

Оригинальная статья

УДК 539.2;669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-153-159

**СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ТЕМАТИКИ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАФЕДРЕ ФИЗИКИ СибГИУ**

© 2025 г. Е. А. Будовских, Д. А. Романов, Л. П. Башенко

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрены особенности импульсных методов упрочнения и защиты поверхности металлов и сплавов, основанных на использовании физического явления электрического взрыва проводников. Выделены два основных направления исследований в этой области: электровзрывное легирование и электровзрывное напыление. Электровзрывное легирование представляет собой процесс, при котором при электрическом взрыве проводников формируется импульсная гетерогенная плазменная струя с высокими давлением и температурой, ее взаимодействие с упрочняемой поверхностью металла или сплава приводит к образованию ударно-сжатого слоя. Это ведет к оплавлению поверхности и насыщению ее компонентами струи, способствует образованию твердых растворов, формированию новых структурно-фазовых состояний и микроструктурным изменениям. Например, при электровзрывном алитировании титана вследствие образования новых фаз увеличиваются твердость и жаростойкость поверхности. Электровзрывное напыление является процессом, при котором мелкодисперсные частицы того или иного вещества, вводимые в область взрыва при формировании струи, ускоряются до высоких скоростей и наносятся на поверхность заготовки, образуя на ней покрытия с металлургической связью. Этот метод позволяет создавать защитные покрытия, повышающие, в частности, коррозионную стойкость и износостойкость деталей. Например, напыление никеля на стальные детали с использованием электрического взрыва может значительно увеличить их срок службы в агрессивных средах. Приведены сведения об основных полученных результатах, представленных в виде защищенных кандидатских и докторских диссертаций. Эти работы не только расширили понимание процессов, происходящих при электровзрывных обработках, но и открыли новые перспективы для применения этих технологий в различных областях промышленности. В целом, электровзрывные методы упрочнения и защиты металлов и сплавов остаются актуальной темой исследований, способствуя совершенствованию современных материалов и технологий.

Ключевые слова: поверхность, упрочнение, защита, электрический взрыв проводников, электровзрывное легирование, электровзрывное напыление

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>

Для цитирования: Будовских Е.А., Романов Д.А., Башенко Л.П. Становление и развитие электровзрывной тематики исследований на кафедре физики СибГИУ. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):153–159. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-153-159](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-153-159)

Original article

**FORMATION AND DEVELOPMENT OF ELECTRO-EXPLOSIVE RESEARCH
TOPICS AT THE DEPARTMENT OF PHYSICS OF SibSIU**

© 2025 E. A. Budovskikh, D. A. Romanov, L. P. Bashchenko

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The features of pulsed methods of hardening and protecting the surface of metals and alloys based on the use of the physical phenomenon of an electrical explosion of conductors are considered. Two main areas of research in this area are identified: electro-explosive alloying and electro-explosive spraying. Electro-explosive alloying is a process in which, during an electric explosion of conductors, a pulsed heterogeneous plasma jet with high pressure and temperature is formed, its interaction with the reinforced surface of a metal or alloy leads to the formation of a shock-compressed layer. This leads to melting of the surface and saturation of its components with jet, promotes the formation of solid solutions, the formation of new structural and phase states and microstructural changes. For example, during electroexplosion of titanium, due to the formation of new phases, the hardness and heat resistance of the surface increase. Electro-explosive spraying is a process in which finely dispersed particles of a substance introduced into the explosion area during the formation of a jet are accelerated to high speeds and applied to the surface of the workpiece, forming coatings with a metallurgical bond on it. This method makes it possible to create protective coatings that enhance, in particular, the corrosion resistance and wear resistance of parts. For example, spraying nickel onto steel parts using an electric explosion can significantly increase their service life in aggressive environments. The information about the main results obtained, presented in the form of defended candidate's and doctoral dissertations, is given. These works have not only expanded the understanding of the processes occurring during electrical explosive treatments, but have also opened up new perspectives for the application of these technologies in various fields of industry. In general, electro-explosive methods of hardening and protecting metals and alloys remain an urgent research topic, contributing to the improvement of modern materials and technologies.

Keywords: surface, hardening, protection, electrical explosion of conductors, electro-explosive alloying, electro-explosive spraying

Financing. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-79-10012, <https://rscf.ru/project/22-79-10012/>

For citation: Budovskikh E.A., Romanov D.A., Bashchenko L.P. Formation and development of electro-explosive research topics at the department of physics of SibSIU. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):153–159. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-153-159](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-153-159)

Введение

Упрочнение и защита поверхности конструкционных и инструментальных материалов – одна из актуальных целей современного производства в различных отраслях промышленности. Основной причиной разрушения материалов изделий и конструкций является воздействие на поверхность эксплуатационных факторов (теплового, механического, химического и других). В связи с этим постоянно совершенствуются и разрабатываются новые методы обработки поверхности.

В настоящее время в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) сформировалась научная школа, которая активно проводит исследования по разработке новых методов упрочнения и защиты поверхности конструк-

ционных и инструментальных материалов в двух направлениях: электровзрывное легирование (ЭВЛ) и электровзрывное напыление (ЭВН).

В первом случае необходимые свойства поверхности обрабатываемого материала формируются, прежде всего, вследствие образования новых упрочняющих фаз при насыщении оплавленного поверхностного слоя продуктами электровзрывного разрушения проводника (например, металлической фольги из того или иного металла или сплава). Во втором случае в область взрыва вводится навеска того или иного химического соединения, которая плазменной струей переносится на нагреваемую до оплавления поверхность и формирует на ней покрытие с металлургической связью с основой.



Рис. 1. Лабораторная электровзрывная установка ЭВУ 60/10
Fig. 1. Laboratory electroexplosive spray coating plant EVU 60/10

Исследования по электровзрывному легированию металлов

В 60-е гг. прошлого века на кафедре физики Сибирского металлургического института им. С. Орджоникидзе (в настоящее время СибГИУ) научные интересы были сконцентрированы на механизмах разрушения ионных кристаллов. По электровзрывной тематике заведующим кафедрой В.М. Финкелем была защищена докторская диссертация [1], содержание которой отражено в монографии [2]. Впоследствии в качестве инструмента, приводящего к разрушению материала, В.М. Финкелем было предложено использовать импульсные плазменные струи, сформированные при электрическом взрыве проводников [3]. Была создана установка для их генерации (рис. 1), начаты исследования по разрушению поверхности ионных кристаллов. По результатам проведенных исследований аспирантом кафедры В.Н. Гурарием была защищена кандидатская диссертация [4].

Исследования по электровзрывной обработке материалов были продолжены аспирантом П.С. Носаревым, в диссертации которого исследовано уже не только разрушение, но и упрочнение поверхности [5]. Объектом воздействия были уже не ионные кристаллы, а углеродистые стали.

Развитием исследований В.Н. Гурария явилась диссертация Е.В. Евстифеева [6], посвященная разработке способа нанесения резистивных металлических покрытий на диэлектрические подложки. Научным руководителем работы был заведующий кафедрой физики Сибирского металлургического института (СМИ), д.ф.-м.н., профессор Л.Б. Зуев. Под его же руководством Л.Н. Гудимовой была выполнена еще одна диссертационная работа по электровзрывному упрочнению углеродистых и легированных сталей [7].

Последующие исследования, выполняемые под руководством уже к.т.н. П.С. Носарева, получили развитие, которое имело ярко выраженный прикладной характер. В конце 80-х гг. им были налажены научные связи с сотрудниками Московского авиационно-технологического института им. К.Э. Циолковского (МАТИ). Большой интерес к электровзрывной тематике проявил профессор кафедры материаловедения и технологии обработки материалов Г.В. Бобров. Материал об ЭВЛ и ЭВН был включен им в учебное пособие [8]. Результаты совместной работы СМИ и МАТИ отражены в диссертации В.П. Симанова [9], к.т.н., доцента кафедры электротехники, электропривода и промышленной электроники СибГИУ.

В это же время была создана новая электровзрывная установка, которая могла быть использована в условиях промышленного производства. Основная ее особенность заключалась в большой по объему вакуумируемой технологической камере, в которой размещался механизм для перемещения упрочняемых инструментов (сверл, резцов, штампов и другие). Взрываемые проводники располагали в кассете по 20 – 30 штук. Такая конструкция установки позволяла повысить производительность упрочняющей обработки и использовать ее в условиях промышленного производства. В связи с начавшейся в стране политико-экономической перестройкой продолжения эти исследования и разработки не получили.

Именно на этом этапе в СибГИУ сформировалась не только технологическая, но и научная основа дальнейших исследований электровзрывного легирования и электровзрывного напыления.



Рис. 2. Сотрудники лаборатории электровзрывного напыления СибГИУ при планировании исследований
Fig. 2. Employees of the SibGIU electro-explosive spraying Laboratory during research planning

Результаты исследования процессов при ЭВЛ отражены в кандидатской [10], а затем в докторской диссертациях [11] Е.А. Будовских. По результатам этих исследований опубликована монография [12]. Изучение ЭВЛ продолжено в кандидатской диссертации Л.П. Бащенко [13].

Электровзрывное напыление покрытий

При электровзрывном напылении навеска химического соединения вводится в область взрыва плазменной струей, переносится на облучаемую поверхность и затем распределяется по глубине оплаваемого слоя.

Отличие ЭВЛ от ЭВН состоит в том, что при ЭВЛ фазовый состав зоны легирования формируется из химических компонентов взрываемого проводника, образующих плазменную струю и взаимодействующих с элементами подложки. При этом содержание материала оплаваемого поверхностного слоя подложки (основы) в случае легирования является основным, а в случае напыления состав поверхностного модифицированного слоя определяется как материалом взрываемого проводника, так и порошковой навески того или иного химического соединения, вносимого в область взрыва. В обоих случаях обработка носит импульсный характер, поэтому формируется мелкодисперсная структура.

По результатам исследований в области ЭВН Д.А. Романовым защищены кандидатская [14] и докторская [15] диссертации. В них разработаны защищенные патентами на изобретения способы электровзрывного напыления износо- и электроэрозсионностойких покрытий различных составов на медь и алюминий, из которых изготавливаются электрические контакты и выключатели тока. Последующая электронно-пучковая обработка использована для гомогенизации состава и выравнивания рельефа покрытий. Полученные результаты могут быть использованы для обра-

ботки деталей и изделий, применяемых в машиностроительной, горнодобывающей и электротехнической отраслях промышленности.

По результатам исследований в области электровзрывной тематики в последние годы в СибГИУ защищены 10 кандидатских диссертаций. Так, под руководством Д.А. Романова в диссертации С.В. Московского [16] изучены особенности упрочнения поверхностей контактов переключателей мощных электрических сетей, в диссертации К.В. Соснина [17] исследованы особенности ЭВН иттрия на титановые сплавы, в диссертации В.В. Почетуки [18] проведено исследование формирования структуры и свойств электроэрозсионностойких покрытий методом электронно-ионно-плазменного напыления.

В настоящее время в университете созданы Лаборатория электровзрывного напыления высоконадежных покрытий и новая электровзрывная установка для их напыления (рис. 2), на которой выполняются работы по упрочняющей обработке поверхности металлов импульсными плазменными струями. Актуальность выполняемых исследований подтверждают аналогичные работы, проводимые в Украине [19 – 21], Белоруссии [22 – 24], Казахстане [25; 26] и Китае. Коллектив лаборатории продолжает сотрудничать с молодыми учеными, в том числе иностранными, открыт для контактов с промышленными предприятиями, научными и учебными организациями в России и в других странах.

Заключение

Анализ публикаций, выполняемых в области импульсной плазменной обработки с целью упрочнения и защиты поверхности конструкционных и инструментальных материалов, показывает большие возможности в развитии новых методов и технологий обработки, в том числе электровзрывного легирования и электровзрывного напыле-

ния, которые активно на протяжении последних десятилетий развиваются в СибГИУ. Проводимые в настоящее время коллективом ученых лаборатории электровзрывного напыления высоконадежных покрытий исследования соответствуют мировым тенденциям. Описанный научный путь и дух исследований, проводимых учеными СибГИУ в рассматриваемой области с 60-х гг. прошлого века, актуален и в настоящее время.

Ученые сохраняют исторические традиции и ищут новые пути решения актуальных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Финкель В.М. *Экспериментальное исследование кинетики разрушения некоторых твердых тел*: автореф. дисс. докт. физ.-мат. наук. Москва. 1965;25.
2. Финкель В.М. *Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах*. Москва: Металлургия, 1970;376.
3. Финкель В.М. *Об импульсивном воздействии плазмы на материалы*. Новокузнецк: Сиб. металлург. ин-т им. Серго Орджоникидзе, 1969;47.
4. Гурарий В.Н. *Прочность и разрушение кристаллов при импульсивном воздействии сверхзвуковых плазменных струй*: автореф. дис. канд. техн. наук. Новокузнецк. 1969;19.
5. Носарев П.С. *Упрочнение и разрушение углеродистых сталей при воздействии быстрых плазменных пучков*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 1973;22.
6. Евстифеев Е.В. *Получение и исследование физических свойств металлических покрытий на диэлектриках*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Томск. 1991;18.
7. Гудимова Л.Н. *Обработка сплавов высокотемпературными плазменными потоками с целью создания слоев с особыми физическими свойствами*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Томск. 1992;25.
8. Бобров Г.В., Ильин А.А. *Нанесение неорганических покрытий. Теория. Технология. Оборудование*. Москва: Интермет Инжиниринг, 2004;628.
9. Симаков В.П. *Поверхностное легирование металлов при воздействии плазмы конденсаторного разряда*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Москва. 1992;22.
10. Будовских Е.А. *Формирование структурно-фазового состояния и свойств поверхностных слоев металлов при электровзрывном легировании*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 1999;24.
11. Будовских Е.А. *Закономерности формирования поверхностных слоев металлов и сплавов при электровзрывном легировании*: автореф. дисс. докт. техн. наук. Новокузнецк. 2008;37.
12. *Физические основы электровзрывного легирования металлов и сплавов* / А.Я. Багаутдинов, Е.А. Будовских, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов. Новокузнецк: СибГИУ; 2007;301.
13. Башенко Л.П. *Упрочнение поверхности титана при электровзрывном науглероживании и карбоборировании и последующей электронно-пучковой обработке*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2013;17.
14. Романов Д.А. *Формирование структуры, фазового состава и свойств электроэрозионностойких покрытий методом электровзрывного напыления*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2012;17.
15. Романов Д.А. *Закономерности формирования структуры и свойств электровзрывных покрытий на металлах и сплавах*: автореф. дисс. докт. техн. наук. Новокузнецк. 2018;37.
16. Московский С.В. *Формирование структуры и свойств электровзрывных электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и оксидов металлов на медных контактах переключателей мощных электрических сетей*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2020;20.
17. Соснин К.В. *Структура, фазовый состав и свойства титана после электровзрывного легирования иттрием и электронно-пучковой обработки*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2017;21.
18. Почетуха В.В. *Формирование структуры и свойств электроэрозионностойких покрытий на основе серебра и упрочняющих фаз методом электронно-ионно-плазменного напыления*: автореф. дисс. канд. техн. наук. Новокузнецк. 2022;18.
19. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: 7 International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology": contributed papers. Minsk, Belarus, 2012;438–441.
20. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi*. 2005;48(5):487–514. <https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
21. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. *Плазменные упрочняющие технологии*. Киев: Наукова думка, 2008;216.
22. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskic V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition

of titanium treated with compression plasma flows. *Surf. Coat. Tech.* 2015;278:183. <https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>

23. Черенда Н.Н., Басалай А.В., Шиманский В.И., Асташинский В.М. Модификация поверхности сплава Ti – 6Al – 4V при высокоэнергетическом плазменном воздействии. *Докл. НАН Беларуси.* 2016;60(2):102–108.
24. Асташинский В.М., Углов В.В., Черенда Н.Н., Шиманский В.И. *Модификация титана при воздействии компрессионными плазменными потоками.* Минск: Белорусская наука, 2016;179.
25. Kakimzhanov D.N., Rakhadilov K., Tyurin Yu.N., Kolisnichenko O.V., Zhurerova L.G., Dautbekov M.K. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂ – NiCr coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials.* 2021;5(2):45–51.
26. Kengesbekov A.B., Rakhadilov B.K., Tyurin Yu.N., Magazov N.M., Kylyshkanov M.K., Sagdoldina Zh.B. The influence of pulse-plasma treatment on the phase composition and hardness of Fe – TiB₂ – CrB₂ coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials.* 2021;5(2):155–162.

REFERENCES

1. Finkel V.M. *Experimental investigation of fracture kinetics of some solids.* Extended abstract of doctor's thesis. Moscow. 1965:25. (In Russ.).
2. Finkel V.M. *Physics of destruction. The growth of cracks in solids.* Moscow: Metallurgiya Publ., 1970:376. (In Russ.).
3. Finkel V.M. *On the impulsive effect of plasma on materials.* Novokuznetsk: Sib. metallurg. in-t named after Sergo Ordzhonikidze, 1969:47. (In Russ.).
4. Gurari V.N. *Strength and fracture of crystals under the impulsive action of supersonic plasma jets.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 1969:19. (In Russ.).
5. Nosarev P.S. *Hardening and destruction of carbon steels under the influence of fast plasma beams.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 1973:22. (In Russ.).
6. Evstifeev E.V. *Preparation and investigation of the physical properties of metal coatings on dielectrics.* Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk, 1991:18. (In Russ.).
7. Gudimova L.N. *Processing of alloys by high-temperature plasma flows in order to create layers with special physical properties.* Extended abstract of candidate's thesis. Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk, 1992:25. (In Russ.).
8. Bobrov G.V., Ilyin A.A. *Application of inorganic coatings. Theory. Technology. Equipment.* Moscow: Internet Engineering, 2004:628. (In Russ.).
9. Simakov V.P. *Surface alloying of metals under the influence of plasma capacitor discharge.* Extended abstract of candidate's thesis. Moscow, 1992:22. (In Russ.).
10. Budovskikh E.A. *Formation of the structural and phase state and properties of metal surface layers during electroexplosive alloying.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 1999:24. (In Russ.).
11. Budovskikh E.A. *Patterns of formation of surface layers of metals and alloys during electroexplosive alloying.* Extended abstract of doctor's thesis. Novokuznetsk, 2008:37. (In Russ.).
12. Bagautdinov A.Ya., Budovskikh E.A., Ivanov Yu.F., Gromov V.E. *Physical foundations of electroexplosive alloying of metals and alloys.* Novokuznetsk: SibGIU;2007:301. (In Russ.).
13. Bashchenko L.P. *Hardening of the titanium surface during electro-explosive carburization and carboborination and subsequent electron beam treatment.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2013;17. (In Russ.).
14. Romanov D.A. *Formation of the structure, phase composition and properties of electroerosion-resistant coatings by electro-explosive spraying.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk, 2012;17. (In Russ.).
15. Romanov D.A. *Patterns of formation of the structure and properties of electroexplosive coatings on metals and alloys.* Extended abstract of doctor's thesis. Novokuznetsk. 2018;37. (In Russ.).
16. Moskovsky S.V. *Formation of the structure and properties of electroexplosive electroerosion-resistant coatings based on silver and metal oxides on copper contacts of switches of high-power electrical networks.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2020;20. (In Russ.).
17. Sosnin K.V. *Structure, phase composition and properties of titanium after electroexplosive doping with yttrium and electron beam treatment.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2017;21. (In Russ.).
18. Pochetukha V.V. *Formation of the structure and properties of electroerosion-resistant coatings based on silver and hardening phases by electron-plasma spraying.* Extended abstract of candidate's thesis. Novokuznetsk. 2022;18. (In Russ.).
19. Nikolchuk I.S., Chumakov A.N., Kuznechik O.O., Minko D.V. Pulsed plasma surface treatment of constructional steel in the air. In: *7 International Conference "Plasma Physics and Plasma Technology": contributed papers.* Minsk, Belarus, 2012;438–441.

20. Pogrebnyak A.D., Tyurin Yu.N. Modification of material properties and coating deposition using plasma jets. *Physics Uspekhi*. 2005;48(5):487–514.
<https://doi.org/10.1070/PU2005v048n05ABEH002055>
21. Tyurin Yu.N., Zhadkevich M.L. *Plasma strengthening technologies*. Kiev: Naukova dumka, 2008;216. (In Russ.).
22. Shymanski V.I., Cherenda N.N., Uglov V.V., Astashynskic V.M., Kuzmitski A.M. Thermal stability of the structure and phase composition of titanium treated with compression plasma flows. *Surf. Coat. Tech.* 2015;278:183.
<https://doi.org/10.1134/S102745101804016X>
23. Cherenda N.N., Basalai A.V., Shimansky V.I., Astashinsky V.M. Modification of the surface of Ti – 6Al – 4V alloy under high-energy plasma exposure. *Dokl. NAS of Belarus*. 2016;60(2):102–108. (In Russ.).
24. Astashinsky V.M., Uglov V.V., Cherenda N.N., Shimansky V.I. *Modification of titanium under the influence of compression plasma flows*. Minsk: Belorusskaya Nauka Publ., 2016;179. (In Russ.).
25. Kakimzhanov D.N., Rakhadilov K., Tyurin Yu.N., Kolisnichenko O.V., Zhurerova L.G., Dautbekov M.K. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂ – NiCr coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 2021;5(2):45–51.
26. Kengesbekov A.B., Rakhadilov B.K., Tyurin Yu.N., Magazov N.M., Kylyshkanov M.K., Sagdoldina Zh.B. The influence of pulse-plasma treatment on the phase composition and hardness of Fe – TiB₂ – CrB₂ coatings. *Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. 2021;5(2):155–162.

Сведения об авторах

Евгений Александрович Будовских, д.т.н., доцент, профессор-консультант кафедры естественнонауч-

ных дисциплин им. профессора В.М. Финкеля, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: budovskikh@mail.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1878-909X

SPIN-код: 5942-8145

Денис Анатольевич Романов, д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник УНИ, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0002-6880-2849

E-mail: romanov_da@physics.sibsui.ru

Information about the authors:

Evgeny A. Budovskikh, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof, Professor of the Chair of Science named after V.M. Finkel', Siberian State Industrial University

E-mail: budovskikh@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering and Ecology, Siberian State Industrial University

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1878-909X

SPIN-код: 5942-8145

Denis A. Romanov, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof, Leading Researcher, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0002-6880-2849

E-mail: romanov_da@physics.sibsui.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 02.06.2025

После доработки 16.06.2025

Принята к публикации 19.06.2025

Received 02.06.2025

Revised 16.06.2025

Accepted 19.06.2025