Транспортное машиностроение. 2025. № 12(48). С. 94-100. ISSN 2782-5957 (print)
Transport Engineering. 2025. no. 12(48). P. 94-100. ISSN 2782-5957 (print)

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 67.017
doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-94-100

ВЛИЯНИЕ ПОТОКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН И ТКАНЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ АРМИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ СОЗДАНИИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Фарида Равилевна Сагитова[1]✉, Фарид Саидович Шарифуллин[2], Ильдар Шаукатович Абдуллин[3]
[1,2] Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия
[3] ООО «Плазма-ВСТ», Казань, Россия
[1] farida_sagitova@mail.ru; https://orcid.org/0009-0008-9746-4341
[2] sharifullin80@mail.ru; https://orcid.org/0009-0006-6903-7436
[3] plasma.vst@gmail.com

Аннотация

В статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния потока низкоэнергетических ионов на физические свойства углеродных волокон и тканей с целью повышения их адгезионного взаимодействия с полимерной материей при создании композиционных материалов. Определены режимы модификации углеволоконных материалов, позволяющие увеличить смачиваемость полимерной матрицей на 23…70 %, повысить капиллярность до 170 %, при этом снизить краевой угол смачивания на 21…40 %. Также у модифицированных образцов увеличивается удельная поверхность: до 76 % для углеродных тканей, до 184 % для углеродных волокон. Выявлена продолжительность сохранения эффекта модификации: в течение 90 дней у углеродных волокон наблюдается снижение капиллярности всего на 10…12 %. Методом микроскопического анализа установлено, что модификация в выбранных режимах не оказывает заметного влияния на геометрические размеры углеволоконных материалов. По результатам проведенных исследований модифицированные углеволоконные материалы рекомендованы в качестве армирующих наполнителей для получения композиционных материалов с повышенными механическими характеристиками.

Ключевые слова: волокна, ткань, поток, ионы, смачиваемость, капиллярность, удельная поверхность.

Ссылка для цитирования:
Сагитова Ф.Р. Влияние потока низкоэнергетических ионов на физические свойства углеродных волокон и тканей, используемых в качестве армирующих элементов при создании композитных материалов / Ф.Р. Сагитова, Ф.С. Шарифуллин, И.Ш. Абдуллин // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 12. – С. 94-100. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-94-100.

Original article
Open Access Article

INFLUENCE OF LOW-ENERGY ION FLOW ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF CARBON FIBERS AND FABRICS USED AS REINFIRCING ELEMENTS FOR PRODUCING COMPOSITE MATERIALS

Farida Ravilevna Sagitova[1]✉, Farid Saidovich Sharifullin[2], Ildar Shaukatovich Abdullin[3]
[1,2] Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
[3] Plasma-VST, Kazan, Russia
[1] farida_sagitova@mail.ru; https://orcid.org/0009-0008-9746-4341
[2] sharifullin80@mail.ru; https://orcid.org/0009-0006-6903-7436
[3] plasma.vst@gmail.com

Abstract

The paper presents the results of experimental studies of the influence of a low-energy ion flow on the physical properties of carbon fibers and fabrics in order to increase their adhesive interaction with polymer fabric when producing composite materials. Modification modes of carbon fiber materials are determined, which make it possible to increase the wettability of the polymer matrix by 23…70 %, increase capillarity to 170%, and at the same time reduce the interfacial angle by 21-40%. Also, the specific surface area of the modified samples increases up to 76% for carbon fabrics and up to 184% for carbon fibers. The duration of the modification effect is found out: within 90 days, carbon fibers show a decrease in capillarity of only 10…12 %. Microscopic analysis reveals that modification in the selected modes has no noticeable effect on the geometric dimensions of carbon fiber materials. According to the results of the conducted research, modified carbon fiber materials are recommended as reinforcing fillers for obtaining composite materials with enhanced mechanical characteristics.

Keywords: fibers, fabric, flow, ions, wettability, capillarity, specific surface area.

Reference for citing:
Sagitova FR, Sharifullin FS, Abdullin IS. Influence of low-energy ion flow on the physical properties of carbon fibers and fabrics used as reinforcing elements for producing composite materials. Transport Engineering. 2025;12:94-100. doi: 10.30987/2782-5957-2025-12-94-100.

Введение

В настоящее время композиционные материалы, получаемые с заранее заданными физико-химическими свойствами, становятся более привлекательными в различных областях промышленности благодаря их высокой удельной прочности и легкости по сравнению с металлами [1, 2]. Одним из перспективных армирующих наполнителей в композиционных материалах являются углеродные волокна (УВ) и углеродные ткани (УТ), которые обладают высокими прочностными характеристиками, биологической и химической стойкостью, термостойкостью и электропроводностью [3]. Однако, такие армирующие наполнители имеют низкую адгезионную способность к полимерным матрицам. Для повышения качественных характеристик композиционного материала осуществляют модификацию поверхности углеродного волокна или ткани различными химическими и физическими методами, при этом при улучшении одних свойств армирующих, наблюдаются ухудшения других свойств [4, 5].

Для решения данной проблемы предлагается модифицировать углеродные волокна и ткани потоком низкоэнергетических ионов (ПНЭИ), генерируемых из плазмы ВЧ разряда пониженного давления с продувом газа. Данный метод не требует применения химических растворов, изменения технологических процессов производства углеволокнистых материалов, позволяет осуществлять направленное регулирование их характеристик за счет воздействия как на поверхность, так и на объем межволокнистой структуры. Поэтому установление закономерности воздействия ПНЭИ на свойства углеволокнистых материалов для увеличения их адгезии к полимерному связующему является актуальной задачей.

Материалы и методы

Для проведения эксперимента использовались УВ марок Т300 («Т*oray Industries*») и *UMT*42 («Алабуга-Волокно») а также УТ марок КУЛОН-500/0,07 и ЛУ-П/0,2 («Аргон»).

Модификация ПНЭИ образцов УВ и УТ проводилась в соответствии с методикой, представленной в работах [6, 7]. В качестве плазмообразующего газа использовались воздух и аргон. Диапазон режимов плазменной модификации выбран исходя из ранее проведенных аналогичных работ: напряжение на аноде U_a = 2,0…7,0 кВ, время обработки t = 10-60 мин, давление в вакуумной камере P = 20…80 Па, расход плазмообразующего газа G = 0,02…0,08 г/с [8]. В работе представлены режимы, при которых наблюдались наилучшие результаты экспериментальных исследований.

Для оценки изменения свойств выбранных материалов в результате их модификации применялся комплекс совре-

менных методов исследования, а также высокоточные аналитические приборы и оборудование.

Смачивание УВ оценивали по специально разработанной методике [9, 10], по высоте капиллярного поднятия материала матрицы по волокну.

Определение величины удельной поверхности проводили на анализаторе *NOVA* 2200*e*.

Для измерения краевого угла смачивания использовали прибор *DSA*-30*E*.

Микрофотографии поверхности УВ получали на конфокальном лазерном сканирующем микроскопе марки O*lympus OLS LEXT* 4100.

Для определения среднего диаметра филамента использовался интерферометр Линника МИИ-4.

Результаты

Для увеличения межфазного взаимодействия армирующих волокон с полимерной матрицей требуется повышение поверхностной свободной энергии и удельной поверхности ($S_{уд}$) волокон. Показателем повышения свободной энергии поверхности армирующего волокна является увеличение смачиваемости с полимерной матрицей. Результаты влияния режимов воздействия ПНЭИ на высоту капиллярного поднятия жидкости (эпоксидной смолы) (h) УВ представлены на рис. 1. Результаты исследования $S_{уд}$ УВ при воздействии ПНЭИ представлены в табл. 1.

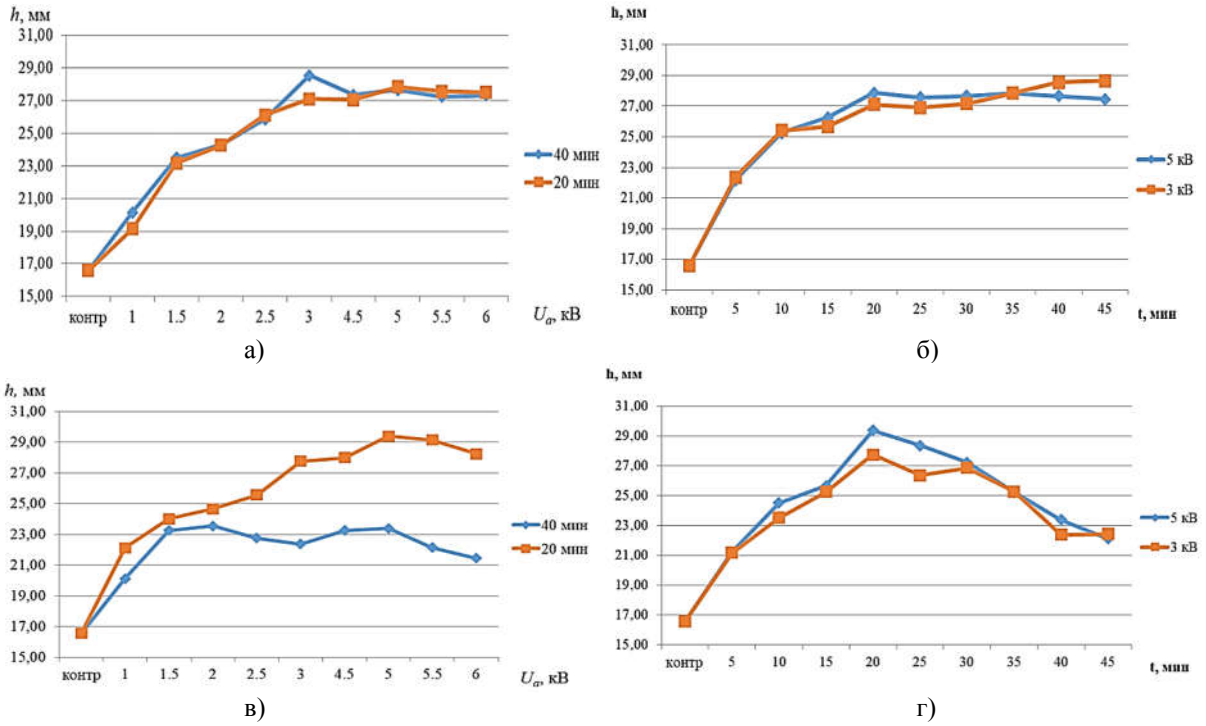


Рис. 1. Влияние режимов воздействия ПНЭИ (P=50 Па, G=0,04 г/с) на высоту поднятия эпоксидной смолы УВ. Плазмообразующий газ: а), б) – аргон; в), г) – воздух

Fig. 1. The effect of FLEI exposure modes (P=50 Pa, G=0.04 g/s) on the height of the CF epoxy resin. Plasma-forming gas: a), b) – argon; c), d) – air

Изменение капиллярности УВ и УТ до и после воздействия ПНЭИ представлено на рис. 2.

Определение краевого угла смачивания позволяет судить об изменениях поверхностных свойств УВ и УТ при взаимодействии с жидкостями (рис. 3).

Для оценки влияния модификации выбранных объектов исследования на геометрию и поверхностные характеристики получены изображения поверхности (рис. 4), проведены измерения среднего диаметра филаментов ($d_ф$) (табл. 2) и линейной плотности ($\rho_л$) волокна (табл. 3).

Длительность сохранения эффекта после воздействия ПНЭИ изучалось по из-

менению смачиваемости УВ с течением времени, при хранении в стандартных условиях. Результаты представлены на рис. 5.

Таблица 1

Влияние ПНЭИ (U_a = 3 кВ, t = 20 мин, P = 50 Па, $G_{воздух}$ = 0,04 г/с) на удельную поверхность УВ

Table 1

Influence of low-energy ion flow (U_a = 3kV, t = 20 min, P = 50 Pa, G air = 0.04 g/s) on the specific surface area of carbon fibers

Марка материала	Воздействие	$S_{уд}$, м^2/г	Изменение $S_{уд}$, %
КУЛОН-500/0,07	Исходный	3,02	19,5
	Модифицированный	3,61	
ЛУ-П/0,2	Исходный	1,11	76,0
	Модифицированный	1,96	
Т300	Исходный	1,43	184,0
	Модифицированный	4,06	
UMT42	Исходный	1,53	163,0
	Модифицированный	4,02	

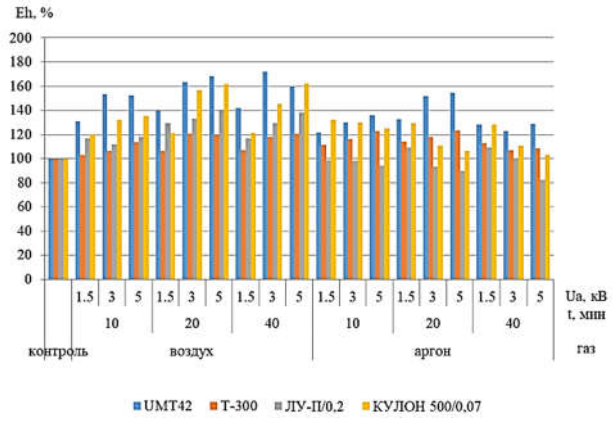


Рис. 2. Относительное изменение капиллярности УВ и УТ до и после воздействия ПНЭИ

Fig. 2. Relative change in the capillary action of carbon fiber and fabric after exposure to FLEI

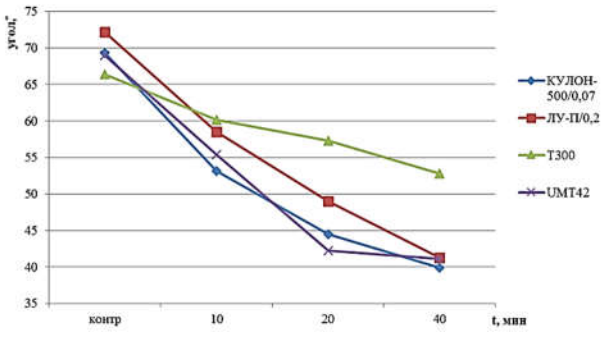
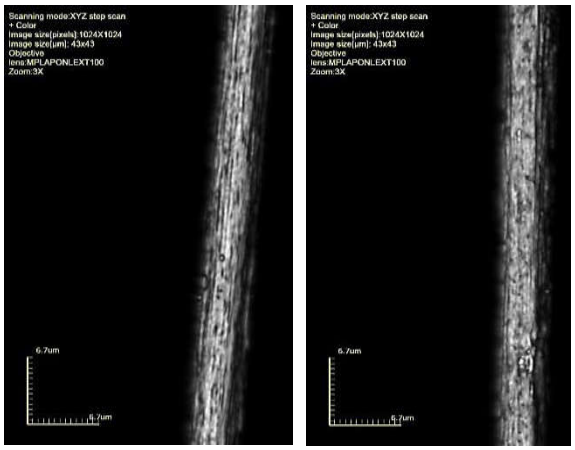


Рис. 3. Влияние ПНЭИ на величину краевого угла смачивания УВ и УТ (U_a=3кВ, P=50Па, $G_{воздух}$=0,04 г/с)

Fig. 3. Influence of FLEI on the contact angle of carbon fiber and fabric (U_a=3kV, P=50Pa, G_{air}=0.04 g/s)



а) б)

Рис. 4. Изображения поверхности УВ (×5000): а – до модификации, б – после модификации (U_a = 3 кВ, t = 20 мин, P = 50 Па, $G_{воздух}$ = 0,04 г/с)

Fig. 4. Images of the CF surface (x5000): a) before modification, b) after modification (U_a = 3 kV, t = 20 min, P = 50 Pa, G_{air} = 0.04 g/s)

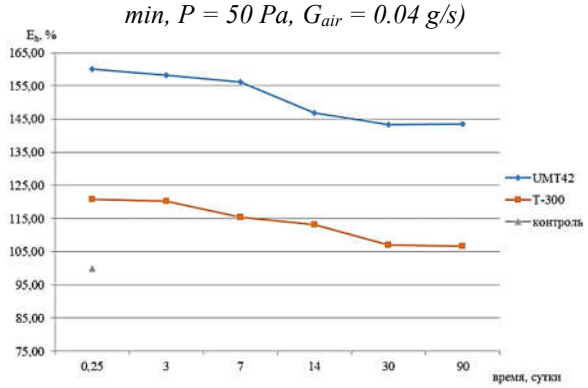


Рис. 5. Продолжительность сохранения эффекта увеличения капиллярности УВ после воздействия ПНЭИ (U_a = 3 кВ, t = 20 мин, P = 50 Па, $G_{воздух}$ = 0,04 г/с)

Fig. 5. Duration of the effect of increased capillary action of CF after exposure to FLEI (Ua = 3 kV, t = 20 min, P = 50 Pa, Gair = 0.04 g/s)

Таблица 2

Влияние ПНЭИ (U_a = 3 кВ, t = 20 мин, P = 50 Па, $G_{воздух}$ = 0,04 г/с) на средний диаметр филамента УВ и УТ

Table 2

Influence of low-energy ion flow (U_a = 3kV, t = 20 min, P = 50 Pa, G_{air} = 0.04 g/s) on the average diameter of carbon fibers and fabrics filaments

Марка материала	$d_ф$, мкм	
	Не модифицированный образец	Модифицированный образец
КУЛОН-500/0,07	5,70±0,05	5,70±0,05
ЛУ-П/0,2	5,90±0,05	5,80±0,05
Т300	7,00±0,05	7,00±0,05
UMT42	7,20±0,05	7,20±0,05

Таблица 3

Влияние ПНЭИ (U_a = 3 кВ, t = 20 мин, P = 50 Па, $G_{воздух}$ = 0,04 г/с) на линейную плотность волокна

Table 3

Influence of low-energy ion flow (U_a = 3kV, t = 20 min, P = 50 Pa, G_{air} = 0.04 g/s) on the linear fiber density

Марка материала	$\rho_л$ исходное / ГОСТ, текс	$\rho_л$ после модификации, текс
КУЛОН-500/0,07	13,5±5 / 14,0±5	13,5±5
ЛУ-П/0,2-А	33±5 / 35±5	33±5
Т300	196±2 / 198	195±2
UMT42	737±5 / 740	737±5

Заключение

По результатам исследования воздействия ПНЭИ на свойства УВ и УТ можно сделать следующие выводы.

Установлено, что модификация УВ и УТ ПНЭИ в выбранных плазмообразующих газах (аргон и воздух) способствует повышению свободной энергии поверхности материала за счет частичного разволокнения поверхностного слоя и появлению активных функциональных групп. Это приводит к увеличению смачиваемости УВ и УТ с полимерной матрицей на 23…70 %, а также к повышению капиллярности после воздействия ПНЭИ до 170 %.

При этом у модифицированных образцов наблюдается повышение удельной поверхности (на 19,5...76 % для УТ, на 163…184 % для УВ), что является основой для возрастания адгезионной прочности между армирующим материалом и полимерной матрицей за счет возрастания контактирующей площади между компонентами композиционного материала.

Для более детального исследования воздействия ПНЭИ на поверхностные свойства углеволокнистых материалов измерялся краевой угол смачивания. Установлено снижение краевого угла смачивания на 21…40 % после воздействия ПНЭИ, за счет формирования на поверхности УВ и УТ функциональных гидроксильных групп.

Немаловажным является сохранение эффекта модификации углеволокнистых материалов до их использования в качестве армирующих наполнителей в композиционном материале. Для установления продолжительности сохранения эффекта с течением времени после воздействия ПНЭИ образцы хранились при нормальных условиях. Установлено, что у волокон обеих марок (*UMT*42 и Т-300) наблюдается снижение капиллярности к 90 суткам всего на 10…12 %.

Таким образом, можно заключить, что воздействие ПНЭИ на УВ и УТ приводит к улучшению их физических свойств (повышается смачиваемость, капиллярность, удельная поверхность, снижается краевой угол смачивания) и применение таких материалов в качестве армирующих наполнителей позволит получить композиционный материал с повышенными механическими характеристиками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор) / В. О. Старцев, В. В. Антипов, А. В. Славин, М. А. Горбовец // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 2(71). С. 122-144.
2. Соколова Ю.В., Готлиб Е.М. Композиционные материалы на основе модифицированных полимеров. М.: Юниар-Принт, 2000. 197 с.
3. Karpov, A. Carbon and composite carbon-carbon materials high temperature mechanical properties / A. Karpov, M. Mostovoy // Perspektivnye Materialy. 2015. No. 3. P. 13-21.
4. Горбаткина Ю.А. Адгезионная прочность в системах полимер-волокно. - М.: Химия, 1987. - 192с.
5. Корнеева Н.В. Адгезия термопластичных матриц с различной молекулярной массой к волокнам / Н.В. Корнеева, Ю.А. Горбаткина [и др.] // Механика композитных материалов. 2002. Т. 38, № 4. С. 433-444.
6. Абдуллин, И.Ш. Модификация нанослоев в высокочастотной плазме пониженного давления / И. Ш.Абдуллин, В. С.Желтухин, И.Р. Сагбиев, М.Ф. Шаехов. Казань: Изд-во Казан.технол. ун-та, 2007. 356 с.
7. Абдуллин, И.Ш. Высокочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения / И.Ш. Абдуллин, В.С. Желтухин, Н.Ф. Кашапов. Казань: Изд-во КГУ, 2000. 348с.
8. Характеристики струйного высокочастотного индукционного разряда пониженного давления в процессах модификации изделий / И. Ш. Абдуллин, И. К. Некрасов, Ф. Р. Сагитова, С. В. Миронов // Инженерно-физический журнал. 2025. Т. 98, № 2. С. 561-571.
9. Кудинов В.В. Оценка физико-химического взаимодействия между волокном и матрицей при получении композиционных материалов, армированных высокопрочными высокомодульными ПЭ-волокнами / В.В. Кудинов, Н.В. Корнеева, М.Ф. Шаехов // Физика и химия обработки материалов. 2005. № 6. С. 58-61.
10. Кудинов В.В. Разработка новых КМ путём управления физико-химическим взаимодействием на границе раздела между упрочняющими элементами и матрицей с помощью неравновесной низкотемпературной плазмы / В.В. Кудинов, Н.В. Корнеева // Новые перспективные материалы и технологии их получения (НПМ) - 2004: материалы межд. науч. конф. Волгоград: РПК «Политехник», 2004. Том II. С. 145-146.

REFERENCES

1. Startsev VO, Antipov VV, Slavin AV, Gorbovets MA. Modern domestic polymer composite materials for aircraft construction (review). Aviation Materials and Technologies. 2023;2(71):122-144.
2. Sokolova YuV, Gotlib EM. Composite materials based on modified polymers. Moscow: Uniar-Print; 2000.
3. Karpov A, Mostovoy M. Carbon and composite carbon-carbon materials high temperature mechanical properties. Perspektivnye Materialy. 2015;3:13-21.
4. Gorbatkina YuA. Adhesive strength in polymer-fiber systems. Moscow: Khimiya; 1987.
5. Korneeva NV, Gorbatkina YuA. Adhesion of thermoplastic matrices with different molecular weights to fibers. Mechanics of Composite Materials. 2002;38(4):433-444.
6. Abdullin IS, Zheltukhin VS, Sagbiev IR, Shaekhov MF. Modification of nanolayers in low-pressure high-frequency plasma. Kazan: Publishing House of Kazan Technological University; 2007.
7. Abdullin IS, Zheltukhin VS, Kashapov NF. High-frequency plasma-jet treatment of materials at low pressures. Theory and practice of application. Kazan: KSU Publishing House; 2000.
8. Abdullin ISh, Nekrasov IK, Sagitova FR, Mironov SV. Characteristics of a jet high-frequency low-pressure induction discharge in product modification. Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2025;98(2):561-571.
9. Kudinov VV, Korneeva NV, Shaekhov MF. Evaluation of the physical and chemical interaction between fiber and matrix in the production of composite materials reinforced with high-strength high-muzzle PE fibers. Physics and Chemistry of Materials Treatment. 2005;6:58-61.
10. Kudinov VV, Korneeva NV. Development of new QMS by controlling the physical and chemical interaction at the interface between the reinforcing elements and the matrix using a nonequilibrium low-temperature plasma. Proceeding of the International Scientific Conference, 2004: New Promising Materials and Technologies for Their Production; Volgograd: Polytechnic. 2004;2:145-146.

Информация об авторах:

Сагитова Фарида Равилевна – кандидат химических наук, ведущий инженер, тел. +79099101070, Author-ID-РИНЦ 53190.

Шарифуллин Фарид Саидович – доктор технических наук, профессор, тел. +79276767265, Author-ID-РИНЦ 177543.

Абдуллин Ильдар Шаукатович – доктор технических наук, тел. +79600848084, Author-ID-РИНЦ 41737.

Sagitova Farida Ravilevna – Candidate of Chemical Sciences, Senior Engineer, phone: +79099101070, Author-ID-RSCI 53190.
Sharifullin Farid Saidovich – Doctor of Technical Sciences, phone: +79276767265, Professor, Author-ID-RSCI 177543.

Abdullin Ildar Shaukatovich – Doctor of Technical Sciences, phone: +79600848084, Author-ID-RSCI 41737.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 09.07.2025; одобрена после рецензирования 06.08.2025; принята к публикации 27.11.2025. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 09.07.2025; approved after review on 06.08.2025; accepted for publication on 27.11.2025. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.

12+

Научное издание

ТРАНСПОРТНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Редактирование Н.Ю. Лакалина
Компьютерная верстка В.А. Ерохина

Подписано в печать 15.12.25. Дата выхода в свет 24.12.25. Формат $60\times84^{1}/_{8}$.
Бумага офсетная. Офсетная печать. Усл. печ. л. 11,63. Уч.-изд. л. 12,5.
Тираж 500 экз. Свободная цена.

Учредитель и издатель – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Брянский государственный технический университет»
(БГТУ)

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет».
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, БГТУ, тел. (4832) 58-82-77.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии БГТУ,
241035, Брянск, ул. Институтская, 16