

## Модифицированные дисперсные наполнители – натрий кремнефтористый и полифосфат аммония, их свойства и влияние на эпоксидную матрицу

Николай А. Яковлев	<sup>1</sup>	<a href="mailto:reddeade@rambler.ru">reddeade@rambler.ru</a>	 0000-0002-7466-0162
Елена В. Плакунова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:elena.plakunowa@ya.ru">elena.plakunowa@ya.ru</a>	 0000-0003-0588-5859
Антон С. Мостовой	<sup>1</sup>	<a href="mailto:mostovoy19@rambler.ru">mostovoy19@rambler.ru</a>	 0000-0003-2828-9988
Андрей С. Щербаков	<sup>2</sup>	<a href="mailto:gassmed7@gmail.com">gassmed7@gmail.com</a>	 0000-0002-5376-7470

<sup>1</sup> Энгельский технологический институт (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17, 413100, Россия

<sup>2</sup> Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А. / г. Саратов, ул. Политехническая, 77, 410054, Россия

**Аннотация.** Изучена структура и свойства полифосфата аммония и натрия кремнефтористого, используемых в качестве дисперсных наполнителей для эпоксидных композиций. Изучена морфология наполнителей по отдельности и в матрице эпоксидного композита при помощи сканирующей электронной микроскопии с детектором рентгеновского энергодисперсионного анализа. В связи с тем что натрий кремнефтористый является побочным продуктом при производстве фосфорной кислоты, определен размер его частиц методом ситового анализа и статистически рассчитаны параметры частиц, при этом был произведен сравнительный анализ исследуемого наполнителя с широко использующимся в производстве композиционных материалов полифосфатом аммония, который в то же время не модифицировался поверхностно-активным веществом 3-аминопропилтриэтоксисиланом. Исследование морфологии и свойств является определяющим фактором, описывающим размер и вид частиц, что влечет за собой возможность регулирования технологических параметров, таких как динамическая вязкость системы, устойчивость к различным нагрузкам, поэтому существует возможность получения высоконаполненных композитов, имеющих высокие физико-механические характеристики. В связи с этим определено влияние изученных наполнителей на свойства полимерных композиционных материалов. Исследованы механизмы взаимодействия модифицирующей добавки 3-аминопропилтриэтоксисилана с эпоксидным олигомером и влияние аппретирования на свойства натрия кремнефтористого и полифосфата аммония, процессы, образования монослойного гетерофункционального поверхностно-активного вещества.

**Ключевые слова:** аппретирование, морфология, агрегация, распределение частиц, дисперсный наполнитель, натрий кремнефтористый, полифосфат аммония

## Surface modification of dispersed fillers (silicofluoride sodium and ammonium polyphosphate). Their properties and influence on an epoxy matrix

Nikolay A. Yakovlev	<sup>1</sup>	<a href="mailto:reddeade@rambler.ru">reddeade@rambler.ru</a>	 0000-0002-7466-0162
Elena V. Plakunova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:elena.plakunowa@ya.ru">elena.plakunowa@ya.ru</a>	 0000-0003-0588-5859
Anton S. Mostovoy	<sup>1</sup>	<a href="mailto:mostovoy19@rambler.ru">mostovoy19@rambler.ru</a>	 0000-0003-2828-9988
Andrey S. Shcherbakov	<sup>2</sup>	<a href="mailto:gassmed7@gmail.com">gassmed7@gmail.com</a>	 0000-0002-5376-7470

<sup>1</sup> Engels Institute of Technology (branch) Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 17 Svobody square, Engels, 413100, Russia

<sup>2</sup> Yuri Gagarin State Technical University of Saratov 77 Politechnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia

**Abstract.** The structure and properties of ammonium polyphosphate and sodium silicofluoride used as dispersed fillers for epoxy compositions were studied. The morphology of the fillers was studied separately and in an epoxy composite matrix using scanning electron microscopy with an X-ray energy dispersive analysis detector. Due to the fact that sodium silicofluoride is a by-product in the production of phosphoric acid, its particle size was determined by sieve analysis and particle parameters were statistically calculated, while a comparative analysis of the studied filler with ammonium polyphosphate widely used in the production of composite materials, which at the same time, was performed time was not modified by the surfactant 3-aminopropyltriethoxysilane. The study of morphology and properties is a determining factor describing the size and type of particles, which entails the possibility of controlling technological parameters, such as the dynamic viscosity of the system, resistance to various loads, therefore, it is possible to obtain highly filled composites having high physical and mechanical characteristics. In this regard, the influence of the studied fillers on the properties of polymer composite materials is determined. The mechanisms of interaction of the modifying additive of 3-aminopropyltriethoxysilane with an epoxy oligomer and the effect of sizing on the properties of sodium silicofluoride and ammonium polyphosphate, processes, and the formation of a monolayer heterofunctional surfactant are studied.

**Keywords:** impregnation, morphology, aggregation, particle distribution, dispersed filler, silicofluoride sodium

Для цитирования

Яковлев Н. А., Плакунова Е. В., Мостовой А.С., Щербаков А.С. Модифицированные дисперсные наполнители – натрий кремнефтористый и полифосфат аммония, их свойства и влияние на эпоксидную матрицу // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 207–212. doi:10.20914/2310-1202-2020-1-207-212

For citation

Yakovlev N.A., Plakunova E.V., Mostovoy A.S., Shcherbakov A.S. Surface modification of dispersed fillers (silicofluoride sodium and ammonium polyphosphate). Their properties and influence on an epoxy matrix. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 1. pp. 207–212. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-1-207-212

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

## Введение

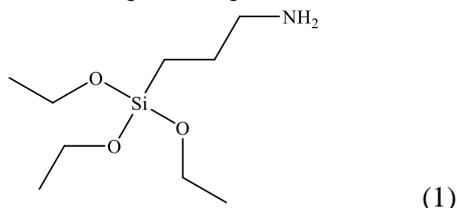
Наполнители полимерных композиционных материалов (ПКМ) способны изменять процесс структурообразования, влияя на кинетику отверждения или вступая в химическое взаимодействие с ПКМ. В зависимости от типа наполнителя может наблюдаться его неравномерное распределение в матрице, что связано с полидисперсностью частиц, различной плотностью и другими факторами. Поэтому существует необходимость модификации таких наполнителей путем аппретирования различными агентами для улучшения химического взаимодействия между наполнителем и полимерной матрицей [1–4]. Вещества, задающие структуру, свойства и протяженность слоя между поверхностью наполнителя и матрицей, относятся к аппретам [5].

В то же время замасливатели, а также специально синтезированные аппретирующие вещества на основе amino-, винил-, эпокси-, хлорсиланов определяют прочность соединений «матрица – наполнитель», зависящих от используемого кремнийорганического соединения.

При этом есть сведения о том, что наиболее высокие показатели адгезионной прочности в стеклопластиках достигаются при использовании эпокисилана ЭС-1 (глицидоксипропилтриэтоксисилан) и аминсилана – АГМ-9 ( $\gamma$ -аминопропилтриэтоксисилан), наносимых на волокна в виде аппретов [6].

## Материалы и методы

Для модификации наполнителей, применяемых в эпоксидных композициях, был выбран amino-функциональный аппрет АГМ-9, состоящий из гамма-аминопропилтриэтоксисилана, с первичной аминогруппой, взаимодействующей с эпоксидным олигомером, улучшая смачиваемость и распределение наполнителей в полимерной матрице:



В работе применялся дисперсный наполнитель полифосфат аммония (ПФА), который зачастую используется в качестве пламезамедляющей добавки, является термически стабильным, с началом деструкции  $T = 700$  °С потери массы достигают 40 %, сам процесс деструкции эндотермичен, что уменьшает передачу теплового потока к полимеру [7].

Структура полифосфата аммония и кремнефтористого натрия была определена методом СЭМ («Aspex EXplorer») диапазоном определяемых частиц до 30 нм, с детектором EDX-элементного анализа), что позволило определить их влияние на перенос напряжений при нагрузке в композите (рисунок 1),

следуя данным, ПФА (рисунок 1, б) имеет несимметричную форму частиц в виде нерегулярного многогранника. Наполнитель НКФ (Балаковский филиал АО «Апатит») (рисунок 1, а) относится к побочному продукту при переработке фторфосфатного сырья на стадии получения фосфорной кислоты. В связи с тем что ранее гексафторсиликат натрия не использовался в качестве наполнителя для эпоксидных композиций, получен патент на изобретение, в котором при различных соотношениях приведены отличительные особенности таких ПКМ [8].

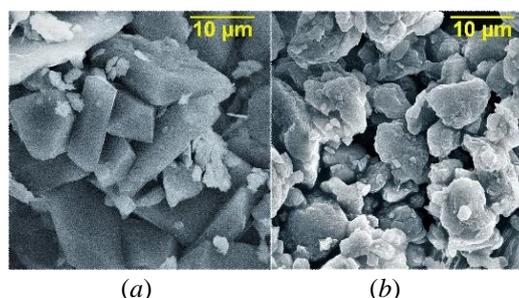


Рисунок 1. Данные СЭМ x 5000: а – частицы кремнефтористого натрия; б – частицы полифосфата аммония

Figure 1. Data SEM x 5000: a – silicofluoride sodium particles; b – particles of ammonium polyphosphate

Инфракрасные спектры исследуемых образцов регистрировали на приборе «IRTracer-100» фирмы Shimadzu, Япония.

Для определения распределения по размерам частиц порошков НКФ, ПФА исследуемую пробу разделяли на несколько фракций просеиванием навески через набор сит с размером отверстий от 0,50 до 0,04 мм.

Полидисперсность может быть описана двумя показателями: степенью неоднородности  $K$  (1) и средним диаметром частиц. Коэффициент неоднородности рассчитывался по формуле

$$K = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (2)$$

где  $d_{60}$  и  $d_{10}$  – диаметр частиц, мкм. Установленный эквивалентный диаметр частиц  $d_3$  для каждого из наполнителей определяли по формуле (2) [9] для гранул агломерационной шихты:

$$d_3 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i \log d_i}{\sum_{i=1}^n g_i}, \quad (2)$$

где  $g_i$  – массовая доля отдельных фракций, %;  $d_i$  – среднелогарифмический размер отдельных фракций, мкм;  $n$  – число фракций.

## Результаты

Данные ИК-спектров (рисунок 2) позволили более подробно оценить возможность наполнителей влиять на процессы структурообразования и горения эпоксидного композита. Для ПФА на отмечается пик колебаний связи NH группы с  $\nu = 3350$  см<sup>-1</sup>, группа фосфорной

кислоты  $R_n(\text{HO})_{3-n}\text{PO}$  с  $\nu = 2300\text{--}2000\text{ см}^{-1}$  и оксид фосфора  $\text{PO}_3$ ,  $\nu = 960\text{ см}^{-1}$ . Анализ данных ИК-спектроскопии НКФ показал наличие интенсивности пиков связей  $\text{SiF}$  ( $750\text{ см}^{-1}$ ) и  $\text{NaF}$  ( $500\text{ см}^{-1}$ ).

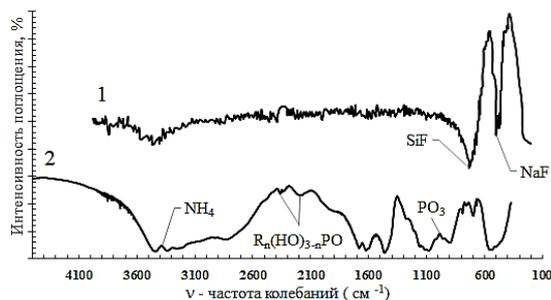


Рисунок 2. Данные ИК-спектроскопии: 1 – НКФ; 2 – ПФА

Figure 2. Data IES: 1 – silicofluoride sodium; 2 – ammonium polyphosphate.

В связи с тем что НКФ является побочным продуктом, методом энергодисперсионного анализа – EDX (рисунок 3) был подтвержден его количественный и качественный состав, выделяющий присутствие на спектре фонового максимума таких элементов, как F, Na и Si.

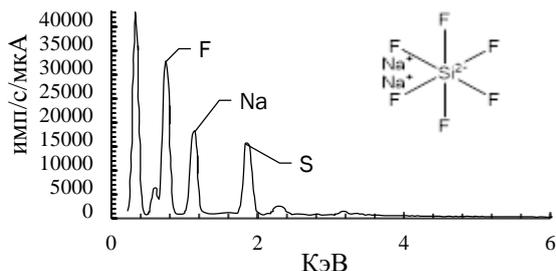
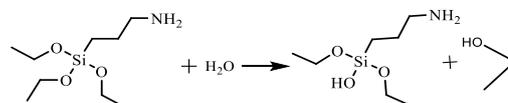


Рисунок 3. ЭРС-спектр НКФ

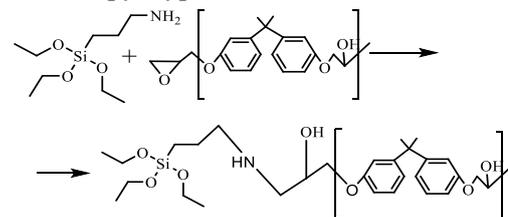
Figure 3. EDX-SSF spectra

Известно [10], что одним из вариантов снижения агломерации частиц наполнителей, а также для улучшения взаимодействия наполнителей и олигомера является его модификация активными силанами. В зависимости от концентрации для модификации наполнителей был подобран 2 %-ный раствор АГМ-9.

Получение раствора АГМ-9 происходило при гидролизе  $\text{CH}_3\text{COOH}$  до  $\text{pH} = 4\text{--}5$ . В результате реакции образуется аминопропилдиэтоксисилан с гидроксильной группой  $\text{R-OH}$ , имеющей низкую стабильность, и этанол,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ .



При совмещении аппретированных НКФ и ПФА с эпоксидным олигомером образующаяся при модификации на наполнителях пленка аminosилана взаимодействует с аминными группами эпоксидного олигомера, тем самым инициируя процесс формирования трехмерной сетчатой структуры:



Эффект модификации можно представить путем статистического анализа гранулометрического состава, полученного методом ситового рассева, и определения насыпной плотности наполнителей до и после аппретирования.

Данные анализа гранулометрического состава позволили определить показатели размеров частиц модифицированных наполнителей. Геометрические размеры уменьшились на 112% для АППМ (модифицированного АГМ-9) и на 24% – для НКФМ соответственно. Присутствующая в исходных наполнителях полидисперсность минимальна, с размером частиц от 40 до 50 мкм. Более детальную информацию о параметрах частиц наполнителя показали кривые интегрального и дифференциального распределения (рисунок 4) гранулометрического состава НКФ и ПФА до и после аппретирования. Критерием отсутствия полидисперсности при этом является разность коэффициента неоднородности и всего объема исследуемого наполнителя.

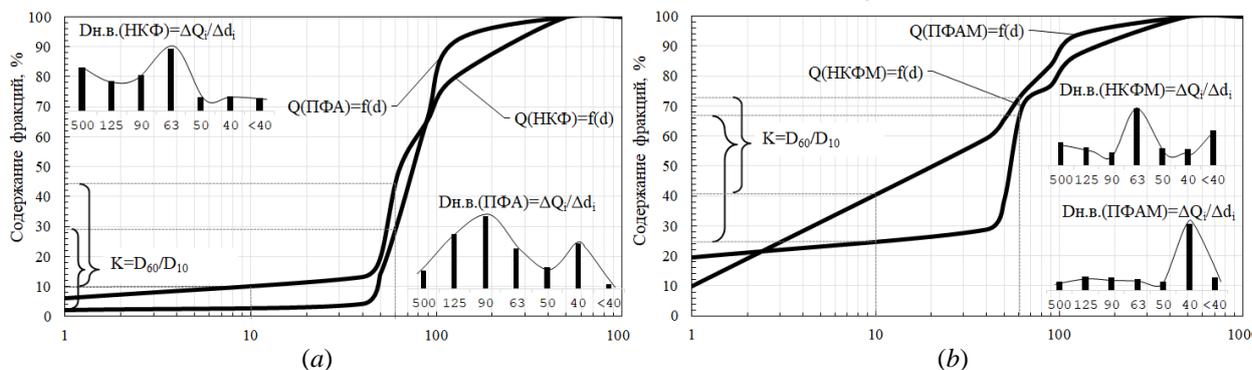


Рисунок 4. Интегральные кривые распределения частиц: а – немодифицированные наполнители; б – модифицированные АГМ-9 наполнители (НКФМ и ПФАМ)

Figure 4. Integral particle distribution curves: a – unmodified fillers; b – modified AGM-9 fillers (SSFM and APPM)

Данные СЭМ (рисунок 5) демонстрируют, что после нанесения аминсилана на наполнители частицы в матрице имеют характерную особенность, заключающуюся в упорядоченном и равномерном распределении по всему объему связующего.

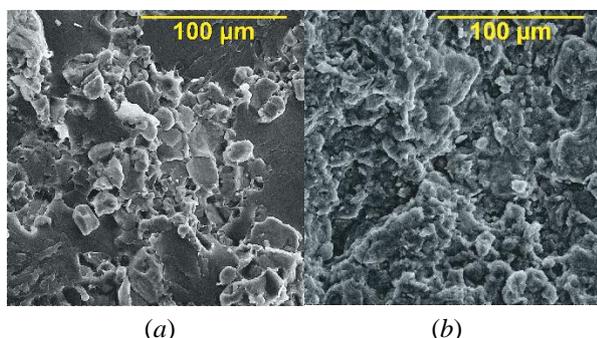


Рисунок 5. Данные СЭМх1000 поверхности эпоксидного композита: *a* – ЭД-20 + ПО-300 + НКФ + ПФА; *b* – ЭД-20 + ПО-300 + НКФМ + ПФАМ

Figure 5. Data SEMx1000 epoxy composite surface microstructure: *a* – ED-20 + PO-300 with non-modified fillers; *b* – ED-20 + PO-300 with modified fillers

Монолитная структура модифицированных эпоксидных систем с модифицированными наполнителями ЭД-20 + ПО-300 + 2,5 ПФА + 2,5 НКФ мас. ч. в сравнении с исходными подтверждает эффективность нанесения АГМ-9 на НКФ и ПФА.

### Обсуждение

По результатам СЭМ определено, что частицы НКФ имеют чешуйчатую форму с размером частиц, определенных при микроскопическом анализе, 8–16 мкм также присутствуют мелкие агломераты, которые отличаются включениями в виде мелких частиц, характеризующимися высокой скоростью седиментации в полимере. Плотность частиц натрий кремнефтористого составляет  $1,312 \text{ г/см}^3$ , так как плотность эпоксидного олигомера около  $\approx 1,2 \text{ г/см}^3$ , следовательно, [10] наполнитель будет служить концентратором напряжений в объеме матрицы.

Стоит отметить, что показатель упаковки наполнителей также увеличивается с 1,112 до 1,609 для НКФ и с 0,806 до 1,198  $\text{г/см}^3$  для АПП. Учитывая природу наполнителей, насыпная плотность возрастает за счет мелких частиц, которые распределяются в пространстве между более крупными, а также из-за деформирования частиц при стремлении к более свободному и выгодному расположению.

Максимальный объем наполнителя  $\varphi_{\text{max}}$ , который можно ввести в полимер для НКФ, составляет по сравнению с модифицированным  $0,593 < 0,689$ , а для ПФА  $0,627 < 0,711$ , следовательно, аппретирование изменяет размер и

форму частиц наполнителя. Согласно [4] отклонение от сферической формы, а также агрегация частиц приводят к снижению  $\varphi_{\text{max}}$ .

Дисперсность наполнителей влияет на процессы распределения в межузловой сетке полимера и параметры формирования структуры наполненных композиций, как следствие, численное описание процесса структурообразования упаковок дискретных сред определяется функцией, описывающей объемные доли частиц,  $Q = f(d)$  и дифференциальными кривыми наиболее вероятного размера частиц  $D_{\text{н.в.}} = \Delta Q_i / \Delta d_i$ . Степень полидисперсности не превышает 5 % для всех исследуемых наполнителей за исключением незначительного отклонения исходного полифосфата аммония, где  $K = 17,27 \%$ .

Анализ полученных статистических данных свидетельствует о происходящем при модификации снижении эквивалентного диаметра частиц с 16 и 28 для НКФ и ПФА соответственно до 11,5 мкм для всех модифицированных наполнителей.

Следует отметить, что процесс аппретирования НКФ проходит в несколько стадий. Одна из них заключается в том, что стабилизаторы дисперсной системы, гидрофобизирующие поверхность частиц, могут приводить к образованию флокул (контролируемая флокуляция), но в последствии с ростом количества флокул происходит пептизация наполнителя, усиливаемая, последующим диспергированием частиц на планетарной мельнице.

Вторая связана с тем, что модификатор сорбирует наполнитель в объеме, а образовавшиеся слои вследствие коагуляции аминсилана на поверхности наполнителя образуют мостики с родственными группами как для наполнителя, так и для связующего. Последующая дефлокуляция при этом связана со снижением удельной межфазной энергии между частицами (снижение адгезии при сближении частиц между собой).

### Заключение

Полученные путем модификации наполнители имеют высокий порог введения относительно немодифицированных, следовательно, служат усилителями матрицы эпоксидного олигомера. После совмещения аппретированных НКФ и ПФА с эпоксидным олигомером – ЭД-20 образующийся в процессе модификации сорбционный слой аминсилана, имеющий функциональную гидроксильную группу, взаимодействует с эпоксидной группой, тем самым, инициируя процесс формирования трехмерной сетчатой структуры эпоксидного олигомера.

Используемые модифицированные наполнители имеют показатель размера частиц 12 для ПФА и 18 мкм – для НКФ. Показатель упаковки и максимальный вводимый объем по сравнению с исходными наполнителями повысился. В свою очередь, модифицированным наполнителям в полимерном связующем характерна плотная текстура и схожесть формы частиц.

В работе определена важная роль наполнителя при создании полимерного композита на основе эпоксидной смолы, так как аппретирующее изменение размера и формы частиц полифосфата аммония и натрия кремнефтористого.

Полученные модифицированные наполнители представляют собой склонные к диспергированию частицы с абсорбционным слоем АГМ-9.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь в исследовании морфологии образцов методом сканирующей электронной микроскопии в СГТУ им. Ю.А. Гагарина, доценту кафедры «ХИМ», к.т.н. К.Б. Костину.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20–33–70002.

### Литература

- 1 Li Y., Li Z., Gao Y., Li L. et al. Influences of (3-aminopropyl) triethoxysilane on the tribological behaviors of basalt fiber/acrylonitrile-butadiene rubber composites under dry friction and water-lubricated conditions // Journal of Applied Polymer Science. 2020. V. 137. № 15.
- 2 Хорохордин А.М., Хорохордина Е.А., Рудаков О.Б. Эпоксидные композиции в строительстве (обзор) // Научный Вестник ВГАСУ. 2017. № 1(14). С. 7–18.
- 3 Нгуен В.Н., Малаховский С.С., Костромина Н.В., Ивашкина В.Н. Влияние кремнийорганического модификатора на процесс отверждения эпоксидного олигомера // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 6 (202). С. 106–108.
- 4 Стегно Е.В., Лалаян В.М., Грачев А.В., Владимиров Л.В. и др. Ориентационные эффекты в гибридных полимерных смесях // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 11. С. 2–8.
- 5 Букетов А.В., Кулинич В.Г., Сметанкин С.А., Андрейчук В.А. и др. Влияние модификатора C<sub>13</sub> H<sub>12</sub> Cl<sub>2</sub> N<sub>2</sub> на адгезионные свойства эпоксидной матрицы // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2017. № 60. С. 69–74.
- 6 Петрова Г.Н., Бейдер Э.Я. Разработка и исследование аппретирующих составов для термопластичных углепластиков // Труды ВИАМ. 2016. № 12 (48). С. 65–73.
- 7 Mostovoy A.S., Kadykova Yu. A., Bekeshev A.Z., Tastanova L.K. Effect of Finely Dispersed Chromite on the Physicochemical and Mechanical Properties of Modified Epoxy Composites // Journal of Applied Polymer Science. 2018. V. 135 (35). P. 1–8.
- 8 Пат. 2648069, RU, C08L 63/02, C09D 163/02, C09D 5/18. Композиция на основе эпоксидной диановой смолы / Яковлев Н.А., Плакунова Е.В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.» (СГТУ имени Гагарина Ю.А.). № 2017121715; Заявл. 20.06.2017; Опубл. 22.03.2018, Бюл. № 9.
- 9 Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Суслов М.А. Влияние формы частиц наполнителя на прочность полимерного композита // Журнал технической физики. 2007. Т. 77. № 6. С. 135–138.
- 10 Pat. no. 2007/0184358, US, G03F 7/405. Micro-patterned SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> films through photo and chemical reactions / Ding X.; Fries D.P.; Assignee University of South Florida. no. 11/539,987; Appl. 10.10.2006; Publ. 24.11.2007.

### References

- 1 Li Y., Li Z., Gao Y., Li L., Yang, Y. Influences of (3-aminopropyl) triethoxysilane on the tribological behaviors of basalt fiber/acrylonitrile-butadiene rubber composites under dry friction and water-lubricated conditions. Journal of Applied Polymer Science. 2020. vol. 137. no. 15.
- 2 Khorokhordin A.M., Khorokhordina E.A., Rudakov O.B. Epoxy compositions in construction (review). Scientific Herald of the Voronezh State Technical University. 2017. no. 1 (14). pp. 7–18. (in Russian).
- 3 Nguyen V.N., Malakhovsky S.S., Kostromina N.V., Ivashkina V.N. The effect of an organosilicon modifier on the curing process of an epoxy oligomer. Advances in Chemistry and Chemical Technology. 2018. vol. 32. no. 6 (202). pp. 106–108. (in Russian).
- 4 Stegno E.V., Lalayan V.M., Grachev A.V., Vladimirov L.V. et al. Orientation effects in hybrid polymer mixtures. All materials. Encyclopedic reference book. 2017. no. 11. pp. 2–8. (in Russian).
- 5 Buketov A.V., Kulnich V.G., Smetankin S.A., Andreichuk V.A. et al. Effect of the C<sub>13</sub> H<sub>12</sub> Cl<sub>2</sub> N<sub>2</sub> modifier on the adhesive properties of an epoxy matrix. Interuniversity collection “Science notes”. 2017. no. 60. pp. 69–74. (in Russian).
- 6 Petrova G.N., Bader E.Y. Development and research of sizing compositions for thermoplastic carbon plastics. VIAM Proceedings. 2016. no. 12 (48). pp. 65–73. (in Russian).
- 7 Mostovoy A.S., Kadykova Yu. ., Bekeshev A.Z., Tastanova L.K. Effect of Finely Dispersed Chromite on the Physicochemical and Mechanical Properties of Modified Epoxy Composites. Journal of Applied Polymer Science. 2018. vol. 135 (35). pp. 1–8.
- 8 Yakovlev N.A.; Plakunova E.V. Composition based on epoxy resin. Patent RF, no. 2648069, 2018.
- 9 Vettegren V.I., Bashkarev A. Ya., Suslov M.A. The effect of the shape of the filler particles on the strength of the polymer composite. Journal of technical physics. 2007. vol. 77. no. 6. pp. 135–138. (in Russian).
- 10 Ding X., Fries D.P. Micro-patterned SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> films through photo and chemical reactions. Patent US, no. 2007/0184358, 2007.

## Сведения об авторах

**Николай А. Яковлев** инженер, лаборатория современных методов исследования функциональных материалов и систем, Энгельский технологический институт (филиал) «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», 413111 РФ Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17, reddeade@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7466-0162>

**Елена В. Плакунова** к.т.н., доцент, кафедра технологии и оборудования химических, нефтегазовых и пищевых производств, Энгельский технологический институт (филиал) «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», 413111 РФ Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17, elena.plakunova@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0588-5859>

**Антон С. Мостовой** к.т.н. заведующий кафедрой, кафедра естественных и математических наук, Энгельский технологический институт (филиал) «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», 413111 РФ Саратовская область, г. Энгельс, пл. Свободы, 17, mostovoy19@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2828-9988>

**Андрей С. Щербаков** аспирант, кафедра химии и химической технологии, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, ул. Политехническая, 77, 410054, РФ, gassmed7@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5376-7470>

## Вклад авторов

**Николай А. Яковлев** обзор литературных источников по исследуемой проблеме, провел эксперимент, выполнил расчёты, написал рукопись

**Елена В. Плакунова** принимала участие в методической части экспериментов, написании статьи и обработке результатов

**Антон С. Мостовой** консультация в ходе исследования, принял участие в написании статьи

**Андрей С. Щербаков** корректировал рукопись до подачи в редакцию и несёт ответственность за плагиат

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Information about authors

**Nikolay A. Yakovlev** engineer, laboratory of modern research methods for functional materials and systems, Engels Institute of Technology (branch) Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 17 Svobody square, Engels, 413100, Russia, reddeade@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7466-0162>

**Elena V. Plakunova** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, technology and equipment of chemical, oil and gas and food production department, Engels Institute of Technology (branch) Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 17 Svobody square, Engels, 413100, Russia, elena.plakunova@ya.ru

<https://orcid.org/0000-0003-0588-5859>

**Anton S. Mostovoy** Cand. Sci. (Engin.), head of department, natural and mathematical sciences department, Engels Institute of Technology (branch) Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 17 Freedom square, Engels, 413100, Russia, mostovoy19@rambler.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2828-9988>

**Andrey S. Shcherbakov** graduate student, chemistry and chemical technology department, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politechnicheskaya street, Saratov, 410054, Russia, gassmed7@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5376-7470>

## Contribution

**Nikolay A. Yakovlev** wrote the manuscript, correct it before filing in editing and is responsible for plagiarism

**Elena V. Plakunova** review of the literature on an investigated problem, conducted an experiment, performed computations

**Anton S. Mostovoy** consultation during the study

**Andrey S. Shcherbakov** correct manuscript before filing in editing and is responsible for plagiarism

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 27/01/2020	После редакции 05/02/2020	Принята в печать 14/02/2020
Received 27/01/2020	Accepted in revised 05/02/2020	Accepted 14/02/2020