

Тип статьи: научная
УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-2-150-159

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТУРБИННОЙ МЕШАЛКИ ДЛЯ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Ли Роман Иннакентьевич¹, Киба Мария Романовна², Тоиров Ильхом Жураевич³,
Ерохин Виктор Евгеньевич⁴, Лисовый Игорь Васильевич⁵

^{1, 4, 5} Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация,

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация,

³ Каршинский инженерно-экономический институт, Карши, Республика Узбекистан

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

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

³ <https://orcid.org/0009-0004-8377-3283>

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-3997-2563>

⁵ <https://orcid.org/0009-0003-8980-1778>

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

Реферат. Мешалки с техническими характеристиками, установленными ГОСТ 20680-2002, не пригодны для перемешивания растворов полимерных нанокомпозигов при восстановлении посадок подшипников. В ЛГТУ определены оптимальные конструктивные параметры многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками полной длины для перемешивания растворов полимерных нанокомпозигов. По этим параметрам получены формулы для расчета насосного эффекта и мощности при проектировании многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров. Экспериментально определено среднее значение коэффициента окружных скоростей, которое составляет $k \approx 0,92$. Предложена формула для расчета мощности при проектировании многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров с наклонными лопатками полной длины. Эксперимент показал высокую сходимость расчетных и фактических значений мощности, потребляемой турбинной мешалкой при перемешивании растворов нанокомпозигов. Проведен эксперимент для оценки и выбора критерия подобия для проектирования многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров. Исследовали критерии подобия Рейнольдса и Фруда. Коэффициент светопропускания раствора после перемешивания при частоте вращения, определенной по критерию Рейнольдса составляет $K_c = 57\%$. Аналогичный параметр раствора после обработки на режиме, определенном по критерию Фруда, в 2,2 раза ниже и составляет $K_c = 26\%$. Более высокий показатель качества по критерию Фруда подтверждается тем, что прочность образцов составляет $\sigma = 27,308$ МПа, что в 1,24 раза больше прочности образцов, полученных из растворов нанокомпозигов, обработанных на режиме, определенном по критерию Рейнольдса. В результате проведенных исследований предложена формула для расчета мощности многолопастных турбинных мешалок с наклонными лопатками. Моделирование конструктивных и режимных параметров многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров следует проводить по критерию Фруда.

Ключевые слова: полимерный композит, раствор, смешение, турбинная мешалка, конструктивные параметры, моделирование.

MODELING AND CALCULATION OF DESIGN AND OPERATING PARAMETERS

TURBINE MIXER FOR SOLUTION DISPERSION POLYMER COMPOSITES

Roman Li¹, Maria Kiba², Ilkhom Toirov³,
Victor Erohin⁴, Igor Lisovy⁵

^{1, 4, 5} Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia,

² St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia,

³ Karshi Engineering and Economic Institute, Karshi, Uzbekistan

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

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

³ <https://orcid.org/0009-0004-8377-3283>

⁴ <https://orcid.org/0000-0003-3997-2563>

⁵ <https://orcid.org/0009-0003-8980-1778>

Abstract. Mixers with technical characteristics established by GOST 20680-2002 are not suitable for mixing solutions of polymer nanocomposites when restoring bearing fits. The optimal design parameters of a multi-bladed turbine mixer with full-length inclined blades for mixing solutions of polymer nanocomposites were determined at the Lipetsk State Technical University. Formulas for calculating the pumping effect and power when designing multi-blade turbine mixers of various sizes are obtained using these parameters. The average value of the peripheral speed coefficient, which is $k \approx 0.92$, was determined experimentally. A formula for calculating power when designing multi-blade turbine mixers of various standard sizes with full-length inclined blades is proposed. The experiment showed a high convergence of calculated and actual values of power consumed by a turbine mixer when mixing nanocomposite solutions. An experiment was carried out to evaluate and select a similarity criterion for the design of multi-bladed turbine mixers of various standard sizes. Reynolds and Froude similarity criteria were studied. The light transmission coefficient of the solution after stirring at a rotation frequency determined by the Reynolds criterion is $Kc = 57\%$. A similar parameter of the solution after treatment in the mode determined by the Froude criterion is 2.2 times lower and amounts to $Kc = 26\%$. A higher quality index according to the Froude criterion is confirmed by the fact that the strength of the samples is $\sigma = 27.308$ MPa, which is 1.24 times greater than the strength of samples obtained from nanocomposite solutions processed in the mode determined by the Reynolds criterion. A formula for calculating the power of multi-bladed turbine mixers with inclined blades was proposed as a result of the research. Modeling of the design and operating parameters of multi-blade turbine mixers of various standard sizes should be carried out according to the Froude criterion.

Keywords: polymer composite, solution, mixing, turbine mixer, design parameters, modeling.

Для цитирования: Ли Р.И., Кибба М.Р., Тоиров И.Ж., Ерохин В.Е., Лисовый И.В. Моделирование и расчет конструктивных и режимных параметров турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 68, № 2. С. 150-159. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-150-159>.

For citation: Li R., Kiba M., Toirov I., Erohin V., Lisovy I. Modeling and calculation of design and operating parameters turbine mixer for solution dispersion polymer composites. *Nauka v central'noj Rossii* = Science in the Central Russia: 2024; 68(2): 150-159. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-2-150-159>.

Введение. Восстановление изношенных деталей современными технологиями обеспечивает значительное снижение расходов на ремонт, сокращение простоев техники, многократно увеличивает ресурс восстановленных деталей [1-6]. Технологии восстановления посадок подшипников на валах и в корпусных деталях полимерными композитами отличает простота, низкое потребление ремонтных материалов и электроэнергии. При этом ресурс восстановленных подшипниковых узлов многократно превышает расчетный, благодаря исключению фреттинг-коррозии и снижению контактных напряжений в подшипнике.

Актуальными являются исследование и разработка полимерных нанокомпозитов.

Наполнение полимеров наночастицами позволяет получать материалы с уникальными потребительскими свойствами [7-14]. При ремонте техники композиты получают введением наночастиц наполнителя в раствор полимера и перемешиванием компонентов вручную или с использованием ультразвуковых ванн. Исследования в работе Киба показали снижение критерия эрозионной активности в растворах эластомерных нанокомпозитов, в сравнении с растворами эластомерных микрокомпозитов. Поэтому для повышения эффективности ультразвукового диспергирования растворов эластомерных нанокомпозитов необходимо использовать ультразвуковые излучатели повышенной мощности. Этот вопрос требует всестороннего изучения, проведения теоретических и экспериментальных исследований.

Обращает на себя внимание использование для приготовления растворов полимерных нанокомпозитов аппаратов с мешалками. Последние отличаются относительной простотой конструкции, высокой надежностью, низким энергопотреблением, однако они не пригодны для использования при перемешивании растворов полимерных нанокомпозитов, предназначенных для восстановления посадок подшипников. ГОСТ 20680-2002 определяет технические условия к аппаратам с турбинной мешалкой. Однако у этих аппаратов емкость сосуда составляет от 0,01 до 100 м³. Расход композита на восстановление корпусной детали не превышает 50 мл, поэтому вышеуказанные мешалки не пригодны для перемешивания растворов полимерных нанокомпозитов при восстановлении.

Расход раствора полимерного нанокомпозита и, соответственно объем, подлежащий перемешиванию в ходе приготовления материала, зависит от номенклатуры и годовой программы восстанавливаемых деталей. Поэтому возникает необходимость в аппаратах с мешалками с различной емкостью сосуда, обеспечивающими одинаковый технологический эффект и минимальные при этом значения потребляемой мощности и расхода электроэнергии.

Насосный эффект и мощность, потребляемая на перемешивание раствора, являются важными техническими характеристиками мешалки и поэтому расчет этих характеристик для разрабатываемых в ЛГТУ многолопастных турбинных мешалок представляет научный и практический интерес.

Гидродинамический процесс, протекающий в аппарате с мешалкой, отличается сложностью, трудно поддается аналитическому описанию и поэтому при исследовании широко используют моделирование и критерии подобия [15, 16].

Цель исследований – получить формулы расчета насосного эффекта и мощности многолопастных турбинных мешалок, обосновать, на основе моделирования, выбор критерия подобия, обеспечивающего наиболее адекватную модель мешалки.

Материалы и методы. В ходе исследований использовали оригинальные многолопастные турбинные мешалки различных типоразмеров, конструктивные параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Конструктивные параметры турбинных мешалок

Параметр	Обозначение	Размерность	Мешалка №1	Мешалка №2	Мешалка №3
Диаметр мешалки	d	мм	34	68	90
Внутренний диаметр аппарата с мешалкой	D	мм	37	74	98
Ширина лопатки мешалки	b	мм	7	14	18,5
Угол наклона лопатки	α	градус	43	43	43
Высота столба жидкости в аппарате с мешалкой	H	мм	30	60	79
Высота установки мешалки от дна сосуда аппарата	h	мм	11,5	22,1	30

В ЛГТУ определены оптимальные режимы 3D печати мешалки с наклонными лопатками из пластика PETG на принтере марки Flying Bear Ghost 5 [17]. На рисунке 1 показаны мешалки различных типоразмеров, изготовленные методом 3D печати.



Рисунок 1 – Турбинные мешалки с наклонными лопатками различных типоразмеров

В качестве привода использовали миксер мощностью 900 Вт. Частоту вращения мешалки регулировали лабораторным автотрансформатором SUNTEK 500BA 0-300 В SK2.1 LTR0500, используя тарировочный график, предварительно составленный с помощью лазерного тахометра UNI-T UT373.

Для использования лазерного тахометра на валу мешалки необходимо сделать выступ, который будет считывать лазерная система, и определять частоту вращения. Для решения этой задачи выполнена и напечатана 3D модель турбинной мешалки с одной лопастью. 3D модели и готовые детали показаны на рисунке 2.

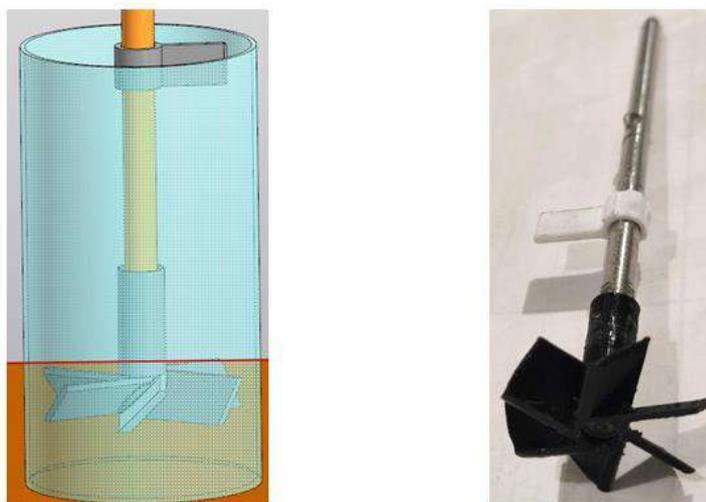


Рисунок 2 – 3D модель и готовые детали для тахометра

Для смешения и диспергирования использовали раствор нанокompозита на основе эластомера Ф-40С. Состав нанокompозита, разработанный в ЛГТУ: эластомер Ф-40С – 100 масс.ч. (ТУ 6-06-246-92), алюминиевый нанопорошок – 0,075 масс.ч. (ТУ 1791-003-36280340-2008) [18, 19].

Отбор компонентов осуществляли на весах аналитических марки ВЛА-200М с ценой деления 0.0001 г.

Диспергирование раствора нанокompозита проводили при температуре 20°C в течение 5,5 мин.

Мощность, потребляемую мешалкой при диспергировании, измеряли ваттметром марки SINOTIMER DDS108-EU.

Адекватность модели проверяли по критерию Фишера [20]

Расчетное значение F_p - критерия вычисляли по формуле

$$F_p = \frac{m \cdot S^2}{S_e^2},$$

где m – повторность в опыте, $m = 3$.

Дисперсию воспроизводимости результатов эксперимента определяли по формуле

$$S_e^2 = \sum_{g=1}^N \frac{S_g^2}{N}$$

Выборочную дисперсию S^2 , интегрально оценивающую степень рассеивания \hat{Y}_g относительно \bar{Y}_g , вычисляли по формуле

$$S^2 = \frac{\sum_{g=1}^N (\hat{Y}_g - \bar{Y}_g)^2}{N - d^*},$$

где \hat{Y}_g – расчетное значение отклика; \bar{Y}_g – среднее значение отклика, полученное из опытов; N – количество опытов в эксперименте, $N = 3$; d^* – количество значимых коэффициентов регрессии.

Табличное значение критерия Фишера F_T для принятого уровня значимости $P=0,05$ и чисел степеней свободы числителя $v_1=N-d^*$ и знаменателя $v_2=N(m-1)$ определяли из таблицы [20].

Модель считается адекватной, если выполняется условие $F_p < F_T$.

Качество диспергирования оценивали коэффициентом светопропускания и прочностью образцов. Способ оценки качества смешения растворов полимерных композитов включает: калибрование прибора на интенсивность светового потока, проходящего сквозь раствор не наполненного полимера I_0 ; отбор в кювету раствора полимерного композита, предварительно подвергнутого интенсивному смешению, и измерение прибором интенсивности светового потока, проходящего сквозь раствор композита I , с последующим автоматическим расчетом коэффициента светопропускания раствора полимерного композита (рассчитывается по формуле

$$K_c = \frac{I}{I_0} \times 100, \%)$$

В ЛГТУ разработан прибор для экспресс-оценки качества смешения и диспергирования, который изготовлен методом 3D печати. На способ и прибор для экспресс-оценки качества смешения и диспергирования в ФИПС подана заявка №2023111783/28(025080) «Способ оценки качества смешения растворов полимерных композитов и устройство для его осуществления», которая в настоящее время проходит экспертизу по существу.

Образцами являлись прямоугольные пленки полимерного нанокompозита размером $50 \times 10 \times 0,15$ мм. Рабочая длина пленок составляла 30 мм. Термическую обработку образцов проводили в сушильном шкафу СНОЛ-3.5,3.5,3.5/3 ступенчато: первая ступень: $T = 50^\circ\text{C}$ в течение 1 ч; вторая ступень: $T = 150^\circ\text{C}$ в течение 2 ч. После термической обработки образцы кондиционировали в течение 24 ч при температуре 20°C [21].

Испытания образцов проводили на разрывной машине ИР 5082-50. Скорость нагружения при испытаниях составляла 5 мм/мин и была постоянной.

Прочность пленок σ рассчитывали по формуле

$$\sigma = \frac{F_p}{A},$$

где F_p – разрушающая нагрузка, Н; A – площадь поперечного сечения пленки, мм².

Результаты и обсуждение. Расчет насосного эффекта турбинной мешалки на основе упрощенной теории вихревых насосов.

Многолопастная турбинная мешалка с наклонными лопатками создает смешанный радиально-осевой поток [15]. Общий насосный эффект V_p^* при этом можно рассчитать по формуле

$$V_p^* = \pi^2 b n d^2 (1-k) \left(\cos^2 \alpha + \frac{d}{6b} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right) \quad (1)$$

где k – коэффициент окружных скоростей (отношение угловой скорости жидкости к угловой скорости мешалки), определяющий тип потока: при $k = 1$ поток является чисто тангенциальным (окружным), при $k = 0$ – чисто радиальным.

Ранее были определены оптимальные конструктивные параметры многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками полной длины для перемешивания растворов полимерных нанокомпозитов [22]. После ввода в формулу (1) параметров: $\alpha = 43^\circ$ и $b = d/6$, получили формулу для расчета насосного эффекта разрабатываемой в нашей работе многолопастной турбинной мешалки

$$V_p^* = 1,876 d^3 \cdot n \cdot \pi^2 (1-k) \quad (2)$$

Мощность, расходуемую на перемешивание, можно определить по зависимости

$$N = \gamma \cdot V_p^* \cdot k (\pi \cdot d \cdot n)^2, \quad (3)$$

где γ – плотность раствора полимерного нанокомпозита.

Полагая, что мощность N известна, получили систему из двух уравнений (2) и (3) с двумя неизвестными V_p^* и k .

В таблице 2 показаны результаты расчета с использованием экспериментально измеренной мощности турбинной мешалки, расходуемой на перемешивание раствора нанокомпозита на основе эластомера Ф-40С, при различных значениях частоты вращения.

Таблица 2 – Результаты расчета насосного эффекта многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками

№ п/п	Частота вращения мешалки n , с ⁻¹	Плотность раствора полимерного нанокомпозита γ	Диаметр мешалки d , м	Мощность N , Вт	Насосный эффект, $V_p^* \times 10^{-4}$ м ³ /с	Коэффициент окружных скоростей, k
1	13	820	0,068	1,8	3,952	0,925
2	15,32	820	0,068	3,0	4,751	0,923
3	17,68	820	0,068	4,4	5,21	0,927

Как следует из таблицы 2 среднее значение коэффициента окружных скоростей составляет $k \approx 0,92$.

После подстановки формулы (2) в (3) получили формулу для расчета мощности многолопастной турбинной мешалки с наклонными лопатками

$$N = 182,4 \gamma \cdot n^3 \cdot d^5 \cdot k (1-k) \quad (4)$$

Далее оценили адекватность формулы (4) по критерию Фишера при проектировании турбинных мешалок различных типоразмеров. Для этого провели эксперимент в ходе которого

измеряли мощность, потребляемую мешалкой большего типоразмера. Конструктивные и режимные параметры мешалки и результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Мощность мешалки №3 при различных режимах работы

Параметр	Размерность	Частота вращения, с ⁻¹		
		10,590	12,522	14,421
Диаметр мешалки, d	м	0,09		
Коэффициент окружных скоростей, k		0,92		
Мощность расчётная, N	Вт	7,9	13,0	19,8
Мощность измеренная, $N_{изм}$	Вт	8,6	13,6	20,4

Выборочная дисперсия S^2 , интегрально оценивающая степень рассеивания \bar{Y}_g относительно \bar{Y}_g , составляет

$$S^2 = \frac{(7,9 - 8,6)^2 + (13,0 - 13,6)^2 + (19,8 - 20,4)^2}{2} = 0,605$$

Расчетное значение F_p - критерия составляет

$$F_p = \frac{3 \cdot 0,605}{0,5934} = 3,06$$

Табличное значение критерия Фишера составляет $F_m = 5,14$ [20]. Зависимость (3) является адекватной, так выполняется условие $F_p < F_T$.

Оценка и выбор критерия подобия для проектирования многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров. На завершающем этапе провели эксперимент для оценки и выбора критерия подобия для проектирования многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров.

Исследовали критерии подобия Рейнольдса и Фруда, поскольку для определения критерия Эйлера требуется измерение мощности, которое будет вносить определенную погрешность в конечный результат.

В работе [22] определена оптимальная частота вращения турбинной мешалки (мешалка №1) при диспергировании раствора эластомерного нанокompозита, которая составляет $n = 1325$ мин⁻¹.

Параметры вышеуказанной мешалки и раствора нанокompозита представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры мешалки и раствора нанокompозита

Параметр	Обозначение	Размерность	Мешалка №1
Число оборотов мешалки	n	с ⁻¹	22,08
Диаметр мешалки	d	м	0,034
Плотность жидкости	γ	кг/м ³	820
Коэффициент динамической вязкости жидкости	η	Па·с	0,1346
Ускорение свободного падения	g	м/с ²	9,8

Для определения оптимальной частоты вращения мешалки №2 увеличенного типоразмера по критериям подобия Рейнольдса и Фруда, преобразовали формулы критериев подобия (1) и (2) к виду

$$n_{Re} = \frac{Re \cdot \eta}{d^2 \gamma}; n_{Fr} = \sqrt{\frac{Fr \cdot g}{d}}$$

где n – число оборотов мешалки, с⁻¹; d – диаметр мешалки, м; γ – плотность жидкости, кг/м³; η – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с, g – ускорение свободного падения, м/с².

Результаты расчета представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Значения частот вращения по Рейнольдсу и Фруду

Критерий	Критерий Рейнольдса R_e	Критерий Фруда F_r
Частота вращения, c^{-1}	5,5	15,615
Частота вращения, $мин^{-1}$	330	937

На режимах, указанных в таблице 5 провели диспергирование раствора нанокompозита на основе эластомера Ф-40С. По завершении обработки измерили коэффициент светопропускания растворов, изготовили образцы и провели испытание их на прочность. Результаты эксперимента представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Оценочные показатели качества диспергирования

Критерий	Частота вращения, $мин^{-1}$	Коэффициент светопропускания K_c , %	Прочность σ , Мпа
Рейнольдса R_e	330	57	21,971
Фруда F_r	937	26	27,308

Как видно из таблицы 6 диспергирование на частоте вращения $n = 937 \text{ мин}^{-1}$, определенной по критерию Фруда, обеспечивает значительно лучшее диспергирование, чем по критерию Рейнольдса, что подтверждается более высокими показателями качества (меньший коэффициент светопропускания и более высокая прочность).

Выводы:

1. В результате проведенных исследований предложена формула для расчета мощности многолопастных турбинных мешалок с наклонными лопатками.
2. Моделирование конструктивных и режимных параметров многолопастных турбинных мешалок различных типоразмеров следует проводить по критерию Фруда.

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. Черноиванов, В. И. Голубев, И. Г. Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы). – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
6. Карагодин, В. И., Митрохин Н. Н. Ремонт автомобилей и двигателей. М.: Мастерство, 2001. – 496 с.
7. 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.
8. Полимерные нанокompозиты : 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.
9. Ли, Р.И. Математическая модель инфракрасного нагрева корпусных деталей при восстановлении полимерным материалом / Р.И. Ли, Д.Н. Псарев, А.Н. Быконя // Клеи. Герметики,

Технологии. 2019. № 9. С. 38-43.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. – Москва : Химия, 2000. – 672 с.

14. Кособудский, И. Д. Наноразмерные металлические частицы в полимерных матрицах: I. Синтез, механизмы образования и стабилизации / И. Д. Кособудский // Известия высших учебных заведений. – 2000. – Т. 43 (4). – С. 3-18.

15. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша. 1971. Пер. с польск. под ред. Шупляка. 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. Ли, Р.И. Оптимизация режима 3-D печати турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов / Ли Р.И., Киба М.Р., Гребеньков Д.В., Ерохин В.Е. – Текст : непосредственный // Наука в Центральной России. – 2024. – №1 (67). – С. 7-15.

18. <https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html>

19. www.nanosized-powders.com

20. Ли, Р. И. Основы научных исследований: Учеб. пособие / Р. И. Ли. – Липецк: ЛГГУ, 2013. – 190 с.

21. Псарев, Д. Н. Технологические основы восстановления посадок подшипников качения в узлах сельскохозяйственной техники полимерными нанокompозитами : специальность 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Псарев Дмитрий Николаевич ; ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ. – Мичуринск, 2024, – 478 с.

22. Ли, Р.И. Оптимизация конструктивных и режимных параметров турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов / Р. И. Ли, М. Р. Киба, Д. В. Гребеньков, В. Е. Ерохин // Наука в Центральной России. – 2023. – №6(66). – С. 34-43.

References

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.

2. 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. Chernoiivanov, V. I. Golubev, I. G. Restoration of machine parts (State and prospects). – M.: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2010. – 376 p.

6. Karagodin, V.I., Mitrokhin N.N. Repair of cars and engines. M.: Masterstvo, 2001. – 496 p.

7. 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.

8. 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 p.

9. Lee, R.I. Mathematical model of infrared heating of body parts during restoration with polymer material / R.I. Lee, D.N. Psarev, A.N. Bykonya // Adhesives. Sealants, Technologies. 2019. No. 9. pp. 38-43.
10. 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.
11. 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.
12. Mikhailiuk, A. E. Development of elastomeric materials based on ethylene-propylene rubbers modified with highly dispersed metal particles: dis. ...cand. tech. Sciences / Mikhailiuk A.E. – Volgograd, 2014. – 140 p.
13. Pomogailo, A. D. Nanoparticles of metals in polymers / A. D. Pomogailo, A. S. Rozenberg, I. E. Uflyand. – Moscow: Chemistry, 2000. – 672 p.
14. 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. – Т. 43 (4). – P. 3-18.
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. Lee, R.I. Optimization of the 3-D printing mode of a turbine mixer for dispersing solutions of polymer composites / Lee R.I., Kiba M.R., Grebenkov D.V., Erokhin V.E. – Text: direct // Science in Central Russia. – 2024. – No. 1 (67). – pp. 7-15.
18. <https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html>
19. www.nanosize-powders.com
20. Lee, R.I. Fundamentals of scientific research: Textbook. allowance / R.I. Lee. – Lipetsk: Leningrad State University, 2013. – 190 p.
21. Psarev, D. N. Technological foundations for restoring seating of rolling bearings in agricultural machinery units with polymer nanocomposites: specialty 4.3.1 “Technologies, machines and equipment for the agricultural sector”: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Psarev Dmitry Nikolaevich; Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Michurinsky State Agrarian University. – Michurinsk, 2024, – 478 p.
22. Lee, R.I. Optimization of design and operating parameters of a turbine mixer for dispersing solutions of polymer composites / R. I. Li, M. R. Kiba, D. V. Grebenkov, V. E. Erokhin // Science in Central Russia. – 2023. – No. 6 (66). – P. 34-43.

Информация об авторах

Р. И. Ли – доктор технических наук, профессор; М. Р. Киба – кандидат технических наук;
И. Ж. Тоиров – кандидат технических наук, доцент; В. Е. Ерохин – аспирант, И. В. Лисовый – студент.

Information about the authors

R. Li – Doctor of Technical Science, Professor; M. Kiba – Candidate of Technical Science;
I. Toirov – Candidate of Technical Science, Associate Professor; V. Erohin – Post Graduate Student;
I. Lisovy – 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): 13.03.2024 Принята к публикации (Accepted): 15.04.2024