




## Изучение взаимодействия базальтового дисперсного наполнителя с эпоксидным связующим




Екатерина Ю. Васинкина <sup>1</sup>	<a href="mailto:vasinkina1987@mail.ru">vasinkina1987@mail.ru</a>	 0000-0002-4247-9262
Юлия А. Кадыкова <sup>1</sup>	<a href="mailto:79053818212@ya.ru">79053818212@ya.ru</a>	 0000-0002-5581-0970
Светлана Г. Калганова <sup>1</sup>	<a href="mailto:s.kalganova2016@ya.ru">s.kalganova2016@ya.ru</a>	 0000-0003-2155-3192

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия

**Аннотация.** В настоящее время базальт, обладая уникальными свойствами, применяется для производства нитей, тканей, сеток, теплоизоляционной ваты. В настоящее время активно ведутся исследования по возможности применения базальта, не перерабатывая его в волокна, в качестве дисперсного наполнителя для термо- и ректопластичных материалов. Поэтому изучение взаимодействия эпоксидного связующего с измельченным базальтом является перспективным и определило цель данного исследования. Объектами исследования служили: эпоксидная смола марки ЭД-20, полиэтиленполиамин ПЭПА, дисперсный базальтовый наполнитель. Исследование взаимодействия базальтового наполнителя с эпоксидным олигомером и отвердителем осуществляли на спектрофотометре «Спекорд», ИК область спектра которого охватывает область  $400 \div 4000$  см<sup>-1</sup>. Для съемки ИК-спектров порошков их прессуют вместе с избытком бромида калия в таблетки толщиной несколько миллиметров. Для получения таблеток используются специальные вакуумные пресс-формы и давление несколько тонн на 1 см<sup>2</sup>. Данные ИКС подтверждают взаимодействие ЭД-20 не только с ПЭПА, но и с дисперсным базальтом. В реакцию вступают аминогруппы, эпоксидные кольца, группы СН, входящие в состав эпоксидного и ароматического колец связующего и отвердителя. При увеличении содержания базальтового наполнителя в эпоксидной смоле наблюдаются те же максимумы и полосы поглощения, что и на ИК-спектрах композиционного материала с малым содержанием дисперсного базальта. Отличие заключается в том, что чем больше содержание базальта в эпоксидной матрице, тем больше относительная интенсивность таких максимумов, что свидетельствует о более сильном взаимодействии компонентов.

**Ключевые слова:** базальтовый дисперсный наполнитель, эпоксидное связующее, отвердитель, композит, инфракрасная спектроскопия, взаимодействие.

## Interaction research epoxy binder with basalt by the X method

Ekaterina Yu. Vasinkina <sup>1</sup>	<a href="mailto:vasinkina1987@mail.ru">vasinkina1987@mail.ru</a>	 0000-0002-4247-9262
Yulia A. Kadykova <sup>1</sup>	<a href="mailto:79053818212@ya.ru">79053818212@ya.ru</a>	 0000-0002-5581-0970
Svetlana G. Kalganova <sup>1</sup>	<a href="mailto:s.kalganova2016@ya.ru">s.kalganova2016@ya.ru</a>	 0000-0003-2155-3192

<sup>1</sup> Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., Politechnicheskaya str., 77, Saratov, 410054, Russia

**Abstract.** Basalt, known for its unique properties, is used for the production of yarns, fabrics, nets, and heat-insulating wool. Currently, a research is promoted on applicability of basalt as a dispersed filler for thermo- and rectoplastic materials without processing it into fibers. Therefore, investigation into interaction of epoxy binder with the crushed basalt is promising, which determines the aim of the given study. The objects of the research are the epoxy resin ED-20, polyethylene polyamine PEPA, and dispersed basalt filler. Spectrophotometer "Specord" with the IR-spectrum covering the area of  $400 \div 4000$  cm<sup>-1</sup> was used to study the interaction of basalt filler with the epoxy oligomer and hardener. To take the photos of IR spectra of powders, the latter are pressed together with an excess of potassium bromide into tablets several millimeters thick. Special vacuum molds and pressure of several tons per 1 cm<sup>2</sup> are used to produce the tablets. The ICS data confirm the interaction of ED-20 not only with PEPA, but also with the dispersed basalt. Amino groups, epoxy rings, CH groups of epoxy and aromatic rings of the binder and hardener undergo a reaction. As the content of the basalt filler in the epoxy increases, the same absorption maxima and bands are observed as in the IR spectra of the composite material with a low content of dispersed basalt. The difference is that the higher the basalt content in the epoxy matrix, the higher the relative intensity of such maxima, which indicates a stronger interaction of the components.

**Keywords:** basalt dispersed filler, epoxy binder, hardener, composite, infrared spectroscopy, interaction.

### Введение

Горные базальтовые породы широко распространены и, как вулканическая порода, встречается практически во всех уголках земли. В Российской Федерации крупные месторождения базальтовых пород находятся на Дальнем Востоке, Камчатке, Сахалине, Дагестане, Урале, Северо-западе Сибири, Кольском полуострове [1–5].

В настоящее время базальт, обладая уникальными свойствами, применяется для производства нитей, тканей, сеток, теплоизоляционной ваты [6–9]. Активно ведутся исследования по возможности применения базальта, не перерабатывая его в волокна, в качестве дисперсного наполнителя для термо- и ректопластичных материалов [3, 9–10].

#### Для цитирования

Васинкина Е.Ю., Кадыкова Ю.А., Калганова С.Г. Изучение взаимодействия базальтового дисперсного наполнителя с эпоксидным связующим // Вестник ВГУИТ. 2022. Т. 84. № 3. С. 172–176. doi:10.20914/2310-1202-2022-3-172-176

#### For citation

Vasinkina E.Yu., Kadykova Yu.A., Kalganova S.G. Interaction research epoxy binder with basalt by the X method. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2022. vol. 84. no. 3. pp. 172–176. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2022-3-172-176

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Поэтому изучение взаимодействия эпоксидного связующего с измельченным базальтом является перспективным и определило цель данного исследования.

### Материалы и методы

Объектом исследования служила эпоксидная смола марки ЭД-20, в качестве сшивающего агента эпоксидного олигомера применялся полиэтиленполиамин ПЭПА, в качестве наполнителя применялся измельченный базальтовый щебень, размер частиц после измельчения  $\leq 140$  мкм.

Исследование взаимодействия базальтового наполнителя с эпоксидным олигомером и отвердителем осуществляли на спектрофотометре «Spesord», ИК область спектра которого охватывает область  $400 \div 4000$   $\text{см}^{-1}$ . Для съемки ИК-спектров порошков их прессуют вместе с избытком бромида калия в таблетки толщиной несколько миллиметров. Для получения таблеток используются специальные вакуумные пресс-формы и давление несколько тонн на  $1 \text{ см}^2$ .

### Результаты и обсуждение

Весь комплекс свойств полимерного композиционного материала зависит от характера взаимодействия между связующим и различными компонентами, вводимыми в полимер. Поэтому в данной работе методом инфракрасной спектроскопии (ИКС) [11–20] изучено взаимодействие измельченного базальтового наполнителя с эпоксидной смолой и отвердителем ПЭПА.

Анализ взаимодействия в композиционном материале 100ЭД-20 + 15ПЭПА позволил установить максимумы и полосы поглощения, представленные на рисунок 1.

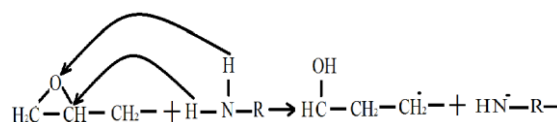
Анализ ИК-спектров данного полимерного композиционного материала (ПКМ) показывает, что отсутствуют максимумы при  $920 \text{ см}^{-1}$  валентных  $\nu_s$ -колебаний эпоксидных колец, при  $3006 \text{ см}^{-1}$   $\nu_s$ -колебаний группы СН в эпоксидных кольцах, при  $3344,15 \text{ см}^{-1}$  и при  $3305,58 \text{ см}^{-1}$  валентных  $\nu_s$ -колебаний и валентных  $\nu_{as}$ -колебаний свободных NH-групп. Это указывает на взаимодействие эпоксидные кольца и аминогруппы отвердителя ПЭПА.

Для эпоксидного кольца характерна большая плотность электронных облаков связей в эпоксидном цикле, не сосредоточенная в области между ядрами атомов кислорода и углерода. Облака каждого из атомов образуют друг с другом угол, равный примерно  $1040^\circ$ . Вследствие этого перекрывание электронных облаков атомов углерода и водорода меньше, чем в обычных  $\sigma$ -связях. Поэтому связи С-О-С ослаблены, вследствие чего атомы водорода аминогрупп отвердителя атакуют легко связь С-О и кольцо раскрывается. Если у эпоксидного кольца

есть заместители, то этот процесс протекает особенно легко:

При этом образуются радикалы, которые легко взаимодействуют между собой с образованием сшитой полимерной сетки ПКМ.

На ИК-спектрах образцов ПКМ состава 100 м.ч. ЭД-20 + 15 м.ч. ПЭПА + 1 м.ч. базальта (рисунок 1, кр. 2) большинство максимумов те же, что и в спектре ненаполненной композиции, однако есть и изменения, отсутствуют максимумы:



- при  $3592,74 \text{ см}^{-1}$  и  $3404,80 \text{ см}^{-1}$  – валентных  $\nu_s$  и  $\nu_{as}$  колебаний группы – NH;
- при  $3055,57 \text{ см}^{-1}$  – валентных  $\nu_s$ -колебаний группы СН в ароматическом ядре;
- при  $3006 \text{ см}^{-1}$  – валентных  $\nu_s$ -колебаний группы СН в эпоксидных кольцах;
- при  $920 \text{ см}^{-1}$  – валентных колебаний эпоксидных колец;
- при  $534,63 \text{ см}^{-1}$  – внеплоскостных валентных  $\nu_s$ -колебаний группы СН ароматического кольца.

Эти данные подтверждают взаимодействие ЭД-20 не только с ПЭПА, но и с базальтом. В реакцию вступают аминогруппы, эпоксидные кольца, группы СН, входящие в состав эпоксидного и ароматического колец. Появился слабый максимум деформационных  $\delta$ -колебаний новой связи С-ОН и сильная широкая полоса валентных колебаний связи Si-O-C при  $1037,34 \text{ см}^{-1}$ . Эти две полосы поглощения являются результатом взаимодействия базальта с эпоксидной смолой. В недеформированном невозмущенном состоянии в тетраэдре  $[\text{SiO}_4]^{4-}$  – все связи равноценны и колебания их выражены, т. е. колеблется как бы одна связь Si-O как единое целое.

На ИК-спектрах образцов КМ 100 м.ч. ЭД-20+15 м.ч. ПЭПА+ 30 м.ч. базальта (рисунок 1, кр. 3) наблюдаются те же максимумы и полосы поглощения, что и на ИК-спектрах ПКМ 100ЭД-20+15ПЭПА, с некоторыми отличиями, такими же, что и на ИК-спектре КМ 100ЭД-20+15ПЭПА+1 базальт. На ИК-спектрах образцов ПКМ 100ЭД-20+15ПЭПА+30 базальт отсутствуют линии при  $775,14 \text{ см}^{-1}$ , хотя этот максимум есть на ИК-спектре с 1 масс. ч. базальта. Это полоса поглощения валентных  $\nu_s$ -колебаний связи Si-O в концевом кремнекислородном мотиве. Это значит, что под поляризующим действием амино- и других функциональных групп ЭД-20 концевой кремнекислородный мотив базальта разрушается. При  $879,18 \text{ см}^{-1}$  – деформационные  $\delta$ -колебания связи Si-O в ортосиликатном мотиве.

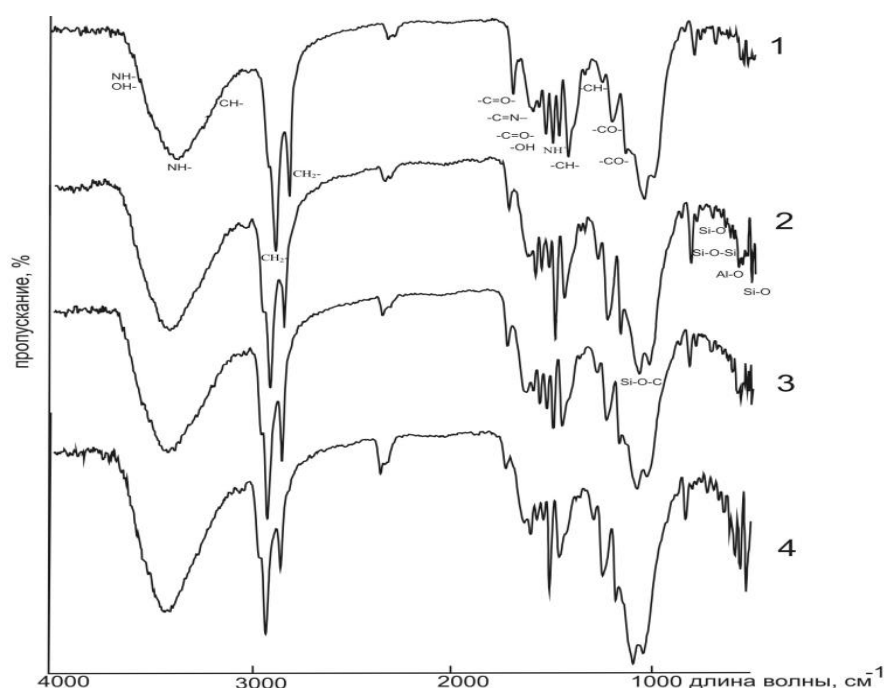


Рисунок 1. ИК-спектры композиции: 1 – 100 м.ч. ЭД-20+15 м.ч. ПЭПА; 2 – 100 м.ч. ЭД-20+15 м.ч. ПЭПА+1 м.ч.базальта; 3 – 100 м.ч. ЭД-20+15 м.ч. ПЭПА+30 м.ч.базальта; 4 – 100 м.ч. ЭД-20+15 м.ч. ПЭПА+50 м.ч.базальта

Figure 1. IR spectra of the composition: 1 – 100 m.h. ED-20+15 m.h. PEP; 2 – 100 m.h. ED-20+15 m.h. PEPA+1 m.h.basalt; 3 – 100 m.h. ED-20+15 m.h. PEPA+30 m.h.basalt; 4 – 100 m.h. ED-20+15 m.h. DAD+50 m.h.basalt

Уменьшилась относительная интенсивность среднеслабой полосы поглощения валентных колебаний связи C=O в сложноэфирной группе, что указывает на взаимодействие этой связи с базальтом. Взаимодействие связей C-H, содержащихся в метильных и метиленовых группах, с базальтом привело к уменьшению относительной интенсивности сильной широкой полосы поглощения при  $1464,86\text{ см}^{-1}$ . Вследствие взаимодействия связей C-O с Si-O базальта и связи C=O с Si-O произошло наложение полос поглощения связей C-O с Si-O (при  $1179,76\text{ см}^{-1}$ ) и полос поглощения связей C=O с Si-O (при  $1088,34\text{ см}^{-1}$ ), в результате чего относительная интенсивность этих полос поглощения увеличилась. Вступила в реакцию с Si-O и группа –CH, входящая в состав бензольного ядра (при  $799,16\text{ см}^{-1}$ ). Вследствие взаимодействия связи C=O с базальтом с образованием новой связи Si-O-C относительная интенсивность полосы поглощения валентных  $\nu_s$ -колебаний связи C=O при  $1739,92\text{ см}^{-1}$  уменьшилась. Увеличилась интенсивность полосы поглощения валентных  $\nu_s$ -колебаний связи –C=N – при  $1643,41$  вследствие взаимодействия ее с гидроксильными

группами гидратного покрова базальта и наложения полосы поглощения  $\nu_s$ -колебаний связи –C=N – с полосой поглощения деформационных  $\delta$ -колебаний групп OH и воды.

Все остальные максимумы также как и на ИК-спектре КМ с 1 масс.ч. базальта.

На ИК-спектрах образцов ПКМ 100 м.ч. ЭД-20+15 м.ч. ПЭПА+ 50 м.ч.базальта (рисунок 1, кр. 4) наблюдаются те же максимумы и полосы поглощения, что и на ИК-спектрах КМ с 1 и 30 масс.ч. базальта. Отличие заключается в том, что чем больше содержание базальта в ПКМ, тем больше относительная интенсивность таких максимумов.

### Заключение

На основании данных ИК-спектроскопии доказано взаимодействие эпоксидного связующего с дисперсным наполнителем – базальтом. Взаимодействие базальта общей формулы  $nR_1SiOH$  с эпоксидной смолой и отвердителем протекает посредством гидроксильных групп, аминогрупп, эпоксидных колец, группы CH, входящей в состав эпоксидного и ароматического колец.

### Литература

- 1 Бекешев А.З., Бредихин П.А., Акметова М.К., Кадькова Ю.А. и др. Изучение свойств дисперсного базальта и его влияние на характеристики полиолефинов // Ползуновский вестник. 2017. № 2. С. 115–118.
- 2 Aidaraliev J.K., Atyrova R.S., Kainazarov A.T., Abdiev M.S. The technology of basalt fibers on bases of local basalts and prospects for application // Izvestiy Oshskogo technologicheskogo university. 2018. № 1–1. С. 251–258.

- 3 Малова Ю.Г., Аблесимов Н.Е. Горные породы базальтового состава: месторождения. часть II // Базальтовые технологии. 2014. С. 26–24.
- 4 Павлов В.В., Арзамасцев В.С., Левкина Н.Л., Арзамасцев С.В. и др. Оценка эффективности модификации полиамида 6 базальтовыми наполнителями // Пластические массы. 2015. № 9-10. С. 39-41.
- 5 Багатаев Р.М. Исследование магматических пород горного дагестана для производства базальтового волокна // Евразийское Научное Объединение. 2019. № 1–2 (47). С. 110–116.
- 6 Аносов В.В., Ахылбек С. Применения базальтовых пород для производства наполнителей композитных материалов // StudNet. 2021. Т. 4. № 5.
- 7 Дроздук Т.А., Айзенштадт А.М., Махова Т.А., Фролова М.А. Оценка пригодности базальтов для производства минерального волокна // Промышленное и гражданское строительство. 2018. № 7. С. 52–56.
- 8 Васильева А.А., Павлова М.С. Получение базальтового непрерывного волокна на основе базальта васильевского месторождения // Техника и технология силикатов. 2019. Т. 26. № 4. С. 111–114.
- 9 Чимчикова М.К. Базальт и волластонит как наполнители полимерной матрицы // Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова. 2021. № 3 (73). С. 423–428.
- 10 Иманкулова А.С., Курманалиева А.К. Исследование физико-механических свойств композиционных материалов с использованием акриловых дисперсий // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. 2020. № 3 (55). С. 217–224.
- 11 Улегин С.В., Кадыкова Ю.А., Фархутдинова Э.Г., Сотник В.А. и др. Эпоксидные компаунды, наполненные дисперсным минеральным наполнителем // Химия: образование, наука, технология: сборник трудов всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы. МЦНИП, 2014. С. 347.
- 12 Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. М.: Теплоэнергетик, 2002. 416 с.
- 13 Кадыкова Ю.А., Улегин С.В., Фархутдинова Э.Г., Сотник В.А. Полимерматричные композиционные материалы на основе эпоксидной матрицы, наполненной дисперсным базальтом // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2012. Т. 4. № 1 (68). С. 97-99.
- 14 Терещенко Ю.В. Трактовка основных показателей variability ритма сердца // Новые медицинские технологии на службе первичного звена здравоохранения: материалы межрегиональной конференции, Омск, 10–11 апреля, 2010. С. 3–11.
- 15 Mostovoy A., Bekeshev A., Tastanova L., Akhmetova M. et al. The effect of dispersed filler on mechanical and physicochemical properties of polymer composites // Polymers and Polymer Composites. 2021. V. 29. №. 6. P. 583-590. doi: 10.1177/0967391120929040
- 16 Pakhareno V., Yanchar I., Efanova V. Polymer composite materials with fibrous and disperse basalt fillers // Fibre Chemistry. 2008. V. 40. №. 3.
- 17 Vinay S.S., Sanjay M.R., Siengchin S., Venkatesh C.V. Basalt fiber reinforced polymer composites filled with nano fillers: A short review // Materials Today: Proceedings. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.430
- 18 Patti A., Nele L., Zarrelli M., Graziosi L. et al. A comparative analysis on the processing aspects of basalt and glass fibers reinforced composites // Fibers and Polymers. 2021. V. 22. №. 5. P. 1449-1459. doi: 10.1007/s12221-021-0184-x
- 19 Raajeshkrishna C.R., Chandramohan P., Babatunde Obadele A. Friction and thermo mechanical characterization of nano basalt reinforced epoxy composites // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. 2021. V. 26. №. 5. P. 425-439. doi: 10.1080/1023666X.2021.1899692
- 20 Subagia I.D.G.A., Tijjing, L.D., Kim Y., Kim C.S. et al. Mechanical performance of multiscale basalt fiber–epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles // Composites Part B: Engineering. 2014. V. 58. P. 611-617. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.034


## References

- 1 Bekeshev A.Z., Bredikhin P.A., Akmetova M.K., Kadykova Yu.A. Study of the properties of dispersed basalt and its influence on the characteristics of polyolefins. Polzunovskiy vestnik. 2017. no. 2. pp. 115–118. (in Russian).
- 2 Aidaraliev J.K., Atyrova R.S., Kainazarov A.T., Abdiev M.S. The technology of basalt fibers on bases of local basalts and prospects for application. Izvestiy Oshskogo technologicheskogo university. 2018. no. 1–1. pp. 251–258. (in Russian).
- 3 Malova Yu.G., Ablesimov N.E. Rocks of basalt composition: deposits. part II. Basalt technologies. 2014. pp. 26–24. (in Russian).
- 4 Pavlov V.V., Arzamastsev V.S., Levkina N.L., Arzamastsev S.V. Evaluation of the effectiveness of modifying polyamide 6 with basalt fillers. Plastic masses. 2015. no. 9-10. pp. 39-41. (in Russian).
- 5 Bagataev R.M. Study of igneous rocks of mountainous Dagestan for the production of basalt fiber. Eurasian Scientific Association. 2019. no. 1–2 (47). pp. 110–116. (in Russian).
- 6 Anosov VV, Akhyllbek S. Application of basalt rocks for the production of fillers for composite materials. StudNet. 2021. vol. 4. no. 5. (in Russian).
- 7 Drozdjuk T.A., Aizenshtadt A.M., Makhova T.A., Frolova M.A. Evaluation of the suitability of basalts for the production of mineral fiber. Industrial and civil construction. 2018. no. 7. pp. 52–56. (in Russian).
- 8 Vasil'eva A.A., Pavlova M.S. Obtaining continuous basalt fiber based on basalt from the Vasilyevsky deposit. Technique and technology of silicates. 2019. vol. 26. no. 4. pp. 111–114. (in Russian).
- 9 Chimchikova M.K. Basalt and wollastonite as polymer matrix fillers. Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture. N. Isanova. 2021. no. 3 (73). pp. 423–428. (in Russian).
- 10 Imankulova A.S., Kurmanalieva A.K. Study of the physical and mechanical properties of composite materials using acrylic dispersions. Proceedings of the Kyrgyz State Technical University. I. Razzakova. 2020. no. 3 (55). pp. 217–224. (in Russian).
- 11 Ulegin S.V., Kadykova Yu.A., Farkhutdinova E.G., Sotnik V.A. Epoxy compounds filled with dispersed mineral filler. Chemistry: education, science, technology: collection of proceedings of the All-Russian scientific-practical conference with elements of a scientific school. MTsNIP, 2014. pp. 347. (in Russian).


- 12 Dzhigiris D.D., Makhova M.F. Fundamentals of the production of basalt fibers and products. Moscow, Teploenergetik, 2002. 416 p. (in Russian).
- 13 Kadykova Yu.A., Ulegin S.V., Farkhutdinova E.G., Sotnik V.A. Polymer matrix composite materials based on epoxy matrix filled with dispersed basalt. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 2012. vol. 4. no. 1 (68). pp. 97-99. (in Russian).
- 14 Tereshchenko Yu.V. Interpretation of the main indicators of heart rate variability. New medical technologies in the service of primary health care: materials of the interregional conference, Omsk, April 10–11, 2010. pp. 3–11. (in Russian).
- 15 Mostovoy A., Bekeshev A., Tastanova L., Akhmetova M. et al. The effect of dispersed filler on mechanical and physicochemical properties of polymer composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2021. vol. 29. no. 6. pp. 583-590. doi: 10.1177/0967391120929040
- 16 Pakharenko V., Yanchar I., Efanova V. Polymer composite materials with fibrous and disperse basalt fillers. *Fibre Chemistry*. 2008. vol. 40. no. 3.
- 17 Vinay S.S., Sanjay M.R., Siengchin S., Venkatesh C.V. Basalt fiber reinforced polymer composites filled with nano fillers: A short review. *Materials Today: Proceedings*. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.10.430
- 18 Patti A., Nele L., Zarrelli M., Graziosi L. et al. A comparative analysis on the processing aspects of basalt and glass fibers reinforced composites. *Fibers and Polymers*. 2021. vol. 22. no. 5. pp. 1449-1459. doi: 10.1007/s12221-021-0184-x
- 19 Raajeshkrishna C.R., Chandramohan P., Babatunde Obadele A. Friction and thermo mechanical characterization of nano basalt reinforced epoxy composites. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2021. vol. 26. no. 5. pp. 425-439. doi: 10.1080/1023666X.2021.1899692
- 20 Subagia I.D.G.A., Tijing, L.D., Kim Y., Kim C.S. et al. Mechanical performance of multiscale basalt fiber–epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles. *Composites Part B: Engineering*. 2014. vol. 58. pp. 611-617. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.034

#### Сведения об авторах


**Екатерина Ю. Васинкина** ассистент, кафедра электроэнергетики и электротехники, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия, vasinkina1987@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

**Юлия А. Кадикова** д.т.н., доцент, кафедра электроэнергетики и электротехники, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия, 79053818212@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

**Светлана Г. Калганова** д.т.н., доцент, кафедра электроэнергетики и электротехники, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., ул. Политехническая, 77, г. Саратов, 410054, Россия, s.kalganova2016@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

#### Вклад авторов

**Екатерина Ю. Васинкина** провела эксперимент, написала рукопись

**Юлия А. Кадикова** обзор литературных источников по исследуемой проблеме


**Светлана Г. Калганова** консультация в ходе исследования, корректировала рукопись до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

#### Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Information about authors


**Ekaterina Yu. Vasinkina** assistant, electric power engineering and electrical engineering department, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., Politechnicheskaya str., 77, Saratov, 410054, Russia, vasinkina1987@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-4247-9262>

**Yulia A. Kadykova** Dr. Sci. (Engin.), associate professor, electric power engineering and electrical engineering department, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., Politechnicheskaya str., 77, Saratov, 410054, Russia, 79053818212@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5581-0970>

**Svetlana G. Kalganova** Dr. Sci. (Engin.), associate professor, electric power engineering and electrical engineering department, Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., Politechnicheskaya str., 77, Saratov, 410054, Russia, s.kalganova2016@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2155-3192>

#### Contribution

**Ekaterina Yu. Vasinkina** conducted an experiment, wrote a manuscript

**Yulia A. Kadykova** review of literature sources on the problem under study

**Svetlana G. Kalganova** consultation during the research, corrected the manuscript before submitting it to the editorial office and is responsible for plagiarism

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 11/07/2022	После редакции 05/08/2022	Принята в печать 02/09/2022
Received 11/07/2022	Accepted in revised 05/08/2022	Accepted 02/09/2022