

Научная статья

УДК 51-76

doi: 10.17223/19988621/98/2

MSC: 92C45

Исследование кинетических характеристик биоцидного воздействия наночастиц оксида меди при климатической деструкции и биокоррозии в экстремальных условиях холодного климата

Бондарчук Иван Сергеевич¹, Герасимчук Анна Леонидовна²,
Глухова Любовь Борисовна³, Марченко Екатерина Сергеевна⁴,
Кычкин Айсен Анатольевич⁵, Кычкин Анатолий Константинович⁶

^{1, 2, 3, 4} Томский государственный университет, Томск, Россия

⁵ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр»
Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ ЯНЦ СО РАН), Якутск, Россия

⁶ Институт физико-технических проблем Сибирского отделения
Российской академии наук им. В.П. Ларионова ФИЦ ЯНЦ СО РАН, Якутск, Россия

¹ ivanich_91@mail.ru

² gerasimchuk_ann@mail.ru

³ glb122@yandex.ru

⁴ 89138641814@mail.ru

⁵ icen.kychkin@mail.ru

⁶ kychkinplasma@mail.ru

Аннотация. Исследованы кинетические характеристики биоцидного воздействия наночастиц оксида меди (II) на рост колоний грибов *Penicillium chrysogenum* в различных температурных условиях. Показано, что повышение концентрации наночастиц замедляет рост колоний микроорганизмов. Разработана математическая модель роста, позволяющая предсказывать динамику роста микроорганизмов при различных концентрациях CuO и температурах $T = 4, 15, 28^\circ\text{C}$. Предложено использование оптимального диапазона концентраций наночастиц (0.10–0.20%) для эффективной защиты полимерных композитов от биоповреждения, особенно в условиях холодного климата и вечной мерзлоты.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, моделирование кинетики роста, численность микроорганизмов, биоцидное воздействие, наночастицы оксида меди (II), концентрация, температура, модель логистического роста, коэффициент детерминации R^2

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант РНФ № 25-69-00009, <https://rscf.ru/project/25-69-00009/>

Для цитирования: Бондарчук И.С., Герасимчук А.Л., Глухова Л.Б., Марченко Е.С., Кычкин А.А., Кычкин А.К. Исследование кинетических характеристик биоцидного воздействия наночастиц оксида меди при климатической деструкции и биокоррозии в экстремальных условиях холодного климата // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 98. С. 13–27. doi: 10.17223/19988621/98/2

A study of kinetic characteristics of biocidal action of copper oxide nanoparticles during climatic destruction and biocorrosion under extreme conditions of cold climate

Ivan S. Bondarchuk¹, Anna L. Gerasimchuk², Lyubov B. Glukhova³, Ekaterina S. Marchenko⁴, Aisen A. Kychkin⁵, Anatoly K. Kychkin⁶

^{1, 2, 3, 4} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

⁵ Federal Research Center “Yakutsk Scientific Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

⁶ Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Federal Research Center Yakut Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

¹ ivanich_91@mail.ru

² gerasimchuk_ann@mail.ru

³ glb122@yandex.ru

⁴ 89138641814@mail.ru

⁵ icen.kychkin@mail.ru

⁶ kychkinplasma@mail.ru

Abstract. This research investigates kinetic characteristics of biocidal effects induced by copper(II) oxide nanoparticles on the growth dynamics of *Penicillium chrysogenum* fungal colonies at different temperatures. The influence of varying concentrations of CuO nanoparticles at different temperatures (4°C, 15°C, and 28°C) on colony growth rates was evaluated. Mathematical models were developed to accurately predict the dynamics of growth curves at different CuO concentration levels and thermal regimes. Key findings include that higher concentrations of CuO significantly suppress fungal colony expansion. An optimal range of 0.10–0.20% CuO was identified as effective for protecting polymer composites against biological corrosion. At lower temperatures, slower growth rates and extended lag phases are observed, while elevated temperatures accelerate both growth rates and reduce lag times. The logistic growth model exhibited strong correlation with experimental data, achieving high coefficients of determination (R^2) in all tested scenarios. These results provide valuable insights into optimizing bioprotection strategies for polymer composite materials exposed to harsh environmental conditions such as permafrost regions.

Keywords: polymer composite materials, growth kinetics modeling, microbial population, biocidal effect, copper(II) oxide nanoparticles, concentration, temperature, logistic growth model, R^2 determination coefficient

Acknowledgments: This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-69-00009), <https://rscf.ru/project/25-69-00009/>

For citation: Bondarchuk, I.S., Gerasimchuk, A.L., Glukhova, L.B., Marchenko, E.S., Kychkin, A.A., Kychkin A.K. (2025) A study of kinetic characteristics of biocidal action of copper oxide nanoparticles during climatic destruction and biocorrosion under extreme conditions of cold climate. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 98. pp. 13–27. doi: 10.17223/19988621/98/2

Введение

Полимерные композиты представляют собой новый класс перспективных материалов, значимость которых в технических системах постоянно увеличивается благодаря ряду важных преимуществ по сравнению с металлами [1, 2]. Современное материаловедение сталкивается с проблемой ограниченной изученности физических, механических и химических свойств недавно разработанных композитов. Острая необходимость в конструкционных полимерах становится причиной быстрого внедрения таких материалов в различные области промышленности и гражданского строительства, однако их широкое внедрение требует особого подхода к защите от негативных воздействий окружающей среды [3–6].

При разработке конструкций, рассчитанных на эксплуатацию в сложных природных условиях, крайне важно учитывать совокупное влияние целого ряда климатических факторов: температуры, влажности воздуха, солнечного света, радиоактивного фона, агрессивных сред и биологически активных микроорганизмов, негативно влияющих на прочность материала [7–10]. Необходимо также исследовать роль патогенных бактерий [11], способствующих деструкции полимеров и ухудшению их эксплуатационных свойств. При разработке современных полимерных композиционных материалов (ПКМ) с улучшенными прочностными характеристиками важно анализировать совместное воздействие бактериальной активности и неблагоприятных условий окружающей среды [12, 13]. Для повышения устойчивости композитов к бактериям целесообразно вводить специальные добавки, обладающие комплексом требуемых физико-химических свойств, как способствующих усилению механических свойств, так и обладающих эффектом биоцидного воздействия, например наночастиц металлов, таких как серебро, никель, медь и цинк [14–16]. Одной из важных задач в ходе таких исследований является разработка оценочных моделей сохранения свойств и характеристик ПКМ при натуральных испытаниях, что позволит прогнозировать срок службы ПКМ в экстремальных климатических условиях [17].

Применение кинетического подхода при изучении процессов биологической коррозии и климатической деструкции полимерных композиционных материалов особенно актуально, например, в условиях вечной мерзлоты ввиду специфических особенностей воздействия совокупности биотических и абиотических факторов [18–21]. Деструкция указанных материалов под воздействием микроорганизмов представляет собой динамический процесс, зависящий от многих переменных, среди которых ведущую роль играют условия окружающей среды, физические свойства поверхности материалов и химический состав самих биоцидных добавок. Использование стандартных методов микробиологических исследований часто ограничено только оценкой начальных и конечных результатов процесса воздействия без учета динамики изменения численности микроорганизмов, что затрудняет прогнозирование долгосрочной эффективности защитных покрытий и сроков службы изделий [22].

Исследование кинетики биоцидного воздействия включает построение зависимостей скорости роста микроорганизмов от концентраций соединений, ингибирующих рост микроорганизмов, продолжительности контакта и условий окружающей среды [23, 24]. Кинетический метод обладает существенными преимуществами перед традиционно используемыми методами микробиологического тестирования,

поскольку позволяет количественно определить скорость роста или снижения численности колоний микроорганизмов и исследовать динамику биоцидного воздействия во времени [25]. Моделирование кинетики является важным этапом при выборе оптимальной концентрации, химической формы и способа введения биоцидных компонентов в строительные материалы и конструкции [26–30]. Важнейшей задачей кинетического анализа является определение наиболее оптимальных концентраций и эффективных способов введения биоцидных агентов, обеспечивающих максимальную защиту материала в течение длительного срока эксплуатации. Цель данной работы – создание математической модели, оценка влияния концентрации наночастиц оксида меди (II) на скорость роста и жизнеспособность микроорганизмов при различных температурах и выбор оптимальной концентрации биоцидного компонента.

Методика исследования

Приготовление тестовых микроорганизмов и измерение диаметра колоний

Штамм *Penicillium chrysogenum* Pn-ПКМ-11 использовали в качестве тестового микроорганизма для определения минимальной антимикробной концентрации наночастиц оксида меди при разных температурах. Штамм культивировали на агаризованной среде Чапека–Докса с добавлением наночастиц оксида меди (II) с концентрацией 0,0, 0,05, 0,1, 0,2 и 0,25 мас. %. Споры культуры и фрагменты мицелия инокулировали в центр чашек Петри. Исследование динамики роста при различных концентрациях CuO и температурах $T = 4, 15, 28^{\circ}\text{C}$ проводили путем измерения диаметра колоний D_i от времени t на протяжении 28 суток. Для усреднения в ходе эксперимента по измерению диаметра колоний от времени для каждого значения концентрации CuO и фиксированного значения температуры T проводили 6 параллельных опытов. Для определения диаметра колоний использовали металлическую линейку с погрешность измерения $\pm 0,05$ мм.

Математическое моделирование кривых роста колоний грибов

Математические модели широко применяются для описания динамики и получения соответствующих кинетических характеристик роста колоний микроорганизмов. Существует множество первичных моделей, описывающих рост клеток микробов с количественной точки зрения: модель Бараньи, модель Гомпертца, трехфазная линейная модель первичного роста и т.д. [31]. Математическая модель отражает ключевые особенности процесса роста, позволяет получить его количественную оценку и спрогнозировать его в различных условиях. Как правило, эти модели основаны на использовании в том или ином виде экспоненциальных функций в форме

$$y = a \cdot \exp[-\exp(b - c \cdot x)]. \quad (1)$$

В качестве примера можно привести уравнение Гомпертца

$$D = A \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{\mu_m \cdot e}{A} \cdot (\lambda - t) + 1\right]\right\}, \quad (2)$$

где x представляет собой время роста, y обозначает степень роста. Степень роста y можно выразить через диаметр колонии D , мм, в логарифмической форме $\ln(D)$, отношение диаметров колоний, D/D_0 , где D_0 – начальное значение диаметра

колонии, или логарифмическое отношение диаметров колоний $\ln(D/D_0)$. Выбор между этими показателями для определения степени роста y зависит от конкретных условий роста и физиологических характеристик культивируемых микроорганизмов.

В уравнении (1) параметры a , b и c не имеют прямой биологической интерпретации. Однако кривую роста микроорганизмов обычно можно описать с помощью трех биологически значимых параметров. Это максимальная скорость роста (μ_m), представляющая собой точку перегиба кривой и показывающая максимальную скорость увеличения популяции микроорганизмов. Время задержки (λ), или лаг-фаза, определяется как точка пересечения касательной с осью Ox в точке перегиба и отражает период до начала экспоненциального роста численности. Максимальный диаметр (A) соответствует точке пересечения асимптоты и оси Oy , где численность популяции достигает своего предельного значения и стабилизируется. На рис. 1 представлена графическая интерпретация, характеризующая общий ход кривой биологического роста.

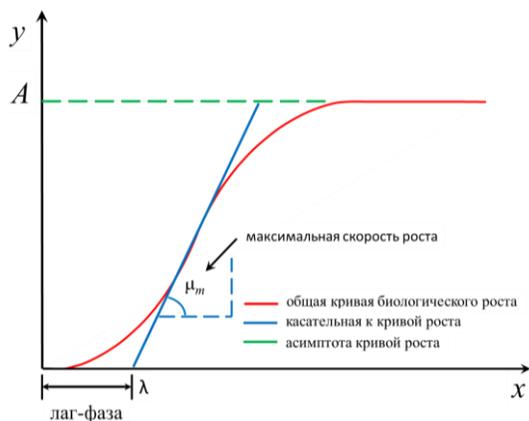


Рис. 1. Общий ход кривой биологического роста
Fig. 1. General trend of the biological growth curve

Помимо уравнения Гомпертца (2), математическая модель в виде логистической функции [31]

$$D = \frac{A}{\left\{1 + \exp\left[\frac{4 \cdot \mu_m}{A} \cdot (\lambda - t) + 2\right]\right\}}, \quad (3)$$

где t – время роста, ч; λ – период замедления роста, ч; A – максимальный диаметр колонии, мм; μ_m – максимальная скорость роста, мм/ч; D – средний диаметр в момент времени t , ч, также является одной из наиболее распространенных для описания связи между диаметром колонии D и временем роста t .

В качестве показателя, отражающего относительное изменение численности популяции во времени, используются экспериментально измеренные средние значения диаметра колоний D . Аппроксимация кривых роста и идентификация параметров математической модели были выполнены методом нелинейной регрессии в программе OriginPro 8.6 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA).

Результаты экспериментальных исследований и их анализ

При исследовании роста штамма *Penicillium chrysogenum* Рп-ПКМ-11 колоний грибов было найдено среднее значение диаметра колоний D по 6 параллельным опытам и приведены зависимости среднего размера диаметра колоний D от времени роста t при различных значениях температуры: 4, 15, 28°C. В табл. 1 приведены зависимости среднего размера диаметра D от времени роста t колоний грибов на примере штамма *Penicillium chrysogenum* Рп-ПКМ-11 при различных массовых концентрациях наночастиц (CuO), %, при указанных температурах.

Таблица 1

Зависимости диаметра колоний D от времени роста t при различных массовых концентрациях наночастиц (CuO)

Время t , ч	Температура, $T = 4^\circ\text{C}$				
	(CuO) = 0.00% (контроль)	(CuO) = 0.05%	(CuO) = 0.10%	(CuO) = 0.20%	(CuO) = 0.25%
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	1.3	0.0	0.0	0.0	0.0
96	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
120	2.2	1.3	0.0	0.0	0.0
144	3.0	2.0	0.0	0.0	0.0
168	5.0	3.0	0.0	0.0	0.0
336	19.7	10.2	7.2	3.8	3.0
504	32.3	12.3	10.0	4.2	5.2
672	45.3	13.3	10.2	4.2	5.8
Время t , ч	Температура, $T = 15^\circ\text{C}$				
	(CuO) = 0.00% (контроль)	(CuO) = 0.05%	(CuO) = 0.10%	(CuO) = 0.20%	(CuO) = 0.25%
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	1.8	1.0	1.8	0.0	0.0
96	4.7	3.3	1.8	0.0	0.0
120	8.8	5.5	2.5	0.0	0.0
144	12.0	7.3	3.2	0.0	0.0
168	16.7	9.5	5.0	0.0	0.0
336	43.2	12.2	9.7	3.8	3.8
504	65.2	16.7	11.3	6.5	9.3
672	79.2	20.5	13.3	7.2	11.0
Время t , ч	Температура, $T = 28^\circ\text{C}$				
	(CuO) = 0.00% (контроль)	(CuO) = 0.05%	(CuO) = 0.10%	(CuO) = 0.20%	(CuO) = 0.25%
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
72	7.0	4.7	2.3	2.5	0.0
96	11.0	8.3	5.5	3.5	1.0
120	16.7	12.0	8.0	5.0	1.0
144	20.2	14.2	10.2	6.5	4.0
168	24.2	16.7	11.3	7.0	5.0
336	49.2	29.8	17.3	20.0	16.8
504	69.5	44.0	23.0	28.5	25.3
672	76.2	55.8	32.7	31.8	33.0

Представленные данные показывают влияние массовой концентрации наночастиц CuO на рост колоний микроорганизмов при $T = 4^{\circ}\text{C}$. Контрольная группа (без добавления наночастиц CuO) демонстрирует самый высокий уровень роста колоний. Это видно по значительному увеличению диаметра колоний с течением времени, который достигает максимальных значений около 45 мм спустя 672 ч. По мере увеличения концентрации наночастиц CuO наблюдается значительное снижение скорости роста колоний. Например, при максимальной концентрации $(\text{CuO}) = 0.25\%$ диаметр колоний становится значительно меньше контрольной группы даже спустя длительное время. Приведенные при $T = 4^{\circ}\text{C}$ опытные данные ясно демонстрируют зависимость бактерицидного эффекта от концентрации: чем выше концентрация наночастиц, тем сильнее торможение роста колоний.

Экспериментальные данные показывают влияние массовой концентрации наночастиц (CuO) на рост колоний микроорганизмов при температуре $T = 15^{\circ}\text{C}$. При отсутствии наночастиц $(\text{CuO}) = 0.0\%$ последние растут наиболее интенсивно, демонстрируя максимальный диаметр среди всей серии кривых при температуре $T = 15^{\circ}\text{C}$. Начальная стадия роста протекает относительно быстро и продолжается равномерно вплоть до максимального значения примерно 79 мм спустя 672 ч. Даже добавление небольших концентраций наночастиц, в пределах $(0.05\text{--}0.10\%)$, оказывает заметное влияние на рост колоний микроорганизмов. Эти концентрации замедляют рост колоний, однако не останавливают его полностью. Особенно заметно замедление на начальной стадии, когда рост колоний протекает в лаг-фазе. Максимальный диаметр колоний стабилизируется на уровнях значительно ниже контрольного варианта: $D_{\text{max}} = 20.5$ мм при $(\text{CuO}) = 0.05\%$, $D_{\text{max}} = 13.3$ мм при $(\text{CuO}) = 0.10\%$. При средней концентрации $(\text{CuO}) = 0.20\%$ наблюдается сильное ингибирующее воздействие на рост колоний микроорганизмов. До момента времени 168 ч не было зафиксировано изменения диаметра колоний. При концентрации CuO = 0.25% рост колоний микроорганизмов практически отсутствует вплоть до 168 ч наблюдения, что свидетельствует о выраженном бактерицидном действии наночастиц CuO. Лишь спустя длительное время (более 336 ч) наблюдается незначительное увеличение диаметра колоний, однако этот показатель значительно ниже, чем в контроле и образцах с меньшими концентрациями CuO. Небольшим отличием в случае высокой концентрации $(\text{CuO}) = 0.25\%$ является лишь немного больший максимальный диаметр $D_{\text{max}} = 11.0$ мм по сравнению с концентрацией $(\text{CuO}) = 0.20\%$, где максимальный размер колоний достигает значения $D_{\text{max}} = 7.2$ мм.

Полученные в результате проведения исследования экспериментальные данные также указывают на влияние концентрации наночастиц оксида меди (II) на рост колоний микроорганизмов при температуре $T = 28^{\circ}\text{C}$. По сравнению с образцами, изученными при температурах $T = 4$ и 15°C , общая картина кинетики роста в целом не претерпевает существенных изменений. Наиболее интенсивный рост колоний происходит в условиях отсутствия наночастиц (контрольный образец). Увеличение концентрации наночастиц приводит к постепенному снижению темпов роста вплоть до полной остановки роста при высоких концентрациях. Контрольный вариант $(\text{CuO}) = 0.00\%$ характеризуется интенсивным и равномерным ростом диаметра колоний, который достигает максимального значения примерно 76 мм спустя 672 ч. При низкой концентрации $(\text{CuO}) = 0.05\%$ рост несколько замедляется по сравнению с контролем, но протекает стабильно. Конечная точка кривой роста соответствует диаметру порядка 56 мм. При увеличении концен-

трации до $(\text{CuO}) = 0.10\%$ отмечается существенное уменьшение скорости роста при сопоставлении с контролем. На начальном этапе динамика роста замедляется: к моменту времени 168 ч диаметр колоний достигает лишь половины от значения в контроле. К концу эксперимента размер колоний составляет лишь треть от контрольного образца. При концентрациях $(\text{CuO}) = 0.20\%$ и $(\text{CuO}) = 0.25\%$ проявляется ярко выраженный тормозящий эффект на начальном участке кривой роста. Высокая концентрация $(\text{CuO}) = 0.25\%$ практически полностью подавляет рост колоний на начальном этапе. Тем не менее небольшая активация роста возможна после первоначального длительного периода лаг-фазы, вероятно, благодаря адаптации колоний микроорганизмов к бактерицидному воздействию.

Таким образом, полученные результаты подтверждают ярко выраженный бактерицидный эффект наночастиц CuO , особенно заметный при средних и высоких концентрациях. Ингибирующий эффект может быть обусловлен накоплением наночастиц CuO внутри клеток и нарушением внутриклеточных процессов, что отражается в замедлении скорости роста и наблюдаемом снижении диаметра колоний [32].

Таблица 2

Расчетные значения параметров в соответствии с математической моделью на основе логистической функции

Концентрация наночастиц (CuO), %	Температура, $T = 4^{\circ}\text{C}$			
	μ_m , мм/ч	λ , ч	A , мм	R^2
(CuO) = 0.00	0.11	187	48	0.98869
(CuO) = 0.05	0.05	135	13	0.99048
(CuO) = 0.10	0.12	272	10	0.99989
(CuO) = 0.20	0.12	296	4	0.99999
(CuO) = 0.25	0.03	243	6	0.99486
Концентрация наночастиц (CuO), %	Температура, $T = 15^{\circ}\text{C}$			
	μ_m , мм/ч	λ , ч	A , мм	R^2
(CuO) = 0.00	0.20	128	79	0.98929
(CuO) = 0.05	0.04	16	20	0.90653
(CuO) = 0.10	0.04	61	13	0.97896
(CuO) = 0.20	0.04	248	7	0.99647
(CuO) = 0.25	0.04	255	11	0.99674
Концентрация наночастиц (CuO), %	Температура, $T = 28^{\circ}\text{C}$			
	μ_m , мм/ч	λ , ч	A , мм	R^2
(CuO) = 0.00	0.19	62	77	0.98701
(CuO) = 0.05	0.11	58	59	0.97425
(CuO) = 0.10	0.06	28	36	0.92982
(CuO) = 0.20	0.09	99	32	0.99594
(CuO) = 0.25	0.09	162	33	0.98148

С использованием логистической модели (3) были рассчитаны численные значения параметров μ_m , λ и A путем аппроксимации экспериментальных с применением метода нелинейной регрессии. В табл. 2 приведены основные параметры роста, описывавшие влияние концентраций наночастиц CuO на рост колоний микроорганизмов при температуре $T = 4^{\circ}\text{C}$. Максимальная скорость роста μ_m характеризует наибольшую скорость увеличения численности популяции микроорганизмов. Из табл. 2 видно, что максимальная скорость роста варьирует от 0.03 до 0.12 мм/ч.

Наибольшие значения μ_m наблюдается при концентрациях $(\text{CuO}) = 0.10\%$ и $(\text{CuO}) = 0.20\%$, тогда как наименьшая скорость роста зафиксирована при $(\text{CuO}) = 0.25\%$. Время задержки роста λ показывает временной интервал перед началом фазы экспоненциального роста. При температуре $T = 4^\circ\text{C}$ значение параметра λ изменяется от 134 до 296 ч. Минимальное время задержки отмечается при концентрации $(\text{CuO}) = 0.05\%$, максимальное – при $(\text{CuO}) = 0.20\%$. Максимальный диаметр A отражает средний конечный размер колоний в стационарной фазе роста. При температуре $T = 4^\circ\text{C}$ средний диаметр колеблется от 4 до 48 мм, достигая максимума при отсутствии наночастиц $(\text{CuO}) = 0.00\%$ и минимального размера 4 мм при высокой концентрации наночастиц $(\text{CuO}) = 0.20\%$. Представленные расчетные данные характеризуются высокими значениями коэффициента детерминации R^2 .

Анализ зависимости параметров роста от концентрации наночастиц CuO показывает, что при низкой концентрации $(\text{CuO}) = 0.05\%$ время задержки роста λ существенно сокращается относительно контрольного образца. Максимальный диаметр колоний также значительно уменьшается по сравнению с контролем $(\text{CuO}) = 0.00\%$. Это свидетельствует об ингибирующем эффекте даже малых доз наночастиц на начальную стадию роста: $\lambda = 187$ ч для $(\text{CuO}) = 0.00\%$ и $\lambda = 135$ ч для $(\text{CuO}) = 0.05\%$; фазу экспоненциального роста: $\mu_m = 0.11$ мм/ч для $(\text{CuO}) = 0.00\%$ и $\mu_m = 0.05$ мм/ч для $(\text{CuO}) = 0.05\%$; итоговый диаметр колоний: $A = 48$ мм для $(\text{CuO}) = 0.00\%$ и $A = 13$ мм для $(\text{CuO}) = 0.05\%$. При средней концентрации $(\text{CuO}) = 0.10\%$ проявляется тенденция к увеличению времени задержки λ и незначительному уменьшению максимального диаметра A по сравнению с образцом $(\text{CuO}) = 0.05\%$, что указывает на постепенное усиление эффекта бактерицидного воздействия: $\lambda = 272$ ч и $A = 10$ мм для концентрации $(\text{CuO}) = 0.10\%$. В области высоких концентраций $(\text{CuO}) = 0.20 \div 0.25\%$ рост максимально замедляется, увеличивается время задержки и снижается максимальный диаметр. Несмотря на то, что время задержки роста λ для $(\text{CuO}) = 0.25\%$ несколько уменьшается до 243 ч по сравнению с образцом $(\text{CuO}) = 0.20\%$, для которого $\lambda = 296$ ч, максимальная скорость роста μ_m для $(\text{CuO}) = 0.25\%$ составляет всего 0.03 мм/ч, что заметно ниже значений при других концентрациях. Это свидетельствует о сильном ингибирующем воздействии высоких доз наночастиц на развитие микроорганизмов.

Результаты экспериментального исследования по влиянию различной концентрации наночастиц CuO на параметры роста микроорганизмов – максимальную скорость роста μ_m , время задержки роста λ и максимальный диаметр колоний A – и их изменение при температуре $T=15^\circ\text{C}$ представлены в табл. 2. Контрольный образец без добавок наночастиц $(\text{CuO})=0.00\%$ демонстрирует самую высокую скорость роста — 0.202 мм/ч. По мере повышения концентрации наночастиц скорость роста резко падает вплоть до уровня значений $\mu_m = 0.04$ мм/ч и находится на этом уровне при всех рассматриваемых концентрациях $(\text{CuO}) \geq 0.05\%$. Важно отметить, что разница в параметре максимальной скорости роста μ_m среди образцов с добавками практически отсутствует, несмотря на различия в содержании наночастиц. В контроле $(\text{CuO}) = 0.00\%$ время задержки λ минимально – 128 ч. После введения небольших количеств наночастиц $(\text{CuO}) = 0.05\%$ время задержки λ резко увеличивается почти в два раза, достигая значения 16 ч. При дальнейшем увеличении концентрации (CuO) до 0.10% и выше время задержки λ вновь возрастает до величин порядка 248 и 255 ч соответственно. Без добавления наночастиц $(\text{CuO}) = 0.00\%$ колонии достигают наибольшего среднего диаметра – 79 мм. Уже при небольшой

концентрации (CuO) = 0.05% диаметр существенно уменьшается до 20 мм. Дальнейшее увеличение концентрации (CuO) приводит к снижению диаметра колоний до низких значений: около 7 мм при концентрации (CuO) = 0.20% и 11 мм в случае (CuO) = 0.25%.

В табл. 2 рассматривается влияние различных концентраций наночастиц CuO на параметры роста микроорганизмов μ_m , λ и A и их изменение на основе экспериментальных данных при температуре $T=28^\circ\text{C}$. Контрольный образец без наночастиц (CuO) = 0.00% проявляет наибольшую скорость роста – 0.19 мм/ч. Добавление уже небольших количеств наночастиц CuO в количестве 0.05% вызывает резкое падение скорости роста – до 0.11 мм/ч. Дальнейшее увеличение концентрации (CuO) = 0.10% еще сильнее снижает скорость роста вплоть до 0.06 мм/ч. При более высоких концентрациях (CuO) = 0.20 и 0.25% скорость роста несколько возрастает до значения 0.09 мм/ч для каждого из образцов, хотя и остается значительно ниже контрольного значения, зафиксированного для образца (CuO) = 0.00%. В контрольном образце (CuO) = 0.00% время задержки равно 62 ч. Небольшие количества наночастиц (CuO) = 0.05% несколько снижают время задержки до 58 ч. Повышение концентрации до (CuO) = 0.10% значительно сокращает время задержки до 28 ч. Но при еще больших концентрациях (CuO) = 0.20% и (CuO) = 0.25% время задержки резко возрастает до 99 и 162 ч соответственно. При отсутствии наночастиц (CuO) = 0.00% колонии имеют наибольший диаметр – 77 мм. При низкой концентрации (CuO) = 0.05% диаметр немного снижается до 59 мм. Увеличение концентрации до среднего значения (CuO) = 0.10% приводит к уменьшению среднего диаметра колоний до 36 мм. Несмотря на некоторое увеличение скорости роста при более высоких концентрациях (CuO) = 0.20% и (CuO) = 0.25%, средний диаметр колоний изменяется незначительно: $A = 32$ мм для (CuO) = 0.20 и $A = 33$ мм для (CuO) = 0.25%.

Обобщив полученные результаты, можно сделать вывод, что низкотемпературные условия способствуют достижению минимально возможных скоростей роста и максимально возможных времен задержки роста. Наличие наночастиц в небольших количествах улучшает эти показатели, особенно при умеренных температурах. Однако дальнейшее увеличение концентрации наночастиц при высокой температуре не приводит к получению требуемых характеристик роста, что делает необходимым выбор некоторого оптимума между скоростью роста и временем задержки роста.

Заключение

Исследование зависимости скорости роста колоний микроорганизмов *Penicillium chrysogenum* от концентрации наночастиц оксида меди (II) и температуры окружающей среды проводилось с целью разработки эффективных методов защиты полимерных композиционных материалов от биологической коррозии. Результаты экспериментального исследования показали зависимость скорости роста колоний микроорганизмов *Penicillium chrysogenum* от концентрации наночастиц оксида меди (II) и температуры окружающей среды. Установлено, что увеличение концентрации наночастиц CuO ведет к сильному торможению роста колоний, особенно при средних и высоких концентрациях. Оптимизация концентраций наночастиц позволила выявить четкую тенденцию: при низких концентрациях (до 0.10%) рост

колоний существенно замедлялся, а при высоких концентрациях (более 0.20%) наблюдалось практически полное прекращение роста микроорганизмов. Температурный фактор оказывал существенное влияние на характеристики роста колоний. Низкая температура (4°C) приводила к замедлению роста и увеличению времени задержки роста, в то время как повышение температуры ускоряло рост и сокращало лаг-фазу.

Анализ экспериментальных данных показал хорошую корреляцию с математической моделью роста на основе логистической функции. Коэффициенты детерминации (R^2) имели высокие значения, подтверждающие точность предложенной модели. Установлено, что оптимальная концентрация наночастиц оксида меди(II) должна находиться в диапазоне 0.10–0.20%. По всей видимости, выбор значений концентрации на таком уровне позволит обеспечить эффективное предотвращение роста микроорганизмов и продлить сроки службы полимерных композиционных материалов. Проведенное исследование подтверждает целесообразность использования наночастиц оксида меди (II) в качестве эффективного биоцидного компонента борьбы с биокоррозией полимерных композитов, особенно в условиях холодного климата и вечной мерзлоты.

Список источников

1. Bukvic M., Milojevic S., Gajevic S., Dordevic M., Stojanovic B. Production technologies and application of polymer composites in engineering: A Review // *Polymers*. 2025. V. 17 (16). Art. 2187. doi: 10.3390/polym17162187
2. Wang Y., Ding Y., Yu K., Dong G. Innovative polymer-based composite materials in additive manufacturing: A review of methods, materials, and applications // *Polymer composites*. 2024. V. 45 (17). P. 15389–15420. doi: 10.1002/pc.28854
3. Brebu M. Environmental degradation of plastic composites with natural fillers – A Review // *Polymers*. 2020. V. 12 (1). Art. 166. doi: 10.3390/polym12010166
4. Jawar V. Designing composite materials for extreme environments: Aerospace and beyond // *Journal of Nanosciences: Current Research*. 2024. V. 9. Art. 261. doi: 10.37421/2572-0813.2024.9.261
5. Korku M., Ilhan R., Feyzullahoglu E. Investigation of effects of environmental conditions on wear behaviors of glass fiber reinforced polyester composite materials // *Polymer Composites*. 2024. V. 46 (1). P. 355–371. doi: 10.1002/pc.28992
6. Zhang X., Yin Z., Xiang S., Yan H., Tian H. Degradation of Polymer Materials in the Environment and Its Impact on the Health of Experimental Animals: A Review // *Polymers*. 2024. V. 16 (19). Art. 2807. doi: 10.3390/polym16192807
7. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K., Polyakov V.V. Effects of cold climates on polymer composite material properties // *Procedia Structural Integrity*. 2020. V. 30. P. 76–81. doi: 10.1016/j.prostr.2020.12.013
8. Lukachevkaya I.G., Lebedev M.P., Struchkov N.F. Effect of the Environment on the Properties of Polymer Composite Materials // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2021. V. 55. P. 1041–1044. doi: 10.1134/S0040579521050109
9. Petrov M.G., Lebedev M.P., Startsev O.V., Kopyrin M.M. Effect of Low Temperatures and Moisture on the Strength Performance of Carbon Fiber Reinforced Plastic // *Doklady Physical Chemistry*. 2021. V. 500. P. 85–91. doi: 10.1134/S0012501621090037
10. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of Basalt Plastics in Open Climatic Conditions // *Polymer Science. Series D*. 2022. V. 15. P. 101–109. doi: 10.1134/S1995421222010191
11. Haktaniyan M., Bradley M. Polymers showing intrinsic antimicrobial activity // *Chemical Society Reviews*. 2022. V. 51. P. 8584–8611. DOI: 10.1039/D2CS00558A

12. Chen A., Peng H., Blakey I., Whittaker A.K. Biocidal Polymers: A Mechanistic Overview // *Polymer Reviews*. 2016. V. 57 (2). P. 276–310. doi: 10.1080/15583724.2016.1223131
13. Glaser J.A. Biological Degradation of Polymers in the Environment // *Plastics in the Environment* / ed. by. A. Gomiero. IntechOpen, 2019. doi: 10.5772/intechopen.85124. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/66340>
14. Olmos D., Gonzalez-Benito J. Polymeric Materials with Antibacterial Activity: A Review // *Polymers*. 2021. V. 13 (4). Art. 613. doi: 10.3390/polym13040613
15. Bryaskova R., Philipova N., Bakov V., Georgiev N. Innovative Antibacterial Polymer Coatings // *Applied Sciences*. 2025. V. 15 (4). Art. 1780. doi: 10.3390/app15041780
16. Santos M.R.E., Fonseca A.C., Mendonca P.V., Branco R., Serra A.C., Morais P.V., Coelho J.F.J. Recent Developments in Antimicrobial Polymers: A Review // *Materials*. 2016. V. 9 (7). Art. 599. doi: 10.3390/ma9070599
17. Starkova O., Gagani A.I., Karl C.W., Rocha I.B.C.M., Burlakovs J., Krauklis A.E. Modelling of Environmental Ageing of Polymers and Polymer Composites—Durability Prediction Methods // *Polymers*. 2022. V. 14 (5). Art. 907. doi: 10.3390/polym14050907
18. Dintcheva N.T. Overview of polymers and biopolymers degradation and stabilization towards sustainability and materials circularity // *Polymer*. 2024. V. 306. Art. 127136. doi: 10.1016/j.polymer.2024.127136
19. Rossetti I., Conte F., Ramis G. Kinetic Modelling of Biodegradability Data of Commercial Polymers Obtained under Aerobic Composting Conditions // *Eng*. 2021. V. 2 (1). P. 54–68. doi: 10.3390/eng2010005
20. Baldera-Moreno Y., Pino V., Farres A., Banerjee A., Gordillo F., Andler R. Biotechnological Aspects and Mathematical Modeling of the Biodegradation of Plastics under Controlled Conditions // *Polymers*. 2022. V. 14 (3). Art. 375. doi: 10.3390/polym14030375
21. Andreia da Silva S., Faccin D.J.L., Cardozo N.S.M. A Kinetic-Based Criterion for Polymer Biodegradability Applicable to Both Accelerated and Standard Long-Term Composting Biodegradation Tests // *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2024. V. 12 (32). P. 11856–11865. doi: 10.1021/acssuschemeng.3c03837
22. Pedreira A., Vazquez J.A., Garcia M.R. Kinetics of Bacterial Adaptation, Growth, and Death at Didecylidimethylammonium Chloride sub-MIC Concentrations // *Frontiers in Microbiology*. 2022. V. 13. Art. 758237. doi: 10.3389/fmicb.2022.758237
23. Peleg M. Selected challenges to modeling the kinetics of microbial inactivation and chemical reactions during food preservation // *Current Opinion in Food Science*. 2023. V. 51. Art. 101029. doi: 10.1016/j.cofs.2023.101029
24. Peleg M. Modeling the dynamic kinetics of microbial disinfection with dissipating chemical agents – a theoretical investigation // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2021. V. 105. P. 539–549. doi: 10.1007/s00253-020-11042-8
25. Liu M., Bauman L., Nogueira C.L., Aucoin M.G., Anderson W.A., Zhao B. Antimicrobial polymeric composites for high-touch surfaces in healthcare applications // *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 2022. V. 22. Art. 100395. doi: 10.1016/j.cobme.2022.100395
26. Sikora P., Augustyniak A., Cendrowski K., Nawrotek P., Mijowska E. Antimicrobial Activity of Al₂O₃, CuO, Fe₃O₄, and ZnO Nanoparticles in Scope of Their Further Application in Cement-Based Building Materials // *Nanomaterials*. 2018. V. 8. Art. 212. doi: 10.3390/nano8040212
27. Jędrzejczak P., Lawniczak L., Słosarczyk A., Kłapiszewski L. Physicomechanical and Antimicrobial Characteristics of Cement Composites with Selected Nano-Sized Oxides and Binary Oxide Systems // *Materials*. 2022. V. 15. Art. 661. doi: 10.3390/ma15020661
28. Słosarczyk A., Kłapiszewska I., Parus A., Balicki S., Kornaus K., Gapinski B., Wieczorowski M., Wilk K.A., Jesionowski T., Kłapiszewski L. Antimicrobial action and chemical and physical properties of CuO-doped engineered cementitious composites // *Scientific Reports*. 2023. V. 13. Art. 10404. doi: 10.1038/s41598-023-37673-1
29. Styszko K., Kupiec K. The rate of biocide leaching from porous renders // *Chemical Engineering Research and Design*. 2018. V. 132. P. 69–76. doi: 10.1016/j.cherd.2017.12.047

30. Erich S.J.F., Baukh V. Modelling biocide release based on coating properties // *Progress in Organic Coatings*. 2016. V. 90. P. 171–177. doi: 10.1016/j.porgcoat.2015.10.009
31. Zwietering M.H., Jongenburger I., Rombouts F.M., Van't Riet K. Modeling of the Bacterial Growth Curve // *Applied and Environmental Microbiology*. 1990. V. 56 (6). P. 1875–1881. doi: 10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990
32. Gudkov S.V., Burmistrov D.E., Fomina P.A., Validov S.Z., Kozlov V.A. Antibacterial Properties of Copper Oxide Nanoparticles (Review) // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. V. 25 (21). Art. 11563. doi: 10.3390/ijms252111563

References

1. Bukvic M., Milojevic S., Gajevic S., Dordevic M., Stojanovic B. (2025) Production technologies and application of polymer composites in engineering: A Review. *Polymers*. 17(16). p. 2187. DOI: 10.3390/polym17162187.
2. Wang Y., Ding Y., Yu K., Dong G. (2024) Innovative polymer-based composite materials in additive manufacturing: A review of methods, materials, and applications. *Polymer Composites*. 45(17). pp. 15389–15420. DOI: 10.1002/pc.28854.
3. Brebu M. (2020) Environmental degradation of plastic composites with natural fillers – A Review. *Polymers*. 12(1). 166. DOI: 10.3390/polym12010166.
4. Jawar V. (2024) Designing composite materials for extreme environments: Aerospace and beyond. *Journal of Nanosciences: Current Research*. 9. 261. DOI: 10.37421/2572-0813.2024.9.261.
5. Korku M., Ilhan R., Feyzullahoglu E. (2024) Investigation of effects of environmental conditions on wear behaviors of glass fiber reinforced polyester composite materials. *Polymer Composites*. 46(1). pp. 355–371. DOI: 10.1002/pc.28992.
6. Zhang X., Yin Z., Xiang S., Yan H., Tian H. (2024) Degradation of polymer materials in the environment and its impact on the health of experimental animals: A Review. *Polymers*. 16(19). 2807. DOI: 10.3390/polym16192807.
7. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K., Polyakov V.V. (2020) Effects of cold climates on polymer composite material properties. *Procedia Structural Integrity*. 30. pp. 76–81. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.013.
8. Lukachevkaya I.G., Lebedev M.P., Struchkov N.F. (2021) Effect of the environment on the properties of polymer composite materials. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 55. pp. 1041–1044. DOI: 10.1134/S0040579521050109.
9. Petrov M.G., Lebedev M.P., Startsev O.V., Kopyrin M.M. (2021) Effect of low temperatures and moisture on the strength performance of carbon fiber reinforced plastic. *Doklady Physical Chemistry*. 500. pp. 85–91. DOI: 10.1134/S0012501621090037.
10. Startsev O.V., Lebedev M.P. Kychkin A.K. (2022) Aging of basalt plastics in open climatic conditions. *Polymer Science, Series D*. 15. pp. 101–109. DOI: 10.1134/S1995421222010191.
11. Haktaniyan M., Bradley M. (2022) Polymers showing intrinsic antimicrobial activity. *Chemical Society Reviews*. 51. pp. 8584–8611. DOI: 10.1039/D2CS00558A.
12. Chen A., Peng H., Blakey I., Whittaker A.K. (2016) Biocidal polymers: A mechanistic overview. *Polymer Reviews*. 57(2). pp. 276–310. DOI: 10.1080/15583724.2016.1223131.
13. Glaser J.A. (2019) Biological degradation of polymers in the environment. *Plastics in the Environment*: IntechOpen, DOI: 10.5772/intechopen.85124. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/66340>.
14. Olmos D., Gonzalez-Benito J. (2021) Polymeric materials with antibacterial activity: A review. *Polymers*. 13(4). p. 613. DOI: 10.3390/polym13040613.
15. Bryaskova R., Philipova N., Bakov V., Georgiev N. (2025) Innovative antibacterial polymer coatings. *Applied Sciences*. 15(4). p. 1780. DOI: 10.3390/app15041780.

16. Santos M.R.E., Fonseca A.C., Mendonca P.V., Branco R., Serra A.C., Morais P.V., Coelho J.F.J. (2016) Recent developments in antimicrobial polymers: A review. *Materials*. 9(7). p. 599. DOI: 10.3390/ma9070599.
17. Starkova O., Gagani A.I., Karl C.W., Rocha I.B.C.M., Burlakovs J., Krauklis A.E. (2022) Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites—durability prediction methods. *Polymers*. 14(5). p. 907. DOI: 10.3390/polym14050907.
18. Dintcheva N.T. (2024) Overview of polymers and biopolymers degradation and stabilization towards sustainability and materials circularity. *Polymer*. 306. p. 127136. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127136.
19. Rossetti I., Conte F., Ramis G. (2021) Kinetic modelling of biodegradability data of commercial polymers obtained under aerobic composting conditions. *Eng.* 2(1). pp. 54–68. DOI: 10.3390/eng2010005.
20. Baldera-Moreno Y., Pino V., Farres A., Banerjee A., Gordillo F., Andler R. (2022) Biotechnological aspects and mathematical modeling of the biodegradation of plastics under controlled conditions. *Polymers*. 14. p. 375. DOI: 10.3390/polym14030375.
21. Andreia da Silva S., Faccin D.J.L., Cardozo N.S.M. (2024) A kinetic-based criterion for polymer biodegradability applicable to both accelerated and standard long-term composting biodegradation tests. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 12(32). pp. 11856–11865. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c03837.
22. Pedreira A., Vazquez J.A., Garcia M.R. (2022) Kinetics of bacterial adaptation, growth, and death at didecyldimethylammonium chloride sub-MIC concentrations. *Frontiers in Microbiology*. 13. p. 758237. DOI: 10.3389/fmicb.2022.758237.
23. Peleg M. (2023) Selected challenges to modeling the kinetics of microbial inactivation and chemical reactions during food preservation. *Current Opinion in Food Science*. 51. p. 101029. DOI: 10.1016/j.cofs.2023.101029.
24. Peleg M. (2021) Modeling the dynamic kinetics of microbial disinfection with dissipating chemical agents – a theoretical investigation. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 105. pp. 539–549. DOI: 10.1007/s00253-020-11042-8.
25. Liu M., Bauman L., Nogueira C.L., Aucoin M.G., Anderson W.A., Zhao B. (2022) Antimicrobial polymeric composites for high-touch surfaces in healthcare applications. *Current Opinion in Biomedical Engineering*. 22. p. 100395. DOI: 10.1016/j.cobme.2022.100395.
26. Sikora P., Augustyniak A., Cendrowski K., Nawrotek P., Mijowska E. (2018) Antimicrobial activity of Al₂O₃, CuO, Fe₃O₄, and ZnO nanoparticles in scope of their further application in cement-based building materials. *Nanomaterials*. 8. p. 212. DOI: 10.3390/nano8040212.
27. Jędrzejczak P., Ławniczak Ł., Ślosarczyk A., Kłapiszewski Ł. (2022) Physicomechanical and antimicrobial characteristics of cement composites with selected nano-sized oxides and binary oxide systems. *Materials*. 15. p. 661. DOI: 10.3390/ma15020661.
28. Ślosarczyk A., Kłapiszewska I., Parus A., Balicki S., Kornaus K., Gapiński B., Wieczorowski M., Wilk K.A., Jesionowski T., Kłapiszewski Ł. (2023) Antimicrobial action and chemical and physical properties of CuO-doped engineered cementitious composites. *Scientific Reports*. 13. p. 10404. DOI: 10.1038/s41598-023-37673-1.
29. Styszko K., Kupiec K. (2018) The rate of biocide leaching from porous renders. *Chemical Engineering Research and Design*. 132. pp. 69–76. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.12.047.
30. Erich S.J.F., Baukh V. (2016) Modelling biocide release based on coating properties. *Progress in Organic Coatings*. 90. pp. 171–177. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.10.009.
31. Zwietering M.H., Jongenburger I., Rombouts F.M., Van't Riet K. (1990) Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*. 56(6). pp. 1875–1881. DOI: 10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990.
32. Gudkov S.V., Burmistrov D.E., Fomina P.A., Validov S.Z., Kozlov V.A. (2024) Antibacterial properties of copper oxide nanoparticles (Review). *International Journal of Molecular Sciences*. V. 25(21). p. 11563. DOI: 10.3390/ijms252111563.

Сведения об авторах:

Бондарчук Иван Сергеевич – инженер лаборатории проблем опасных космических объектов физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ivanich_91@mail.ru

Герасимчук Анна Леонидовна – заведующая лабораторией промышленной микробиологии Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: gerasimchuk_ann@mail.ru

Глухова Любовь Борисовна – научный сотрудник лаборатории биохимии и молекулярной биологии Биологического института Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: glb122@yandex.ru

Марченко Екатерина Сергеевна – доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией сверхэластичных биоинтерфейсов Научного управления Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: 89138641814@mail.ru

Кычкин Айсен Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории композиционных материалов Арктики и Субарктики Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр» Сибирского отделения Российской академии наук (ФИЦ ЯНЦ СО РАН) (Якутск, Россия). E-mail: icen.kychkin@mail.ru

Кычкин Анатолий Константинович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела № 40 Материаловедение Института физико-технических проблем СО РАН им. В.П. Ларионова ФИЦ ЯНЦ СО РАН (Якутск, Россия). E-mail: kychkinplasma@mail.ru

Information about the authors:

Bondarchuk Ivan S. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ivanich_91@mail.ru

Gerasimchuk Anna L. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: gerasimchuk_ann@mail.ru

Glukhova Lyubov B. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: glb122@yandex.ru

Marchenko Ekaterina S. (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: 89138641814@mail.ru

Kychkin Aisen A. (Federal Research Center “Yakut Scientific Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC YaSC SB RAS), Yakutsk, Russian Federation). E-mail: icen.kychkin@mail.ru

Kychkin Anatoly K. (V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the Federal Research Center “Yakut Scientific Center” of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (FRC YaSC SB RAS), Yakutsk, Russian Federation). E-mail: kychkinplasma@mail.ru

The article was submitted 21.10.2025; accepted for publication 08.12.2025

Статья поступила в редакцию 21.10.2025; принята к публикации 08.12.2025