

Тип статьи: научная
УДК 621.822.6.004.67: 668.3: 631.3.02
DOI: 10.35887/2305-2538-2024-4-127-135

МЕТОД РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ В ТУРБИННОЙ МЕШАЛКЕ

*Роман Иннакентьевич Ли*¹, *Мария Романовна Киба*²,
*Виктор Евгеньевич Ерохин*³, *Марат Ильдарович Клеблеев*⁴

^{1,3} Липецкий государственный технический университет,
г. Липецк, Российская Федерация

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

³ <https://orcid.org/0000-0003-3997-2563>

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

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

⁴ Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Российская Федерация

⁴ <https://orcid.org/0009-0004-9724-9503>

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

Реферат. В ЛГТУ разработана турбинная мешалка для перемешивания и диспергирования растворов полимерных нанокомпозиов, предназначенных для восстановления посадочных отверстий в корпусных деталях техники. Предложена формула расчета оптимальной частоты вращения турбинной мешалки, учитывающая конструктивные параметры мешалки и физические свойства наночастиц, обеспечивающая эффективное перемешивание наночастиц наполнителя в растворе нанокомпозиата. Проведен эксперимент для оценки адекватности математической модели частоты вращения турбинной мешалки. В эксперименте использовали опытные турбинные мешалки трех различных типоразмеров. Для перемешивания использовали раствор нанокомпозиата эластомера Ф-40С. Качество диспергирования оценивали коэффициентом светопропускания. Для каждого типоразмера турбинной мешалки получены экспериментальные нелинейные зависимости коэффициента пропускания от частоты вращения мешалки. После аппроксимации экспериментальных зависимостей и взятия частных производных определены их экстремумы, т.е. фактические оптимальные частоты вращения для каждого типоразмера мешалки: $n_{оп1} = 1325 \text{ мин}^{-1}$; $n_{оп2} = 1113 \text{ мин}^{-1}$; $n_{оп3} = 973 \text{ мин}^{-1}$. Затем измерена мощность, потребляемая мешалками различного типоразмера при частоте вращения: 500, 1000 и 1500 мин^{-1} . Далее по каждой мешалке, используя значения измеренной мощности, рассчитали значения коэффициентов окружных скоростей k . С увеличением диаметра мешалки от 34 до 90 мм, соответствующие значения коэффициента окружных скоростей k увеличиваются от 0,9534 до 0,9703, что свидетельствует об увеличении окружного потока. Далее по предложенной формуле, используя значения коэффициентов окружных скоростей, получили расчетные значения оптимальной частоты вращения для мешалок №1, №2 и №3: $n_{оп1} = 1307 \text{ мин}^{-1}$; $n_{оп2} = 1100 \text{ мин}^{-1}$; $n_{оп3} = 965 \text{ мин}^{-1}$. Дисперсионный анализ показал, что расчетное значение Фишера не превышает табличное, что подтверждает адекватность формулы расчета оптимальной частоты вращения турбинной мешалки.

Ключевые слова: полимерный нанокомполит, раствор, перемешивание, турбинная мешалка, оптимум, частота вращения.

METHOD FOR CALCULATING THE OPTIMAL DISPERSION MODE OF SOLUTIONS POLYMER COMPOSITES IN TURBINE MIXER

*Roman Li*¹, *Maria Kiba*², *Victor Erokhin*³, *Marat Klebleev*⁴

^{1,3} *Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation*

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

³ <https://orcid.org/0000-0003-3997-2563>

² *Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation*

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

⁴ *Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russian Federation*

⁴ <https://orcid.org/0009-0004-9724-9503>

Abstract. LSTU has developed a turbine stirrer for mixing and dispersing solutions of polymer nanocomposites designed to restore mounting holes in the body parts of equipment. Formula is proposed for calculation of optimal rotation frequency of turbine mixer, which takes into account structural parameters of mixer and physical properties of nanoparticles, which provides effective mixing of nanoparticles of filler in solution of nanocomposite. An experiment was carried out to assess the adequacy of a mathematical model of the turbine stirrer speed. Experimental turbine agitators of three different sizes were used in the experiment. A solution of elastomer nanocomposite F-40S was used for mixing. The dispersion quality was evaluated by the light transmission coefficient. For each turbine stirrer size, experimental non-linear dependences of the transmittance on the stirrer speed were obtained. After approximation of experimental dependences and taking partial derivatives, their extremes are determined, i.e. actual optimal rotation frequencies for each mixer size: $n_{op1} = 1325 \text{ min}^{-1}$; $n_{op2} = 1113 \text{ min}^{-1}$; $n_{op3} = 973 \text{ min}^{-1}$. Then the power consumed by stirrers of various sizes at a speed of 500, 1000 and 1500 min^{-1} was measured. Further, the values of the circumferential velocity coefficients k were calculated for each stirrer using the measured power values. As the stirrer diameter increases from 34 to 90 mm, the corresponding circumferential velocity factor k increases from 0.9534 to 0.9703, indicating an increase in circumferential flow. Further, according to the proposed formula, using the values of the coefficients of peripheral speeds, the calculated values of the optimal speed for stirrers No. 1, No. 2 and No. 3 were obtained: $n_{op1} = 1307 \text{ min}^{-1}$; $n_{op2} = 1100 \text{ min}^{-1}$; $n_{op3} = 965 \text{ min}^{-1}$. Analysis of variance showed that the calculated Fischer value does not exceed the table value, which confirms the adequacy of the formula for calculating the optimal speed of the turbine stirrer.

Keywords: polymer nanocomposite, solution, mixing, turbine mixer, optimum, rotation frequency.

Для цитирования: Ли Р.И., Киба М.Р., Ерохин В.Е., Клеблеев М.И. Метод расчета оптимального режима диспергирования растворов полимерных композитов в турбинной мешалке // Наука в центральной России Science in the Central Russia. 2024. Т. 70, № 4. С. 127-135. <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-127-135>.

For citation: Li R., Kiba M., Erokhin V., Klebleev M. Method for calculating the optimal dispersion mode of solutions polymer composites in turbine mixer. *Nauka v central'noj Rossii = Science in the Central Russia*: 2024; 70(4): 127-135. (In Russ.) <https://doi.org/10.35887/2305-2538-2024-4-127-135>.

Введение. Восстановление изношенных деталей позволяет существенно уменьшить затраты на ремонт, сократить простои техники, значительно повысить долговечность восстановленных деталей [1-6]. Типовая технология восстановления корпусных деталях полимерными композитами выгодно отличается простотой, низкой себестоимостью, а ресурс восстановленных деталей многократно превышает расчетный.

Полимерные материалы, наполненные наночастицами, обладают уникальными потребительскими свойствами [7-15]. Композиты для восстановления деталей получают вводом наночастиц наполнителя в раствор полимера и перемешиванием компонентов вручную, с использованием ультразвуковых ванн и механизированных мешалок. Для обеспечения высокой эффективности перемешивания растворов полимерных нанокompозитов, предназначенных для восстановления корпусных деталей, необходимо разработать метод расчета оптимального режима работы турбинных мешалок.

Рао и Мухерья 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» [16].

Цель исследований – получить формулу расчета оптимальной частоты вращения турбинной мешалки, учитывающую конструктивные параметры мешалки и физические свойства наночастиц, обеспечивающую диспергирование и равномерное распределение наночастиц наполнителя в растворе нанокompозита.

Материалы и методы.

При исследованиях использовали: «оригинальные многолопастные турбинные мешалки различных типоразмеров, конструктивные параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Конструктивные параметры турбинных мешалок [17]

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 качестве привода использовали миксер мощностью 900 Вт. Частоту вращения мешалки регулировали лабораторным автотрансформатором SUNTEK 500BA 0-300 В SK2.1 LTR0500, используя тарифовочный график, предварительно составленный с помощью лазерного тахометра UNI-T UT373. Мощность, потребляемую мешалкой при диспергировании, измеряли ваттметром марки SINOTIMER DDS108-EU. Качество диспергирования оценивали коэффициентом светопропускания K_p » [17].

Для исследований 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)» [15, 18, 19].

Результаты и обсуждение. В работе [17] получена формула мощности N , потребляемой многолопастной турбинной мешалкой с наклонными лопатками полной длины:

$$\langle N = \gamma \cdot b \cdot d^4 \cdot n^3 \cdot k(1-k)(\cos^2 \alpha + \frac{d}{6b} \sin \alpha \cdot \cos \alpha), \quad (1)$$

где γ – плотность раствора нанокompозита кг/м³; b – ширина лопатки, м; d – диаметр мешалки, м; n – частота вращения, мин⁻¹; k – коэффициент окружных скоростей; α – угол наклона лопатки, °» [17].

Используя формулу (1) получили выражение для расчета коэффициента окружных скоростей k

$$k = \frac{\sqrt{\gamma \cdot d^4 n^3 \pi^4 (d \sin(2\alpha) + 12b \cos^2(\alpha)) (\gamma \cdot d^5 n^3 \pi^4 \sin(2\alpha) + (12\gamma \cdot b \cdot d^4 n^3 \pi^4 \cos^2(\alpha) - 48N))}}{2\gamma \cdot d^4 n^3 \pi^4 (d \sin(2\alpha) + 12b \cos^2(\alpha))} + \frac{1}{2} \quad (2)$$

Как упоминалось выше существует оптимальная частота вращения мешалки n_o , при которой частицы равномерно распределяются в объеме жидкости. В работе [20] предлагается уравнение для расчета мощности N , потребляемой мешалкой, при которой обеспечивается получение однородной взвеси

$$\frac{H-h}{D} = 0,1 + 0,23 \lg \left[\frac{N}{\gamma g W_{oc} V_g} \cdot \frac{d}{D} \left(\frac{1}{1-\varepsilon} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (3)$$

Для плохо осаждаемых или не осаждаемых частиц, скорость осаждения частиц W_{oc} рассчитывают по формуле

$$W_{oc} = \frac{2r_s^2(\rho_{нап} - \rho_{пм})G}{9\eta}, \quad (4)$$

Центробежное ускорение рассчитывают по формуле

$$G = \omega^2 \cdot (d/2) \quad (5)$$

После подстановки выражений (1) и (4) в уравнение (3) и преобразований, получили формулу для расчета оптимальной частоты вращения мешалки n_0 , при которой частицы равномерно распределяются в объеме жидкости

$$n_0 = \frac{234045816,386 \cdot V_v \cdot (\rho_{нап} - \rho_{пм}) \cdot D \cdot d_s^2 \cdot g \cdot e^{\frac{9,968(H-h)}{D} \cdot 0,998}}{\eta d^4 k \cdot (1-k) \cdot \left(\frac{1}{1-\varepsilon}\right)^{0,67} \cdot (d \cdot \sin(2\alpha) + 12b \cdot \cos^2(\alpha))}, \quad (6)$$

где V_v – объем взвеси, м³; $\rho_{пм}$, $\rho_{нап}$ – плотность раствора полимера и наполнителя кг/м³; D – диаметр аппарата, м; r_s и d_s – радиус и диаметр наночастицы, м; η – динамическая вязкость раствора нанокompозита, Па·с; H – высота слоя однородной суспензии, м; h – высота расположения мешалки над дном, м; ε – объемная доля жидкости; g – ускорение свободного падения, м/с²; ω – угловая скорость, с⁻¹.

Формула (6) учитывает конструктивные параметры аппарата с мешалкой, размер, физические свойства и содержание наночастиц в полимерном растворе, т.е. наиболее полно отражают величины, влияющие на гидродинамику жидкости в аппарате с мешалкой. Далее провели эксперимент с целью оценки адекватности модели (6) и оценки сходимости расчетных значений n_{op} с фактическими n_{of} .

Исследование оптимальной частоты вращения турбинных мешалок различных типоразмеров.

В работе [21] экспериментально определена оптимальная частота вращения мешалки №1, которая составляет $n = 1325$ мин⁻¹. При этом режиме обеспечивается наилучшее качество перемешивания раствора нанокompозита, что подтверждается минимальным значением коэффициента пропускания светового потока $K_t = 22,75\%$ при контроле качества перемешивания.

В данном эксперименте исследовали качество перемешивания растворов нанокompозитов в мешалках №2 и №3 при различной частоте вращения (таблица 2).

На рисунке 1 показано изменение коэффициента пропускания света K_t в растворах нанокompозитов, после обработки при различных частотах вращения мешалки №2.

Таблица 2 – Качество перемешивания растворов нанокompозита в мешалках

Мешалка №2		Мешалка №3	
Частота вращения n , мин ⁻¹	Коэффициент пропускания K_t , %	Частота вращения n , мин ⁻¹	Коэффициент пропускания K_t , %
1000	32	865	25
1100	20	965	18
1200	27	1065	23

Графическую зависимость на рисунке 1 представили в виде аппроксимированной функции. После взятия частной производной определили оптимальную частоту вращения n мешалки №2, $n_{of2} = 1113$ мин⁻¹ при которой достигается минимум коэффициента пропускания света $K_t = 19,6\%$, т.е. наиболее высокое качество перемешивания раствора нанокompозита.

На рисунке 2 показано изменение коэффициента пропускания света K_t в растворах нанокompозитов, после обработки при различных частотах вращения n мешалки №3.

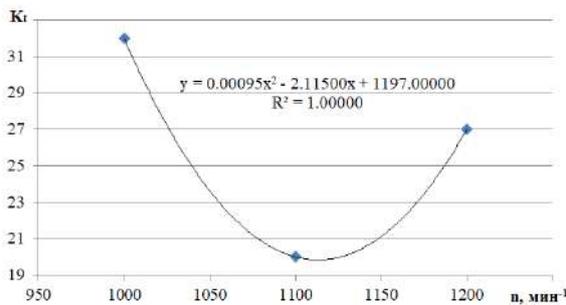


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента пропускания света K_t от частоты вращения мешалки n №2

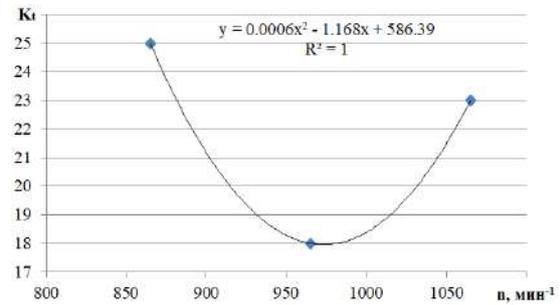


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента пропускания света K_t от частоты вращения мешалки n №3

Графическую зависимость на рисунке 2 представили в виде аппроксимированной функции. После взятия частной производной определили оптимальную частоту вращения n мешалки №3, $n_{\text{опт}} = 973 \text{ мин}^{-1}$ при которой достигается минимум коэффициента пропускания света $K_t = 17,8\%$, т.е. наиболее высокое качество перемешивания раствора нанокompозита.

Оценка адекватности модели оптимальной частоты вращения турбинной мешалки

На следующем этапе оценивали адекватность модели (6), разработанной в теоретической главе диссертации.

Первоначально исследовали мощность, потребляемую мешалками различного типоразмера при частоте вращения: 500, 1000 и 1500 мин^{-1} .

На рисунке 3 представлены графики зависимости мощности N , потребляемой мешалками различного типоразмера, от частоты вращения n

Объём жидкости в сосудах аппаратов с мешалками №1, №2 и №3 составляет соответственно: 29, 100 и 200 мл.

При увеличении частоты вращения потребляемая мощность увеличивается. Чем больше диаметр мешалки, тем больше скорость приращения мощности с увеличением частоты вращения.

Далее по каждой мешалке, используя формулу (2), рассчитали значения коэффициентов окружных скоростей k , с последующим усреднением результата. Результаты расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значение коэффициента окружных скоростей.

Частота вращения, мин^{-1}	Коэффициент окружных скоростей		
	Мешалка №1	Мешалка №2	Мешалка №3
500	0,95309	0,9602	0,9688
1000	0,9534	0,9628	0,9698
1500	0,9535	0,9632	0,9723
Средний	0,9534	0,9621	0,9703

На рисунке 4 показан график зависимости коэффициента окружных скоростей k от диаметра мешалки d . При увеличении диаметра также увеличивается окружной поток по степенной зависимости.

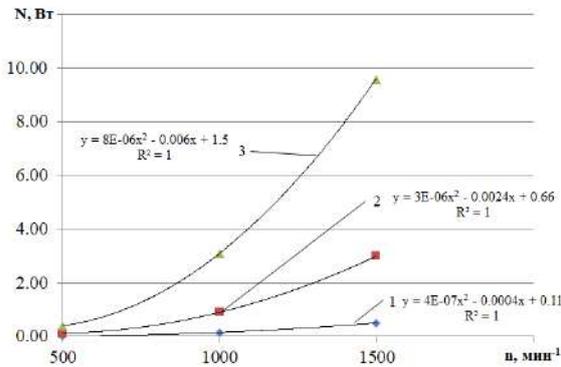


Рисунок 3 – Зависимость мощности N , потребляемой мешалкой, от частоты вращения n

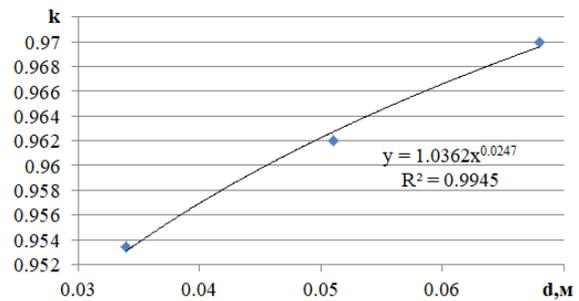


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента окружных скоростей от диаметра мешалки

Как следует из таблицы 2 и рисунка 3 с повышением типоразмера мешалки увеличивается окружная составляющая скорости потока жидкости в аппарате, о чем свидетельствует повышение коэффициента окружных скоростей k .

Расчетную оптимальную частоту вращения для мешалок №1, №2 и №3 определили по формуле (6), подставляя в нее значения коэффициентов окружных скоростей. В таблице 4 представлены результаты расчета.

Таблица 4 – Опытные и расчетные значения оптимальной частоты вращения мешалок

Мешалка	Результаты эксперимента		Данные модели (2.26), расчетное значение $n_{opt}, мин^{-1}$
	Опытное среднее $n_{opt}, мин^{-1}$	Дисперсия в опыте S_g^2 , ($мин^{-1}$) ²	
№1	1325	625	1307
№2	1113	1369	1100
№3	973	1764	965

Дисперсия воспроизводимости результатов эксперимента

$$S_e^2 = \frac{625 + 1369 + 1764}{3} = 1253$$

Выборочная дисперсия S^2

$$S^2 = \frac{(1325 - 1307)^2 + (1113 - 1100)^2 + (973 - 965)^2}{2} = 278$$

Расчетное значение F_p - критерия

$$F_p = \frac{3 \cdot 278}{1253} = 0,6656$$

Табличное значение критерия Фишера $F_m = 5,14$ [22].

Модель (6) является адекватной, так выполняется условие $F_p < F_m$.

Заключение. Получена формула расчета (6) оптимальной частоты вращения турбинной мешалки, учитывающая конструктивные параметры мешалки и физические свойства наночастиц,

обеспечивающая эффективное диспергирование и равномерное распределение наночастиц наполнителя в растворе нанокompозита.

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. 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.
16. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Польша. 1971. Пер. с польск. под ред. Шупляка. И.А. Л., Химия, 1975. 384 с.
17. Ли Р.И. Моделирование и расчет конструктивных и режимных параметров турбинной мешалки для диспергирования растворов полимерных композитов / Ли Р.И., Коба М.Р., Тоиров И.Ж., Ерохин В.Е., Лисовый И.В. – Текст: непосредственный // Наука в Центральной России. –

2024. – №2 (68). – С. 7-15.

18. <https://institut-plastmass.tiu.ru/p32507115-fenolnye-smoly-laki.html>.
19. www.nanosized-powders.com.
20. Иванец В.Н., Лобасенко Б.А. Методы интенсификации гидромеханических процессов. Учебное пособие. Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2003.- 84 с.
21. 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.
22. Ли, Р. И. Основы научных исследований: Учеб. пособие / Р. И. Ли. – Липецк: ЛГГУ, 2013. – 190 с.

References

1. Kononenko A. S. Increasing the reliability of fixed flange joints of agricultural machinery using nanostructured sealants: Diss. ... Doctor of Engineering Sciences. Moscow, 2012. 405 p.
2. Zhachkin S. Yu., Krasnova M. N., Penkov N. A., Krasnov A. I. Modeling the mechanical impact of the tool in obtaining galvanic composite coatings // Proceedings of GOSNITI. 2015. Vol. 120. Pp. 130–134.
3. Zhachkin S. Yu., Penkov N. A., Mandrykin I. A., Belentsov V. G. Intensification of restoration of agricultural machinery parts with a dispersion-hardened composite coating based on chromium // Innovations in Agriculture. 2019. No. 3 (32) . P. 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. P. 89–94.
5. Chernovanov, V.I. Golubev, I.G. Restoration of machine parts (State and prospects). - M.: FGNU "Rosinformagrotech", 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; N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences. - Moscow: 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. P. 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 Formation of a Uniform Polymer Coating on the Outer Surface of a Rotating Cylindrical Part. Li R.I., Psarev D.N. Adhesives. Sealants. Technologies. 2015. No. 2. P. 34-38.
12. Mikhailyuk, A. E. Development of Elastomeric Materials Based on Ethylene-Propylene Rubbers Modified with Finely Dispersed Metal Particles: Dis. ... Cand. of Technical Sciences / Mikhailyuk A.E. – Volgograd, 2014. – 140 p.
13. Pomogaylo, A. D. Metal nanoparticles in polymers / A. D. Pomogaylo, A. S. Rosenberg, I. E. Uflyand. – Moscow: Chemistry, 2000. – 672 p.
14. Kosobudsky, I. D. Nanosized metal particles in polymer matrices: I. Synthesis, formation and stabilization mechanisms / I. D. Kosobudsky // News of higher educational institutions. – 2000. – Vol. 43 (4). – P. 3-18.
15. Psarev, D. N. Technological foundations of restoration of rolling bearing fits in agricultural machinery units using polymer nanocomposites: specialty 4.3.1 "Technologies, machines and equipment for the agro-industrial complex": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Psarev Dmitry Nikolaevich; FGBOU VO Michurinsk SAU. - Michurinsk, 2024, - 478 p.
16. Strenk F. Mixing and apparatus with stirrers. Poland. 1971. Translated from Polish under the editorship of Shchuplyak. I.A. L., Chemistry, 1975. 384 p.
17. Li R.I. Modeling and calculation of design and operating parameters of a turbine mixer for

dispersing polymer composite solutions / Lee R.I., Kiba M.R., Toirov I.Zh., Erokhin V.E., Lisovy I.V. -
Text: direct // Science in Central Russia. - 2024. - No. 2 (68). - P. 7-15.

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

19. www.nanosized-powders.com

20. Ivanets V.N., Lobasenko B.A. Methods of intensification of hydromechanical processes. Tutorial.
Kemerovo Technological Institute of Food Industry, 2003.- 84 p.

21. Lee, R.I. Optimization of design and operating parameters of a turbine mixer for dispersing polymer
composite solutions / R. I. Lee, M. R. Kiba, D. V. Grebenkov, V. E. Erokhin // Science in Central Russia. -
2023. - No. 6 (66). - P. 34-43.

22. Lee, R. I. Fundamentals of scientific research: Textbook / R. I. Lee. - Lipetsk: LGSU, 2013. - 190
p.Информация об авторах.

Информация об авторах

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

Information about the authors

R. Li – Doctor of Technical Science, Professor; M. Kiba – Candidate of Technical Science;
V. Erokhin – Post Graduate Student; M. Klebleev – 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): 15.07.2024 Принята к публикации (Accepted): 24.08.2024