

Синтез и переработка полимеров
и композитов на их основе
Synthesis and processing of polymers
and polymeric composites

УДК 678+54.142+532.13+519.242.7

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-5-441-451>

EDN UQDAWL



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Реологические свойства фосфорсодержащего олигоэфир(мет)акрилата для переработки методом вакуумной инфузии

О.О. Тужиков¹, Л.Ю. Донецкова¹, С.М. Соломахин¹, А.В. Налесная¹, А. Аль-Хамзави²,
Б.А. Бураков¹, С.В. Борисов¹, О.И. Тужиков¹

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, 400005 Россия

²Университет Аль-Кадисия, Эд-Дивания, 58002 Ирак

✉ Автор для переписки, e-mail: tuzhikovoleg@mail.ru

Аннотация

Цели. Для получения полимерных композиционных материалов (ПКМ) с повышенным уровнем физико-механических свойств методом безавтоклавной технологии (vacuum assisted resin transfer molding, VaRTM) связующие должны обладать вязкостью до 500 мПа·с. В ряде случаев это приводит к ограничению по применению тех или иных материалов, либо требует использования временных разбавителей, что неразрывно связано с ухудшением других требуемых характеристик композита, например, увеличением горючести. Нами были синтезированы три фосфорсодержащих олигоэфир(мет)акрилата PhOEM-1, PhOEM-2, PhOEM-3, обладающих значительными отличиями по характеристикам вязкости в ряду PhOEM-1 << PhOEM-2 << PhOEM-3, при этом полимер на основе PhOEM-1, обладая меньшей вязкостью, характеризуется худшими физико-механическими свойствами. В связи с этим, целью исследования явилось изучение вязкостных характеристик смесей метакрилатных связующих одинаковой природы, разного строения и функциональности путем изучения реологических свойств исходных олигоэфир(мет)акрилатов и их смесей, взятых в различных соотношениях, с применением метода оптимизации составов по симплекс-решетке (плану Шеффе) для получения ПКМ по безавтоклавной (VaRTM) технологии.

Методы. Исследование реологических свойств фосфорсодержащих олигоэфир(мет)акрилатов и их смесей проводили методом ротационной вискозиметрии на вискозиметре Brookfield LVDV-II + Pro с использованием шпинделя 27 при скоростях сдвига в диапазоне от 0 до 70 с⁻¹ и температурах от 30 до 70°C. Параллельно проводили реологические исследования на вискозиметре Lamy Rheology GT300 PLUS (GEL TIMER) в том же диапазоне скоростей сдвига и температур.

Результаты. Установлено, что исследуемые объекты, в зависимости от температуры, характеризуются значениями вязкости от 96 до 2137 мПа·с. По характеру вязкого течения фосфорсодержащие олигоэфир(мет)акрилаты и их смеси ведут себя аналогично ньютоновским жидкостям только при определенных скоростях сдвига. Рассчитаны эффективные энергии активации вязкого течения связующих и их смесей, установлено влияние температур на вязкость связующих.

Выводы. Определены особенности и характер кривых течения фосфорсодержащих олигоэфир(мет)акрилатных связующих одинаковой природы, разного строения и функциональности, а также их смесей. Установлены области оптимальных составов трех компонентных смесей фосфорсодержащих олигоэфир(мет)акрилатов для использования их в технологическом процессе VaRTM при получении ПКМ в диапазоне температур от 30 до 70°C. Определены оптимальные составы и температурные условия для получения ПКМ методом VaRTM, что позволяет получать полимерные изделия сложной геометрической формы и разного размера.

Ключевые слова

реология, полимерные композиционные материалы, VaRTM-технология, фосфорсодержащие олигоэфир(мет)акрилатные связующие, математическое планирование

Поступила: 16.05.2024
Доработана: 17.07.2024
Принята в печать: 10.09.2024

Для цитирования

Тужиков О.О., Донецкова Л.Ю., Соломахин С.М., Налесная А.В., Аль-Хамзави А., Буравов Б.А., Борисов С.В., Тужиков О.И. Реологические свойства фосфорсодержащего олигоэфир(мет)акрилата для переработки методом вакуумной инфузии. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(5):441–451. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-5-441-451>

RESEARCH ARTICLE

Rheological properties of phosphorus-containing oligoester(meth)acrylate for processing by vacuum infusion

Oleg O. Tuzhikov^{1,✉}, Lyubov Yu. Donetsko¹, Semyon M. Solomakhin¹, Anna V. Nalesnaya¹, Ali Al-Hamzawi², Boris A. Buravov¹, Sergey V. Borisov¹, Oleg I. Tuzhikov¹

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005 Russia

²Al-Qadisiyah, Al-Diwaniyah, 58002 Iraq

✉ Corresponding author, e-mail: tuzhikovoleg@mail.ru

Abstract

Objectives. To obtain polymer composite materials (PCM) with enhanced physicochemical properties using the vacuum assisted resin transfer molding (VaRTM) method, binders must have a viscosity of up to 500 mPa·s. In some cases, this leads to restrictions on the use of certain materials or requires the use of temporary diluents. This is closely related to the deterioration of other required composite characteristics, such as increased flammability. Three phosphorus-containing oligoester(meth)acrylates PhOEM-1, PhOEM-2, and PhOEM-3 were synthesized with significant differences in viscosity characteristics in the series PhOEM-1 << PhOEM-2 << PhOEM-3. The polymer based on PhOEM-1 exhibits inferior physicochemical properties despite having lower viscosity. Hence, the aim of the study was to investigate the viscosity characteristics of mixtures of methacrylate binders of the same nature but different structures and functionalities. This was done by studying the rheological properties of the original oligoester(meth)acrylates and their mixtures taken in various ratios. The method used was to optimize compositions via a simplex lattice (Scheffe's plan), in order to obtain PCM using the VaRTM technology.

Methods. The study of rheological properties of phosphorus-containing oligoester(meth)acrylates and their mixtures was conducted using the method of rotational viscometry on a Brookfield LVDV-II + Pro viscometer with a spindle 27 at different shear rates ranging from 0 to 70 s⁻¹ and temperatures from 30 to 70°C. Rheological studies were also conducted on a Lamy Rheology GT300 PLUS (GEL TIMER) viscometer in the same range of shear rates and temperatures.

Results. It was established that the objects under investigation can be characterized by viscosity values ranging from 96 to 2137 mPa·s depending on the temperature. The nature of the viscous flow of phosphorus-containing oligoester(meth)acrylates and their mixtures is similar to that of Newtonian liquids only at certain shear rates. The effective activation energies of the viscous flow of binders and their mixtures were calculated, and the influence of temperature on the viscosity of binders was determined.

Conclusions. The study identified the features and nature of the flow curves of phosphorus-containing oligoester(meth)acrylate binders of the same nature but different structures and functionalities, as well as of their mixtures. The optimal composition ranges of three-component mixtures of phosphorus-containing oligoester(meth)acrylates for use in the VaRTM technological process in producing polymer composite materials within the temperature range of 30 to 70°C were defined. The optimal compositions and temperature conditions for obtaining polymer composite materials using the VaRTM technology were also identified. This enables the production of polymer products with complex geometric shapes and varying sizes.

Keywords

rheology, polymer composite materials, VaRTM technology, phosphorus-containing binders, mathematical planning

Submitted: 16.05.2024

Revised: 17.07.2024

Accepted: 10.09.2024

For citation

Tuzhikov O.O., Donetsko¹ L.Yu., Solomakhin S.M., Nalesnaya A.V., Al-Hamzawi A., Buravov B.A., Borisov S.V., Tuzhikov O.I. Rheological properties of phosphorus-containing oligoester(meth)acrylate for processing by vacuum infusion. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(5):441–451. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-5-441-451>

ВВЕДЕНИЕ

За последнее десятилетие рынок полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе реактопластов стремительно растет за счет уникальных свойств полученных полимеров: устойчивости к износу и к воздействию химических реагентов, в том числе в широком диапазоне температур, и возможности переработки материала с помощью современных энергосберегающих и экологических методов, таких как безавтоклавное формование (VaRTM — Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) [1–3].

Кроме широкого выбора связующих для получения ПКМ, развиваются и методы их переработки. Примерами могут быть ручная выкладка, напыление, инъекционное и автоклавное формование. Как правило, вышеперечисленные способы получения ПКМ являются сравнительно дорогостоящими процессами, требующими одновременно повышения технологичности и уменьшения себестоимости продукции¹ [4, 5].

Одной из перспективных с точки зрения затратности и технологичности, является сравнительно новая безавтоклавная технология — вакуумно-инфузионный метод VaRTM [6, 7]. Однако при производстве композитов таким способом одной из важнейших технологических характеристик, ограничивающих использование связующего, является его вязкость. Авторами [8–11], было установлено, что оптимальная вязкость связующего для вакуумной инфузии не должна превышать 500 мПа·с.

Ранее коллегами был синтезирован и запатентован фосфорсодержащий трехфункциональный олигоэфир(мет)акрилат (PhOEM-1) [12]. Позже нами были получены и запатентованы тетрафункциональные олигоэфир(мет)акрилаты, содержащие в составе спейсеры (PhOEM-2, PhOEM-3) [13, 14]. Все рассматриваемые олигоэфир(мет)акрилаты способны к отверждению в присутствии пероксидного инициатора, при этом обладают различными уровнями начальной вязкости и других физико-механических свойств. Синтезированные тетрафункциональные эфир(мет)акрилаты, в отличие от трехфункциональных, характеризуются относительно высокими значениями вязкости при температурах до 40°C, ограничивающих их использование в стандартных производственных условиях. Указанные выше соединения были выбраны нами для изучения реологических свойств их смесей в температурном диапазоне 30–70°C.

Учитывая вышесказанное, целью работы являлось исследование особенностей кривых течения

фосфорсодержащих олигоэфир(мет)акрилатов и их смесей при температурах 30–70°C для определения оптимальных составов трехкомпонентных смесей, удовлетворяющих процессам получения ПКМ методом VaRTM.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования выбраны фосфорсодержащие способные к полимеризации олигоэфир(мет)акрилаты (PhOEM), обладающие различной молекулярной массой и относительной неопределенностью, содержащие в структуре спейсер и без спейсера.

Синтез соединений проводили в соответствии с методикой, описанной в работе [15].

Исследование реологических свойств связующих и их смесей проводили методом ротационной вискозиметрии. Для этого использовали вискозиметр Brookfield LVDV-II + Pro шпиндель 27 (*Brookfield*, США) и вискозиметр Lamy Rheology GT300 PLUS (GEL TIMER) (*Lamy Rheology*, Франция). Результаты, полученные на вискозиметре Lamy Rheology GT300 PLUS (GEL TIMER), показали аналогичные тенденции в изменении свойств связующих.

Для определения области оптимальных составов олигоэфир(мет)акрилатов использовали программу STATISTICA (*StatSoft*, Россия), в которой реализуется графически ориентированный подход к анализу экспериментальных данных [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структуры исследованных соединений, синтезированных в соответствии с работой [15], представлены на рис. 1–3.

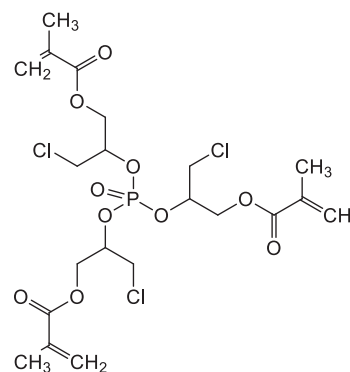


Рис. 1. Структура PhOEM-1

Fig. 1. Structure of PhOEM-1

¹ Вешкин Е.А. Технологии безавтоклавного формования низпористых полимерных композиционных материалов и крупногабаритных конструкций из них: дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИАМ; 2016. 146 с. [Veshkin EA. Technologies of non-autoclave molding of low-porous polymer composite materials and large-sized structures made from them. Diss. Cand. Sci. (Eng.). Moscow: VIAM; 2016. 146 p. (in Russ.).]

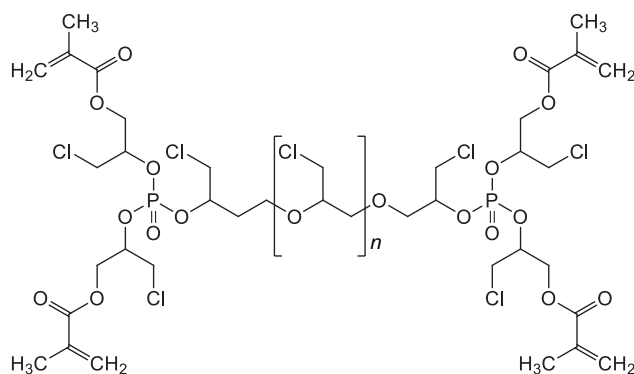


Fig. 2. Structure of PhOEM-2

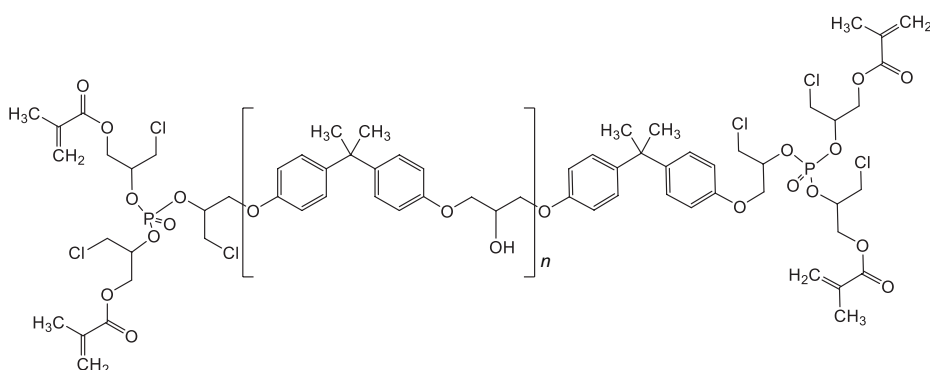


Fig. 3. Structure of PhOEM-3

Вязкость синтезированных соединений исследовали при различных скоростях сдвига и температурах. Результаты исследований реологических свойств в виде кривых течения представлены на рис. 5–7.

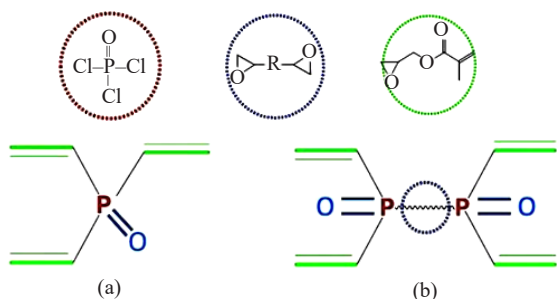


Fig. 4. Generalized structural chemical formulas of PhOEMs and of the starting reagents for their production: (a) PhOEM-1 (without spacer); (b) PhOEM-2 and PhOEM-3, with the different spacer structure

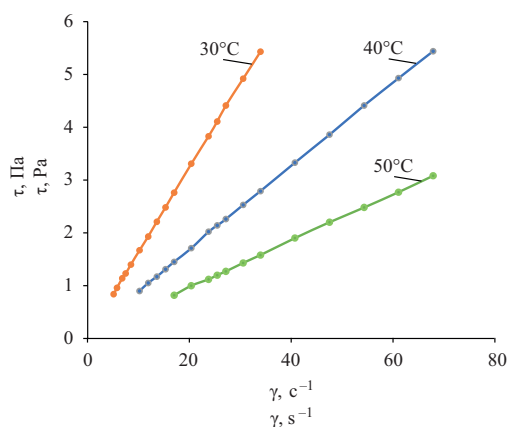


Fig. 5. Share rate versus shear stress for PhOEM-1 depending on temperature: τ is shear stress, Pa; $\dot{\gamma}$ is shear rate, s^{-1}

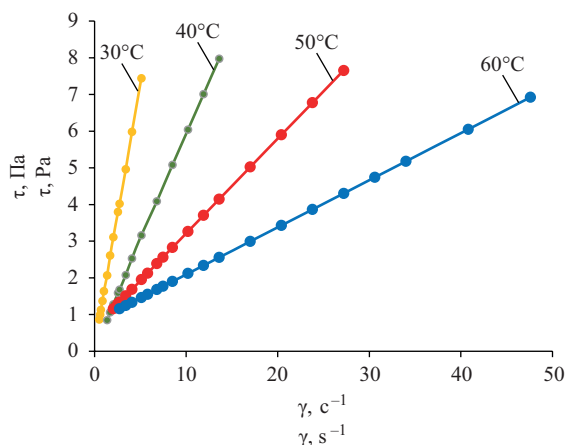


Рис. 6. Кривые течения PhOEM-2 в зависимости от температуры: τ — напряжение сдвига, Па, γ — скорость сдвига, с^{-1}

Fig. 6. Share rate versus shear stress for PhOEM-2 depending on temperature: τ is shear stress, Pa, γ is shear rate, s^{-1}

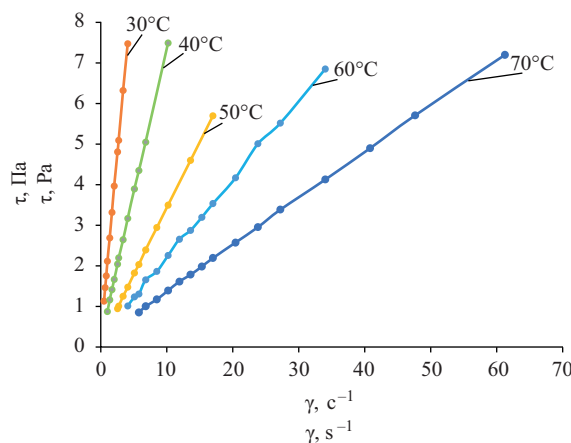


Рис. 7. Кривые течения PhOEM-3 в зависимости от температуры: τ — напряжение сдвига, Па, γ — скорость сдвига, с^{-1}

Fig. 7. Share rate versus shear stress for PhOEM-3 depending on temperature: τ is shear stress, Pa, γ is shear rate, s^{-1}

Исследование реологических особенностей PhOEM-1 ограничено температурным диапазоном 30–50°C в связи с недостаточной чувствительностью прибора и низкой вязкостью олигомера при этих температурах. В этом случае разработчиком прибора рекомендовано использовать шпиндель другого размера. Однако измерения вязкости жидкости с использованием различных геометрических размеров шпинделя не рекомендованы при проведении сравнительных исследований.

Для сопоставления вязкостных свойств исследуемых олигомеров использовали диапазон скоростей сдвига, при которых жидкости вели себя аналогично ньютоновским. С повышением температуры исследование продолжали при больших скоростях сдвига, обеспечивая заданные условия.

На основании полученных результатов были рассчитаны эффективные энергии активации вязкого течения исследуемых объектов с использованием уравнения (1) [17].

$$E_a = \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \lg \frac{\eta_2}{\eta_1}, \quad (1)$$

где E_a — эффективная энергия активации вязкого течения, Дж/моль; R — газовая постоянная, Дж/(К·моль); T_i — температура испытания, К; η_i — вязкость, мПа·с.

Полученные результаты представлены на рис. 8.

Из представленных данных видно, что эффективная энергия активации вязкого течения зависит от структуры соединения (рис. 4) и присутствия в нем спейсеров различного строения, что необходимо

учитывать при разработке процесса получения ПКМ по VaRTM-технологии.

С целью подбора оптимальных составов смесей олигоэфир(мет)акрилатов, обеспечивающих необходимые условия технологических критериев для вакуумной инфузии, исследования проводили с применением метода математического планирования эксперимента по симплекс-решетке (плану Шеффе) с построением полиномиальной модели четвертого порядка [18]. Суть метода состоит в построении регрессионной зависимости свойств смеси от содержания компонентов. Использование данного метода позволяет установить зависимость свойств связующих от их состава [19, 20].

Исследуемая область системы PhOEM-1, PhOEM-2, PhOEM-3 включает массовые доли от 0 до 1. Область исследования представлена в виде равностороннего концентрационного треугольника Гиббса. На рис. 9 представлено положение экспериментальных точек

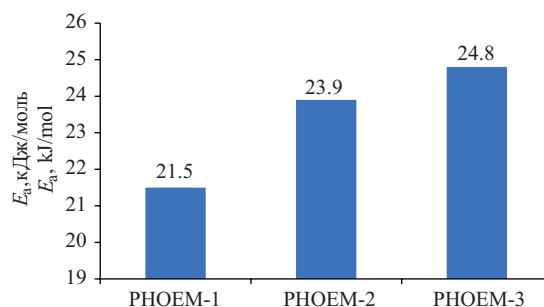


Рис. 8. Эффективная энергия активации вязкого течения для PhOEM-1, PhOEM-2, PhOEM-3

Fig. 8. Flow activation energy in PhOEM-1, PhOEM-2, PhOEM-3

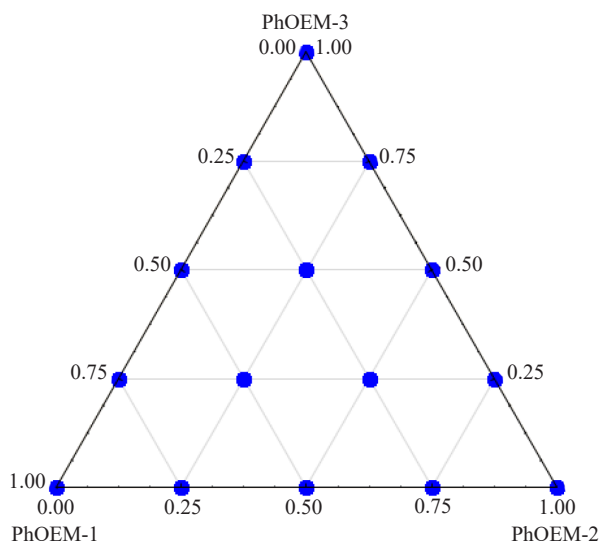


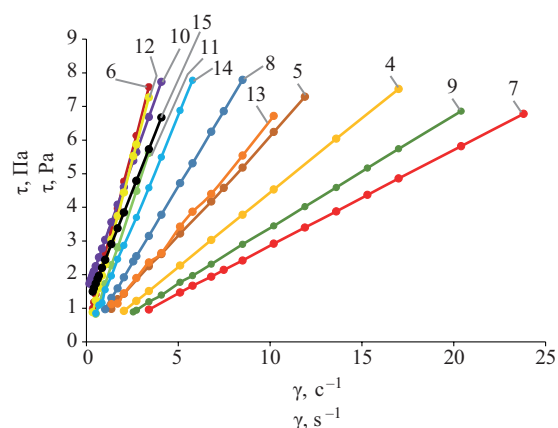
Рис. 9. Концентрационный треугольник Гиббса

Fig. 9. Gibbs triangle showing concentration

составов, т.е. точек количественных соотношений дозировок исследуемых соединений, которые ложатся в основу таблицы матрицы планирования эксперимента.

На рис. 10 представлены результаты исследований реологических свойств смесей связующих в соответствии с математическим планированием по плану Шеффе (см. таблицу) в виде кривых течения. Как и в выше описанном исследовании, были выбраны области вязкого течения, при которых смеси вели себя аналогично ньютоновским жидкостям.

Из представленных на рис. 10 реологических зависимостей видно, что смеси ведут себя аналогично

Рис. 10. Кривые течения для смесей связующих при 30°C: τ — напряжение сдвига, Па; γ — скорость сдвига, с^{-1} Fig. 10. Share rate versus shear stress for mixtures at a temperature 30°C: τ is shear stress, Pa; γ is shear rate, s^{-1}

ньютоновским жидкостям [21] и удовлетворительно описываются уравнением (2).

$$\tau = \eta \cdot \gamma, \quad (2)$$

где η — динамическая вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; τ — напряжение сдвига, Па; γ — скорость сдвига, с^{-1} .

Используя полученные результаты, были рассчитаны значения эффективной энергии активации вязкого течения для смесей олигомеров.

Соотношение компонентов, значения вязкости при температурах 30–70°C и значения эффективной энергии активации вязкого течения исследуемых смесей представлены в таблице.

Таблица. Матрица планирования и соответствующие ей вязкости и энергия активации вязкого течения (10 об/с)

Table. Planning matrix and corresponding viscosities and activation energy of viscous flow (10 rpm)

Номер состава Composition number	PhOEM			Вязкость, мПа·с Viscosity, mPa·s					E_a , кДж/моль E_a , kJ/mol
	1	2	3	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	
1	1	0	0	162	89	48	—	—	21.5
2	0	1	0	1460	612	434	401	373	23.9
3	0	0	1	1856	776	368	248	155	24.4
4	0.5	0.5	0	445	232	127	66	—	23.2
5	0.5	0	0.5	661	408	220	124	94	20.3
6	0	0.5	0.5	2231	1035	530	304	178	24.2
7	0.75	0.25	0	284	150	96	56	34	19.7
8	0.25	0.75	0	926	436	239	124	71	24.4
9	0.75	0	0.25	349	202	131	89	67	16.6
10	0.25	0	0.75	1987	984	661	506	363	16.6
11	0	0.75	0.25	1652	764	361	195	129	25.9
12	0	0.25	0.75	2137	932	438	255	148	25.8
13	0.5	0.25	0.25	694	347	195	114	74	21.9
14	0.25	0.5	0.25	1347	668	328	192	102	23.7
15	0.25	0.25	0.5	1699	905	530	312	227	20.6

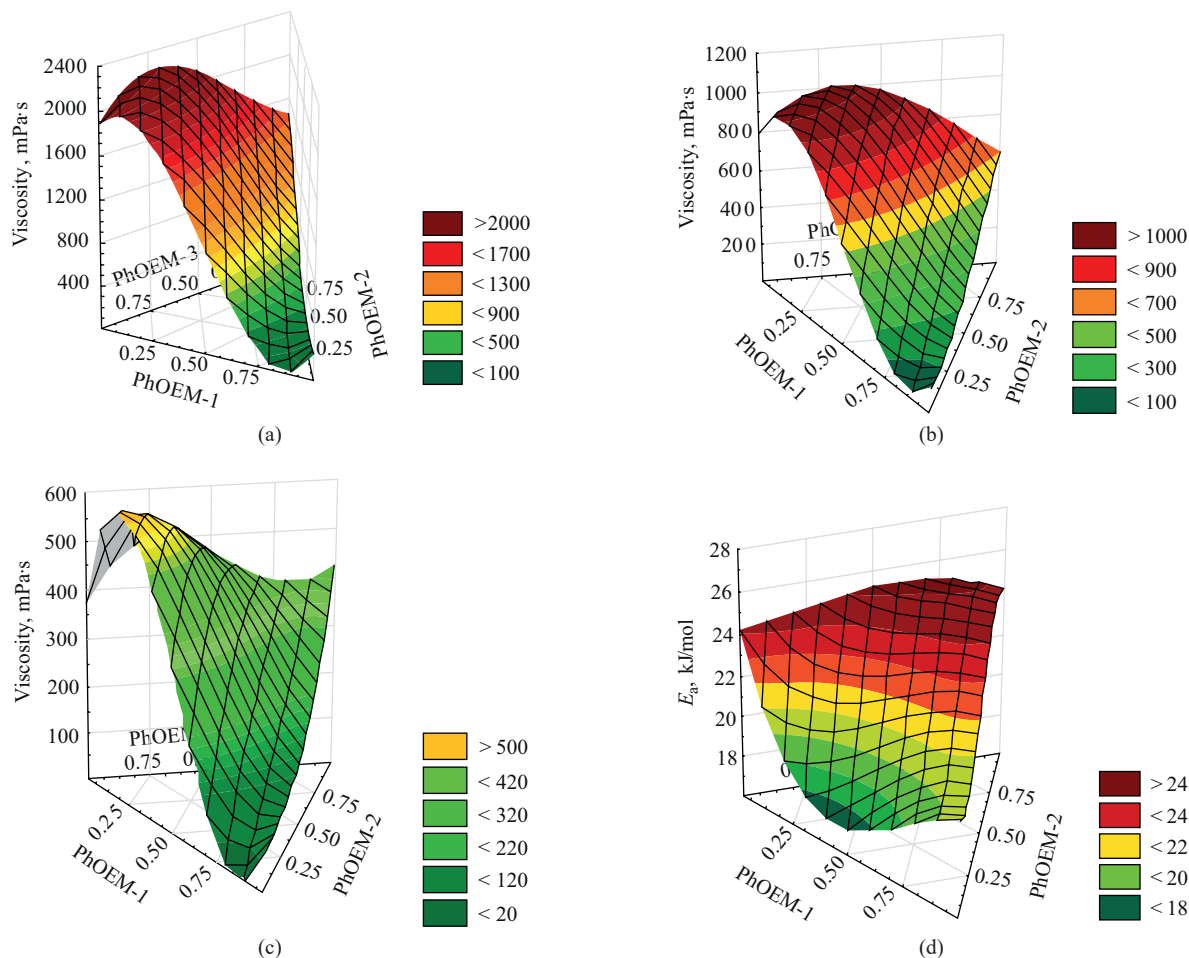


Рис. 11. Диаграммы «состав–свойство» смесей при температурах: (a) 30°C, (b) 40°C, (c) 50°C, (d) эффективная E_a , кДж/моль

Fig. 11. Composition–property diagrams of mixtures at temperatures: (a) 30°C, (b) 40°C, (c) 50°C, (d) effective E_a , kJ/mol

Для определения области оптимальных составов олигоэфир(мет)акрилатов графическим методом использовали программу STATISTICA, в которой реализуется графически-ориентированный подход к анализу экспериментальных данных. Диаграммы характера изменения свойств от состава фосфорсодержащих связующих представлены на рис. 11.

Из рис. 11 видно, что при температурах 30 и 40°C существуют области значений вязкости, ниже которых соотношение компонентов смеси являются оптимальными. Заметим, что при температурах выше 50°C, исходные связующие и их смеси удовлетворяют требованиям для переработки полимерных материалов методом VaRTM-технологией, т.к. значения их вязкости не превышают 500 мПа·с.

Минимальным значением эффективной энергии активации вязкого течения обладает смесь PhOEM-1 : PhOEM-3 = 1 : 1. Введение в эту смесь PhOEM-2 приводит к увеличению эффективной

энергии активации вязкого течения. Вероятно, это определяется межмолекулярным взаимодействием олигомеров и их термодинамической совместимостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были исследованы особенности кривых течения фосфорсодержащих олигоэфир(мет)акрилатов и их смесей, определены области оптимальных составов трехкомпонентных смесей для использования их в технологическом процессе VaRTM получения ПКМ при температурах от 30 до 70°C.

Различия в полученных кривых течения метакрилатов определяются молекулярной массой соединений и их строением, а также присутствием в структуре того или иного спейсера. Кривые течения принимают линейный вид при некоторых значениях скоростей сдвига, выше которых, в пределах

исследованного диапазона скоростей, поведение исследуемых жидкостей аналогично ньютоновской жидкости.

Соединения со спейсером (PhOEM-2, PhOEM-3) характеризуются значительно большими значениями вязкости 1460 и 1856 мПа·с при 30°C, что в два и более раз превышает вязкость PhOEM-1 (162 мПа·с). Та же тенденция остается и при больших температурах.

Установлено, что при температурах выше 50°C вязкость как исходных компонентов, так и их смесей в любом соотношении удовлетворяют условиям VaRTM-технологии для получения ПКМ с повышенными физико-механическими свойствами.

Совместным использованием диаграмм «состав–вязкость» и «состав–энергия активации» можно определить область оптимальных технологических условий (температура, разность давлений) получения ПКМ методом вакуумной инфузии.

Благодарности

Работа проводилась по теме Министерства образования и науки Российской Федерации «Разработка новых полимерных, композитных и гибридных функциональных материалов со специальными свойствами для перспективных автономных и беспилотных аппаратов» (FZUS-2024-0001).

Acknowledgments

Financial support was provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FZUS-2024-0001, “Development of new polymer, composite, and hybrid functional materials with special properties for advanced autonomous and unmanned vehicles”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение термореактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования. *Авиационные материалы и технологии*. 2021;1(62):22–33. <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33>
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*. 2015;1(34): 3–33. <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
3. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Панина Н.Н., Гребенева Т.А., Голиков Е.И., Шарова И.А., Баторова Ю.А. Перспективные полимерные материалы для конструкционных композиционных изделий с энергоэффективным режимом формования. *Пластические массы*. 2020;3–4:52–54. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-3-4-52-54>

Вклад авторов

О.О. Тужиков — идея исследования, консультация по вопросам проведения экспериментов, написание текста статьи.

Л.Ю. Донецкова — выполнение эксперимента, анализ, обработка данных.

С.М. Соломахин — выполнение эксперимента, анализ, обработка данных.

А.В. Налесная — анализ литературы, формализация списка литературы.

А. Аль-Хамзави — консультация по вопросам проведения экспериментов.

Б.А. Буравов — обработка экспериментальных данных, написание текста статьи.

С.В. Борисов — консультирование по реологическим свойствам связующих.

О.И. Тужиков — консультация по вопросам химии фосфорсодержащих соединений, а также планирования, методологии и реализации исследования.

Authors' contributions

O.O. Tuzhikov — research idea, consultation on experimental procedures, writing the article.

L.Yu. Donetskova — experiment execution, data analysis, data processing.

S.M. Solomakhin — experiment execution, data analysis, data processing.

A.V. Nalesnaya — literature analysis, formalization of the reference list.

A. Al-Hamzawi — consultation on experimental procedures.

B.A. Buravov — experimental data processing, writing the article.

S.V. Borisov — consultation on rheological properties of binders.

O.I. Tuzhikov — consultation on chemistry of phosphorus-containing compounds, as well as on planning, methodology, and implementation of research.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

REFERENCES

1. Tkachuk A.I., Donetskii K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2021;1(62):22–33 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33>
2. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE “VIAM” SSC RF on realization of “Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period until 2030.” *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2015;1(34):3–33 (in Russ.). <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33>
3. Kogan D.I., Chursova L.V., Panina N.N., et al. Advanced polymer materials with energy-efficient molding mode for structural composite products. *Plasticheskie Massy*. 2020;3–4: 52–54 (in Russ.). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2020-3-4-52-54>

- Постнова М.В., Постнов В.И. Опыт развития безавтоклавных методов формирования ПКМ. *Труды ВИАМ*. 2014;4:6. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6>
- Michels J., Widmann R., Czaderski C., Allahvirdizadeh R., Motavalli M. Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications. *Compos. Part B: Eng.* 2015;77:484–493. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.053>
- Меркулова Ю.И., Мухаметов Р.Р. Низковязкое эпоксидное связующее для переработки методом вакуумной инфузии. *Авиационные материалы и технологии*. 2014;1(30):39–41. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-1-39-41>
- Сакошев З.Г., Блазнов А.Н., Сакошев Е.Г., Задворных Г.С. Исследование реологических свойств связующих на основе эпоксидной смолы и отвердителей ХТ-152Б, ИМТГФА и Этал-450. В сб.: *Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы XV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием*. Бийск: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова; 2022. Р. 234–237.
- Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ. *Авиационные материалы и технологии*. 2011;2(19):38–42.
- Саяпин С.Н. Новый подход к технологии изготовления длинномерных полых изделий из волокнистых полимерных композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2022;11(752):38–46. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-11-38-46>
- Донецкий К.И., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 1. *Труды ВИАМ*. 2022;6(112):58–67. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67>
- Хрульков А.В., Донецкий К.И., Усачева М.Н., Горнянский А.Н. Методы инфузии для изготовления полимерных композиционных материалов (обзор). Часть 2. *Труды ВИАМ*. 2022;7(113):50–62. <https://doi.org/10.18577/2307-2022-0-7-50-62>
- Новаков И.А., Бахтина Г.Д., Кочнов А.Б., Кострюкова Ю.В. Способ получения фосфорхлорсодержащих метакрилатов: пат. 2447079 РФ. Заявка № 2011100594/04; заявл. 11.01.2011; опубл. 10.04.2012.
- Тужиков О.И., Тужиков О.О., Буравов Б.А., Бочкарев Е.С., Солодовникова К.В., Хохлова Т.В., Сидоренко Н.В., Аль-Хамзави А.Х.Д. Применение олигоэфиракрилата (((4-((1-(2-((bis((1-галоген-3-(мет-акрилоилокси)-пропан-2-илокси)фосфин)окси)-3-галогенпропокси)3-хлорпропан-2-илокси)-1-галоген-бутан-2-илокси)фосфиндиил) бис(окси))бис(3-галоген-пропан-2,1-диил)бис(2-метакрилата) в качестве мономера для получения термо- и теплостойких полимеров с пониженной горючестью: пат. 2712107 РФ. Заявка № 2019125870; заявл. 16.08.2019; опубл. 24.01.2020.
- Тужиков О.И., Тужиков О.О., Буравов Б.А., Бочкарев Е.С., Солодовникова К.В., Хохлова Т.В., Сидоренко Н.В., Аль-Хамзави А.Х.Д. Применение олигоэфиракрилата (((((((((2-гидрокси-пропан-1,3-диил) бис(окси)) бис(4,1-фенилен)) бис(пропан-2,2-диил)) бис(4,1-фенилен)) бис(окси)) бис(1-галогенпропан-3,2-диил)) бис(окси)) бис(фосфинтриил)тетракис(окси)) тетракис(3-галогенпропан-2,1-диил)тетракис(2-метилакрилата) в качестве мономера для получения термо- и теплостойких полимеров с пониженной горючестью: пат. 2712116 РФ. Заявка № 2019126186; заявл. 20.08.2019; опубл. 24.01.2020.
- Postnova M.V., Postnov V.I. Development experience out-of-autoclave methods of formation PCM. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2014;4:6 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6>
- Michels J., Widmann R., Czaderski C., Allahvirdizadeh R., Motavalli M. Glass transition evaluation of commercially available epoxy resins used for civil engineering applications. *Compos. Part B: Eng.* 2015;77:484–493. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.053>
- Merkulova Yu.I., Mukhametov R.R. Development of a low-viscosity epoxy binder for processing by vacuum infusion. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2014;1(30):39–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-1-39-41>
- Sakoshev Z.G., Blaznov A.N., Sakoshev E.G., Zadvornyykh G.S. Investigation of rheological properties of binders based on epoxy resin and hardeners HT-152B, IMTHFA, and Etal-450. In: *Technologies and Equipment of the Chemical, Biotechnological, and Food Industries: Materials of the 15th All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Graduate Students, and Young Scientists with International Participation*. Biisk: Altai State Technical University; 2022. P. 234–237 (in Russ.).
- Mukhametov R.R., Akhmadieva K.R., Chursova L.V., Kogan D.I. New polymer binders for promising methods for the production of structural fibrous PCM. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii = Aviation Materials and Technologies*. 2011;2(19):38–42 (in Russ.).
- Sayapin S.N. New Approach to the Manufacturing Technology of Long Hollow Products Made of Fibrous Polymer Composite Materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*. 2022;11(752):38–46 (in Russ.). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-11-38-46>
- Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Khrulkov A.V. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (Review). Part 1. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2022;6(112):58–67 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-6-58-67>
- Khrulkov A.V., Donetskiy K.I., Usacheva M.N., Goryansky A.N. Infusion methods for the manufacture of polymer composite materials (Review). Part 2. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*. 2022;7(113):50–62 (in Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-2022-0-7-50-62>
- Novakov I.A., Bakhtina G.D., Kochnov A.B., Kostriukova Yu.V. Method of Producing Phosphorus-and-Chlorine-Containing Methacrylates: RF Pat. 2447079 C1. Publ. 10.04.2012 (in Russ.).
- Tuzhikov O.I., Tuzhikov O.O., Buravov B.A., et al. Use of Oligoether Acrylate of (((4-((1-(2-((bis((1-Chloro-3-(Methacryloyloxy)propan-2-yl)oxy)phosphine)-oxy)-3-Chlorophenoxy)-3-Chloropropan-2-yl)oxy)-1-Chlorobutan-2-yl)oxy)phosphindiy)bis(oxi))bis(3-chloropropan-2,1-diyl)-bis(2-methacrylate) as a Monomer for Producing Thermo- and Heat-Resistant Polymers with Low Inflammability: RF Pat. 2712107. Publ. 24.01.2020 (in Russ.).
- Tuzhikov O.I., Tuzhikov O.O., Buravov B.A., et al. Use of Oligoether Acrylate of (((((((((2-hydroxypropane-1,3-diyl)bis(oxi))bis(4,1-phenylene))bis(propan-2,2-diyl))-bis(4,1-phenylene))bis(hydroxy))-bis(1-chloropropane-3,2-diyl)bis(oxi))-bis(phosphintriyl)tetakis(oxi))-tetakis(3-chloropropane-2,1-diyl)tetakis(2-methylacrylate) as a Monomer for Obtaining Thermo- and Heat-Resistant Polymers with Low Inflammability: RF Pat. 2712116. Publ. 24.01.2020.

15. Буравов Б.А., Аль-Хамзави А., Бочкарев Е.С., Гричишкина Н.Х., Борисов С.В., Сидоренко Н.В., Тузиков О.И., Тузиков О.О. Синтез новых фотоотверждаемых фосфорсодержащих олигоэфирметакрилатов со спейсером в структуре. *Тонкие химические технологии*. 2022;17(5):410–426. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-5-410-426>
16. Кочетыгов А.А. *Анализ данных с использованием системы STATISTICA*: учебное пособие. Тула: ТулГУ; 2023. 324 с. ISBN 975-5-7679-5255-7
17. Полежаева Н.И. Разработка органического связующего для паяльных паст со строго заданными реологическими характеристиками. *Решетневские чтения*. 2018;1:619–620.
18. Короткова Е.И. *Оптимизация многофакторного эксперимента в химии*: учебное пособие. Томск: ТПУ; 2021. 85 с. ISBN 978-5-4387-1055-4
19. Вершинин В.И., Перцев В.И. *Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента*. Санкт-Петербург: Лань; 2022. 236 с. ISBN 978-5-8114-9167-4
20. Четверикова Д.К., Брежнев А.М. Особенности планирования многофакторного эксперимента. В сб.: *Теория и практика инновационных исследований в области естественных наук: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием*. Оренбург: Оренбургский государственный университет; 2022. С. 221–225.
21. Чепурненко А.С., Кондратьева Т.Н. Прогнозирование реологических параметров полимеров методами машинного обучения. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):36–47. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-36-47>
15. Buravov B.A., Al-Khamzawi A., Bochkarev E.S., Grichishkina N.K., Borisov S.V., Sidorenko N.V., Tuzhikov O.I., Tuzhikov O.O. Synthesis of new photo-cured phosphorus-containing oligoester methacrylates with a spacer in the structure. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2022;17(5):410–426. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-5-410-426>
16. Kochetygov A.A. *Analiz dannykh s ispol'zovaniem sistemy STATISTICA (Data Analysis using the STATISTICA System)*: a textbook. Tula: TulGU; 2023. 324 p. (in Russ.). ISBN 975-5-7679-5255-7
17. Polezhaeva N.I. Development of organic binder for solder pastes with strictly specified rheological characteristics. *Reshetnevskie chteniya*. 2018;1:619–620 (in Russ.).
18. Korotkova E.I. *Optimizatsiya mnogofaktornogo eksperimenta v khimii (Optimization of a Multifactorial Experiment in Chemistry)*: a textbook. Tomsk: TPU; 2021. 85 p. (in Russ.). ISBN 978-5-4387-1055-4
19. Vershinin V.I., Pertsev V.I. *Planirovanie i matematicheskaya obrabotka rezul'tatov khimicheskogo eksperimenta (Planning and Mathematical Processing of the Results of a Chemical Experiment)*. St. Petersburg: Lan; 2022. 236 p. (in Russ.). ISBN 978-5-8114-9167-4
20. Chetverikova D.K., Brezhnev A.M. Features of planning a multifactorial experiment. In: *Theory and Practice of Innovative Research in the Field of Natural Sciences: Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*. Orenburg: Orenburg State University; 2022. P. 221–225 (in Russ.).
21. Chepurnenko A.S., Kondrat'eva T.N. Prediction of Rheological Parameters of Polymers by Machine Learning Methods. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2024;24(1):36–47 (in Russ.). <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2024-24-1-36-47>

Об авторах

Тузиков Олег Олегович, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой общей и неорганической химии, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: tuzhikovoleg@mail.ru. Scopus Author ID 12645529200, SPIN-код РИНЦ 8142-5915, <https://orcid.org/0000-0001-6316-8896>

Донецкова Любовь Юрьевна, магистр, инженер кафедры общей и неорганической химии, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: lovedonetskova@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 8843-1727, <https://orcid.org/0009-0008-8085-5071>

Соломахин Семён Михайлович, магистр, инженер кафедры общей и неорганической химии, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: solomakhin-sim@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-5040-3683>

Налесная Анна Владимировна, к.х.н., доцент кафедры общей и неорганической химии, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: nalesnaya@yandex.ru. SPIN-код РИНЦ 1669-1722, <https://orcid.org/0009-0006-4083-129X>

Аль-Хамзави Али, преподаватель кафедры химической технологии, технический факультет, Университет Аль-Кадисия (58002, Ирак, Эд-Дивания, Аль-Джамаа, Сунния ул.). E-mail: ali.alhamzawi80@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 2551-0018, <https://orcid.org/0000-0003-4491-494X>

Буравов Борис Андреевич, к.х.н., доцент кафедры общей и неорганической химии; старший научный сотрудник лаборатории полимерных, композитных и гибридных функциональных материалов, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: byravov@ya.ru. Scopus Author ID 57972246000, SPIN-код РИНЦ 6730-5763, <https://orcid.org/0000-0001-9039-571X>

Борисов Сергей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры химии и технологии переработки эластомеров; старший научный сотрудник лаборатории полимерных, композитных и гибридных функциональных материалов, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: borisov.volgograd@yandex.ru. Scopus Author ID 57193435253, SPIN-код РИНЦ 4774-4238, <https://orcid.org/0000-0003-4400-0822>

Тузиков Олег Иванович, д.х.н., профессор кафедры технологии высокомолекулярных и волокнистых материалов, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» (400005, Россия, Волгоград, пр-т им. В.И. Ленина, д. 28). E-mail: tuzhikov_oi@vstu.ru. Scopus Author ID 6507272270, SPIN-код РИНЦ 7255-0330, <https://orcid.org/0000-0003-1893-2861>

About the authors

Oleg O. Tuzhikov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of General and Inorganic Chemistry, Volgograd State Technical University (28, pr. im. V.I. Lenina, Volgograd, 400005, Russia). E-mail: tuzhikovoleg@mail.ru. Scopus Author ID 12645529200, RSCI SPIN-code 8142-5915, <https://orcid.org/0000-0001-6316-8896>

Lyubov Yu. Donetskova, Master Degree, Engineer, Department of General and Inorganic Chemistry, Volgograd State Technical University (28, pr. im. V.I. Lenina, Volgograd, 400005, Russia). E-mail: lovedonetskova@mail.ru. RSCI SPIN-code 8843-1727, <https://orcid.org/0009-0008-8085-5071>

Semyon M. Solomakhin, Master Degree, Engineer, Department of General and Inorganic Chemistry, Volgograd State Technical University (28, pr. im. V.I. Lenina, Volgograd, 400005, Russia). E-mail: solomakhin-sim@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0007-5040-3683>

Anna V. Nalesnaya, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of General and Inorganic Chemistry, Volgograd State Technical University (28, pr. im. V.I. Lenina, Volgograd, 400005, Russia). E-mail: nalesnaya@yandex.ru. RSCI SPIN-code 1669-1722, <https://orcid.org/0009-0006-4083-129X>

Ali Al-Khamzawi, Lecturer, Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Al-Qadisiyah University (Al-Qadisiyah, Al-Diwaniyah, 58002, Iraq). E-mail: ali.alhamzawi80@gmail.com. RSCI SPIN-code 2551-0018, <https://orcid.org/0000-0003-4491-494X>

Boris A. Buravov, Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Department of General and Inorganic Chemistry; Senior Researcher, Laboratory of Polymer, Composite and Hybrid Functional Materials, Volgograd State Technical University (28, pr. im. V.I. Lenina, Volgograd, 400005, Russia). E-mail: buravov@ya.ru. Scopus Author ID 57972246000, RSCI SPIN-code 6730-5763, <https://orcid.org/0000-0001-9039-571X>

Sergey V. Borisov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Chemistry and Processing Technology of Elastomers; Senior Researcher, Laboratory of Polymer, Composite and Hybrid Functional Materials, Volgograd State Technical University (28, pr. im. V.I. Lenina, Volgograd, 400005, Russia). E-mail: borisov.volgograd@yandex.ru. Scopus Author ID 57193435253, RSCI SPIN-code 4774-4238, <https://orcid.org/0000-0003-4400-0822>

Oleg I. Tuzhikov, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Department of Technology of Macromolecular and Fibrous Materials, Volgograd State Technical University (28, pr. im. V.I. Lenina, Volgograd, 400005, Russia). E-mail: tuzhikov_oi@vstu.ru. Scopus Author ID 6507272270, RSCI SPIN-code 7255-0330, <https://orcid.org/0000-0003-1893-2861>