Научная статья
УДК 504.064.2:338.439.4
doi:10.35694/YARCX.2025.69.1.008

РАЗРАБОТКА БИОРАЗЛАГАЕМЫХ ПОКРЫТИЙ КАК СПОСОБ ФИКСАЦИИ УДОБРЕНИЯ В ПОЧВЕ

Алена Константиновна Горелкина[1], Иван Владимирович Яковлев[2], Дмитрий Егорович Гвоздев[3]
[1, 2, 3]Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия
[1]alengora@yandex.ru, ORCID 0000-0002-3782-2521
[2]yak0v.iv@yandex.ru, ORCID 0009-0001-7820-5407
[3]alengora@yandex.ru

Реферат. В последние десятилетия проблема загрязнения окружающей среды вследствие интенсивного сельскохозяйственного производства становится всё более актуальной. Традиционные методы внесения удобрения часто ведут к превышению норм их применения. Экологический аспект превышения расхода удобрений связан с их попаданием в экосистему. Одно из эффективных и экологически безопасных технических решений для агрономии – это биоразлагаемое покрытие, которое способно минимизировать потери удобрений, повысить их усвояемость растениями и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Целью работы является исследование материалов, применяемых в качестве биоразлагаемых плёнок, обеспечивающих фиксирование и медленное высвобождение удобрений в почве. Рассмотрен различный состав полимерного покрытия, конструкция, а также предложена математическая модель процесса разложения покрытия с учётом различных факторов окружающей среды. Анализ биоматериалов и применение методов математического моделирования позволили разработать математическую модель с широкой вариативностью, учитывающей климатические факторы (температуру (T), влажность (H), осадки (P), солнечную радиацию (S)), которые влияют на скорость биоразложения. Результаты исследования демонстрируют, что предложенное покрытие и разработанная модель могут стать основой для создания экологически безопасных решений в сельском хозяйстве.

Ключевые слова: *полимерные материалы, биоразлагаемые покрытия, удобрения, почва, фиксация в почве*

DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE COATINGS AS A WAY OF FERTILIZER FIXATION IN SOIL

Alena K. Gorelkina[1], Ivan V. Yakovlev[2], Dmitriy E. Gvozdev[3]
[1, 2, 3]Kemerovo State University, Kemerovo, Russia
[1]alengora@yandex.ru, ORCID 0000-0002-3782-2521
[2]yak0v.iv@yandex.ru, ORCID 0009-0001-7820-5407
[3]alengora@yandex.ru

Abstract. In recent decades, the problem of environmental pollution due to intensive agricultural production has become increasingly actual. Traditional fertilization methods often lead to exceeding the rates of their application. The environmental aspect of excess fertilizer consumption is associated with their penetration the ecosystem. One of the effective and environmentally friendly technical solutions for agronomy is a biodegradable coating that can minimize fertilizer losses, increase their digestibility by plants and reduce negative environmental impacts. The purpose of the work is to study materials used as biodegradable films that provide fixation and slow release of fertilizers in the soil. Various polymer coating composition, design are considered, and a mathematical model of the coating decomposition process is proposed taking into account various environmental factors. The analysis of biomaterials and the use of mathematical modeling methods allowed to develop a mathematical model with wide variability taking into account climatic factors (temperature (T), humidity (H), precipitation (P), solar radiation (S)), which affect the rate of biodegradation. The results of the study demonstrate that the proposed coating and the developed model can become the basis for creating environmentally friendly solutions in agriculture.

Keywords: *polymer materials, biodegradable coatings, fertilizers, soil, fixation in soil*

Введение. Одной из актуальных проблем современного сельского хозяйства является повышение эффективности использования органических и минеральных удобрений. Из-за вымывания или иных путей значительная часть вносимых удобрений теряется, что снижает их усвоение растениями, ведёт к загрязнению окружающей среды и ухудшению почвенного плодородия.

Направлением решения данной проблемы является разработка биоразлагаемых покрытий, способных контролировать высвобождение питательных веществ из удобрений. Покрытие представляет собой биоразлагаемые природные материалы и синтетические полимеры с удобрением внутри.

Применение удобрений сопровождается рядом проблем [1–3]:

1. Контаминация водоёмов. Избыточное использование удобрений приводит к вымыванию питательных веществ, таких как азот и фосфор, что может вызвать эвтрофикацию водоёмов.

2. Потеря удобрений через испарение и вымывание. Удобрения могут быстро вымываться из почвы, что приводит к необходимости их повторного применения или увеличение порции внесения.

3. Негативное воздействие на биосистемы. Избыточное применение удобрений может угнетать микробиологическую активность и разнообразие почвенных организмов.

Исходя из вышеперечисленных проблем, удержание (фиксация) удобрения в почве является серьёзной проблемой для АПК и окружающей среды. Наиболее значимыми составляющими потерь удобрений являются их вымывание из почвы и экологический аспект, обусловленный попаданием удобрения в поверхностные и грунтовые воды [4].

Основной целью работы является исследование материалов, применяемых в качестве биоразлагаемых плёнок – эффективных и экологически безопасных технических решений для агрономии, которые способны минимизировать потери удобрений, повысить их усвояемость растениями и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

Одной из важнейших составляющих новизны данных разработок является использование биоразлагаемых материалов, обладающих свойством разлагаться в процессе времени без ущерба для экосистемы. Это позволяет обеспечивать постепенное высвобождение удобрений в почву по мере деградации покрытия, что, в свою очередь, значительно увеличивает их эффективность использования и снижает риск загрязнения водных ресурсов. Кроме того, исследования сосредоточены на оптимизации состава биоразлагаемых покрытий, учитывающей различные взаимодействия между материалами и типами удобрений, а также изменяющиеся условия окружающей среды.

При разработке биоразлагаемого покрытия акцент будет сделан на сельскохозяйственных культурах, таких как зерновые (например, пшеница, кукуруза), овощи (например, картофель). Эти культуры требуют применения удобрений для достижения высоких урожаев и имеют большое экономическое значение, что делает их приоритетными объектами для исследований в данной области.

Таким образом, результаты проводимых исследований направлены на решение актуальных задач устойчивого развития сельского хозяйства, включая снижение расходов химических удобрений и минимизацию экологических рисков, связанных с их использованием.

Материалы и методы. В данном исследовании применяется аналитический метод для разработки биоразлагаемого материала, а также математическое моделирование для исследования и описания процессов.

Рассматриваются различные типы биоматериалов для создания биоразлагаемого покрытия. Основные группы материалов:

1. Природные полимеры – крахмал. Он является биодеградируемым, что уменьшает загрязнение окружающей среды. Покрытие на основе крахмала может замедлять высвобождение удобрений, обеспечивая их постепенное усвоение растениями. Это позволяет снизить риск вымывания удобрений в подземные воды и уменьшить потребность в их частом применении. Крахмальные плёнки обладают хорошей механической прочностью и гибкостью, что делает их подходящими для создания оболочек [5].

2. Хитозан может защищать растения от патогенов благодаря своим антибактериальным свойствам, что улучшает здоровье растений. Этот полимер проявляет высокую биосовместимость, что делает его безопасным для использования в сельском хозяйстве. Хитозан может использоваться для создания покрытий, которые обеспечивают контролируемое и постепенное высвобождение удобрений [6].

3. Синтетические полимеры:

– Полиэтиленгликоль (ПЭГ). Его проницаемость может изменяться в ответ на изменения температуры и влажности, что даёт возможность контролировать высвобождение питательных веществ в различных условиях. Благодаря гидрофильной природе ПЭГ, такие покрытия могут способствовать удержанию влаги в почве и улучшению усвоения питательных веществ растениями [7].

– Лактатные полимеры на основе молочной кислоты. Быстро разлагаются в природе, что делает их идеальными в качестве основы для

покрытия. После выполнения своей функции они распадаются на безвредные продукты, такие как углекислый газ и вода. Оболочки, созданные с использованием лактатных полимеров, могут обеспечить защиту удобрений от неблагоприятных условий окружающей среды до тех пор, пока они не будут необходимы для растений [8].

В состав структурированного покрытия входят следующие основные компоненты:

– активное вещество – удобрение, необходимое для высвобождения в почву и зависящее от культуры [9];

– биоразлагаемое полимерное покрытие – это оболочка, которая обволакивает удобрение (материалы, подходящие для создания покрытия, могут быть такие, как: полисахариды (крахмал, целлюлоза), полиэфиры (ПГА – полигидроксиалканоаты), белки (желатин, казеин)). Актуальным является также поиск альтернативных материалов и разработка биоразлагаемых покрытий в качестве альтернативы полиэтилену [10; 11].

Таким образом, использование природных и синтетических полимеров не только обеспечивает защиту удобрений, но и создаёт основу для разработки более сложных покрытий. Покрытие может иметь различный состав, обладающий способностью к биодеградации. В результате, комбинируя синтетические полимеры с природными материалами, можно добиться более эффективного и контролируемого высвобождения питательных веществ, что является важным аспектом для устойчивого сельского хозяйства.

В составе разрабатываемого покрытия (оболочки) в качестве основы применяются природные полимеры [9], такие как полисахариды, полиэфиры или белки. Эти материалы постепенно разрушаются под действием микроорганизмов в почве, влаги, температуры и pH. Для ускорения данного процесса в покрытии нами предлагается использовать технологические отверстия для попадания влаги (рис. 1).

Основные функции биоразлагаемого покрытия:

– покрытия, образуемые полимерами, медленно разлагаются, позволяя удобрениям равномерно высвобождаться и поддерживать оптимальный уровень питательных веществ в почве;

– биоразлагаемое покрытие может защищать удобрения от внешних воздействий, таких как осадки и солнечное излучение, что также способствует сохранению удобрений в почве. Это достигается за счёт контролируемой скорости разложения полимерного материала под воздействием влаги, микроорганизмов и температурных условий.

Технологические отверстия в покрытии обеспечивают эффективное взаимодействие между оболочкой и окружающей средой. Отверстия выполняют следующие функции:

1. Увеличение проницаемости. Позволяют воздуху и влаге свободно проникать внутрь покрытия. Это способствует более равномерному распределению влаги и кислорода, необходимых для жизнедеятельности микроорганизмов, которые участвуют в процессе разложения полимеров.

2. Контроль высвобождения питательных веществ. Размер и расположение отверстий могут быть оптимизированы для достижения желаемой скорости высвобождения питательных веществ. Это позволяет более точно регулировать подачу удобрений в зависимости от потребностей растений и условий окружающей среды.

3. Снижение экологических рисков. Использование технологических отверстий позволяет контролировать уровень удобрений, что снижает риск их вымывания в водные ресурсы и минимизирует негативное воздействие на экосистему.

Обсуждение. Основной принцип работы такого покрытия заключается в постепенном, контролируемом высвобождении питательных веществ из плёнки в почву. Это происходит за счёт биоразложения полимерной оболочки под воздействием микроорганизмов и факторов окружающей среды.

Скорость биоразложения оболочки можно регулировать, меняя толщину покрытия, его состав и включая различные добавки. Это позволяет настраивать скорость высвобождения питательных веществ в соответствии с потребностями растений.

По мере разрушения оболочки, питательные вещества начинают постепенно высвобождаться в почву. Это обеспечивает длительное и равномерное питание растений.

В конечном итоге, вся полимерная оболочка полностью разрушается микроорганизмами [12], превращаясь в углекислый газ, воду и минеральные вещества, которые усваиваются почвой.

Для описания процесса разложения биоразлагаемого покрытия можно использовать уравнение, основанное на кинетике реакции:

$$\frac{dC}{dt} = -k\,(T,H)\cdot C^{n}, \qquad (1)$$

где C – концентрация полимера в покрытии, мг/дм^3; t – время, ч; k (T, H) – скорость реакции, зависящая от T и влажности H, см/ч; n – порядок реакции, n = 0, 1, 2, 3 или дробное значение.

Порядок реакции (n) – это сумма порядков всех исходных веществ в кинетическом уравнении реакции.

Реакции нулевого порядка – такие реакции, скорость которых не зависит от концентрации реагента.

Реакции первого порядка – реакции, скорость которых зависит от концентрации одного из веществ.

Реакции второго порядка – реакции, скорость которых зависит от концентрации двух веществ.

Скорость разложения полимеров будет описана через уравнение Аррениуса с учётом зависимости от влажности:

$$k\,(T,H) = A \cdot e^{\frac{Ea}{RT}} \cdot H^{m}, \qquad (2)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, который характеризует частоту столкновений реагирующих молекул; Ea – активированная энергия, Дж/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль*К; H – влажность, кг/м^3; m – коэффициент, учитывающий влияние влажности на скорость разложения.

Чтобы учитывать климатические условия, такие как осадки и солнечное излучение, вводятся дополнительные параметры в формулу (2):

$$k\,(T,H) = A \cdot e^{\frac{Ea}{RT}} \cdot H^{m} \cdot P \cdot S, \qquad (3)$$

где P – коэффициент, учитывающий количество осадков; S – коэффициент, учитывающий уровень солнечной радиации, который может ускорять фотодеградацию полимеров.

Данная модель предоставляет основу для количественного анализа разложения биоразлагаемого покрытия для удобрений. Предложенный подход позволяет учитывать влияние различных факторов, таких как температура, влажность и климатические условия.

Для практической реализации данной модели необходимо провести дополнительные эксперименты для валидации параметров и корректировки моделей для каждого типа полимера. Предложенное биоразлагаемое покрытие представлено на рисунке 1.

После изготовления покрытия (рис. 1) по необходимым параметрам для определённой культуры и размеров поля, производится технология укладки полотна, а именно:

– подготовка поля – тщательно обрабатывается и выравнивается для обеспечения равномерного распределения покрытия с удобрением. При необходимости проводится культивация или боронование для создания оптимальных условий;

– рулоны или плиты с полотном доставляются на поле и размещаются в соответствии с заданной схемой. Полотно раскатывается равномерно по поверхности поля, при этом стыки между полотнами тщательно соединяются;

– для фиксации полотна на поверхности могут использоваться специальные крепёжные элементы или грузы;

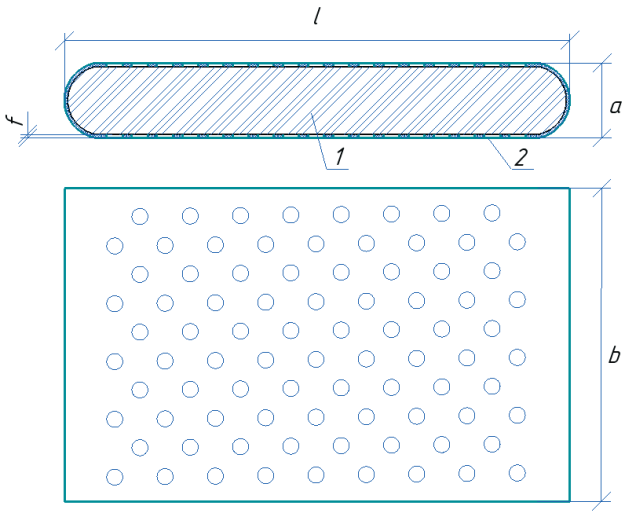
– после укладки полотно заделывается в почву на определённую глубину с помощью культиваторов, фрез или иных почвообрабатывающих орудий. Заделывание позволяет обеспечить плотный контакт полотна с почвой, что важно для эффективного высвобождения питательных веществ;

– в процессе и после укладки проводится тщательный контроль качества. Отслеживается равномерность распределения полотна, глубина заделки, сохранность целостности покрытия;

– осуществляется мониторинг высвобождения питательных веществ в течение сезона [13; 14].

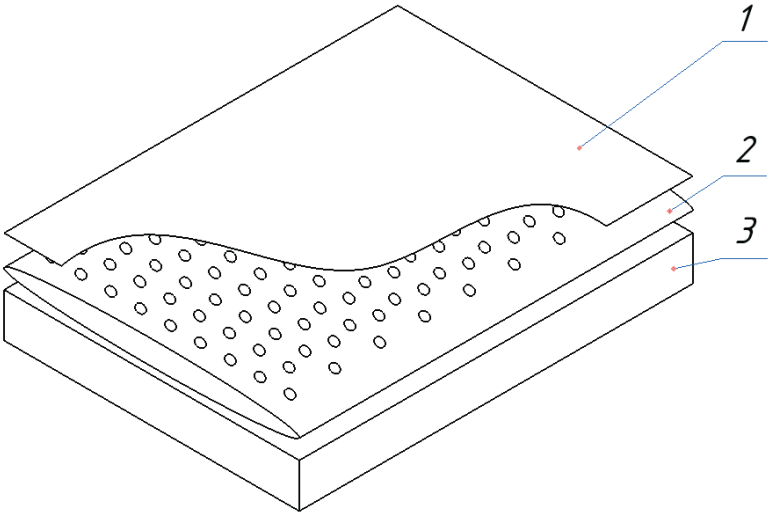
На рисунке 2 показана схема укладки полотна.

Выводы. Разработка эффективных биоразлагаемых покрытий является важным научно-



l – длина покрытия; a – толщина покрытия (оболочки); f – толщина слоя покрытия; b – ширина покрытия; 1 – активное вещество (удобрение); 2 – биоразлагаемое покрытие (оболочки).

Рисунок 1 – Биоразлагаемое покрытие с удобрением



1 – почва; 2 – биоразлагаемое покрытие с удобрением; 3 – грунт.

Рисунок 2 – Схема укладки полотна

техническим направлением, способным внести значительный вклад в повышение устойчивости сельскохозяйственного производства. В качестве основы для биоразлагаемых покрытий рассматриваются различные полисахариды (крахмал, целлюлоза, хитозан), полиэфиры (полигидроксиалканоаты), белки (желатин, казеин) и другие природные и синтетические полимеры. Активно ведутся исследования по разработке композитных материалов, включающих органические наполнители, биоактивные добавки, ферменты и другие функциональные компоненты.

Применение биоразлагаемых полимерных покрытий для удержания удобрений в почве открывает ряд перспектив:

– повышение эффективности использования питательных веществ растениями;

– снижение экологической нагрузки за счёт уменьшения потерь удобрений;

– улучшение качества почвы и её плодородия.

Математическое моделирование позволяет описать процесс разложения покрытия, что значительно сокращает время, затраченное на реальный эксперимент.

Данное предложенное покрытие и разработанная математическая модель подлежат практическому подтверждению. Исследования в этой области продолжаются, и их результаты будут способствовать созданию более эффективного и устойчивого покрытия.

Список источников

1. Узаков З. З., Халикова С., Эгамбердиев А. Экологические проблемы применения минеральных удобрений // Символ науки: международный научный журнал. 2018. №. 4. С. 35–38. EDN YUZLXN.

2. Дабахова Е. В., Питина И. А. Агроэкологические проблемы использования органических удобрений в сельском хозяйстве // Агрохимический вестник. 2017. №. 2. С. 10–14. EDN YKJSYJ.

3. Потетня К. М. Влияние химических удобрений на окружающую среду // Научно-технический вестник: Технические системы в АПК. 2022. №. 3-4 (15-16). С. 42–47. EDN CREPEC.

4. Таран А. Л., Долгалев Е. В., Холин А. Ю. Эколого-экономически эффективные технологии производства азотсодержащих минеральных удобрений, разработанные в МИТХТ // Вестник МИТХТ им. М. В. Ломоносова. 2008. Т. 3, №. 2. С. 31–34. EDN JSIHRF.

5. Подденежный Е. Н., Бойко А. А., Алексеенко А. А. [и др.] Прогресс в получении биоразлагаемых композиционных материалов на основе крахмала (обзор) // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2015. № 2 (61). С. 31–41. EDN UAOMGH.

6. Тасекеев М. С., Еремеева Л. М. Производство биополимеров как один из путей решения проблем экологии и АПК: аналит. обзор. Алматы : НЦ НТИ, 2009. С. 7.

7. Крюк Т. В., Михальчук В. М., Петренко Л. В. [и др.] Перспективные ингибиторы окисления полиэтиленгликоля в водных растворах // Химико-фармацевтический журнал. 2002. Т. 36, №. 1. С. 31–34. EDN SVVIUL.

8. Прибиль М. М. Высокоэффективные лактатные биосенсоры на основе инженерии иммобилизованной лактатоксидазы : дисс. … канд. хим. наук : 02.00.02 / ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова». М. : МГУ, 2015. 163 с.

9. Тимирбаева Г. Р. Биоразлагаемые полимеры: тенденции развития рынка // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 9. С. 724–727. EDN MWNMFP.

10. Крутько Э. Т., Прокопчук Н. Р., Глоба А. И. Технология биоразлагаемых полимерных материалов: учеб.-метод. пособие. Минск : БГТУ, 2014. 105 с.

11. Толстошеин Н. С., Пудовкин Д. А., Тебякин А. Д. Биоразлагаемые покрытия на основе полисахаридов // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. статей молодых ученых, аспирантов и студентов. Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», 2021. Т. XIII. С. 96–99. EDN WPQHAP.

12. Николаенко А. Н., Меньшикова С. А. Мелиоративный мониторинг почв, включая почвенные субстраты // Основные результаты научных исследований института за 2017 год : сб. науч. тр. М. : Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова, 2018. С. 266–274. EDN XTZOJN.

13. Majeed Z., Ramli N. K., Mansor N. [et al.] A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled-release fertilizer processes // Reviews in Chemical Engineering. 2015. Vol. 31, №. 1. P. 69–95. DOI 10.1515/revce-2014-0021.

14. Chen J., Lü S., Zhang Z. [et al.] Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 613–614. P. 829–839. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.09.186.

References

1. Uzakov Z. Z., Khalikova S., Egamberdiev A. Ekologicheskie problemy primeneniya mineral'nyh udobrenij // Simvol nauki: mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal. 2018. №. 4. S. 35–38. EDN YUZLXN.

2. Dabakhova E. V., Pitina I. A. Agroekologicheskie problemy ispol'zovaniya organicheskih udobrenij v sel'skom hozyajstve // Agrohimicheskij vestnik. 2017. №. 2. S. 10–14. EDN YKJSYJ.

3. Potetnya K. M. Vliyanie himicheskih udobrenij na okruzhayushchuyu sredu // Nauchno-tekhnicheskij vestnik: Tekhnicheskie sistemy v APK. 2022. №. 3-4 (15-16). S. 42–47. EDN CREPEC.

4. Taran A. L., Dolgalev E. V., Kholin A. Yu. Ekologo-ekonomicheski effektivnye tekhnologii proizvodstva azotsoderzhashchih mineral'nyh udobrenij, razrabotannye v MITHT // Vestnik MITHT im. M. V. Lomonosova. 2008. T. 3, №. 2. S. 31–34. EDN JSIHRF.

5. Poddenezhnyj E. N., Bojko A. A., Alekseenko A. A. [i dr.] Progress v poluchenii biorazlagaemyh kompozicionnyh materialov na osnove krahmala (obzor) // Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. P. O. Sukhogo. 2015. № 2 (61). S. 31–41. EDN UAOMGH.

6. Tasekeev M. S., Eremeeva L. M. Proizvodstvo biopolimerov kak odin iz putej resheniya problem ekologii i APK: analit. obzor. Almaty : NC NTI, 2009. S. 7.

7. Kryuk T. V., Mikhal'chuk V. M., Petrenko L. V. [i dr.] Perspektivnye ingibitory okisleniya polietilenglikolya v vodnyh rastvorah // Himiko-farmacevticheskij zhurnal. 2002. T. 36, №. 1. S. 31–34. EDN SVVIUL.

8. Pribil' M. M. Vysokoeffektivnye laktatnye biosensory na osnove inzhenerii immobilizovannoj laktatoksidazy : diss. … kand. him. nauk : 02.00.02 / FGBOU VO «Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M. V. Lomonosova». M. : MGU, 2015. 163 s.

9. Timirbaeva G. R. Biorazlagaemye polimery: tendencii razvitiya rynka // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2010. № 9. S. 724–727. EDN MWNMFP.

10. Krut'ko E. T., Prokopchuk N. R., Globa A. I. Tekhnologiya biorazlagaemyh polimernyh materialov: ucheb.-metod. posobie. Minsk : BGTU, 2014. 105 s.

11. Tolstoshein N. S., Pudovkin D. A., Tebyakin A. D. Biorazlagaemye pokrytiya na osnove polisaharidov // Problemy tekhnogennoj bezopasnosti i ustojchivogo razvitiya : sb. nauch. statej molodyh uchenyh, aspirantov i studentov. Tambov : Izdatel'skij centr FGBOU VO «Tambovskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet», 2021. T. XIII. S. 96–99. EDN WPQHAP.

12. Nikolaenko A. N., Men'shikova S. A. Meliorativnyj monitoring pochv, vklyuchaya pochvennye substraty // Osnovnye rezul'taty nauchnyh issledovanij instituta za 2017 god : sb. nauch. tr. M. : Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut gidrotekhniki i melioracii imeni A. N. Kostyakova, 2018. S. 266–274. EDN XTZOJN.

13. Majeed Z., Ramli N. K., Mansor N. [et al.] A comprehensive review on biodegradable polymers and their blends used in controlled-release fertilizer processes // Reviews in Chemical Engineering. 2015. Vol. 31, №. 1. P. 69–95. DOI 10.1515/revce-2014-0021.

14. Chen J., Lü S., Zhang Z. [et al.] Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment // Science of the Total Environment. 2018. Vol. 613–614. P. 829–839. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.09.186.

Сведения об авторах

Алена Константиновна Горелкина – доктор технических наук, профессор кафедры техносферной безопасности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», spin-код: 9970-1320.

Иван Владимирович Яковлев – аспирант, ассистент кафедры техносферной безопасности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет», spin-код: 9410-8678.

Дмитрий Егорович Гвоздев – аспирант кафедры техносферной безопасности, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кемеровский государственный университет».

Information about the authors

Alena K. Gorelkina – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Technosphere Security, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kemerovo State University", spin-code: 9970-1320.

Ivan V. Yakovlev – postgraduate student, Assistant of the Department of Technosphere Security, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kemerovo State University", spin-code: 9410-8678.

Dmitriy E. Gvozdev – postgraduate student of the Department of Technosphere Security, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Kemerovo State University".

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.