacetate for the application in radiation dosimetry // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2025. Vol. 18. P. 101507. DOI: 10.1016/j.jrras.2025.101507
- Chaikh A., Gaudu A., Baloss J.* Monitoring methods for skin dose in interventional radiology // International Journal of Cancer Therapy and Oncology. 2014. Vol. 3, № 3. P. 03011. DOI: 10.14319/ijcto.0301.1
- Matsuda K., Nagai S.* Studies on the radiation-induced coloration mechanism of the cellulose triacetate film dosimeter // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. 1991. Part A. Vol. 42, Is. 12. P. 1215–1221. DOI: 10.1016/0883-2889(91)90200-K
- McLaughlin, W., Ba W.-Z.* Cellulose diacetate film dosimeters // Radiat Phys Chem. 1998. Vol. 31, № 4-6. P. 481–490.
- Optimization of CR-39 for fast neutron dosimetry applications / *E. Vilela, E. Fantuzzi, G. Giacomelli* [et al.] // Radiation Measurements. 1999. Vol. 31, Is. 1–6. P. 437–442. DOI: 10.1016/S1350-4487(99)00141-9
- Polymer Film Blend of Polyvinyl Alcohol, Trichloroethylene and Cresol Red for Gamma Radiation Dosimetry / *A. Doyan, Susilawati, S. Prayogi* [et al.] // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 1866. DOI: 10.3390/polym13111866
- Thermal and optical properties of electron beam irradiated cellulose triacetate / *S. Nouh, A. Mohamed, H. El Hussieny, E. Sakr* // Materials Chemistry and Physics. 2008. Vol. 110. P. 376–379.
- Uses of polymer-alanine film, ESR dosimeters in dosimetry of ionizing radiation / *X. Liqing, Y. Zhang, J. Dai* [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. 1993. Vol. 42. P. 837–840. DOI: 10.1016/0969-806X(93)90385-8

References

- Algethami M.* Effect of gamma radiation on the optical and color properties of cellulose triacetate for the application in radiation dosimetry // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. 2025. Vol. 18. P. 101507. DOI: 10.1016/j.jrras.2025.101507
- Chaikh A., Gaudu A., Baloss J.* Monitoring methods for skin dose in interventional radiology // International Journal of Cancer Therapy and Oncology. 2014. Vol. 3, № 3. P. 03011. DOI: 10.14319/ijcto.0301.1
- Ershov B.* Radiation-chemical destruction of cellulose and other polysaccharides // Russian Chem. 1998. P. 353–375, 315–334. (In Russ.)
- Matsuda K., Nagai S.* Studies on the radiation-induced coloration mechanism of the cellulose triacetate film dosimeter // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. 1991. Part A. Vol. 42, Is. 12. P. 1215–1221. DOI: 10.1016/0883-2889(91)90200-K

- McLaughlin, W., Ba W.-Z. Cellulose diacetate film dosimeters // Radiat Phys Chem. 1998. Vol. 31, № 4-6. P. 481–490.*
- Optimization of CR-39 for fast neutron dosimetry applications / E. Vilela, E. Fantuzzi, G. Giacomelli [et al.] // Radiation Measurements. 1999. Vol. 31, Is. 1–6. P. 437–442. DOI: 10.1016/S1350-4487(99)00141-9*
- Polymer Film Blend of Polyvinyl Alcohol, Trichloroethylene and Cresol Red for Gamma Radiation Dosimetry / A. Doyan, Susilawati, S. Prayogi [et al.] // Polymers. 2021. Vol. 13. P. 1866. DOI: 10.3390/polym13111866*
- Sukhikh E., Filatov P., Malikov E. Calibration of the polymer film Gafchromic AVT-3 on electron and photon beams // Medical Physics. 2013. № 2 (58). P. 50–60. (In Russ.)*
- Tenishev V. Spectral, dosimetric and metrological characteristics of radiochromic radiation-sensitive compositions // Measuring technology. 2020. № 8. P. 59–65. DOI: 10.32446/0368-1025it.2020-8-59-65 (In Russ.)*
- The effect of various types of ionizing radiation on polytrifluoroethylene and polyvinyl chloride / B. Palsky, D. Sachuk, L. Grebinskaya, Ya. Lavrentovich // Navy. 1991. Ser. A, № 5. P. 55–65. (In Russ.)*
- Thermal and optical properties of electron beam irradiated cellulose triacetate / S. Nouh, A. Mohamed, H. El Hussieny, E. Sakr // Materials Chemistry and Physics. 2008. Vol. 110. P. 376–379.*
- Uses of polymer-alanine film, ESR dosimeters in dosimetry of ionizing radiation / X. Liqing, Y. Zhang, J. Dai [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. 1993. Vol. 42. P. 837–840. DOI: 10.1016/0969-806X(93)90385-8*

Информация об авторах

*Никита Семенович Штабнов – аспирант,
lol_hukutos@mail.ru <http://orcid.org/0009-0003-2157-6084>*

*Руслан Альбертович Вазиров – кандидат биологических наук,
доцент и старший научный сотрудник,
rulsan.vazirov@urfu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5392-0386>*

*Максим Евгеньевич Котельников – магистрант,
kotielnikov00@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0001-9673-6092>*

*Алексей Евгеньевич Шкуро – доктор технических наук, доцент, профессор,
shkuroae@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0469-2601>*

*Виктор Гаврилович Бурындин – доктор технических наук, профессор.
buryndinvg@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6900-3435>*

Information about the authors

*Nikita S. Shtabnov – postgraduate student,
lol_hukutos@mail.ru <http://orcid.org/0009-0003-2157-6084>*

*Ruslan A. Vazirov – Candidate of Biological science, Associate Professor
and Senior Researcher,
rulsan.vazirov@urfu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-5392-0386>*

*Maxim E. Kotelnikov – Master's degree student,
kotielnikov00@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0001-9673-6092>*

*Alexey E. Shkuro – Doctor of technical Sciences, Associate Professor,
shkuroae@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-0469-2601>*

*Victor G. Buryndin – Doctor of technical Sciences, Professor.
buryndinvg@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-6900-3435>*

Статья поступила в редакцию 02.07.2025; принята к публикации 10.08.2025.

The article was submitted 02.07.2025; accepted for publication 10.08.2025.