Тип статьи: научная

УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02 DOI: 10.35887/2305-2538-2023-6-34-43

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Роман Иннакентьевич Ли <sup>1</sup>, Мария Романовна Киба <sup>2</sup>, Дмитрий Васильевич Гребеньков <sup>3</sup>, Виктор Евгеньевич Ерохин <sup>4</sup>
<sup>1,3,4</sup> Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

<sup>1</sup> romanlee@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-4880-6081

<sup>3</sup>https://orcid.org/0000-0003-3045-7434, <sup>4</sup>https://orcid.org/ 0000-0003-3997-2563

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> https://orcid.org/0000-0001-9999-8146

Автор, ответственный за переписку: Роман Иннакентьевич Ли, romanlee@list.ru Corresponding author: Roman Li, romanlee@list.ru

Реферат. Применение полимерных композитов при восстановлении изношенных корпусных деталей сельскохозяйственной техники существенно увеличивает их послеремонтный ресурс и приводит к значительной экономии материальных средств при ремонте. Композит должен обладать высокими механическими и теплофизическими свойствами, что возможно при условии равномерного распределении частиц наполнителя в объеме раствора. Агрегирование частиц, их не однородное распределение в растворе полимера значительно ухудшает эксплуатационные свойства материала. Механическое смешение и диспергирование растворов полимерных композитов с использованием аппаратов с мешалками является перспективным способом обработки, улучшающим потребительские свойства материала. Проведены теоретические исследования и с учетом физических свойств раствора эластомерного нанокомпозита выбрана конструкция открытой турбинной мешалки. Установлено, что при разработке аппарата с мешалкой следует учесть влияние конструктивных параметров мешалки на мощность, потребляемую аппаратом на перемешивание компонентов, а также качество смешения и диспергирования раствора полимерного композита. Проведен анализ влияния конструктивных параметров мешалки на потребляемую мощность и определены конструктивные параметры мешалки. Реализован активный эксперимент по плану В2 в котором функцией отклика приняли оценочный параметр качества смешения коэффициент светопропускания, а факторами угол наклона лопатки мешалки и частоту ее вращения. Получена регрессионная модель в виде полинома второго порядка и проведена ее оптимизация. Установлены оптимальные конструктивные и режимные параметры мешалки, обеспечивающие наиболее высокое качество смешения растворов. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция открытой, турбинной мешалки для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов, предназначенных для восстановления изношенных корпусных деталей техники.

**Ключевые слова:** деталь, восстановление, раствор, полимер, наполнитель, механическое смешение, качество.

# OPTIMIZATION OF DESIGN AND REGIME DATA THE TURBINE MIXER FOR DISPERSION OF SOLUTIONS POLYMERIC COMPOSITES

Roman Li<sup>1</sup>, Maria Kiba<sup>2</sup>, Dmitry Grebenkov<sup>3</sup>, Viktor Erokhin<sup>4</sup>

1,3,4 Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

1 romanlee@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-4880-6081

3 https://orcid.org/0000-0003-3045-7434, https://orcid.org/0000-0003-3997-2563

<sup>2</sup> St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia <sup>2</sup> https://orcid.org/0000-0001-9999-8146

**Abstract.** The use of polymer composites in the restoration of worn-out body parts of agricultural machinery significantly increases their post-repair life and leads to significant savings in material resources during repair. The composite should have high mechanical and thermophysical properties, which is possible provided that the filler particles are evenly distributed in the volume of the solution. Aggregation of particles, their non-uniform distribution in the polymer solution significantly impairs the performance of the material. Mechanical mixing and dispersion of polymer composite solutions using agitators is a promising treatment method that improves the consumer properties of the material. Theoretical studies were carried out and, taking into account the physical properties of the elastomeric nanocomposite solution, the design of the open turbine stirrer was chosen. It has been found that when developing a device with a stirrer, the effect of the design parameters of the stirrer on the power consumed by the device on the mixing of components, as well as the quality of mixing and dispersion of the polymer composite solution should be taken into account. The effect of the design parameters of the stirrer on the power consumption was analyzed and the design parameters of the stirrer were determined. An active experiment according to the plan was implemented V2 in which the response function took the estimated parameter of the mixing quality of the light transmission coefficient, and the factors of the inclination angle of the stirrer blade and its rotation frequency. A regression model in the form of a second-order polynomial was obtained and its optimization was carried out. The optimal design and operating parameters of the stirrer have been established, which ensure the highest quality of mixing solutions. Based on the results of the studies, the design of an open, turbine stirrer for mixing nanocomposite solutions was developed.

Keywords: detail, reduction, solution, polymer, filler, mechanical mixing, quality.

Для цитирования: Ли Р.И., Киба М.Р., Гребеньков Д.В., Ерохин В.Е. Оптимизация конструктивных и режимных параметров турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2023. Т. 66, № 6. С. 34-43. https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-6-34-43.

**For citation:** Li R., Kiba M., Grebenkov D., Erokhin V. Optimization of design and regime data the turbine mixer for dipersion of solutions polymeric composities. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2023; 66(6): 34-43. (In Russ.) https://doi.org/10.35887/2305-2538-2023-6-34-43.

**Введение.** Восстановление изношенных корпусных деталей автомобилей и тракторов полимерными композитами значительно увеличивает их ресурс и существенно уменьшает затраты на ремонт техники [1...14]. Высокий ресурс восстановленных посадок подшипников, достигается при условии высоких механических и теплофизических свойств материала. Чтобы выполнить это условие следует добиваться равномерного распределении частиц наполнителя в объеме раствора. Агрегирование частиц, их неоднородное распределение в растворе полимера приводят к существенному ухудшению эксплуатационных свойств композита.

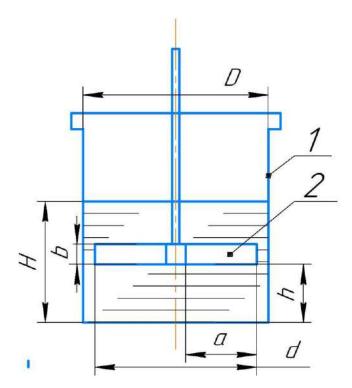
Одним из перспективных направлений обработки является механическое смешение и диспергирование растворов полимерных композитов с использованием аппаратов с мешалками. Эффективность смешения оценивают энергией, расходуемой на перемешивание, для достижения необходимого технологического эффекта. Считают, что «из двух аппаратов с мешалками более эффективно работает тот, в котором достигается определенный технологический эффект при более низкой затрате энергий» [15]. Поэтому при разработке аппарата с мешалкой необходимо учесть влияние конструктивных параметров мешалки на мощность N, потребляемую аппаратом на перемешивание компонентов, а также качество смешения и диспергирования раствора полимерного композита. Цель исследований — провести анализ влияния конструктивных параметров мешалки на потребляемую мощность, определить оптимальные конструктивные и режимные параметры мешалки, обеспечивающие высокое качество смешения и диспергирования раствора полимерного композита.

Материалы и методы. Состав исследуемого раствора полимерного нанокомпозита: «Раствор эластомера Ф-40С − 100 масс.ч. (ТУ 6-06-246-92), алюминиевый нанопорошок (ТУ 1791-003-36280340-2008) − 0,075 масс.ч.» [5, 13, 14]. На рисунке 1 показаны геометрические параметры аппарата с мешалкой. Реализован активный эксперимент. Наполнитель добавляли в раствор эластомера и в течение 5,5 мин, при температуре окружающей среды в 22°С, проводили смешение в аппарате с мешалкой. Далее прибором оригинальной конструкции (заявка на получение патента на изобретение №2023111783 от 04.05.20230) измеряли интенсивность светового потока, прошедшего через раствор полимерного нанокомпозита и рассчитывали коэффициент светопропускания.

В наших исследованиях качество смешения и диспергирования оценивали новым показателем – коэффициентом светопропускания (заявка на получение патента на изобретение №2023111783 от 04.05.20230 «Способ оценки качества смешения растворов полимерных композитов и устройство для его осуществления»), определяемым по формуле

$$K_t = \frac{I_t}{I_0} \times 100\%, \tag{1}$$

где  $I_t$  – интенсивность светового потока, прошедшего через раствор полимерного композита, предварительно подвергнутого смешению;  $I_0$  – интенсивность светового потока на выходе из раствора не наполненного полимера («нулевого» раствора). Эту величину приняли в качестве функции отклика.



1- емкость с раствором нанокомпозита; 2- мешалка; D- диаметр емкости; d- диаметр мешалки; H- высота уровня жидкости; b- высота мешалки; a- длина лопатки; b- ширина лопатки

Рисунок 1 – Геометрические параметры аппарата с мешалкой

В таблице 1 показаны принятые факторы и их интервалы варьирования.

тиолици т з ровии и интервалы вирвирования фикторов									
Наименование	Наименование Кодированное				Интервал				
фактора	обозначение				варьирования				
	фактора	нижний	нулевой	верхний					
Угол наклона лопаток, °	$X_1$	30	45	60	15				
Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$X_2$	1100	1300	1500	200				

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

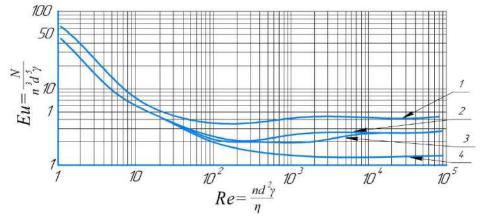
**Результаты и обсуждение.** Исходя из физических свойств раствора эластомерного нанокомпозита [5] выбрали открытую турбинную мешалку [16].

Мощность, расходуемую на перемешивание, аппаратом с мешалкой определяют по формуле [15]

$$N = K_2 n^3 d^5 \gamma \Psi_1 \Psi_2 \dots \Psi_n, \tag{2}$$

где  $K_2$  — значение критерия Эйлера при числе Рейнольдса  $\mathrm{Re}=10^5; n$  — частота вращения мешалки;  $\gamma$  — плотность раствора нанокомпозита;  $\Psi_1\Psi_2...\Psi_n$  — поправочные коэффициенты, учитывающие влияние геометрических параметров аппарата с мешалкой на мощность, расходуемую на перемешивание [15].

Влияние вида и количества лопаток Z мешалки на мощность, затрачиваемую на перемешивание N. На рисунке 2 показано изменение критерия мощности  $E_u$  (модифицированного критерия Эйлера) от вида и размеров лопатки полной длины [17]. Максимальная мощность расходуется мешалкой с прямыми лопатками и наибольшей шириной (кривая 1). В области турбулентного течения расход мощности у мешалки с лопатками, наклоненными под углом  $\alpha=45^{\circ}$  наименьший. Это обусловлено, что помимо радиального течения жидкости возникает осевое течение жидкости. Осевая циркуляция жидкости является обязательным условием образования суспензии, т.к. осевое движение препятствует оседанию на дно частиц наполнителя. Авторы в работе [18] предлагают в качестве оптимального количество лопаток Z=6. Поэтому предварительно приняли мешалку с лопатками, наклоненными под углом  $\alpha=45^{\circ}$ , и количеством Z=6.



1 – прямые лопатки b/d=0,2 ; 2 – прямые лопатки b/d=0,125 ; 3 – изогнутые лопатки b/d=0,125 ; 4 – лопатки, наклоненные под углом  $\alpha=45^{0}$  , b/d=0,125 ; b – ширина лопатки; d – диаметр мешалки

Рисунок 2 — Зависимость критерия мощности  $E_u = f(R_e)$  от вида и размеров лопатки полной длины в турбинных мешалках, Z = 6

Влияние размеров лопаток (параметров a/d и b/d) мешалки на мощность N. Влияние длины a лопатки на мощность N, затрачиваемую на перемешивание, является существенным. В результате многочисленных исследований предложен поправочный коэффициент по длине лопатки  $\Psi_a$  в формулу для расчета мощности N

$$\Psi_a = (\frac{i_a}{i_{a_0}})^{1.5},\tag{3}$$

где  $i_{a_0} = (\frac{a}{d})_0 = 0.25$  — постоянный инвариант длины лопатки.

Из формулы (3) следует значительное влияние длины лопатки на мощность. Например, при увеличении длины a, и соответственно отношения до a/d=0.4 поправочный коэффициент увеличится до 2.02 раза. Однако ранее было отмечено, что в турбулентном режиме потребляемая мощность мешалки с наклонными лопатками под углом  $\alpha=45^{0}$  (рисунок 2, кривая 4), в сравнении с мешалкой, имеющей прямые лопатки максимальной ширины, примерно в три раза меньше (кривая 1).

Поправочный коэффициент  $\Psi_b$  по ширине лопатки в формуле расчета мощности N имеет вид

$$\Psi_b = \left(\frac{\dot{i}_b}{\dot{i}_{b_0}}\right)^m,\tag{4}$$

где  $i_{b_0}=(\frac{a}{d})_0=0,2$  — постоянный инвариант ширины лопатки;  $m=1,25\,$  при Z=4 и  $m=1,0\,$  при Z=6.

Как следует из формулы (4) с увеличением количества лопаток, влияние ширины лопатки на потребляемую мощность уменьшается. Поэтому в соответствии с рекомендациями в работе [19] и формулой (4) окончательно выбрали количество лопаток Z = 6.

Влияние скорости вращения мешалки n на качество смешения. Рао и Мухерьи при исследовании образования суспензий установили: «существует оптимальное число оборотов мешалки, при котором достигается наиболее равномерное распределение частиц твердого тела в жидкости (максимальная степень перемешивания). Как снижение, так и повышение скорости вращения мешалки по сравнению с указанным числом оборотов приводит к ухудшению степени перемешивания системы» [15, 19]. Поэтому возникла необходимость исследований для определения оптимальной частоты вращения мешалки, при которой достигается максимальная степень перемешивания.

Как упоминалось ранее, осевая циркуляция жидкости является обязательным условием образования суспензии, т.к. осевое движение препятствует оседанию на дно частиц наполнителя. Мешалка с наклонными лопатками создает осевую составляющую циркулирующего потока раствора композита. В зависимости от угла наклона лопаток  $\alpha$  доля осевой составляющей в общем циркулирующем потоке будет различной. Проведены исследования смешения и диспергирования растворов полимерных композитов мешалками с лопатками, наклоненными под углом  $\alpha = 30,45u60^{\circ}$ .

В связи с вышеизложенным, спланирован и реализован активный эксперимент. В таблице 2 показан план эксперимента и его результаты.

Таблица 2 – План В	и	результаты активного эксперимента
1 donniga 2   1 maii D	/ FI	Jes ynbiaibi akinbiioi o skellephimellia

<b>№</b> п/п	$X_1$	$X_2$	Y <sub>1</sub>	<i>Y</i> <sub>2</sub>	<i>Y</i> <sub>3</sub>	$ar{Y}_g$	$\hat{Y}_g$	$S_g^2$
1	-1	-1	41,62	42,61	43,42	42,55	42,3633	0,0348
2	+1	-1	44,35	47,24	46,31	45,97	45,8556	0,0123
3	-1	+1	37,77	37,64	39,69	38,37	38,4778	0,0123
4	+1	+1	42	40,95	42,84	41,93	42,1167	0,0348
5	-1	0	31,26	32,3	33,04	32,20	32,2756	0,0057
6	+1	0	352	37,31	3524	35,92	35,8411	0,0057
7	0	-1	33,12	30	34,03	32,38	32,6811	0,0887
8	0	+1	26,43	29,54	31,53	29,17	28,8689	0,0887

Результаты эксперимента обработали по методике регрессионного анализа: «однородность дисперсий оценивали по критерию Кохрена, значимость коэффициентов регрессии сравнением с соответствующими доверительными интервалами, работоспособность по коэффициенту детерминации  $R^2$ , адекватность регрессионной модели по критерию Фишера, координаты экстремума взятием частных производных по каждому фактору в регрессионной модели и приравниванием выражений к нулю, в заключении провели каноническое преобразование регрессионной модели и по ней построили двумерное сечение поверхности отклика» [20].

В итоге получили зависимость качества смешения раствора нанокомпозита от угла наклона лопаток и частоты вращения мешалки.

Регрессионная модель в натуральных единицах

$$Y = 461,986127 - 4,344444 x_1 - 0,519444 x_2 + 0,04963 x_1^2 + 0,000196 x_2^2$$
.

Результаты регрессионного анализа представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты регрессионного анализа

Критерий К	Сохрена	Критерий Ф	ишера	Коэффициент				
Табличное       Расчетное         значение,       значение, $G_m$ $G_p$		Табличное	Расчетное	детерминации R <sup>2</sup>				
		значение,	значение,					
		$F_m$ $F_p$						
0,51	0,51 0,356486		0,12	0,89				
Дисперсии од	цнородны	Регрессионная	и модель	Регрессионная модель				
		адекваті	на	работоспособна				

На рисунке 3 показана поверхность, а на рисунке 4 – двумерное сечение поверхности отклика.

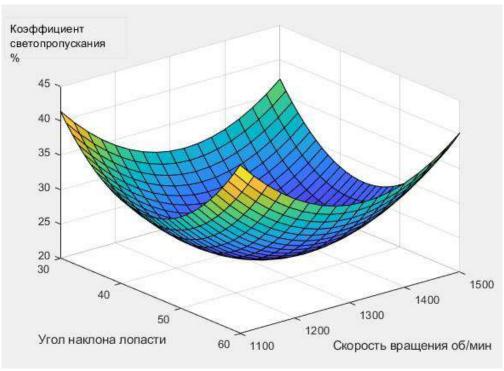


Рисунок 3 – Поверхность отклика

В таблице 4 показаны конструктивные и режимные параметры открытой, турбинной мешалки для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов.

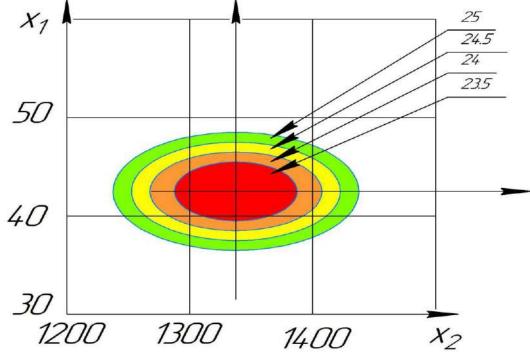


Рисунок 4 – Двумерное сечение поверхности отклика

Таблица 4 –	Конструктивные	и режимные	параметры	открытой,	турбинной	мешалки дл	Ri
смешения и лиспе	ергирования раство	ров эластоме	рных наноко	омпозитов			

Диаметр	Диаметр	Высота	Высота	Длина	Шири-	Угол	Частота	Коэффи
емкости	мешалки	уровня	мешал-	лопат-	на	наклона	вращения,	циент
D, мм	d, мм	жидкос	ки	ки	лопат-	лопатки	мин <sup>-1</sup>	светопро-
		-ти	h, мм	а, мм	ки	$\alpha$ , <sup>0</sup>		пускания
		Н, мм			b, мм	,		$K_t$ ,%
37	34	30	11,5	13	7	45	1300	23,5

#### Выводы.

- 1. Получена регрессионная модель качества смешения растворов полимерных композитов от угла наклона лопаток и частоты вращения мешалки.
- 2. Установлены оптимальные конструктивные и режимные параметры мешалки, обеспечивающие наиболее высокую степень смешения и диспергирования растворов полимерных композитов.
- 3. Разработана конструкция открытой, турбинной мешалки для смешения и диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов.

#### Список источников

- 1. Кононенко А. С. Повышение надежности неподвижных фланцевых соединений сельскохозяйственной техники использованием наноструктурированных герметиков: Дисс. ... д-ра техн. наук. М., 2012. 405 с.
- 2. Жачкин С. Ю., Краснова М. Н., Пеньков Н. А., Краснов А. И. Моделирование механического воздействия инструмента при получении гальванических композитных покрытий // Труды ГОСНИТИ. 2015. Т. 120. С. 130–134.
- 3. Жачкин С.Ю., Пеньков Н.А., Мандрыкин И.А., Беленцов В.Г. Интенсификация восстановления деталей сельхозмашин дисперсно-упрочненным композитным покрытием на основе хрома // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №3 (32) . С. 49-54.
- 4. Кононенко А.С., Дмитраков К.Г. Повышение стойкости полимерных композитов холодного отверждения к воздействию рабочих жидкостей использованием наноматериалов // Международный технико-экономический журнал. 2015. № 1. С. 89–94.
- 5. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995\_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.
- 6. Полимерные нанокомпозиты: многообразие структурных форм и приложений / А.К. Микитаев, Г.В. Козлов, Г.Е. Заиков; Ин-т биохим. физики им. Н.М. Эмануэля РАН. М.: Наука, 2009. 278 с.
- 7. Ли, Р.И. Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей при восстановлении полимерным материалом [Текст] / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.Н. Быконя // Клеи. Герметики, Технологии. 2019. № 9. С. 38-43.
- 8. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995\_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265.
- 9. Модель формирования равномерного полимерного покрытия на наружной поверхности вращающейся цилиндрической детали. Ли Р.И., Псарев Д.Н. Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 2. С. 34-38.
- 10. Михайлюк, А. Е. Разработка эластомерных материалов на основе этиленпропиленовых каучуков, модифицированных высокодисперсными частицами металлов: дис. ... канд. техн. наук / Михайлюк А.Е. Волгоград, 2014. 140 с.
- 11. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. Москва: Химия, 2000. 672 с.
- 12. Кособудский, И. Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: І. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский // Известия высших учебных заведений. -2000.-T.43 (4). -C.3-18.

- 13. https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html.
- 14. www.nanosized-powders.com.
- 15. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша. 1971. Пер. с польск. под ред. Щупляка. И.А. Л., Химия, 1975. 384 с.
- 16. Проектирование процессов и аппаратов пищевых производств. Под ред. В.Н. Стабникова. Киев: Вища школа, 1982. 199 с.
  - 17. Bates R. L., Fond y P. L., Corpstein R. R. Ind. Eng. Chem Process Des. Develop., 2, 310 (1963).
  - 18. Rushton J. H., Costich E. W., Everett H. J. Chem. Eng. Progr., 46, 467 (1950).
  - 19. Raghavendra Rao S., Muherji B. K. Trans. Indian Inst. Chem. Eng., 7, 63 (1954/55).
- 20. Ли, Р. И. Основы научных исследований: Учеб. пособие / Р. И. Ли. Липецк: ЛГГУ, 2013. 190 с.

#### Reference

- 1. Kononenko A. S. Increasing the reliability of fixed flange connections of agricultural machinery using nanostructured sealants: Diss. ... Dr. Tech. Sci. M., 2012. 405 p.
- Zhachkin S. Yu., Krasnova M. N., Penkov N. A., Krasnov A. I. Modeling of the mechanical impact of a tool when producing galvanic composite coatings // Proceedings of GOSNITI. 2015. T. 120. pp. 130– 134.
- 3. Zhachkin S.Yu., Penkov N.A., Mandrykin I.A., Belentsov V.G. Intensification of restoration of agricultural machine parts with dispersion-strengthened composite coating based on chromium // Innovations in agriculture. 2019. No. 3 (32). pp. 49-54.
- 4. Kononenko A.S., Dmitrakov K.G. Increasing the resistance of cold-curing polymer composites to the effects of working fluids using nanomaterials // International Technical and Economic Journal. 2015. No. 1. pp. 89–94.
- 5. R. I. Li, D. N. Psarev, M. R. Kiba. Promising Nanocomposite Based on Elastomer F-40 for Repairing Base Members of Machines. ISSN 1995\_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 128-132.
- 6. Polymer nanocomposites: variety of structural forms and applications / A.K. Mikitaev, G.V. Kozlov, G.E. Zaikov; Institute of Biochemistry. physics named after N.M. Emanuel RAS. M.: Nauka, 2009. 278
- 7. Lee, R.I. Mathematical model of infrared heating of body parts during restoration with polymer material [Text] / R.I. Lee, D.N. Psarev, A.N. Bykonya // Adhesives. Sealants, Technologies. 2019. No. 9. pp. 38-43.
- 8. R. I. Li, D. N. Psarev, V. A. Malyugin. A Polymeric Nanocomposite for Fixing Bearings during Assembly and Repair of Equipment. ISSN 1995\_4212, Polymer Science, Series D, 2019, Vol. 12, No. 3, pp. 261-265
- 9. Model of the formation of a uniform polymer coating on the outer surface of a rotating cylindrical part. Lee R.I., Psarev D.N. Adhesives. Sealants. Technologies. 2015. No. 2. P. 34-38.
- 10. Mikhailyuk, A. E. Development of elastomeric materials based on ethylene-propylene rubbers modified with highly dispersed metal particles: dis. ...cand. tech. Sciences / Mikhailyuk A.E. Volgograd, 2014. 140 p.
- 11. Pomogailo, A. D. Nanoparticles of metals in polymers / A. D. Pomogailo, A. S. Rozenberg, I. E. Uflyand. Moscow: Chemistry, 2000. 672 p.
- 12. Kosobudsky, I. D. Nanosized metal particles in polymer matrices: I. Synthesis, mechanisms of formation and stabilization / I. D. Kosobudsky // News of higher educational institutions. -2000. T.43 (4). -P.3-18.
  - 13. https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html
  - 14. www.nanosize-powders.com
- 15. Strenk F. Stirring and apparatus with stirrers. Poland. 1971. Transl. from Polish edited by Shpiplika. I.A. L., Chemistry, 1975. 384 p.
- 16. Design of processes and apparatus for food production. Ed. V.N. Stabnikova. Kyiv: Vishcha School, 1982. 199 p.
  - 17. Bates R. L., Fond y P. L., Corpstein R. R. Ind. Eng. Chem Process Des. Develop., 2, 310 (1963).

- 18. Rushton J. H., Costich E. W., Everett H. J. Chem. Eng. Progr., 46, 467 (1950).
- 19. Raghavendra Rao S., Muherji V. K. Trans. Indian Inst. Chem. Eng., 7, 63 (1954/55).
- 20. Lee, R.I. Fundamentals of scientific research: Textbook. allowance / R.I. Lee. Lipetsk: Leningrad State University, 2013. 190 p.

### Информация об авторах

Р. И. Ли – доктор технических наук, профессор; М. Р. Киба – кандидат технических наук; Д. В. Гребеньков – кандидат технических наук, доцент; В. Е. Ерохин – аспирант.

#### Information about the authors

- R. Li Doctor of Technical Science, Professor; M. Kiba Candidate of Technical Science;
- D. V. Grebenkov Candidate of Technical Science, Associate Professor; V. Erohin Post Graduate Student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** all authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию (Received): 23.11.2023 Принята к публикации (Accepted): 22.12.2023