# КИНЕТИКА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ НИТРАТА АММОНИЯ ИЗ КАПСУЛИРОВАННЫХ ГРАНУЛ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

# А.А. Липин, А.Г. Липин, А.А. Тихомирова, В.А. Крисанова

Андрей Александрович Липин (ORCID 0000-0002-7984-1691)\*, Александр Геннадьевич Липин (ORCID 0000-0003-2011-9503), Анастасия Алексеевна Тихомирова, Виктория Андреевна Крисанова

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Россия, 153000 E-mail: linin @@mail.mi\*\_157linin@mail.mi

E-mail: lipin.a@mail.ru\*, 157lipin@mail.ru

Предложена математическая модель процесса высвобождения нитрата аммония из капсулированной гранулы в пористой среде (например, почве). Модель позволяет прогнозировать изменение во времени степени выделения и концентрации нитрата аммония внутри капсулы, а также эволюцию профилей его концентрации в пористой среде вблизи гранулы. Она предназначена для оперативного прогнозирования времени высвобождения нитрата аммония из капсулированных гранул в почве. Экспериментальная проверка предложенной модели проводилась в дренажных колонках, заполненных песком. Исследовалась кинетика высвобождения нитрата аммония из капсулированных гранул с различной относительной массой полимерной оболочки: 20, 25 и 30%. Капсулированные гранулы были предварительно получены на лабораторной установке с аппаратом псевдоожиженного слоя. Среднеквадратичное отклонение расчетных по модели и опытных данных о степени выделения нитрата аммония не превышало 0,019, что свидетельствует о их хорошем соответствии. Значение эффективного коэффициента диффузии нитрата аммония через слой покрытия составило 4,0·10<sup>-13</sup> м<sup>2</sup>/с. Рассчитаны профили концентрации нитрата аммония в окружающей пористой среде в различные моменты времени при отсутствии усвоения питательных веществ растениями и с их усвоением. Показано, что при наличии усвоения удобрения растениями, накопление его в пористой среде на расстояниях более 0,015 м от центра гранулы отсутствует, а при отсутствии усвоения удобрение диффундирует в пористой среде на расстояние 0,025 м. Выполнено сравнение кинетики выделения аммиачной селитры в пористой среде и воде. Установлено, что характер высвобождения нитрата аммония при экспресс-анализе в воде и в условиях влажной пористой среды (песок) практически одинаковый. Это означает, что основным фактором, определяющим процесс выделения, является сам слой покрытия, а не внешняя среда, окружающая удобрение, будь то вода или почва.

**Ключевые слова:** нитрат аммония, пористая среда, капсулированное удобрение, математическая модель, высвобождение в почве, прогнозирование, диффузия

# AMMONIUM NITRATE RELEASE FROM COATED GRANULES IN A POROUS MEDIUM

# A.A. Lipin, A.G. Lipin, A.A. Tikhomirova, V.A. Krisanova

Andrey A. Lipin (ORCID 0000-0002-7984-1691), Aleksandr G. Lipin (ORCID 0000-0003-2011-9503), Anastasiya A. Tikhomirova, Viktoriya A. Krisanova

Department of Processes and Apparatus of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, 153000, Ivanovo, Russia E-mail: lipin.a@mail.ru\*, 157lipin@mail.ru

A mathematical model of ammonium nitrate release from coated granule in a porous medium (e.g., soil) is proposed. The model predicts the change in time of the degree of ammonium nitrate release and its concentration inside the capsule, as well as the evolution of ammonium nitrate concentration profiles in the porous medium near the granule. It is intended for fast prediction of the release time of ammonium nitrate from coated granules in soil. Experimental verification of the proposed model was carried out in drainage columns filled with sand. The kinetics of ammonium nitrate release from encapsulated granules with different relative mass of polymer shell: 20, 25 and 30% was studied. The coated granules were produced in a laboratory setup with fluidized bed apparatus. The standard deviation of the model-calculated and experimental data on the degree of ammonium nitrate release did not exceed 0.019, indicating their good agreement. The value of the effective diffusion coefficient of ammonium nitrate through the coating layer was  $4.0 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ammonium nitrate concentration profiles in the surrounding porous medium at different time points were calculated in the absence of nutrient consumption by plants and with their consumption. It is shown that when the plants consume nutrients, its accumulation in porous medium at distances more than 0.015 m from the center of the granule is absent. In the absence of nutrients consumption by plants it diffuses in porous medium at a distance of 0.025 m. The kinetics of ammonium nitrate release in porous medium and water was compared. It was discovered that the character of ammonium nitrate release at express analysis in water and in conditions of wet porous medium (sand) is practically the same. This means that the main factor determining the release process is the coating layer itself, rather than the external environment surrounding the fertilizer, be it water or soil.

**Keywords:** ammonium nitrate, porous medium, controlled release fertilizer, mathematical model, release in soil, predicting, diffusion

#### Для цитирования:

Липин А.А., Липин А.Г., Тихомирова А.А., Крисанова В.А. Кинетика высвобождения нитрата аммония из капсулированных гранул в пористой среде. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2025. Т. 68. Вып. 7. С. 152–159. DOI: 10.6060/ivkkt.20256807.7226.

#### For citation:

Lipin A.A., Lipin A.G., Tikhomirova A.A., Krisanova V.A. Ammonium nitrate release from coated granules in a porous medium. *ChemChemTech* [*Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*]. 2025. V. 68. N 7. P. 152–159. DOI: 10.6060/ivkkt.20256807.7226.

#### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность вносимых в почву удобрений зависит главным образом от их способности поддерживать достаточную концентрацию питательных веществ в корневой зоне растений в течение необходимого периода времени. Для большинства промышленных удобрений концентрация действующих веществ быстро снижается в результате деградации (например, химической, фотохимической и биологической), улетучивания, выщелачивания. Вследствие этого питательные вещества не успевают усвоиться растениями в полной мере. Для повышения эффективности обычных удобрений часто применяются относительно большие дозы, что повышает экологический риск [1-8].

Применение капсулированных удобрений позволяет снизить количество внесений удобрения в почву и минимизировать загрязнение окружающей среды. Капсулированные удобрения могут быть получены путем нанесения на гранулы традиционных удобрений покрытия из пленкообразующего материала [9-12]. Слой покрытия действует как физический барьер, который снижает скорость выделения питательных веществ. Подбирая материал покрытия и его толщину, можно регулировать скорость выделения, поэтому капсулированные удобрения относятся к удобрениям с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ (англ. Controlled Release Fertilizer (CRF)). К такому типу удобрений относится, например, аммиачная селитра, покрытая полимерной оболочкой.

Для изготовления капсулированных удобрений используются барабанные и тарельчатые грануляторы, аппараты с псевдоожиженным слоем. В последних удается получить более качественное покрытие. Причем для целей капсулирования используются не классические аппараты псевдоожиженного слоя, а модифицированные аппараты: с трубой Вурстера, с фонтанирующим слоем [1-7].

Скорость высвобождения питательных веществ из капсулированного удобрения определяется их диффузией через слой покрытия. Прогнозирование скорости и характера высвобождения питательных веществ является актуальной задачей при разработке и производстве капсулированных удобрений. Для целей прогнозирования разработчики обычно применяют методы математического моделирования. Математические модели позволяют быстро оценить время действия удобрения, основываясь на опытных данных непродолжительного физического эксперимента [13, 14].

Зачастую исследователи используют «экспресс-тестирование» капсулированных удобрений, растворяя их в воде. Предложены математические модели, описывающие высвобождение питательных веществ из капсул CRF именно в водной среде [15-20]. Однако на практике капсулированные гранулы «работают» в почве, представляющей собой пористую среду. Поэтому актуально создание математической модели процесса высвобождения питательных компонентов из капсулированной гранулы удобрения в пористой среде, что и является целью настоящей работы. Для проверки адекватности модели выполнены экспериментальные исследования высвобождения питательных веществ в пористой среде на примере капсулированных гранул аммиачной селитры. Кроме того, выполнено сравнение кинетики выделения в пористой среде и воде.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Капсулированные гранулы нитрата аммония были получены на лабораторной установке [21] с аппаратом псевдоожиженного слоя. В качестве исходных гранул использовалась фракция промышленно выпускаемого удобрения аммиачная селитра с диаметром частиц 2-3 мм, а в качестве капсулянта – водная дисперсия стиролакрилового полимера. Были получены три вида капсулированных гранул, отличающиеся относительной массой оболочки, то есть отношением массы слоя покрытия к массе ядра капсулы: 20, 25 и 30%.

Экспериментальное исследование выделения нитрата аммония из капсулированных гранул проводили при комнатной температуре (20±2 °C) в двух средах: пористой среде, в качестве которой использовали речной песок, и дистиллированной воде. Фракционный состав песка следующий: <0,10 мм – 2,39 мас.%; 0,10-0,16 мм – 12,70 мас.%; 0,16-0,25 мм – 30,88 мас.%; 0,25-0,40 мм – 54,03 мас.%.

Опыты с песком проводились в дренажных колонках, представляющих собой пластиковую трубу конической формы. Дно колонки было выполнено в виде металлической сетки, на которой закреплялась фильтровальная ткань, предотвращающая попадание песка в сборник фильтрата. Выбор песка в качестве модельной среды обусловлен тем, что он содержит минимум веществ, оказывающих влияние на электропроводность фильтрата, то есть является инертной пористой средой. Перед загрузкой в дренажные колонки песок промывался для удаления примесей и высушивался.

Кинетика выделения нитрата аммония из капсулированных гранул в песке исследовалось по методике, описанной в работе [22]. В дренажную колонку, чередуя слоями, засыпали 250 грамм речного песка и 5 г капсулированных гранул аммиачной селитры. Высота слоя песка в колонке составляла 0,1 м, насыпная плотность 1580 кг/м<sup>3</sup>. Песок увлажнялся до относительной влажности 18%. Таким образом, капсулированные гранулы удобрения находились в неподвижном слое влажного песка, в который диффундировал целевой компонент. С периодичностью 1-3 сут. колонка орошалась 50 мл дистиллированной воды, собирался фильтрат, и определялась концентрация аммиачной селитры в нем. Концентрация определялась кондуктометрическим способом с помощью кондуктометра АНИОН 4100. Масса выделившегося нитрата аммония определялась как произведение массы собранного фильтрата и его концентрации. Каждый замер масса суммировалась. Степень выделения рассчитывалась как отношение текущей массы выделившегося нитрата аммония к массе ядра гранулы в начале опыта.

Для исследования кинетики высвобождения нитрата аммония из капсулированных гранул в водной среде 5 г капсулированных гранул помещались в емкость, заполненную 50 мл дистиллированной воды и закрывающуюся крышкой. С определенной периодичностью проводись замеры концентрации раствора в емкости кондуктометрическим способом. Степень выделения рассчитывалась как отношение текущей концентрации раствора к его максимально возможной концентрации.

На основании полученных данных строились зависимости степени выделения аммиачной селитры от времени.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ НИТРАТА АММОНИЯ ИЗ КАПСУЛИРОВАНОЙ ГРАНУЛЫ В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Для построения математической модели процесса высвобождения нитрата аммония из капсулированной гранулы в почвенной среде принята следующая физическая картина процесса. Гранула удобрения имеет начальный радиус R и покрыта полимерной оболочкой толщиной  $\delta_{n}$  (рис. 1). После

A.A. Lipin et al.

помещения ее во влажную среду начинается пропитка полимерного покрытия водой, так называемый индукционный период. Поскольку экспериментальные исследования показали, что его продолжительность мала по сравнению с общим временем высвобождения, при построении математической модели он не рассматривается. После пропитки пленки покрытия на ее внутренней стороне образуется слой насыщенного раствора нитрата аммония с концентрацией Снас и начинается выделение нитрата аммония в окружающую гранулу среду. При этом ядро гранулы продолжает растворяться и его размер уменьшается. Этот период процесса высвобождения называется периодом постоянной скорости. После полного растворения ядра начинается период падающей скорости выделения, во время которого концентрация раствора внутри капсулы С<sub>гр</sub> постепенно снижается.



Рис. 1. Расчетная схема: 1 – твердое ядро; 2 – насыщенный раствор; 3 – слой покрытия; 4 – окружающая пористая среда; j – поток нитрата аммония

Fig. 1. Calculation scheme: 1 – solid core; 2 – saturated solution; 3 – coating layer; 4 – surrounding porous medium; j – is an ammonium nitrate diffusive flux

## Принимались следующие допущения:

1. Перенос нитарата аммония через слой покрытия и распростанение его в окружающей среде происходит по диффузионному механизму.

2. Перемещение почвенной воды в пределах рассматриваемой пространственной области отсутствует.

3. Температура остается постоянной в течение всего времени процесса.

Перенос нитрата аммония через слой покрытия и распространение его в окружающей пористой среде описывается уравнениями диффузии (1, 2), записанными в сферических координатах:  $\frac{\partial C(r,\tau)}{\partial \tau} = D \left[ \frac{\partial^2 C(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C(r,\tau)}{\partial r} \right], \qquad R < r < R_{\pi}, (1)$ 

$$\frac{\partial C_{n.c.}(r,\tau)}{\partial \tau} = D_{n.c.} \left[ \frac{\partial^2 C_{n.c.}(r,\tau)}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C_{n.c.}(r,\tau)}{\partial r} \right] - S, R_{II} < r < R_{II.c.} (2)$$

где С – концентрация нитрата аммония в слое покрытия, кг/м<sup>3</sup>; D – коэффициент диффузии нитрата аммония в слое покрытия, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – время, с; С<sub>п.с.</sub> – концентрация нитрата аммония в окружающей пористой среде, кг/м<sup>3</sup>; D<sub>п.с.</sub> – эффективный коэффициент диффузии нитрата аммония в пористой среде, м<sup>2</sup>/с; S – сток вещества, обусловленный усвоением удобрения растениями; R<sub>п.с.</sub> – радиус пространственной области вокруг капсулы.

Уравнения (1) и (2) дополняются граничными и начальными условиями (3) – (7). Граничное условие для уравнения (1) на внутренней поверхности покрытия имеет вид:

$$C(\mathbf{R},\tau) = \varepsilon \cdot C_{_{\mathrm{Hac}}}$$
 при  $C_{_{\mathrm{rp}}} \ge C_{_{\mathrm{Hac}}}$ , (3)

$$C(\mathbf{R},\tau) = \varepsilon \cdot C_{rp}$$
 при  $C_{rp} < C_{Hac}$ , (4)

где  $\varepsilon$  – коэффициент распределения, характеризующий объемную долю жидкости (раствор нитрата аммония) в слое покрытия; С<sub>нас</sub> – концентрация насыщенного раствора нитрата аммония; С<sub>гр</sub> – среднеобъемная концентрация нитрата аммония внутри капсулы.

Оно записано из предположения, что на внутренней поверхности слоя покрытия устанавливается равновесное значение концентрации нитрата аммония, поскольку перенос компонентов в растворе осуществляется значительно быстрее, чем в слое покрытия. Суммарный процесс переноса лимитирован переносом в слое покрытия. Условие (3) применимо в период постоянной скорости выделения, а условие (4) в период падающей скорости.

Граничное условие на внешней поверхности пленки покрытия записано из предположения о равенстве диффузионных потоков и имеет вид:

$$D\frac{\partial C(R_{n},\tau)}{\partial r} = D_{n.c.}\frac{\partial C_{n.c.}(R_{n},\tau)}{\partial r}.$$
 (5)

Граничное условие для уравнения (2) на внешней границе (при г=R<sub>п.с.</sub>) имеет вид (6):

$$\frac{\partial C_{n.c.}(R_{n.c.},\tau)}{\partial r} = 0.$$
(6)

Начальные условия для уравнений (1) и (2):

$$C(r,0) = 0, C_{\pi.c.}(r,0) = 0.$$
 (7)

Дополнительными уравнениями модели являются: соотношение между концентрациями нитрата аммония в фазах (8), уравнение для расчета

ChemChemTech. 2025. V. 68. N 7

среднеобъемной концентрации нитрата аммония внутри капсулы  $C_{rp}$  (9), уравнение для расчета массового потока нитрата аммония (10) и выражение для расчета доли выделившегося из гранулы нитрата аммония (11).

$$C_{n.c.}(R_{n},\tau) = C(R_{n},\tau)/\varepsilon, \qquad (8)$$

$$\frac{\partial C_{rp}}{\partial \tau} = -j \frac{F_{s}}{V_{s}} = \frac{-3j}{R},$$
(9)

$$\mathbf{j} = -\mathbf{D} \frac{\partial \mathbf{C}(\mathbf{R}, \tau)}{\partial \mathbf{r}},\tag{10}$$

$$CR = 1 - C_m / \rho \quad . \tag{11}$$

где р – плотность нитрата аммония.

Предполагается, что эффективный коэффициент диффузии нитрата аммония в пористой среде  $D_{n.c.}$  зависит от объемной доли воды  $\phi$  в пористой среде:

$$\mathsf{D}_{_{\Pi,\mathsf{C}}} = \varphi \mathsf{D}_{_{\mathsf{B}}},\tag{12}$$

где  $D_{\text{B}}$  – коэффициент диффузии нитрата аммония в воде,  $D_{\text{B}}$ =2,8 $\cdot$ 10<sup>-9</sup> м<sup>2</sup>/с.

Таким образом, система уравнений (1)-(12) представляет собой математическую модель процесса выделения нитрата аммония из капсулированной гранулы, прогнозирующую профиль концентрации в окружающей пористой среде в произвольный момент времени. Для решения системы уравнений математического описания использовался метод конечных разностей. С целью минимизации вычислительных операций применена неравномерная сетка по пространственной координате.

Эффективный коэффициент диффузии нитрата аммония в слое покрытия определялся по методике, описанной в работе [18]. Для этого использовались экспериментальные данные по кинетике высвобождения нитрата аммония, полученные в водной среде. Значение коэффициента диффузии составило  $D = 4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}.$ 

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены зависимости степени выделения нитрата аммония от времени процесса в пористой среде (песок) для гранул с различной относительной массой оболочки. Точками показаны экспериментальные данные, а линиями расчет по модели. За 40 сут., согласно расчетам, степень выделения нитрата аммония из капсул с относительной массой оболочки 20% составила 0,954, из капсул с относительной массой оболочки 25% -0,915, из капсул с относительной массой оболочки 30% - 0,788. Расчетные данные хорошо подтверждаются результатами экспериментов. Так, среднеквадратичное отклонение расчетных и опытных данных для капсул с относительной массой оболочки 20% составило 0,002; с относительной массой оболочки 25% – 0,014; с относительной массой оболочки 30% – 0,019. Увеличение относительной массы оболочки приводит к увеличению ее толщины и, как следствие, к уменьшению скорости высвобождения нитрата аммония из капсул.



Рис. 2. Изменение во времени степени выделения нитрата аммония в пористой среде из капсулированных гранул с различной относительной массой оболочки: 1 – 20%; 2 – 25%; 3 – 30% Fig. 2. Comparison of experimentally measured (symbols) and calculated (lines) release from coated ammonium nitrate granules.

Mass fraction of the coating, %: 1 - 20; 2 - 25; 3 - 30

Сравнение кинетики выделения нитрата аммония в воде и пористой среде (песок) приведено на рис. 3. Из кривых рис. 3 следует, что характер высвобождения нитрата аммония при экспресс-анализе в воде и в условиях влажной почвенной среды (песок) практически одинаковый. Среднее относительное отклонение степени выделения для двух сред составило 3,3%. Это означает, что основным фактором, определяющим процесс выделения, является сам слой покрытия, а не внешняя среда, окружающая удобрение, будь то вода или почва.

На рис. 4, 5 приведены профили концентрации нитрата аммония в окружающей капсулу пористой среде в различные моменты времени. Расчеты выполнены при следующих значениях величин, входящих в уравнения математической модели:  $R_{n.c.}=0,025$  м,  $\varepsilon=0,1$ ,  $\rho=1700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\phi=0,18$ . На рис. 4 приведены результаты моделирования при отсутствии усвоения питательных веществ растениями, а на рис. 5 с учетом их усвоения. Величина усвоения удобрения растениями S=3,375·10<sup>-5</sup> кг/(м<sup>3</sup>·с) принималась по данным работы [23].



Рис. 3. Сравнение кинетики выделения нитрата аммония в водной и пористой среде для капсул с разной относительной массой оболочки: 1 – 20%; 2 – 30%

Непрерывная линия – выделение в воде, пунктирная линия – выделение в песке

Fig. 3. Comparison of release profiles of ammonium nitrate in water and porous medium for capsules with different mass fraction of the coating: 1 - 20%; 2 - 30%



Рис. 4. Изменение концентрации нитрата аммония в пористой среде по пространственной координате без усвоения удобрения растениями в различные моменты времени τ, сут.: 1 – 1; 2 – 10; 3 – 24; 4 – 30; 5 – 40

Fig. 4. Ammonium nitrate concentration profiles in porous medium along the spatial coordinate without the uptake of nutrients by plants at different times  $\tau$ , day: 1 - 1; 2 - 10; 3 - 24; 4 - 30; 5 - 40

При отсутствии усвоения питательных веществ растениями (рис. 4) наблюдается перестройка профилей концентрации. Так, на расстоянии 0,02 м от гранулы происходит постепенное увеличение концентрации нитрата аммония в почве, а в непосредственной близости от гранулы с момента времени 20 сут. его концентрация начинает уменьшаться. Это уменьшение связано с началом второго периода процесса высвобождения, когда твердое ядро полностью растворилось и концентрация в самой капсуле снижается. Максимально расстояние от гранулы, на которое диффундирует удобрение в почве при отсутствии усвоения его растениями, составило 0,025 м. Моделирование показало, что при усвоении питательных веществ растениями в первые 20 сут. происходит определенное накопление удобрения в почве (рис. 5), однако перестройка профилей в этом случае незначительная (кривая 2 идет чуть выше кривой 1). После растворения твердого ядра наблюдается снижение профиля концентрации нитрата аммония в почве (кривые 3-5). Кроме того, при наличии усвоения удобрения растениями, накопление его в пористой среде на расстояниях более 0,012 м от центра гранулы отсутствует (рис. 5).



Рис. 5. Изменение концентрации нитрата аммония в пористой среде по пространственной координате с учётом усвоения удобрения растениями в различные моменты времени τ, сут.: 1 – 1; 2 – 10; 3 – 24; 4 – 30; 5 – 40

Fig. 5. Ammonium nitrate concentration profiles in porous medium along the spatial coordinate with the uptake of nutrients by plants at different times  $\tau$ , day: 1 - 1; 2 - 10; 3 - 24; 4 - 30; 5 - 40

#### выводы

В работе получены удобрения с контролируемым высвобождением питательных веществ путем капсулирования товарной аммиачной селитры в полимерную оболочку. Исследована кинетика высвобождения нитрата аммония из капсулированных гранул, отличающихся относительной мас-

### А.А. Липин и др.

сой оболочки, в двух средах: пористой среде (песок) и в воде. Показано, что характер высвобождения нитрата аммония практически одинаковый для обеих сред. Среднее относительное отклонение степени выделения составило 3,3%. Разработана математическая модель процесса высвобождения нитрата аммония в пористой среде. Выполнены параметрическая идентификация и проверка адекватности модели. Среднеквадратичное отклонение расчетных по модели и опытных данных о степени выделения нитрата аммония не превышает 0,019. Предложенная модель помимо прогнозирования изменения степени выделения нитрата аммония во времени позволяет рассчитать профили изменения его концентрации в пористой среде. Показано различие в концентрационных профилях при наличии и отсутствии усвоения питательных веществ растениями.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение НИР (Тема № FZZW-2024-0004).

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

The study was financially supported by the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant No. FZZW-2024-0004).

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

#### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

- Moradi S., Babapoor A., Ghanbarlou S., Kalashgarani M. Y., Salahshoori I., Seyfaee A. Toward a new generation of fertilizers with the approach of controlled-release fertilizers: a review. *J. Coat. Technol. Res.* 2024. V. 21. P. 31–54. DOI:10.1007/s11998-023-00817-z.
- Vejan P., Khadiran T., Abdullah R., Ahmad N. Controlled release fertilizer: A review on developments, applications and potential in agriculture. *J. Control. Release*. 2021. V. 339. P. 321-334. DOI: 10.1016/j.jconrel.2021.10.003.
- Rahman M. H., Haque K.M.S., Khan M. Z. H. A review on application of controlled released fertilizers influencing the sustainable agricultural production: A Cleaner production process. *Environ. Tech. Innovat.* 2021. V. 23. P. 101697. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101697.
- Govil S., Long N.V.D., Escribà-Gelonch M., Hessel V. Controlled-release fertiliser: Recent developments and perspectives. *Ind. Crops Prod.* 2024. V. 219. P. 119160. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119160.
- Priya E., Sudipta S., Pradip K. M. A review on slow-release fertilizer: Nutrient release mechanism and agricultural sustainability. *J. Environ. Chem. Eng.* 2024. V. 12. N 4. P. 113211. DOI: 10.1016/j.jece.2024.113211.
- Asadu C.O., Ezema C.A., Ekwueme B.N., Onu C.E., Onoh I.M., Adejoh T., Ezeorba T.P.C., Ogbonna C.C., Otuh P.I., Okoye J.O., Emmanuel U.O. Enhanced efficiency fertilizers:

Overview of production methods, materials used, nutrients release mechanisms, benefits and considerations. *Environ. Pollut. Manag.* 2024. V. 1. P. 32-48. DOI: 10.1016/j.epm.2024.07.002.

- Jariwala H., Santos R.M., Lauzon J.D., Dutta A., Chiang Y. W. Controlled release fertilizers (CRFs) for climate-smart agriculture practices: a comprehensive review on release mechanism, materials, methods of preparation, and effect on environmental parameters. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. V. 29. P. 53967–53995. DOI: 10.1007/s11356-022-20890-y.
- Lawrencia D., Wong S.K., Low D.Y.S., Goh B.H., Goh J.K., Ruktanonchai U.R., Soottitantawat A., Lee L.H., Tang, S.Y. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release. *Plants*. 2021. V. 10. N 2. P. 238. DOI: 10.3390/plants10020238.
- Fufaeva V. M., Taran Yu. A., Strel'nikova V. O. Controlled-Release Fertilizers—A New Development in the Fertilizer Market (a Review). *Theor. Found. Chem. Eng.* 2024. V. 58. N 2. P. 287-294. DOI: 10.1134/S0040579524700477.
- Taran Yu. A., Fufaeva V. M. Production of encapsulated controlled-release fertilizers based on prilled and granular urea. *Chem. Petrol. Eng.* 2022. V. 58. N 5-6. P. 499-504. DOI: 10.1007/s10556-022-01120-1.
- Норов А.М., Соколов В.В., Рыбин Е.А., Лапушкин В.М., Пагалешкин Д.А., Владимиров В.А. Получение NPK- 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. Norov A.M., Sokolov V.V., Rybin E.A., Lapushkin V.M., Pagaleshkin D.A., Vladimirov V.A. Obtaining NPK and NP(S) fertilizers withlong-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.
- Липин А.Г., Липин А.А. Энерго- и ресурсосберегающие процессы с участием полимерной фазы. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 203-213. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6836j. Lipin A.G., Lipin A.A. Energy- and resource-saving processes involving the polymer phase. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. J.* 2023. V. 66. N 7. P. 203-213 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6836j.
- Irfan S.A., Razali R., KuShaari K., Mansor N., Azeem B., Ford Versypt A.N. A review of mathematical modeling and simulation of controlled-release fertilizers. *J. Control. Release*. 2018. V. 271. P. 45-54. DOI: 10.1016/j.jconrel.2017.12.017.
- Duan Q., Jiang Sh., Chen F., Li Zh., Ma L., Song Y., Yu X., Chen Y., Liu H., Yu L. Fabrication, evaluation methodologies and models of slow-release fertilizers: A review. *Ind. Crops Prod.* 2023. V. 192. P. 116075. DOI: 10.1016/j.indcrop.2022.116075.
- Trinh T. H., KuShaari K., Basit A., Azeem B., Shuib A. Use of Multi-Diffusion Model to Study the Release of Urea from Urea Fertilizer Coated with Polyurethane-Like Coating (PULC). *APCBEE Procedia*. 2014. V. 8. P. 146 – 150. DOI: 10.1016/j.apcbee.2014.03.017.
- Trinh T. H., KuShaari K., Shuib A. S., Ismail L., Azeem B. Modelling the release of nitrogen from controlled release fertiliser: Constant and decay release. *Biosyst. Eng.* 2015. V. 130. P. 34-42. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.12.004.
- Kusters G.L.A., Canadell J., de Vos S., Storm C., van der Schoot P. A mathematically tractable model for controlled release urea fertilisers. *Biosyst. Eng.* 2023. V. 228. P. 49-55. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.02.009.

- 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. Lipin A.G., Lipin A.A. Nitrogen release from polymer-coated urea granules. Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved.Khim. Khim. Tekhnol. J. 2022. V. 65. N 7. P. 100-106 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6635.
- Lipin A.A., Lipin A.G. Modelling nutrient release from controlled release fertilisers. *Biosyst. Eng.* 2023. V. 234. P. 81-91. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2023.08.015
- Липин А.А., Липин А.Г. Кинетика высвобождения питательных веществ из гранул NPK удобрения с полимерным покрытием. *Вестник ТГТУ*. 2022. Т. 28. № 3. С.466-475. DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.466-475. Lipin A.A.,

**Lipin A.G.** Nutrient Release From Polymer Coated NPK Fertilizer Granules. *Vestnik TGTU*. 2022. V. 28. N 3. P. 466-475 (in Russian). DOI: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.466-475.

- Lipin A.G., Lipin A.A., Wójtowicz R. Calculation of degree of coverage in fluidized bed coating. *Dry. Technol.* 2022. V. 40. N 1. P. 30-41. DOI: 10.1080/07373937.2020.1777153.
- 22. Товстик Е.В., Скугорева С.Г., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Подходы к испытанию удобрений контролируемого действия. *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 1. С. 182–190. DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-182-190. Tovstik E.V., Skugoreva S.G., Adamovich T.A., Ashikhmina T. Ya. Approaches to testing controlled fertilizers. *Theoret. Prikl. Ecolog.* 2022. N 1. P. 182–190 (in Russian). DOI: 10.25750/1995-4301-2022-1-182-190
- Gumnitskii Ya.M., Lyuta O.V. Molecular-diffusion mass transfer of substance in soil medium. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2014. V. 48. N 4. P. 414-419. DOI: 10.7868/S0040357114040046.

Поступила в редакцию 18.02.2025 Принята к опубликованию 25.04.2025

Received 18.02.2025 Accepted 25.04.2025