

ПОЛУЧЕНИЕ NPK- И NP(S)-УДОБРЕНИЙ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ НЕОРГАНИЧЕСКОГО УСВОЯЕМОГО ПОКРЫТИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ СВОЙСТВ

А.М. Норов, В.В. Соколов, Е.А. Рыбин, В.М. Лапушкин, Д.А. Пагалешкин, В.А. Владимиров

Андрей Михайлович Норов (ORCID 0009-0005-3100-6944)*, Валерий Васильевич Соколов (ORCID 0009-0001-0383-3943), Евгений Александрович Рыбин (ORCID 0009-0008-6136-0890), Денис Александрович Пагалешкин (ORCID 0009-0003-8652-5229), Владимир Александрович Владимиров (ORCID 0009-0006-3704-7146)

АО «Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова», Северное шоссе, 75, Череповец, Российская Федерация, 162625

E-mail: ANorov@phosagro.ru*, VVSokolov1@phosagro.ru, ERYbin@phosagro.ru, DPagalesh-kin@phosagro.ru, VAVladimirov@phosagro.ru

Всеволод Михайлович Лапушкин (ORCID 0000-0002-9773-2077)

Российский государственный аграрный университет МСХА им. К.А. Тимирязева, ул. Тимирязевская, 49, Москва, Российская Федерация, 127550

E-mail: lapushkin@rgau-msha.ru

Проведено исследование возможности получения удобрения с контролируемым высвобождением азота путем нанесения неорганической усвояемой оболочки монокальцийфосфата на гранулы азотсодержащих минеральных NPK- и NP(S)-удобрений. Показано, что в структуре полученных гранул четко выделяются ядро и защитная оболочка. Исследование гранул по фракциям показало, что нанесенная оболочка монокальцийфосфата равномерно распределяется по всей поверхности гранулы вне зависимости от фракции, а максимальное отклонение фактической толщины оболочки от расчетного значения составляет менее 10%. Сферичность полученных гранул также является одинаковой для всех фракций, при этом гранулы с покрытием являются более сферичными по сравнению с исходными образцами. При изучении физико-механических свойств полученных удобрений с покрытием монокальцийфосфата установлено, что они имеют более высокие потребительские качества по сравнению с традиционными минеральными удобрениями – характеризуются более низкой слеживаемостью и пылимостью, а также несколько более высокой прочностью гранул. Выявлена тенденция улучшения физико-механических качеств при увеличении толщины оболочки для исследованных значений. Изучение скорости высвобождения азота в лабораторных испытаниях показало, что применение монокальцийфосфата в качестве материала оболочки способно снизить скорость высвобождения элемента из удобрений и пролонгировать период действия удобрения по сравнению с непокрытыми образцами. Проведенные агрохимические испытания разработанных удобрений с покрытием показали увеличение урожайности зерна пшеницы на 10-18% и более эффективное использование азота из удобрения с покрытием по сравнению с исходными образцами (увеличение на 6-18%). Так же, как и для физико-механических свойств, отмечалось, что увеличение толщины оболочки в исследованном диапазоне улучшало агрохимическую эффективность полученных удобрений. Помимо этого, выявлено, что удобрения с покрытием монокальцийфосфата не уступают по агрономической эффективности удобрениям с ингибиторами нитрификации. Исследование динамики поглощения азота пшеницей доказало контролируемость высвобождения азота из полученных удобрений с оболочкой и возможность регулирования этого процесса с помощью изменения толщины оболочки.

Ключевые слова: удобрение пролонгированного действия, удобрение с покрытием, неорганическая оболочка, контролируемое высвобождение, монокальцийфосфат, физико-механические характеристики, повышенная эффективность

OBTAINING NPK AND NP(S) FERTILIZERS WITH LONG-RELEASE BY APPLYING AN INORGANIC DIGESTIBLE COATING AND STUDYING THEIR PROPERTIES

A.M. Norov, V.V. Sokolov, E.A. Rybin, V.M. Lapushkin, D.A. Pagaleshkin, V.A. Vladimirov

Andrey M. Norov (ORCID 0009-0005-3100-6944)*, Valeriy V. Sokolov (ORCID 0009-0001-0383-3943), Evgeniy A. Rybin (ORCID 0009-0008-6136-0890), Denis A. Pagaleshkin (ORCID 0009-0003-8652-5229), Vladimir A. Vladimirov (ORCID 0009-0006-3704-7146)

JSC «Y. Samoilov Research Institute for Fertilizers and Insectofungicides», Severnoye shosse, 75, Cherepovets, 162625, Russia

E-mail: ANorov@phosagro.ru*, VVSokolov1@phosagro.ru, ERybin@phosagro.ru, DPagaleshkin@phosagro.ru, VAVladimirov@phosagro.ru

Vsevolod M. Lapushkin (ORCID 0000-0002-9773-2077)

Timiryazev Russian State Agrarian University of the Moscow State Agricultural Academy, Timiryazevskaya st., 49, Moscow, 162625, Russia

E-mail: lapushkin@rgau-msha.ru

A study has been conducted on the possibility of obtaining fertilizers with controlled nitrogen release by applying a non-organic digestible shell of monocalcium phosphate to granules of nitrogen-containing mineral NPK and NP(S) fertilizers. It is shown that the structure of the obtained granules has a clearly defined core and the protective shell itself. The study of granules by fractions showed that the applied monocalcium phosphate shell is evenly distributed over the entire surface of the pellet, regardless of the fraction, and the maximum deviation of the actual shell thickness from the calculated value is less than 10%. The sphericity of the obtained granules is also the same for all fractions, while the coated granules are more spherical compared to the original samples. When studying the physical and mechanical properties of the obtained fertilizers coated with monocalcium phosphate, it was found that they have higher consumer qualities compared to traditional mineral fertilizers – they are characterized by lower caking and dustiness, as well as slightly higher granule strength. A tendency to improve the physical and mechanical properties with an increase in the thickness of the shell for the studied values has been revealed. The study of the rate of nitrogen release in laboratory tests has shown that the use of monocalcium phosphate as a shell material can reduce the rate of release of the element from fertilizers and prolong the period of fertilizer action compared with uncoated samples. Agrochemical tests of the developed coated fertilizers showed an increase in wheat grain yield by 10-18% and a more efficient use of nitrogen from the coated fertilizer compared to the original samples (an increase of 6-18%). Just as for the physical and mechanical properties, it was noted that increasing the shell thickness in the studied range improved the agrochemical efficiency of the fertilizers obtained. In addition, it was found that fertilizers coated with monocalcium phosphate are not inferior in agronomic efficiency to fertilizers with nitrification inhibitors. The study of the dynamics of nitrogen uptake by wheat proved the controllability of nitrogen release from the obtained fertilizers with a shell and the possibility of regulating this process by changing the shell thickness.

Keywords: prolonged fertilizer, coated fertilizer, inorganic cover, controlled release, monocalciumphosphate, physical and mechanical properties, increased efficiency

Для цитирования:

Норов А.М., Соколов В.В., Рыбин Е.А., Лапушкин В.М., Пагалешкин Д.А., Владимиров В.А. Получение НПК- и NP(S)-удобрений пролонгированного действия путем нанесения неорганического усвояемого покрытия и исследование их свойств. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 5. С. 39–48. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.7f.

For citation:

Norov A.M., Sokolov V.V., Rybin E.A., Lapushkin V.M., Pagaleshkin D.A., Vladimirov V.A. Obtaining NPK and NP(S) fertilizers with long-release by applying an inorganic digestible coating and studying their properties. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2025. V. 68. N 5. P. 39–48. DOI: 10.6060/ivkkt.20256805.7f.

ВВЕДЕНИЕ

В последние несколько лет проблема повышения эффективности использования минеральных удобрений стала одной из ключевых задач сельского хозяйства во всем мире. На сегодняшний день установлено, что применение традиционных минеральных удобрений не обеспечивает высокий процент усвоения растением питательных веществ. При использовании традиционных минеральных удобрений происходят значительные потери питательных элементов из-за их вымывания в грунтовые воды, потери в газовую фазу (азот в виде NO_x), что приводит к негативным последствиям для окружающей среды. Также часть питательных веществ аккумулируется в почве и не усваивается растением в необходимый период. В проведенных исследованиях по данной тематике установлено, что растение в среднем использует его лишь 30-60% питательных веществ от внесенных с удобрением [1-4].

Азот является одним из ключевых элементов питания растений, необходимым для их роста, развития и повышения урожайности. Наиболее применяемыми агрохимикатами в сельском хозяйстве являются азотные удобрения, на долю которых приходится около 55-60% всех вносимых удобрений [5-6]. По данным исследования [7] доля участия

азотных удобрений в урожайности зерновых культур составляет до 50%. При этом установлено, что потери азота при использовании классических марок удобрений могут достигать 70% [8-9].

Одним из наиболее распространенных способов повышения эффективности действия минеральных удобрений является создание удобрений с замедленным (SRF) и контролируемым (CRF) высвобождением питательных веществ на основе классических марок. Эффект замедления достигается, как правило, нанесением полупроницаемой полимерной или малорастворимой неорганической оболочки на поверхность гранул (созданием матрицы вокруг гранулы). Скорость выделения питательных элементов регулируется изменением толщины и состава покрытия [10-13]. В качестве полимерных материалов используются такие, как алкидные смолы, латекс, поливинилиденхлорид, гелеобразующие полимеры, различные виды воска, термопластик, метакриловая кислота, полисахариды и др. В качестве же неорганических покрытий применяются, в основном, малорастворимые в воде вещества – сера, оксиды магния, различные фосфаты и аммонийфосфаты, гипс, глина и др. [14,15].

В табл. 1 представлены основные отмечаемые преимущества и недостатки при использовании полимерных и неорганических веществ в качестве материалов для создания оболочки на поверхности гранул минеральных удобрений [10, 14-23].

Таблица 1

Сравнение используемых материалов для создания покрытий гранул
Table 1. Comparison of materials used to create granule coatings

Полимерные материалы		Неорганические вещества	
Преимущества	Недостатки	Преимущества	Недостатки
- сохранение соотношения питательных веществ	- сложность обеспечения требований биоразлагаемости в почве	- полная биоразлагаемость материала оболочки	- часто необходим подбор связующего для улучшения адгезии к грануле
- прочное закрепление материала на грануле	- значительное увеличение стоимости производства	- включает дополнительные элементы питания, необходимые растению	- для контроля высвобождения необходимо высокое содержание покрытия в грануле
- длительный период действия удобрения (высокая контролируемость высвобождения веществ)	- дополнительное выделение CO_2 при разложении в почве	- более дешевый и доступный материал	- возможное смещение соотношения питательных веществ
- незначительная зависимость от внешних факторов, таких как pH, влажности почвы и активности микроорганизмов	- возможное дополнительное загрязнение почвы и накопление микропластика при ежегодном внесении		

Стоит отметить, что удобрения с полимерным покрытием обеспечивают более длительный срок действия удобрения и более высокую контролируемость высвобождения питательных веществ по сравнению с удобрениями с неорганическими покрытиями. Однако, многие применяемые полимерные материалы являются достаточно дорогостоящими и могут вызывать дополнительное загрязнение как почвы, так и атмосферы.

Согласно требованиям стандарта ЕС (Regulation EU 2019/1009), превращение минимум 90% углерода, находящегося в полимерном покрытии, в CO_2 должно протекать за 48 мес. после окончания заявленного срока действия удобрения. Эта норма допускает постоянное наличие полимера в почве и даже его накопление при ежегодном внесении удобрений, особенно с учетом того, что срок действия самого удобрения варьируется в среднем от 3 до 18 мес. При применении удобрений с неорганическим покрытием не возникает проблем со скоростью биоразложения оболочки и дополнительным выделением парникового газа CO_2 в атмосферу.

С целью разработки экологически безопасных азотсодержащих минеральных удобрений пролонгированного действия в АО «НИУИФ» были получены и исследованы образцы NPK- и NP(S)-удобрений с неорганическим усвояемым покрытием монокальцийфосфата.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

По литературным данным [24–29] процесс нанесения как полимерных, так и неорганических покрытий на гранулы минеральных удобрений может быть осуществлен по тому же принципу и на тех же аппаратах, что и процесс грануляции удобрений – тарельчатый гранулятор, барабан-гранулятор, аппарат кипящего слоя и др.

В проведенном эксперименте на гранулы азотсодержащих минеральных удобрений марок NPK 15:15:15 и сульфоаммофоса NP(S) 20:20(14) наносилось покрытие смеси моно- и дикальцийфосфата (далее монокальцийфосфат), имеющего степень нейтрализации первого водородного иона фосфорной кислоты до 105%. Нанесение покрытия осуществлялось с помощью разработанной модельной установки, схема которой представлена на рис. 1.

Покрытие монокальцийфосфата наносилось на гранулы минеральных удобрений путем распыливания пульпы монокальцийфосфата на поверхность гранул в смесителе для получения влажной шихты, последующего окатывания и сушки гранул

горячим воздухом в сушильном барабане, имеющем специальную насадку. После завершения процесса нанесения покрытия гранулы охлаждались и отсеивалась товарная фракция. Для оценки влияния размера покрытия для каждой марки удобрений были нанесены покрытия толщиной 50 и 100 мкм. Гипотеза исследования предполагала, что полученные удобрения с усвояемым покрытием должны иметь физико-механические характеристики не ниже, чем удобрения без покрытий, а эффективность их применения должна быть выше, чем у традиционных удобрений (непокрытых образцов сравнения).



Рис. 1. Модельная установка по нанесению покрытий

Fig. 1. Model coating installation

Исследование равномерности толщины и первичного качества покрытия на грануле проводилось методом сканирующей электронной микроскопии [30] на приборе TM 3030 Hitachi с использованием EDS-системы Quantax 70 Bruker.

Изучение скорости растворения удобрений проводилось гравиметрическим методом, путем растворения 2,0 г гранул фракции 3,0–3,5 мм (как имеющих наиболее близкую к расчетной толщину покрытия) на ситах с ячейкой диаметром 0,5 мм в течение определенного времени без механического перемешивания. Объем дистиллированной воды для растворения составлял 100 см³, чтобы обеспечить отсутствие равновесного состояния. После завершения эксперимента остаток высушивался до постоянной массы при температуре 63 °С.

Исследование скорости высвобождения азота из гранул проходило путем анализа исходных гранул и сухого остатка гранул после растворения на массовую долю азота методом рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S8 Tiger Bruker. Далее доля высвобожденного азота рассчитывалась исходя из элементного баланса в исходной грануле и остатке после растворения.

Анализ слеживаемости удобрений проводился путем изучения усилия, необходимого для разрушения брикета гранул после их хранения в климатической камере при температуре 38 °С и влажности 70%. Статическая прочность гранул исследовалась методом определения усилия, необходимого для разрушения гранулы диаметром 3 мм.

Анализ сферичности гранул проводился на оптическом анализаторе Samsizer P4.

Пылимость удобрений анализировалась гравиметрическим методом, путем изучения прироста на фильтре (массы пыли) после пребывания гранул в установке кипящего слоя с давлением воздуха 0,5 бар.

Мелкоделяночные полевые испытания проводились на территории Полевой опытной станции ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева на окультуренной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с низким содержанием гумуса в пятикратной повторности. В качестве опытной культуры выступала яровая пшеница.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена микрофотография поверхности скола гранулы NPK-удобрения с покрытием монокальцийфосфата.

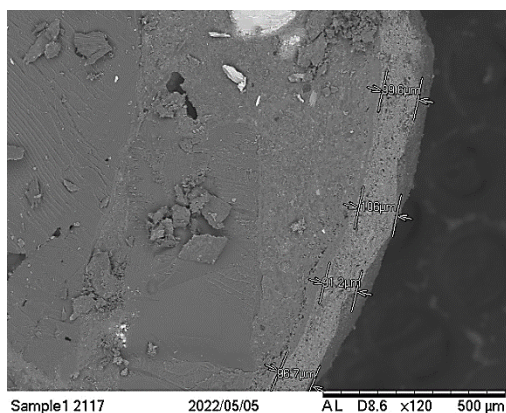


Рис. 2. Микрофотография поверхности скола гранулы NPK-удобрения с покрытием толщиной 100 мкм
Fig. 2. Micrograph of the chip surface of an NPK fertilizer granule with a 100 µm thick coating

По результатам анализа структуры полученных удобрений можно отметить, что гранулы имеют четко выраженную границу между ядром гранулы и оболочкой, отсутствуют какие-либо переходные слои (расслоения) вблизи оболочки, покрытие распределено по поверхности гранулы достаточно равномерно, оболочка не имеет значительных дефектов и макропор, плотно прилегает к поверхности ядра гранулы, что позволяет полно-

стью «закрыть» питательные элементы внутри оболочки и обеспечить их более постепенное и контролируемое высвобождение.

В табл. 2 представлено распределение толщины покрытия и сферичности в зависимости от диаметра полученных гранул.

Таблица 2

Распределение толщины покрытия в зависимости от размера гранул

Table 2. Distribution of the coating thickness depending on the granules size

Фракция, мм	NPK с покрытием 100 мкм		NP(S) с покрытием 50 мкм	
	Толщина покрытия, мкм	Сферичность	Толщина покрытия, мкм	Сферичность
2-3	93,1±2,1	0,930	46,8±1,5	0,926
3-4	98,9±2,6	0,919	49,3±1,2	0,929
4-5	97,6±2,3	0,929	51,4±1,6	0,931
5-6	104,4±4,3	0,930	52,5±1,3	0,925

По данным табл. 2 видно, что распределение толщины покрытия и сферичности полученных гранул по фракциям является равномерным как для удобрения с покрытием толщиной 50 мкм, так и толщиной 100 мкм. Сферичность гранул находится в диапазоне 0,92-0,93 для обоих представленных образцов. Максимальное отклонение фактической толщины покрытия от расчетного значения по всем фракциям составляет 8,7% для толщины покрытия 100 мкм и 9,8% для толщины 50 мкм.

В целом можно отметить тенденцию к увеличению толщины покрытия на грануле при увеличении диаметра. Незначительное снижение толщины покрытия для NPK-удобрения во фракции 4-5 мм по сравнению с фракцией 3-4 мм может быть связано с неравномерностью попадания пульпы монокальцийфосфата при распылении на гранулы данной фракции. Однако по величине доверительного интервала показателя видно, что средние значения толщин покрытия для этих фракций пересекаются. Тенденции изменения сферичности гранул в зависимости от диаметра выявлено не было.

В табл. 3 приведены основные физико-механические характеристики гранул исходных удобрений и полученных удобрений с покрытием.

По данным табл. 3 видно, что нанесение покрытия монокальцийфосфата способствовало некоторому увеличению статической прочности гранул, значительному снижению слеживаемости (на 51-78%) и пылимости (на 41-62%). Рассыпчатость

всех гранул составляла 100%. Также прослеживается тенденция к повышению сферичности и статической прочности удобрений с покрытием при увеличении толщины оболочки. Снижение пылимости полученных гранул можно объяснить увеличением сферичности гранул после нанесения покрытия и окатывания их в барабане. Значительное снижение слеживаемости удобрений можно объяснить свойствами самого материала покрытия, так

как монокальцийфосфат обладает низкой склонностью к слеживанию.

Наибольший интерес для исследования представляли такие характеристики как скорость растворения гранул и высвобождения азота, а также их агрохимическая эффективность при использовании в реальном полевом опыте. На рис. 3 представлен график высвобождения азота из NPK-удобрения при растворении в дистиллированной воде.

Таблица 3

Физико-механические характеристики удобрений
Table 3. Physical and mechanical properties of fertilizers

Образец удобрения	Статическая прочность, МПа	Слеживаемость, кПа	Пылимость, г/т	Сферичность
NPK 15:15:15 без покрытия	6,7±1,8	70,0±9,7	4641±371	0,892
NPK 15:15:15 (толщ. 50 мкм)	7,6±1,8	32,8±5,2	2723±285	0,915
NPK 15:15:15 (толщ. 100 мкм)	8,8±1,8	15,4±4,0	1768±324	0,927
NP(S) 20:20(14) без покрытия	7,9±1,8	56,2±5,1	1629±131	0,908
NP(S) 20:20(14) (толщ. 50 мкм)	8,9±1,8	27,7±3,6	912±147	0,929
NP(S) 20:20(14) (толщ. 100 мкм)	9,6±1,8	14,3±3,9	764±96	0,936

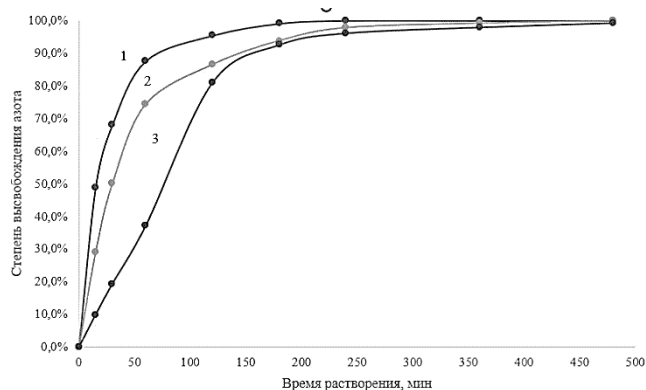


Рис. 3. Динамика высвобождения азота из NPK-удобрений при растворении в дистиллированной воде: 1- NPK без покрытия; 2- NPK с покрытием 50 мкм; 3- NPK с покрытием 100 мкм

Fig. 3. Dynamics of nitrogen release from NPK fertilizers when dissolved in distilled water: 1- NPK without coating; 2- NPK coated with 50 µm; 3- NPK coated with 100 µm

Как было отмечено выше, степень выделения азота в раствор рассчитывалась по балансу данного элемента.

$$W_N = \frac{m_{\text{нав.}} \cdot N_{\text{исх.}} - m_{\text{ост.}} \cdot N_{\text{ост.}}}{m_{\text{нав.}} \cdot N_{\text{исх.}}},$$

где $m_{\text{нав.}}$ — масса навески, взятой для растворения, г; $N_{\text{исх.}}$ — доля азота в исходном удобрении, %; $m_{\text{ост.}}$ — масса остатка после растворения, г; $N_{\text{ост.}}$ — доля азота в остатке после растворения, %.

По полученным данным можно сказать, что все удобрения начинали растворяться и выделять азот сразу же после помещения их в раствор (наблюдалась небольшая задержка начала процесса для удобрений с покрытием 100 мкм, однако при растворении в избытке воды данный эффект проявлялся незначительно). По представленным кривым высвобождения видно, что удобрения с покрытием выделяли азот более медленно по сравнению с непокрытым образцом. За первые 30 мин растворения, когда движущая сила процесса была максимальной, скорость выделения азота снизилась на 18% абс. для покрытия толщиной 50 мкм и на 48,5% абс. для покрытия толщиной 100 мкм. Также увеличилось общее время высвобождения азота из удобрений с покрытием по сравнению с непокрытым образцом. С учетом погрешности методики измерения можно сказать, что для NPK без покрытия весь азот выделился за 3–4 ч, для NPK с покрытием 50 мкм — за 6–8 ч, а для NPK с покрытием 100 мкм — за 8–10 ч. Приведенные данные позволяют предположить, что полученные удобрения с покрытием также позволят дольше снабжать растение азотом при их применении в почве. Та же самая тенденция наблюдалась и для NP(S)-удобрений.

В табл. 4 представлены данные агрохимических испытаний удобрений с покрытием. Дозы

внесения удобрений для всех опытов были одинаковыми и составляли, г/м²: N₉P₁₈K₉.

Как видно из табл. 4, удобрения с покрытием монокальцийфосфата увеличили урожайность зерна как для NPK-удобрений – на 10,2-18,7%, так и для NP(S)-удобрений – на 9,3-11,7%. Также увеличилось отношение зерна к соломе в урожае – с 0,65 до 0,72 для NPK-удобрения и с 0,80 до 0,86 для NP(S)-удобрения. Помимо этого, нанесение покрытия монокальцийфосфата позволило в значительной степени увеличить коэффициент использования азота растением из удобрений: с 53 до

68% для NPK и с 54 до 72% для сульфоаммофоса. Также стоит отметить, что полученные удобрения с покрытием монокальцийфосфата толщиной 100 мкм не уступают по эффективности применения NPK-удобрениям с ингибиторами нитрификации, а в случае сульфоаммофоса даже превосходят ингибиторы.

Во время проведения полевых опытов нами была проанализирована динамика потребления растениями питательных элементов. На рис. 4 представлена динамика потребления азота пшеницей из NPK-удобрений в разные фазы ее роста.

Таблица 4

Результаты агрохимических испытаний NPK- и NP(S)-удобрений с покрытием

Table 4. Results of agrochemical tests of coated NPK and NP(S) fertilizers

Образец удобрения	Урожайность зерна, г/м ²	Отношение зерна к соломе в урожае	Коэффициент использования азота из удобрений, %
NPK 15:15:15 без покрытия	400	0,65	53
NPK 15:15:15 (толщ. 50 мкм)	441	0,70	59
NPK 15:15:15 (толщ. 100 мкм)	475	0,72	68
NPK 15:15:15 с ингибитором нитрификации	480	0,77	69
NP(S) 20:20(14) без покрытия	512	0,80	54
NP(S) 20:20(14) (толщ. 50 мкм)	560	0,80	68
NP(S) 20:20(14) (толщ. 100 мкм)	572	0,86	72
NP(S) 20:20(14) с ингибитором нитрификации	517	0,77	55

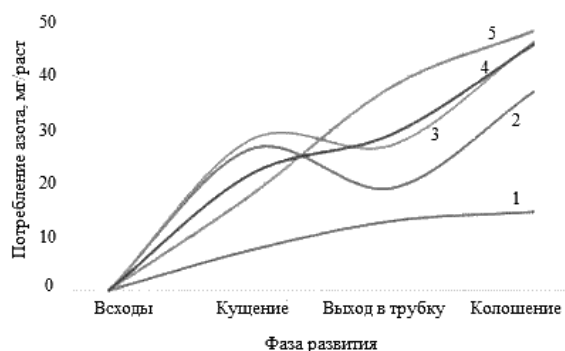


Рис. 4. Динамика потребления азота пшеницей из NPK-удобрений: 1- РК-фон; 2- NPK без покрытия; 3- NPK с покрытием монокальцийфосфата толщиной 50 мкм; 4- NPK с ингибитором нитрификации; 5- NPK с покрытием монокальцийфосфата толщиной 100 мкм

Fig. 4. Dynamics of nitrogen consumption by wheat from NPK fertilizers: 1-PK-base; 2- NPK without coating; 3- NPK coated with MCP, layer thickness 50 µm; 4- NPK with nitrification inhibitors; 5- NPK coated with MCP, layer thickness 100 µm

По кривым потребления видно, что удобрения с покрытием способствовали лучшему снабжению пшеницы элементом питания по сравнению с

непокрытым образцом. Азот из удобрения с толщиной покрытия 50 мкм на первой стадии роста усваивался растением в таких же количествах, как и азот из удобрения без покрытия. Однако постепенно усвоение элемента из удобрения с покрытием возрастало и уже на стадии кушения стало выше, чем для непокрытого образца. Азот из удобрения с покрытием в 100 мкм, по-видимому, выделялся несколько медленнее, чем из удобрения с покрытием 50 мкм и без покрытия, с чем и связано более низкое его усвоение пшеницей на начальных стадиях. Однако, в последующих стадиях усвоение азота возрастало и в фазе колошения было максимальным. Эти данные свидетельствуют о возможности контроля выделения и усвоения растением азота при применении полученных удобрений с покрытием. Также стоит отметить, что покрытия обеспечивали снабжение пшеницы азотом на протяжении всех стадий роста. В целом, потребление азота из удобрений с покрытием не уступало его использованию из удобрений с ингибитором нит-

рификации, а иногда было и более высоким. Похожая тенденция наблюдалась и при использовании сульфаммофоса с покрытием.

Также можно сказать, что графики потребления азота растением из почвы качественно совпадают с графиками, полученными в лаборатории при растворении удобрений в дистиллированной воде. В начале процесса скорость выделения азота из NPK без покрытия была немного выше, чем у удобрения с покрытием 50 мкм и значительно выше, чем у удобрения с покрытием 100 мкм. Затем происходило снижение скорости выделения азота для образцов без покрытия и с покрытием 50 мкм, а для NPK с покрытием 100 мкм происходило увеличение скорости. В конце процесса лабораторного растворения наибольшее количество азота осталось именно у образца NPK с покрытием 100 мкм, которое было еще способно его отдавать. С этим, скорее всего, связано наибольшее потребление азота растением и в почве на конечных стадиях развития. Также можно отметить, что потребление азота из NPK с покрытием 100 мкм имеет несколько сигмоидальный вид, что совпадает с видом графика его высвобождения при растворении в воде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно отметить, что полученные удобрения с покрытием монокальцийфосфата на базе марок NPK 15:15:15 и NP(S) 20:20(14) имеют структуру с четко выраженным ядром гранул и слоем покрытия. При этом нанесенное покрытие монокальцийфосфата имеет равномерное распределение по поверхности гранул, отсутствуют дефекты покрытия и макропоры, покрытие плотно прилегает к ядру гранулы и обладает хорошей адгезией к поверхности исходного удобрения при нанесении данным способом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Akay G.** Sustainable ammonia and advanced symbiotic fertilizer production using catalytic multi-reaction-zone reactors with nonthermal plasma and simultaneous reactive separation. *ACS Sust. Chem. Eng.* 2017. V. 5. N 12. P. 11588–11606. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b02962.
2. **Dovzhenko A.P., Yaprntseva O.A., Sinyashin K.O., Doolotkeldieva T., Zairov R.R.** Recent progress in the development of encapsulated fertilizers for time-controlled release. *Heliyon*. 2024. N 10. P. 1-19. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34895.
3. **Zhang S., Yang Y., Gao B., Wan Y., Li Y.C., Zhao C.** Bio-based interpenetrating network polymer composites from locust sawdust as coating material for environmentally friendly controlled-release urea fertilizers. *J. Agric. Food Chem.* 2016. N 64. P. 5692–5700. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b01688.

Полученные удобрения с покрытием монокальцийфосфата имеют более высокие потребительские свойства: несколько повышенную статическую прочность гранул, сниженную более чем в 2 раза слеживаемость и пылимость удобрений, а также увеличенную сферичность гранул при указанном способе нанесения. Помимо этого, полученные удобрения имеют более высокую агрохимическую эффективность по сравнению с исходными (традиционными) удобрениями. Они способствуют как увеличению урожая (на 9-19%), так и повышению коэффициента использования азота из удобрений (снижению потерь) – на 6-16%, и не уступают, а в некоторых вариантах даже и превосходят, удобрения с ингибиторами нитрификации.

Изменение толщины покрытия позволяет регулировать скорость высвобождения азота из полученных удобрений. При этом сам материал покрытия является усвояемым растениями удобрением, легко доступен для приобретения, а технология получения удобрений с такими покрытиями не требует какого-либо специального оборудования.

Помимо NPK-удобрений и сульфаммофоса, покрытия монокальцийфосфата были нанесены на карбамид гранулированный и приллированный и аммиачную селитру и проведены их агрохимические испытания с положительным результатом.

БЛАГОДАРНОСТЬ И ФИНАНСИРОВАНИЕ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

REFERENCES

1. **Akay G.** Sustainable ammonia and advanced symbiotic fertilizer production using catalytic multi-reaction-zone reactors with nonthermal plasma and simultaneous reactive separation. *ACS Sust. Chem. Eng.* 2017. V. 5. N 12. P. 11588–11606. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b02962.
2. **Dovzhenko A.P., Yaprntseva O.A., Sinyashin K.O., Doolotkeldieva T., Zairov R.R.** Recent progress in the development of encapsulated fertilizers for time-controlled release. *Heliyon*. 2024. N 10. P. 1-19. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e34895.
3. **Zhang S., Yang Y., Gao B., Wan Y., Li Y.C., Zhao C.** Bio-based interpenetrating network polymer composites from locust sawdust as coating material for environmentally friendly controlled-release urea fertilizers. *J. Agric. Food Chem.* 2016. N 64. P. 5692–5700. DOI: 10.1021/acs.jafc.6b01688.

4. Дзюин Г.П., Дзюин А.Г. Коэффициенты использования азота, фосфора и калия из минеральных удобрений, навоза и почвы культурами севооборота. *Международ. журн. экспериментального образования*. 2016. Вып. 5. С. 83-90.
5. Cross L., Gruere A. Public summary – world outlook for fertilizer demand, nitrogen, phosphates and potash from 2022 to 2023. IFA Strategic Forum, Washington DC, 31 October-2nd November 2022. P. 1-13.
6. Лапушкин В.М., Волкова М.А., Лапушкина А.А., Торшин С.П., Игалиев Ф.Г., Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Соколов В.В., Кочетова И.М., Рыбин Е.А. Агрономическая эффективность мочевины пролонгированного действия при выращивании яровой пшеницы. *Агрохимия*. 2024. Вып. 4. С. 35-40. DOI: 10.31857/S000218812404049.
7. Шафран С.А. Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях. *Агрохимия*. 2020. Вып. 6. С. 14-21.
8. Sempeho S.I., Kim H.T., Mubofu E., Pogrebnoi A., Shao G., Hilonga A. Encapsulated urea – kaolinite nanocomposite for controlled release fertilizer formulations. *J. Chem.* 2015. N 17. P. 1–17. DOI: 10.1155/2015/237397.
9. Лапушкин В.М., Игалиев Ф.Г., Лапушкина А.А., Торшин С.П., Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Соколов В.В., Кочетова И.М., Рыбин Е.А. Эффективность новых форм НРК-удобрений с замедленным и контролируемым высвобождением питательных веществ при выращивании яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве. *Агрохимия*. 2023. Вып. 3. С. 29-35. DOI: 10.31857/S0002188123020096.
10. Salmiaton Ali, Firoozeh Danafar. Controlled-Release Fertilizers: Advances and Challenges. *Life Sci. J.* 2015. N 12. P. 33–45.
11. Dora Lawrence, See Kiat Wong. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release. *Plants*. 2021. N 10. P. 238–264. DOI: 10.3390/plants10020238.
12. Maya Rajan, S. Shahena, Vinaya Chandran, Linu Mathew. Controlled release of fertilizers concept, reality, and mechanism. *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture*. 2021. N 3. P. 41–56. DOI: 10.1016/B978-0-12-819555-0.00003-0.
13. Липин А.Г., Липин А.А. Кинетика высвобождения азота из гранул мочевины с полимерным покрытием. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 7. С. 100-106. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6635.
14. Пироговская Г. «Умные» удобрения. *Наука и инновации*. 2020. № 5. С. 28–32. DOI: 10.29235/1818-9857-2020-5-28-32.
15. Мухина М.Т., Боровик Р.А., Коршунов А.А. Удобрения пролонгированного действия: основные этапы и направления развития. *Плодородие*. 2021. № 4. С. 77-82. DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.23.
16. Норов А.М., Соколов В.В., Рыбин Е.А., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Лапушкин В.М., Торшин С.П., Лапушкина А.А., Игалиев Ф.Г. Инновационные высокоэффективные удобрения нового поколения. Сб. Труды НИУИФ к 105-летию основания института. Чеков: АО «Первая Образцовая типография». 2024. 615 с.
17. Ryszko Urszula, Rusek Piotr, Watros Anna, Ostrowski Jaroslaw. Mineral fertilisers in the light of the new EU fertiliser regulation 2019/1009. *Przemysl Chemiczny*. 2020. N 99. P. 1072-1078. DOI: 10.15199/62.2020.7.21.
18. Md. Hafizur Rahman, K.M. Shamsul Haque, Md. Zaved Hossain Khan. A review on application of controlled released fertilizers influencing the sustainable agricultural production: A Cleaner production process. *Environ. Technol. Innov.* 2021. N 23. P. 101697. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101697.
4. Dzyuin G.P., Dzyuin A.G. Coefficients of the use of nitrogen, phosphorus and potassium from mineral fertilizers, manure and soil by crops of crop turnover. *Mezhdunarod. Zhurn. Eksperimental'nogo Obrazovaniya*. 2016. N 5. P. 83-90 (in Russian).
5. Cross L., Gruere A. Public summary – world outlook for fertilizer demand, nitrogen, phosphates and potash from 2022 to 2023. IFA Strategic Forum, Washington DC, 31 October-2nd November 2022. P. 1-13.
6. Lapushkin V.M., Volkova M.A., Lapushkina A.A., Torshin S.P., Igraliev F.G., Norov A.M., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Sokolov V.V., Kochetova I.M., Rybin E.A. Agronomic efficiency of prolonged-acting urea in the cultivation of spring wheat. *Agrokhimia*. 2024. N 4. P. 35-40 (in Russian). DOI: 10.31857/S000218812404049.
7. Shafran S.A. Nitrogen balance in agriculture in Russia and its regulation in modern conditions. *Agrokhimia*. 2020. N 6. P. 14-21 (in Russian).
8. Sempeho S.I., Kim H.T., Mubofu E., Pogrebnoi A., Shao G., Hilonga A. Encapsulated urea – kaolinite nanocomposite for controlled release fertilizer formulations. *J. Chem.* 2015. N 17. P. 1–17. DOI: 10.1155/2015/237397.
9. Lapushkin V.M., Igliev F.G., Lapushkina A.A., Torshin S.P., Noorov A.M., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Sokolov V.V., Kochetova I.M., Rybin E.A. Effectiveness of new forms of NPK fertilizers with slow and controlled release of nutrients in the cultivation of spring wheat on sod-podzolic soil. *Agrokhimia*. 2023. N 3. P. 29-35 (in Russian). DOI: 10.31857/S0002188123020096.
10. Salmiaton Ali, Firoozeh Danafar. Controlled-Release Fertilizers: Advances and Challenges. *Life Sci. J.* 2015. N 12. P. 33–45.
11. Dora Lawrence, See Kiat Wong. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release. *Plants*. 2021. N 10. P. 238–264. DOI: 10.3390/plants10020238.
12. Maya Rajan, S. Shahena, Vinaya Chandran, Linu Mathew. Controlled release of fertilizers concept, reality, and mechanism. *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture*. 2021. N 3. P. 41–56. DOI: 10.1016/B978-0-12-819555-0.00003-0.
13. Lipin A.G., Lipin A.A. Kinetics of nitrogen release from polymer-coated urea granules. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 7. P. 100-106 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6635.
14. Pirogovskaya G. «Smart» fertilizers. *Nauka Innovatsii*. 2020. N 5. P. 28–32 (in Russian). DOI: 10.29235/1818-9857-2020-5-28-32.
15. Mukhina M.T., Borovik R.A., Korshunov A.A. Prolonged fertilizers: main stages and directions of development. *Plodородие*. 2021. N 4. P. 77-82 (in Russian). DOI: 10.25680/S19948603.2021.121.23.
16. Norov A.M., Sokolov V.V., Rybin E.A., Pagaleshkin D.A., Fedotov P.S., Lapushkin V.M., Torshin S.P., Lapushkina A.A., Igliev F.G. Innovative high-efficiency fertilizers of the new generation. Proceedings of the JSC «NIUIF» for the 105th anniversary of the foundation of the Institute. Chekhov: AO «Pervaya obraztsovaya tipografiya». 2024. 615 p. (in Russian).
17. Ryszko Urszula, Rusek Piotr, Watros Anna, Ostrowski Jaroslaw. Mineral fertilisers in the light of the new EU fertiliser regulation 2019/1009. *Przemysl Chemiczny*. 2020. N 99. P. 1072-1078. DOI: 10.15199/62.2020.7.21.
18. Md. Hafizur Rahman, K.M. Shamsul Haque, Md. Zaved Hossain Khan. A review on application of controlled released fertilizers influencing the sustainable agricultural production: A Cleaner production process. *Environ. Technol. Innov.* 2021. N 23. P. 101697. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101697.

- leased fertilizers influencing the sustainable agricultural production: A Cleaner production process. *Environ. Technol. Innov.* 2021. N 23. P. 101697. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101697.
19. **Trenkel M.E.** Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, France. 2010. 163 p.
20. **Pravin Vejan, Tumirah Khadiran, Rosazlin Abdullah, Noraini Ahmad.** Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *J. Control. Release.* 2021. N 339. P. 321-334. DOI: 10.1016/j.jconrel.2021.10.003.
21. **Одинцов А.В., Липин А.Г., Степанов В.В.** Капсулирование минеральных удобрений в тарельчатом грануляторе. *Прилож. к журн. Современ. наукоемк. технологии.* 2009. № 4. С. 68-72.
22. **Yajun Zhang, Wenli Tao.** Coated and un-coated urea incorporated with organic fertilizer improves rice nitrogen uptake and mitigates gaseous active nitrogen loss and microplastic pollution. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2024. N 375. P. 109201. DOI: 10.1016/j.agee.2024.109201.
23. **Japan Lian, Weitao Liu.** Effects of microplastics derived from polymer-coated fertilizer on maize growth, rhizosphere, and soil properties. *J. Clean. Prod.* 2021. N 318. P. 128571. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128571.
24. **Hassan Seddighi, Keivan Shayesteh, Navid Omrani, Pouya Es'haghi.** Fertilizers Coating Methods: A Mini Review of Various Techniques. *Chem. Res. Technol.* 2024. N 1. P. 38-48. DOI: 10.2234/chemrestec.2024.444838.1008.
25. **Липин А.Г., Липин А.А.** Распределение частиц по массам покрытия при периодическом процессе капсулирования в псевдоожиженном слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 84-90. DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6448.
26. **Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А.** Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ. *Современ. наукоемк. технологии. Регион. прилож.* 2017. Т. 3. Вып. 51. С. 86-91.
27. **Chandra Wahyu Purnomo, Hens Saputra.** Manufacturing of slow and controlled release fertilizer. *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture.* 2021. N 6. P. 95-110. DOI: 10.1016/B978-0-12-819555-0.00006-6.
28. **Таран Ю.А., Фуфаева В.М., Разина Н.Д.** Энерго- и ресурсосбережение при производстве и применении удобрений пролонгированного действия. Сб. тр. Одиннадцатой Всеросс. конф. с Междунар. уч. «Энергосбережение – теория и практика». М.: ООО «Центр полиграф. услуг «РАДУГА». 2022. С. 354-357.
29. **Thanh H. Trinh, Kuzilati Kushaari.** Modelling the release of nitrogen from controlled release fertiliser: Constant and decay release. *Biosyst. Eng.* 2015. N 30. P. 34-42. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.12.004.
30. **Гордина Н.Е., Мельников А.А., Гусев Г.И., Гушин А.А., Румянцев Р.Н., Астраханцева И.А.** Использование механохимической и плазмохимической обработки при синтезе каталитических систем на основе вермикулита и оксихлорида циркония. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2022. Т. 65. Вып. 5. С. 43-57. DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6612.
19. **Trenkel M.E.** Slow- and Controlled-Release and Stabilized Fertilizers: An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. International Fertilizer Industry Association (IFA). Paris, France. 2010. 163 p.
20. **Pravin Vejan, Tumirah Khadiran, Rosazlin Abdullah, Noraini Ahmad.** Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *J. Control. Release.* 2021. N 339. P. 321-334. DOI: 10.1016/j.jconrel.2021.10.003.
21. **Odintsov A.V., Lipin A.G., Stepanov V.V.** Encapsulation of mineral fertilizers in a plate granulator. *Prilozhenie k zhurnalu Sovremenny'e naukoemkie tekhnologii.* 2009. N 4. P. 68-72 (in Russian).
22. **Yajun Zhang, Wenli Tao.** Coated and un-coated urea incorporated with organic fertilizer improves rice nitrogen uptake and mitigates gaseous active nitrogen loss and microplastic pollution. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2024. N 375. P. 109201. DOI: 10.1016/j.agee.2024.109201.
23. **Japan Lian, Weitao Liu.** Effects of microplastics derived from polymer-coated fertilizer on maize growth, rhizosphere, and soil properties. *J. Clean. Prod.* 2021. N 318. P. 128571. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128571.
24. **Hassan Seddighi, Keivan Shayesteh, Navid Omrani, Pouya Es'haghi.** Fertilizers Coating Methods: A Mini Review of Various Techniques. *Chem. Res. Technol.* 2024. N 1. P. 38-48. DOI: 10.2234/chemrestec.2024.444838.1008.
25. **Lipin A.G., Lipin A.A.** Particle mass distribution of the coating during the periodic encapsulation process in a fluidized bed. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2021. V. 64. N 12. P. 84-90 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20216412.6448.
26. **Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A.** Encapsulation of granules in polymer shells as a method of creating mineral fertilizers with a controlled rate of nutrient release. *Sovremen. naukoemk. tekhnol. Region. prilozh.* 2017. V. 3. N 51. P. 86-91 (in Russian).
27. **Chandra Wahyu Purnomo, Hens Saputra.** Manufacturing of slow and controlled release fertilizer. *Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture.* 2021. N 6. P. 95-110. DOI: 10.1016/B978-0-12-819555-0.00006-6.
28. **Taran Yu.A., Fufaeva V.M., Razina N.D.** Energy and resource conservation in the production and application of long-acting fertilizers. Sat. tr. of the Eleventh Russian conference with International participation "Energy saving - theory and practice". M.: LLC "Tsentr poligraf. uslug "RADUGA". 2022. P. 354-357 (in Russian).
29. **Thanh H. Trinh, Kuzilati Kushaari.** Modelling the release of nitrogen from controlled release fertiliser: Constant and decay release. *Biosyst. Eng.* 2015. N 30. P. 34-42. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.12.004.
30. **Gordina N.E., Melnikov A.A., Gusev G.I., Gushchin A.A., Rumyantsev R.N., Astrakhantseva I.A.** Mechanochemical and plasmachemical processing in the synthesis of catalytic systems based on vermiculite and zirconium oxychloride. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2022. V. 65. N 5. P. 43-57 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226505.6612.

Поступила в редакцию 04.12.2024

Принята к опубликованию 29.01.2025

Received 04.12.2024

Accepted 29.01.2025