



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)

УДК 628.16.081.32

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.032

EDN: EEBQTP

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХСЛОЙНЫХ УДОБРЕНИЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ И ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Виктория Олеговна Стрельникова ¹, Юлия Александровна Таран ²,
Валентина Михайловна Фуфаева ³

^{1, 2, 3} МИРЭА – Российский технологический университет, Институт тонких химических технологий
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

¹ strelnikova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7438-804X>

² taran_yu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0938-973X>

³ fufaeva@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0099-3068>

Аннотация. Представлены результаты исследования качественных показателей двухслойных гранул азотсодержащих удобрений. В качестве исходных гранул использовались гранулированный и приллированный карбамид, а также приллированное НРК-удобрение. Первый слой включал порошкообразный наполнитель из фосфогипса и раствор лигносульфоната как связующее, причём оба компонента являются отходами производств. Второй слой представлял собой защитную оболочку на основе стеариновой кислоты. Качество полученных гранул оценивали исходя из качества поверхности, статической прочности, а также скорости растворения гранул в дистиллированной воде (продолжительного эффекта). В результате было показано, что полученные удобрения обладают приемлемым качеством поверхности (гладкое и равномерное покрытие), повышенной статической прочностью (в 1,4–3 раза больше относительно исходных гранул) и пролонгированным эффектом (время полного растворения 5–7 суток в сравнении с 1–2 часами для исходных гранул). Применение таких удобрений позволит снизить объём разрушенных гранул в процессе их хранения, транспортировки и внесения удобрений в почву, а также уменьшить потери азота в результате почвенных преобразований, что в совокупности минимизирует негативное воздействие на окружающую среду. Кроме того, вовлечение в процесс невостребованных отходов химической промышленности соответствует принципам устойчивого развития в рамках экономики замкнутого цикла.

Ключевые слова: азотсодержащие удобрения, наполнитель, фосфогипс, защитное покрытие, статическая прочность, пролонгированный эффект.

Благодарности: авторы выражают признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Стрельникова В. О., Таран Ю. А., Фуфаева В. М. Исследование качественных показателей двухслойных удобрений с наполнителем и защитной оболочкой // Ползуновский вестник. 2026. № 1, С. 207–213. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.032. EDN: <https://elibrary.ru/EEBQTP>.

Original article

INVESTIGATION OF QUALITY INDICATORS OF TWO-LAYER FERTILIZERS WITH A FILLER AND A PROTECTIVE COATING

Victoria O. Strelnikova ¹, Yulia A. Taran ², Valentina M. Fufaeva ³

^{1, 2, 3} MIREA - Russian Technological University, Institute of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov, Moscow, Russia

¹ strelnikova@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7438-804X>

² taran_yu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0938-973X>

³ fufaeva@mirea.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0099-3068>

Abstract. The article presents the results of a study of the qualitative properties of two-layer granules of nitrogen-containing fertilizers. Granulated and prilled urea, as well as prilled NPK fertilizer, were used as the initial

© Стрельникова В. О., Таран Ю. А., Фуфаева В. М. 2026

granules. The first layer included a powdered phosphogypsum filler and a lignosulfonate solution as a binder, both components being industrial waste. The second layer was a protective shell based on stearic acid. The quality of the resulting granules was assessed based on surface quality, static strength, and the rate of dissolution of the granules in distilled water (prolonged effect). The results showed that the obtained fertilizers have an acceptable surface quality (smooth and uniform coating), increased static strength (1.4-3 times greater than that of the initial granules), and a prolonged effect (complete dissolution time of 5-7 days compared to 1-2 hours for the initial granules). The use of such fertilizers will reduce the volume of granules destroyed during storage, transportation, and soil application, as well as nitrogen loss due to soil transformation, which will minimize the negative impact on the environment. Furthermore, the inclusion of unclaimed chemical industry waste in the process is consistent with the principles of sustainable development within the framework of a circular economy.

Keywords: Nitrogen-containing fertilizers, filler, phosphogypsum, protective coating, static strength, prolonged effect.

Acknowledgements: the authors express gratitude to colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Strelnikova, V.O., Taran, Yu.A., Fufaeva, V.M. (2026). Investigation of the quality indicators of two-layer fertilizers with a filler and a protective coating. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 207-213. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.032. EDN: <https://elibrary.ru/EEBQTP>.

ВЕДЕНИЕ

Высокие потери традиционных гранулированных удобрений в процессе обращения с ними (10–15% [1]), а также почвенных преобразований азота (20–60 % [2]) являются причиной загрязнения окружающей среды и экономического убытка как производителей удобрений, так и фермеров. Для решения данной проблемы на рынок вводятся новые виды удобрений, обладающие улучшенными физико-механическими свойствами (в первую очередь статической прочностью), а также замедленной скоростью растворения гранул в почве (т.е. пролонгированным эффектом).

Известным приёмом улучшения физико-механических свойств продукции является использование наполнителей различной природы [3]. В области производства гранулированных удобрений наполнитель представляет собой порошкообразное вещество, которое вносят в раствор/плав минерального удобрения, смешивают с исходными или измельчёнными гранулами удобрения или наносят на поверхность исходных гранул в количестве 5–25% масс. или более [4–8]. Кроме того, в области агрохимии для соответствия принципам устойчивого (в том числе зелёного) развития [9] в процессы получения минеральных удобрений активно внедряются всевозможные невоспребованные отходы производств, например, применение избыточного активного ила рассмотрено в [10]. К таким отходам относится фосфогипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – побочный продукт производства фосфорсодержащих удобрений [4, 6].

Удобрения с пролонгированным эффектом представляют собой ядра гранул, покрытых оболочками со сниженной растворимостью в воде, т.е. обладающих гидрофобными свойствами. Такие оболочки создают физический барьер для транспорта питательных веществ из удобрения в почву, благодаря чему увеличивается доля азота, используемого выращиваемыми культурами, а также снижается объём соединений азота, подверженных вымыванию в поверхностные и грунтовые воды и улетучиванию в атмосферу [2]. Для покрытия используют органические, неорганические, полимерные и биополимерные вещества [11]. Применение стеариновой кислоты с целью замедления высвобождения питательных элементов из гранул удобрения рассмотрено в [12, 13, 14]. Следует отметить, что стеариновая кислота при внесении в почву под действием микробиоты разлагается на CO_2 и H_2O , что поз-

воляет избежать загрязнения почвы балластными материалами и отнести её к биоразлагаемым веществам [15].

Совместное использование наполнителей и верхнего гидрофобного покрытия рассмотрено в работе [16], где за счёт нанесения двухслойного покрытия, состоящего из первого слоя – смеси гипса и серы (20 % об.) и наружного слоя – расплава парафина (3 % об.) была повышена эффективность карбамида на 26 %.

Представленное исследование является продолжением работы авторов по получению сложных удобрений с наполнителем [17]. С целью предотвращения разрушения структуры сложных гранул с наполнителем и замедления растворения их в почве были проведены исследования по нанесению верхней защитной оболочки на основе стеариновой кислоты с получением двухслойных гранул, а также изучение свойств полученных гранул.

МЕТОДЫ

Двухслойные удобрения получены на основе карбамида марки Б (ГОСТ 2081-2010) в приллированном и гранулированном виде, а также NPK-удобрения марки 16:16:16 (ТУ 2186-031-00206486-2013) в виде прилл. Исследования проводились на узкой фракции исходных гранул с диаметром 3–4 мм.

Наполнителем выступал порошкообразный фосфогипс (ГОСТ Р 58820-2020), высушенный до постоянной массы с дисперсностью частиц < 0,2 мм. Наполнитель вводился в количестве 50 % от массы исходных гранул. В качестве связующего для нанесения наполнителя на исходные гранулы использовался 40 % раствор лигносульфоната, приготовленный из исходного порошка (ТУ 2455-028-00279580-2004).

Гидрофобное покрытие представляло из себя расплав на основе стеариновой кислоты марки Т-32 (ГОСТ 6484-96).

Процесс нанесения наполнителя на исходные гранулы удобрения проводили на лабораторной установке с тарельчатым гранулятором, описанной в [17]. Режимно-технологические параметры работы гранулятора: угол наклона тарелки – $35 \pm 2^\circ$, частота вращения тарелки – 30 ± 1 об/мин и температура в слое гранул – $40 \pm 5^\circ\text{C}$.

Покрытие полученных гранул сложного удобрения защитной оболочкой также осуществляли в тарельчатом грануляторе путём распыла покрытия через форсунку на движущийся слой гранул. Температурный режим на форсунке устанавливался на уровне

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХСЛОЙНЫХ УДОБРЕНИЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ И ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

75±5°С. Расход состава покрытия рассчитывался из планируемой доли покрытия, которая составляла 25 % масс. для всех вариантов опытов.

Для готовых гранул оценивали: качество поверхности – микроскопическим методом, статическую прочность – по ГОСТ 21560.2-82 на приборе ИПГ-1М и скорость растворения (продолгованный эффект) – весовым методом, который включает растворение навески гранул, помещённой в непроточную ячейку, в дистиллированной воде, отбор остатка через установленные промежутки времени, высушивание его до постоянной массы и взвешивание.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные гранулы удобрений с наполнителем (однослойные) и с защитной оболочкой (двухслойные) представлены на рисунке 1. Видно, что приллы обладают более сферической формой по сравнению с гранулами, что является следствием различных технологий производства данных продуктов [18]. Вместе с тем, после финишного покрытия защитной оболочкой все образцы удобрений обладают равномерным покрытием достаточно гладкой поверхностью.

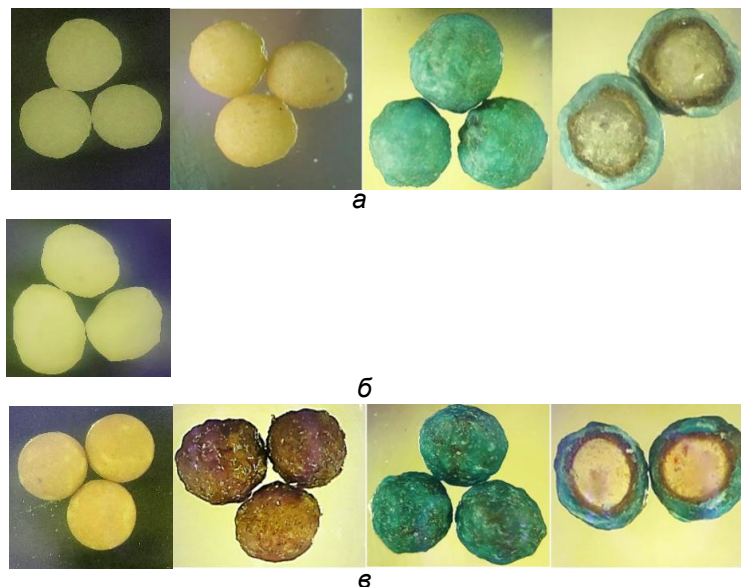


Рисунок 1 – Вид гранул азотсодержащих удобрений: первый столбец – исходные гранулы; второй столбец – однослойные (с наполнителем); третий столбец – двухслойные (с наполнителем и защитной оболочкой); четвёртый столбец – двухслойные в разрезе; а – приллырованный карбамид; б – гранулированный карбамид; в – приллырованный NPK

Figure 1 – The type of granules of complex fertilizer with filler: first column – original granules; second column – single-layer (with filler); third column – two-layer (with filler and protective shell); fourth column – two-layer in section; а – prilled urea; б – granulated urea; в – prilled NPK

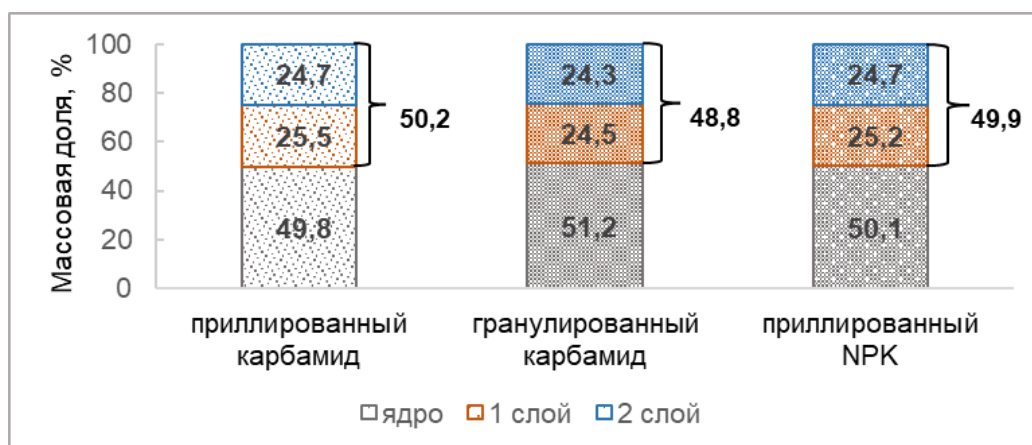


Рисунок 2 – Массовая доля покрытия двухслойных гранул

Figure 2 – Mass fraction of coating of two-layer granules

Расчёт массовой доли покрытия осуществлялся по формуле (1):

POLZUNOVSKIY VESTNIK № 1 2026

$$x_{\text{покр.}} = \frac{m - m_0}{m} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $x_{\text{покр.}}$ – массовая доля покрытия, % масс.; m – масса двухслойных гранул с покрытием, г; m_0 – масса исходных гранул без покрытия, г.

Установлено (рис. 2), что в среднем массовая доля покрытия двухслойных гранул составляет $49 \pm 0,7\%$ масс., причём наименьшее значение наблюдается в случае использования в качестве исходного удобрения (ядра) гранулированного карбамида. Это

объясняется изначально менее гладкой поверхностью и сферичностью гранул по сравнению с приллами, что способствует худшему прикреплению порошка наполнителя к ядру. Тем не менее, можно заключить, что для всех вариантов двухслойных удобрений массовая доля покрытия в среднем составляет половину от общей массы гранул, при этом соотношение первого и второго слоёв покрытия 1:1.

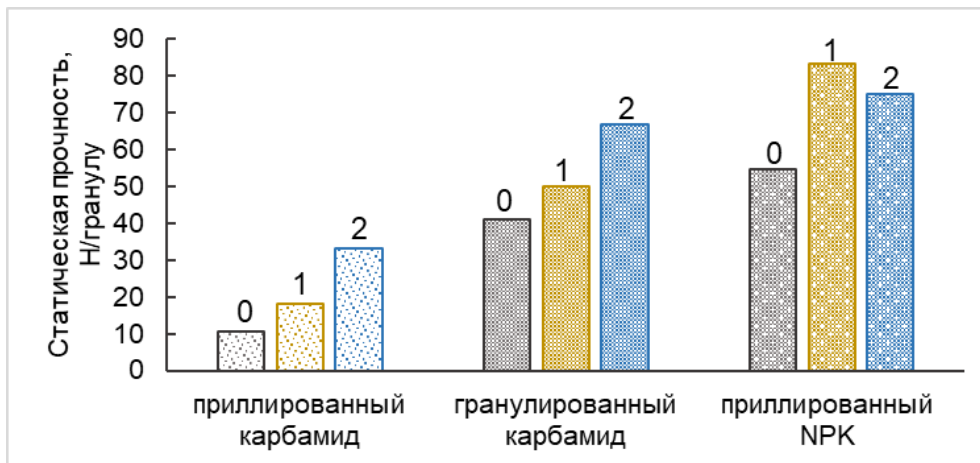


Рисунок 3 – Значения статической прочности гранул удобрений: 0 – исходные гранулы; 1 – однослойные; 2 – двухслойные

Figure 3 – Values of static strength of granules of fertilizer: 0 – original granules; 1 single-layer; 2 – two-layer

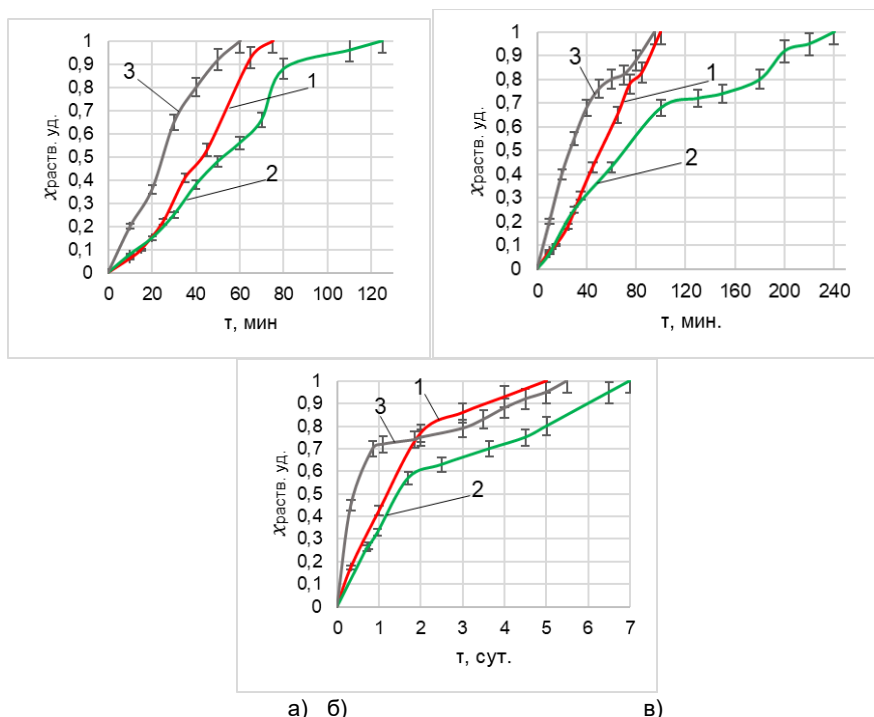


Рисунок 4 – Кривые растворимости гранул удобрений: а – исходные гранулы; б – однослойные; 2 – двухслойные; 1 – приллированный карбамид; 2 – гранулированный карбамид; 3 – приллированный NPK

Figure 4 – Solubility curves of fertilizer granules: а – original granules; б – single-layer; 2 – double-layer; 1 – prilled urea; 2 – granulated urea; 3 – prilled NPK

Результаты исследования динамики изменения статической прочности гранул при последова-

тельном нанесении слоёв представлены на рисунке 3. Для карбамида как приллированного, так и

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХСЛОЙНЫХ УДОБРЕНИЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ И ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

гранулированного наблюдается увеличение значений статической прочности (в 3 и 1,5 раза соответственно) в сравнении с непокрытыми гранулами. Для двухслойных гранул на основе NPK также характерно увеличение прочности относительно исходных гранул (в 1,4 раза), однако следует отметить, что после нанесения защитного слоя прочность немного снижается относительно однослойных гранул. Вероятно, адгезия первого слоя, состоящего из порошкообразного фосфогипса, к поверхности гранул NPK-удобрения больше, чем к поверхности гранул карбамида, поэтому финишное покрытие на основе стеариновой кислоты, являющееся само по себе достаточно мягким, незаметно снижает статическую прочность гранул NPK-удобрения. Напротив, для карбамида последующее нанесение защитного покрытия позволяет сильнее сцепить частицы наполнителя и упрочнить рыхлую структуру покрытия.

Для определения скорости растворения образцов полученных удобрений рассчитывали долю растворившегося удобрения по формуле (2):

$$x_{\text{раств.уд.}} = 1 - \frac{m_{\text{ост.}} - (m_{\text{пок.}} - m_{\text{связ.}})}{m_{\text{нав.}} \cdot x_{\text{пок.}}},$$

где $x_{\text{раств.уд.}}$ – массовая доля растворившегося удобрения; $m_{\text{ост.}}$ – масса высушенного остатка, г; $m_{\text{пок.}}$ – масса покрытия, г; $m_{\text{связ.}}$ – масса сухого вещества в связующем, г; $m_{\text{нав.}}$ – масса исходной навески, г; $x_{\text{пок.}}$ – массовая доля покрытия.

Далее строили зависимости доли растворившегося сложного двухслойного удобрения от времени (рис. 4). Также для сравнительного анализа были построены кривые растворимости для исходных гранул удобрений, которые получили рефрактометрическим методом путём измерения концентрации удобрения в растворе по показателю преломления (рис. 4, а). Видно, что для всех видов двухслойных гранул время полного растворения значительно увеличилось по сравнению с исходными гранулами (рис. 4, в). Так, за 1-е сутки гранулы на основе приллированного карбамида растворились на 43 %, на основе гранулированного карбамида – на 34 % и приллированного NPK-удобрения – на 70 %, при этом полное растворение происходит за 5, 7 и 5,5 суток соответственно. Для всех исходных полное растворение происходит в пределах двух часов (рис. 4, а). Покрытие гранул фосфогипсом не дало значительного пролонгированного эффекта (рис. 4, б), для всех образцов полное растворение наблюдалось в течение 1,5–4 часов, т.е. за первые сутки. Причиной этого является присутствие в первом слое покрытия водорастворимого связующего – лигносульфоната, который выделяется в раствор, после чего частицы порошкообразного наполнителя (фосфогипса) осыпаются с поверхности гранулы, способствуя выделению питательных компонентов из гранулы в раствор. Также можно отметить, что скорость растворения двухслойных гранул на основе приллированных продуктов больше (а время полного растворения меньше), чем для гранул на основе гранулированного карбамида, что связано с

большей удельной поверхностью прилл, а также наличием усадочного канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования подтверждают возможность получения двухслойных гранул азотсодержащих удобрений с наполнителем и защитным покрытием, обладающих повышенной статической прочностью и пролонгированным эффектом. Это позволит уменьшить долю разрушенных гранул на этапах хранения, транспортировки и внесения удобрений в почву, а также снизить долю удобрений, подверженных вымыванию и переходу в газообразные соединения в результате почвенных преобразований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Кизинек С.В. Агрохимические основы применения удобрений. Майкоп : ОАО «ПолиграфЮГ», 2013. 571 с.
2. Urea application in soil: processes, losses, and alternatives – a review / A.M. Motasim [et al.] // Discov Agric. V. 2. № 42. 2024. doi.org/10.1007/s44279-024-00060-z.
3. Использование азотсодержащих кремнийорганических соединений при создании термо- и огнестойких компаундов для герметизации высоковольтного и высокочастотного оборудования / А.Д. Кирилин [и др.] // Тонкие химические технологии. 2024. Т. 19. № 4. С. 293–306. doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-4-293-309.
4. Vashishtha M., Dongara P., Singh D. Improvement in properties of urea by phosphogypsum coating // International Journal Chem Tech Research. 2010. V. 2. № 1. P. 36–44.
5. Dubey A., Mailapalli D.R. Zeolite coated urea fertilizer using different binders: Fabrication, material properties and nitrogen release studies // Environmental Technology & Innovation. 2019. V. 16. P. 100452. doi.org/10.1016/j.eti.2019.100452.
6. Shivay Y.S., Prasad R., Pal. M. Effect of nitrogen levels and coated urea on growth, yields and nitrogen use efficiency in aromatic rice. Journal of Plant Nutrition. 2015. V. 36. № 6. P. 875–882. doi.org/10.1080/01904167.2015.1109102.
7. New coating formulation for the slow release of urea using a mixture of gypsum and dolomitic limestone / F.E. Babadi [et al.] // Particuology. 2015. V. 23. P. 62–67. doi.org/10.1016/j.partic.2014.12.011.
8. Lipin A.A., Lipin A.G. Particle coating with composite shell in a pan granulator // Particulate science and technology. 2021. V. 40. № 1. P. 123–130. doi.org/10.1080/02726351.2021.1927272.
9. Cordeiro C.M., Sindhøj E. Situating the discourse of recycled nutrient fertilizers in circular economy principles for sustainable agriculture // Front. Sustain. 2024. 5:1465752. doi: 10.3389/frsus.2024.1465752.
10. Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования по утилизации избыточного активного ила // Ползуновский вестник. 2015. Т. 1. № 4. С. 114–118.
11. Фуфаева В.М., Таран Ю.А., Стрельникова В.О. Удобрения пролонгированного действия – новый этап развития рынка удобрений (обзор) // Химическая технология. 2024. № 3. С. 86–96. doi:10.31044/1684-5811-2024-25-3-86-95.

12. Affendi N.M.N., Mansor N., Mathialagan R. Development and characterization of allicin using palm stearin as a binder on urea granules // *Journal of Plant Nutrition*. 2019. V. 43. № 5. P. 621–628. doi: 10.1080/01904167.2019.1701021.

13. Synthesis, characterization and analysis of biodegradable polymer-coated urea fertilizers for controlled nutrient release / B. Balashanmugavel [et al.] // *Polym. Bull.* 2024. V. 81. P. 15533–15549. Doi: org/10.1007/s00289-024-05431-6.

14. Influence of biodegradable polymer coated urea on nitrogen uptake and utilization of maize (*Zea mays* L.) / B. Balaganesh [et al.] // *International Journal of Plant & Soil Science*. 2021. V. 33. № 24. P. 297–306. doi: 10.9734/IJPSS/2021/v33i2430781.

15. Decomposition of lipids in soils: Free and esterified fatty acids, alcohols and ketones / J. Moucawi [et al.] // *Soil Biology and Biochemistry*. 1981. V. 13. № 6. P. 461–468. Doi: org/10.1016/0038-0717(81)90035-3.

16. Ibrahim K.R.M., Babadi F.E., Yunus R. Comparative performance of different urea coating materials for slow release // *Particuology*. 2014. V. 17. P. 165–172. doi: 10.1016/j.partic.2014.03.009.

17. Стрельникова В.О., Таран Ю.А. Получение нового удобрения на основе карбамида с использованием фосфогипса в качестве наполнителя // *Химическая промышленность сегодня*. 2023. № 5. С. 29–37. doi: 10.53884/27132854_2023_5_29.

18. Соколовский А.А., Яшке Е.В. Технология минеральных удобрений и кислот / А.А. Соколовский. Москва : Химия, 1971. 456 с.

Информация об авторах

В. О. Стрельникова – старший преподаватель «Кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н. И.», Институт тонких химических технологий им М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет.

Ю. А. Таран – доктор технических наук, доцент, заведующий «Кафедрой процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.», Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет.

В. М. Фуфаева – кандидат технических наук, преподаватель «Кафедры процессов и аппаратов химических технологий имени Гельперина Н.И.», Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова, ФГБОУ ВО МИРЭА – Российский технологический университет.

REFERENCES

1. Sheudzhen, A.Kh., Bondareva, T.N. & Kizinek, S.V. (2013). *Agrochemical principles of fertilizer application*. Maykop : Poligra FYUG. (In Russ.).

2. Motasim, A.M., Samsuri, A.W., Nabayi, A., Akter, A., Haque, M.A. & Adibah, A.M. (2024). Urea application in soil: processes, losses, and alternatives - a review. *Discov Agric*, V. 2,(42). doi: org/10.1007/s44279-024-00060-z.

3. Kirilin, A.D., Belova, L.O., Golub, N.A., Pletnyova, M.V., Kirilina, N.I. & Mironov, D.E. (2024). The use of nitrogen-containing organosilicon compounds in the creation of heat- and fire-resistant compounds for sealing high-voltage and high-frequency equipment //

Fine chemical technologies, V. 19,(4), 293-306. (In Russ.). doi: org/10.32362/2410-6593-2024-19-4-293-309.

4. Vashishtha, M., Dongara, P. & Singh, D. (2010). Improvement in properties of urea by phosphogypsum coating. *International Journal Chem Tech Research*, V. 2, (1), 36-44.

5. Dubey, A. & Mailapalli, D.R. (2019). Zeolite coated urea fertilizer using different binders: Fabrication, material properties and nitrogen release studies. *Environmental Technology & Innovation*, V. 16, (13), 100452. doi: org/10.1016/j.eti.2019.100452.

6. Shivay, Y.S., Prasad, R. & Pal, M. (2015). Effect of nitrogen levels and coated urea on growth, yields and nitrogen use efficiency in aromatic rice. *Journal of Plant Nutrition*, 36 (6), 875-882. doi: org/10.1080/01904167.2015.1109102.

7. Babadi, F.E., Yunus, R., Rashid, S.A., Salleh, M.A.M. & Ali, S. (2015). New coating formulation for the slow release of urea using a mixture of gypsum and dolomitic limestone. *Particuology*, (23), 62-67. doi: org/10.1016/j.partic.2014.12.011.

8. Lipin, A.A., Lipin, A.G. (2021). Particle coating with composite shell in a pan granulator. *Particulate science and technology*, V. 40, (1), 123-130. doi: org/10.1080/02726351.2021.1927272.

9. Cordeiro, C.M. & Sindhøj, E. (2024). Situating the discourse of recycled nutrient fertilizers in circular economy principles for sustainable agriculture. *Front. Sustain*, (5), 1465752. doi: 10.3389/frsus.2024.1465752.

10. Gorelova, O.M., Titova, K.YU. (2015). Research on the utilization of excess activated sludge. *Polzunovskij vestnik*, V. 1, № 4, 114-118. (In Russ.).

11. Fufaeva, V.M., Taran, Yu.A. & Strel'nikova, V.O. (2024). Slow-release fertilizers - a new stage in the development of the fertilizer market (review). *Chemical technology*, (3), 86-96. (In Russ.). doi: 10.31044/1684-5811-2024-25-3-86-95.

12. Affendi, N.M.N., Mansor, N. & Mathialagan, R. (2018). Development and characterization of allicin using palm stearin as a binder on urea granules. *Journal of Plant Nutrition*, V. 43. (5). P. 621-628. doi: 10.1080/01904167.2019.1701021.

13. Balashanmugavel, B., Subramani, M., Vunnam, V. & Kasiviswanathan, S.Ch.B. (2024). Synthesis, characterization and analysis of biodegradable polymer-coated urea fertilizers for controlled nutrient release. *Polym. Bull.*, V. 81. 15533-15549. Doi: org/10.1007/s00289-02405431-6.

14. Balaganesh, B., Malarvizhi, P., Chandra Sekaran, N., Jeyakumar, K P., Latha, R. & Lakshmanan, A. (2021). Influence of biodegradable polymer coated urea on nitrogen uptake and utilization of maize (*Zea mays* L.) // *International Journal of Plant & Soil Science*, V. 33, (24), 297-306. doi: 10.9734/IJPSS/2021/v33i2430781.

15. Moucawi, J., Fustec, E., Jambu, P. & Jacquesy, R. (1981). Decomposition of lipids in soils: Free and esterified fatty acids, alcohols and ketones // *Soil Biology and Biochemistry*, V. 13. (6). 461-468. Doi: org/10.1016/0038-0717(81)90035-3.

16. Ibrahim, K.R.M., Babadi, F.E. & Yunus, R. (2014). Comparative performance of different urea coating materials for slow release. *Particuology*, V. 17, 165-172. doi: 10.1016/j.partic.2014.03.009.

17. Strel'nikova, V.O., Taran, Yu.A. (2023). Production of a new urea-based fertilizer using phosphogypsum as a filler. *The chemical industry today*, (5), 29-37. (In Russ.). doi: 10.53884/27132854_2023_5_29.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВУХСЛОЙНЫХ УДОБРЕНИЙ С НАПОЛНИТЕЛЕМ И ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ

18. Sokolovskij, A.A. & Yashke, E.V. (1971). Technology of mineral fertilizers and acids. Moscow : Himiya. (In Russ.).

Information about the authors

V.O. Strelnikova - is a senior lecturer at the N.I. Gelperin Department of Processes and Apparatuses in Chemical Engineering, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technology, MIREA - Russian Technological University.

U.A. Taran - is a doctor of engineering sciences, associate professor, and head of the N.I. Gelperin Department of Processes and Apparatuses in Chemical Engineering, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technology, MIREA - Russian Technological University.

V.M. Fufaeva - is a candidate of engineering sciences, lecturer at the N.I. Gelperin Department of Processes and Apparatuses in Chemical Engineering, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technology, MIREA - Russian Technological University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mart 2026.