

УДК 631.84.7:631.813:633.11“321”

АГРОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОЧЕВИНЫ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ[§]

© 2024 г. В. М. Лапушкин^{1,2,*}, М. А. Волкова^{1,2}, А. А. Лапушкина^{1,2}, С. П. Торшин¹,
Ф. Г. Игралиев¹, А. М. Норов³, Д. А. Пагалешкин³, П. С. Федотов³,
В. В. Соколов³, И. М. Кочетова³, Е. А. Рыбин³

¹ Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127434 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

³ Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова
162625 Череповец, Северное шоссе, 75, Россия

*E-mail: lapushkin@rgau-msha.ru

Представлены результаты серии вегетационных опытов, в которых изучили влияние мочевины с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция на формирование урожая яровой пшеницы. Показали, что капсулированная мочевина в сравнении с ее обычной формой обеспечивала увеличение урожая зерна яровой пшеницы на 9–13%. Покрытие гранул мочевины дигидрофосфатом кальция способствовало более равномерному высвобождению азота удобрения, повышая эффективность его использования растениями на 10–13%. Установлено, что эффективность капсулированной мочевины находится в прямой зависимости от толщины покрытия гранул.

Ключевые слова: азотные удобрения, мочевина пролонгированного действия, капсулированная мочевина, дигидрофосфат кальция, яровая пшеница, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188124040049, **EDN:** dlzqkv

ВВЕДЕНИЕ

Растущее мировое население требует увеличения продуктивности сельскохозяйственного производства, что, в свою очередь, приводит к увеличению спроса на удобрения [1–5].

Наиболее применяемыми агрохимикатами в сельскохозяйственном производстве являются азотные удобрения. В структуре мирового потребления минеральных удобрений на их долю приходится около 56%, а спрос на них на рынке каждый год возрастает в среднем на 3% [6–8].

Традиционные азотные удобрения вследствие высоких потерь азота характеризуются низкой агрономической и экономической эффективностью. Известно, что в результате вымывания нитратов из корнеобитаемого слоя, улетучивания аммиака, денитрификации и иммобилизации потери азота удобрений в совокупности могут достигать 70% [9–13].

Потери азота из удобрений оказывают экологическую нагрузку на окружающую среду, вследствие выбросов парниковых газов (в частности — N_2O) в атмосферу, загрязнения грунтовых вод и эвтрофикации поверхностных вод [1, 11–15].

Таким образом, перед производителями азотных удобрений по-прежнему стоит задача совершенствования своей продукции с целью повышения ее эффективности и минимизации возможных негативных воздействий на окружающую среду [1, 15].

В последние десятилетия производители удобрений сосредоточились на производстве удобрений пролонгированного действия [13]. Капсулированная мочевина считается одним из перспективных удобрений длительного действия. Исследования показали, что мочевина с покрытием способна обеспечить прирост урожая зерновых культур до 40% [16]. Наиболее изучена мочевина, покрытая элементарной серой и полимерами различного происхождения.

Как показала практика применения, покрытие гранул мочевины серой малоэффективно из-за “взрывного” характера высвобождения элементов

[§] Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”.

питания. Применение удобрений с полимерным покрытием ограничивается тем, что большинство синтетических полимеров, применяемых для капсулирования, трудно разлагаемы, что приводит к их накоплению и загрязнению окружающей среды. Биоразлагаемые полимеры чувствительны к воде и обладают плохой пленкообразующей способностью, что снижает эффект пролонгации, усложняет процесс производства и повышает стоимость удобрений [15].

Таким образом, в настоящее время актуальна разработка новых экономически эффективных форм мочевины пролонгированного действия, соответствующих экологическим стандартам и обеспечивающих оптимальные темпы высвобождения азота.

Для решения вопроса, связанного со снижением потерь азота мочевины и ресурсосбережением, Научно-исследовательским институтом по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова были получены образцы мочевины с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция [17].

В сельскохозяйственном производстве однозамещенный фосфат кальция, более известный как суперфосфат, является хорошо изученным и рекомендовавшим себя фосфорным удобрением. Данное неорганическое соединение в отличие от полимерных веществ не только легкодоступно и легко производимо на предприятиях по выпуску агрохимикатов, но и безопасно с экологической точки зрения.

Интенсивность высвобождения азота из капсулированной мочевины зависит от толщины покрытия гранулы дигидрофосфатом кальция, что подтверждено результатами лабораторных исследований. При этом оптимальная толщина покрытия гранул пока не определена.

В связи с вышеизложенным, цель работы — изучение эффективности новой формы мочевины пролонгированного действия с различной толщиной покрытия гранул дигидрофосфатом кальция на посевах яровой пшеницы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования новой формы мочевины в период с 2020 по 2022 г. в вегетационном домике кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ—МСХА им. К.А. Тимирязева была проведена серия опытов на яровой пшенице сорта Любава. Любава — районированный сорт яровой пшеницы современной селекции “ФИЦ Немчиновка” и введенный в Государственный реестр селекционных достижений в 2012 г.

Вегетационные опыты проводили в четырехкратной повторности. Растения пшеницы выращивали в сосудах Митчерлиха вместимостью 5 кг сухой почвы. Для набивки сосудов использовали пахотный

горизонт дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Перед закладкой опыта почву известковали.

Агрохимические показатели пахотного горизонта почвы определяли по общепринятым методикам: содержание гумуса — по ГОСТ 26213-91 (метод Тюрин), pH_{KCl} — по ГОСТ 26483-85, гидролитическую кислотность — по ГОСТ 26212-2021 (метод Каппена), сумма поглощенных оснований — по ГОСТ 27821-88 (метод Каппена—Гильковица), содержание подвижных форм фосфора и обменного калия — по ГОСТ Р 54650-2011 (метод Кирсанова), содержание щелочегидролизующего азота — по Корнфилду.

В среднем за 3 года почва пахотного горизонта после известкования характеризовалась следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса — низкое (2.57%), pH_{KCl} — близкий к нейтральному (pH 5.7), гидролитическая кислотность — низкая (1.58 мг-экв/100 г), сумма поглощенных оснований — высокая (13.2 мг-экв/100 г), емкость катионного обмена — высокая (14.8 мг-экв/100 г), степень насыщенности основаниями — высокая (89%), содержание щелочегидролизующего азота по Корнфилду — низкое (68 мг/кг), подвижных форм фосфора по Кирсанову — среднее (92 мг/кг), обменного калия по Кирсанову — повышенное (158 мг/кг).

В каждый сосуд высевали по 30 семян пшеницы. После появления всходов проводили прореживание, удаляя нетипичные растения и оставляя до созревания по 20 растений. Урожай убирали в фазе полной спелости зерна.

Схема опыта включала в себя 4 варианта: 1. РК — фон, 2. РК + мочевина без покрытия (вариант сравнения), 3. РК + мочевина капсулированная, толщина покрытия 50 мкм, 4. РК + мочевина капсулированная, толщина покрытия 100 мкм.

В качестве фосфорного и калийного удобрения применяли монокальцийфосфат и хлорид калия. Дозы удобрений устанавливали в соответствии с рекомендациями Журбицкого из расчета: N — 0.15, P_2O_5 —0.1, K_2O — 0.1 г д.в./кг почвы. При расчете доз удобрений учитывали снижение содержания азота в капсулированных удобрениях и содержание фосфора в нанесенных покрытиях.

Из приведенных микрофотографий распределения элементов питания по поверхности скола гранулы карбамида видно, что нанесенное покрытие плотно прилегал к поверхности гранулы и полностью ее обволакивало, имело достаточно прочную структуру без существенных дефектов и макропор. По поверхности гранулы покрытие было распределено в достаточной степени равномерно, заданная толщина выдержана (рис. 1).

Содержание азота в исходном удобрении — 46%, при нанесении покрытия толщиной 50 мкм, удобрение содержало 40% азота и 8% фосфора, при толщине

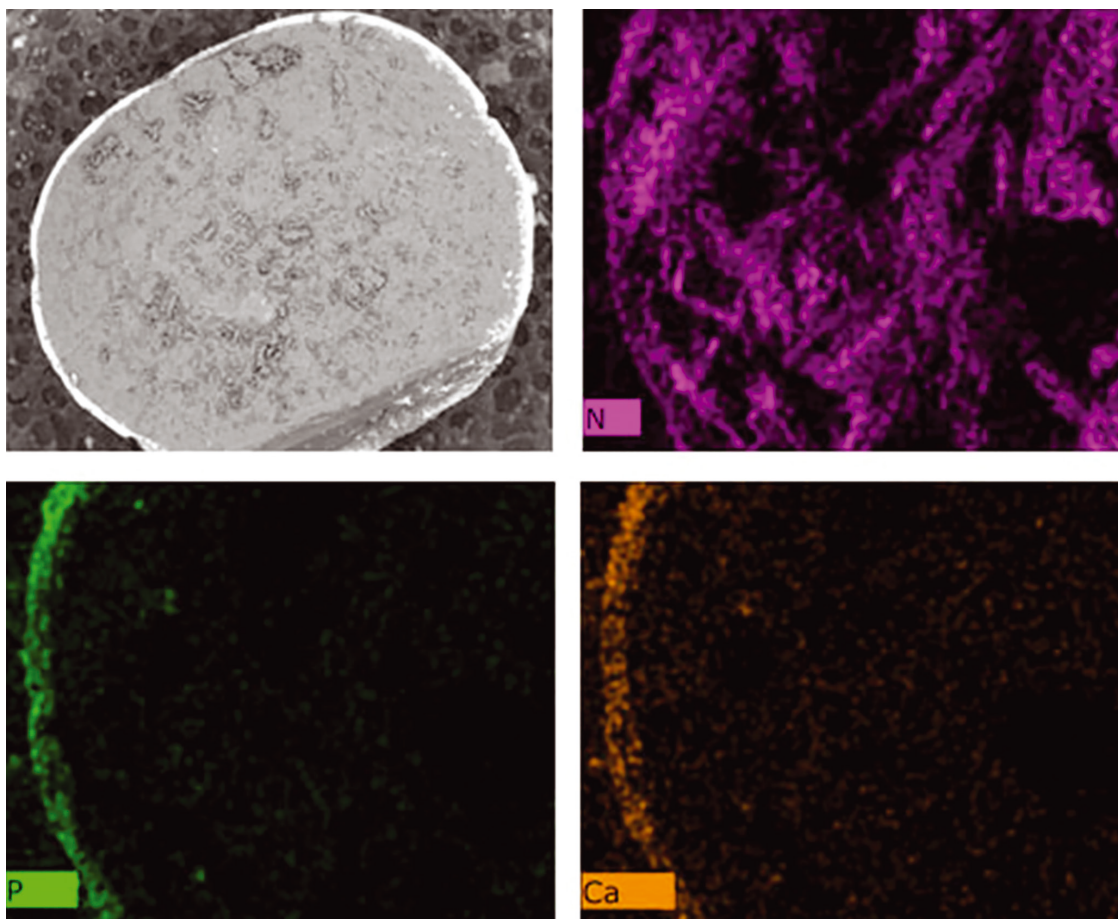


Рис. 1. Микрофотография скола гранулы капсулированного карбамида и распределение азота, фосфора и кальция по поверхности скола.

покрытия 100 мкм содержание азота снижалось до 35%, а фосфора увеличивалось до 14%.

Определение содержания азота, фосфора и калия в растительных образцах осуществляли в соответствии с общепринятыми методиками: содержание азота — ГОСТ 13496.4-93 (метод Кельдаля), фосфора — по ГОСТ 26657-97 (колориметрический метод), калия — по ГОСТ 30504-97 (пламенно-фотометрический метод). Перед определением основных элементов питания растительный материал (зерно и солома) озоляли в концентрированной серной кислоте в присутствии катализатора — металлического селена.

Данные вегетационных опытов были статистически обработаны методом дисперсионного анализа с помощью пакета анализа данных программы MSExcel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам вегетационных опытов, проведенных в 2020–2022 гг., новая форма мочевины пролонгированного действия с покрытием

гранул дигидрофосфатом кальция по сравнению с некапсулированной мочевиной обеспечивала наиболее оптимальное питание яровой пшеницы в течение вегетации, что способствовало формированию более высокого урожая.

В табл. 1 представлены урожаи за период исследования. В различные годы биологический урожай яровой пшеницы был неодинаков, при этом сохранялась единая тенденция к его изменению.

В 2020 г. по сравнению с обычной мочевиной в вариантах, где вносили капсулированную форму мочевины, масса зерна и соломы были больше на 13–18 и 8–15% соответственно. В 2021 г. достоверное увеличение массы зерна в сравнении контрольным вариантом (мочевины без покрытия) отмечено только в варианте, где в сосуды вносили капсулированную мочевины с толщиной покрытия гранул 100 мкм. Масса зерна в данном варианте была больше на 26%. Масса соломы изменялась не существенно. В 2022 г. — масса зерна увеличилась на 7–8, масса соломы — на 11–18%.

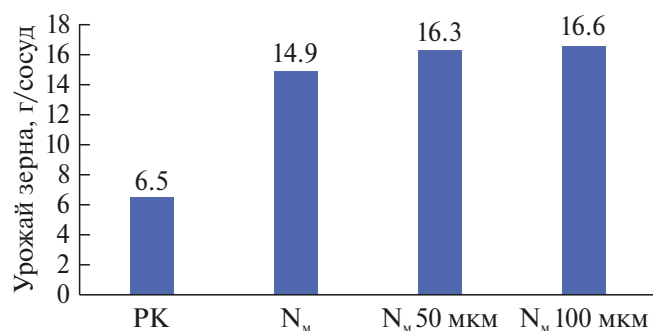


Рис. 2. Урожай яровой пшеницы в зависимости от формы примененной мочевины (среднее за 3 года).

В среднем за 3 года исследования урожай пшеницы в вариантах с внесением в почву капсулированной мочевины был больше на 9–13% (рис. 2).

Наибольший урожай зерна яровой пшеницы сорта Любава был получен в варианте с внесением в почву капсулированной мочевины с толщиной покрытия гранул 100 мкм.

В среднем за 3 года проведенного исследования урожай пшеницы увеличивался главным образом за счет улучшения биометрических показателей

растений и элементов структуры урожая. В сравнении с обычной мочевиной в вариантах с внесением удобрений с покрытием масса одного растения увеличивалась на 9–11, масса колоса – на 10, количество зерен в колосе – на 4–7% (табл. 2).

Кроме этого, при применении капсулированной мочевины у растений яровой пшеницы формировалось более выполненное зерно, о чем свидетельствуют данные массы 1000 зерен, которая была больше на 5–6% в сравнении с вариантом, где применяли обычную форму мочевины. Увеличение толщины покрытия с 50 до 100 мкм не влияло на изменение элементов структуры урожая.

С целью оценки доли полезной части урожая был рассчитан коэффициент хозяйственной эффективности ($K_{хоз}$). Под данным коэффициентом понимают отношение хозяйственной части урожая к биологическому урожаю. В среднем за 3 года исследования коэффициент хозяйственной эффективности урожая пшеницы повышался под действием азотных удобрений от 0.37 до 0.43 и не зависел от формы примененного удобрения.

Все формы мочевины оказали положительное влияние на химический состав урожая пшеницы (табл. 3).

Таблица 1. Урожай яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида, г/сосуд

Вариант	2020 г.		2021 г.		2022 г.	
	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома
PK (фон)	4.4	9.6	4.0	8.7	11.2	15.4
PK + N _m (без покрытия)	13.6	20.6	5.4	14.4	25.7	27.5
PK + N _m 50 мкм	16.0	22.3	5.5	14.3	27.4	32.5
PK + N _m 100 мкм	15.3	23.6	6.8	13.0	27.8	30.4
HCP ₀₅	0.9	2.1	1.1	1.8	1.4	3.0

Таблица 2. Влияние разных форм мочевины на показатели структуры урожая яровой пшеницы (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Масса 1-го растения, г	$K_{хоз}$	Масса 1-го колоса, г	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г
PK (фон)	0.98	0.37	0.4	11.4	29.3
PK + N _m (без покрытия)	1.98	0.42	1.0	21.7	34.4
PK + N _m 50 мкм	2.19	0.41	1.1	23.1	36.0
PK + N _m 100 мкм	2.16	0.43	1.1	22.5	36.3

Таблица 3. Влияние мочевины пролонгированного действия на химический состав урожая яровой пшеницы (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Содержание в зерне, %			Содержание в соломе, %		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
PK (фон)	2.04	1.00	0.38	0.32	0.23	1.70
PK + N _m (без покрытия)	2.84	0.95	0.38	0.63	0.17	1.72
PK + N _m 50 мкм	2.92	0.99	0.40	0.67	0.15	1.59
PK + N _m 100 мкм	2.87	0.95	0.36	0.71	0.15	1.69

Таблица 4. Вынос элементов питания урожаем яровой пшеницы и коэффициент использования азота удобрений (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Вынос зерном			Вынос соломой			Общий вынос			КИУ, %
	мг/сосуд									
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
РК (фон)	121	63	24	34	26	190	160	90	224	—
РК + N _м (без покрытия)	369	139	54	118	35	360	502	176	428	46
РК+N _м 50 мкм	423	164	65	139	34	373	577	200	453	56
РК+N _м 100 мкм	434	162	59	148	33	379	602	198	457	59

В среднем за 3 года опытов содержание азота фосфора и калия в основной и побочной продукции было оптимальным во всех вариантах с применением азотного удобрения.

Вместе с тем, мочевина с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция способствовала усилению потребления азота растениями пшеницы. Наиболее высокое содержание азота в зерне пшеницы отмечено в вариантах с внесением капсулированной мочевины, что составило 2.87–2.92%, против 2.84% в варианте с обычной формой мочевины. Содержание азота в соломе растений возрастало с увеличением толщины покрытия гранул с 0.63% — при внесении обычной мочевины до 0.67 и 0.71% при толщине покрытия 50 и 100 мкм соответственно (табл. 3).

О повышении потребления азота пшеницей при внесении капсулированных форм мочевины свидетельствуют и результаты расчета выноса элементов питания урожаем (табл. 4).

При увеличении толщины покрытия гранул возрастал хозяйственный вынос азота. В сравнении с некапсулированной мочевиной вынос азота в вариантах, где применяли мочевину пролонгированного действия с тонким покрытием (50 мкм) был больше на 15%, с толстым покрытием (100 мкм) — на 20%. Следует отметить, что вынос фосфора и калия в вариантах с капсулированной мочевиной также был больше, чем в варианте сравнения. По сравнению с показателями в варианте с обычным карбамидом при применении мочевины с покрытием вынос фосфора был больше на 13–14, калия — на 6–7%. Это объясняется оптимизацией азотного питания растений и увеличением урожая.

Покрытие мочевины дигидрофосфатом кальция способствовало более полному усвоению растениями азота удобрений, т.е. повышало коэффициент его использования. При этом эффективность использования азота возросла с увеличением толщины покрытия гранул удобрения. В варианте, где применяли мочевину с тонким покрытием (50 мкм), коэффициент использования азота из удобрения (КИУ) составлял 56%. При

толщине покрытия гранул 100 мкм КИУ достигал 59%. Таким образом, нанесение на гранулы мочевины дигидрофосфата кальция способствовало увеличению коэффициента использования азота на 10–13% в сравнении с некапсулированной формой мочевины, где КИУ был равен 46%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение мочевины пролонгированного действия с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция на яровой пшенице способствовало улучшению показателей структуры урожая и, следовательно, позволило получить более высокий и качественный урожай зерна. В среднем за 3 года исследования мочевина с замедленным высвобождением азота обеспечила прибавку урожая зерна яровой пшеницы на 9–13% в сравнении с некапсулированной формой, а также формированию более выполненного зерна. Наибольший урожай зерна пшеницы был получен в варианте с внесением в почву капсулированной мочевины с толщиной покрытия гранул 100 мкм.

Применение мочевины с покрытием дигидрофосфатом кальция улучшало режим питания растений, наряду с повышением потребления растениями азота, увеличивался также вынос фосфора и калия. Коэффициент использования азота из капсулированной мочевины был на 10–13% больше обычного карбамида и возрастал с увеличением толщины покрытия гранул.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lewu F.B., Volova T., Sabu T., Rakhimol K.R. Controlled release fertilizers for sustainable agriculture // Academic Press is an imprint of Elsevier. 2021. 253 p.
2. Xie L.H., Liu M.Z., Ni B.L., Zhang X., Wang Y.F. Slow-release nitrogen and boron fertilizers from a functional superabsorbent formulation based on wheat straw and attapulgite // Chem. Eng. J. 2011. V. 167. P. 342–348.
3. Dimkpa C.O., Fugice J., Singh U., Lewis T.D. Development of fertilizers for enhanced nitrogen use effi-

- ciency – Trends and perspectives // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 731. P. 1–12.
4. Alexandratos N., Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision // *ESA Working Paper No. 12–03*. FAO, 2012. P. 1–18.
 5. Angle S.J., Singh U., Dimkpa C.O., Bindraban P.S., Hel-lums D.T. Role of fertilizers for climate–resilient agriculture // *Proc. Inter. Fertil. Soc.* 2017. V. 802. P. 1–44.
 6. IFA market intelligence service. World outlook for fertilizer demand, nitrogen, phosphates and potash from 2021 to 2022. Public Summary, IFA Strategic Forum, 15–17 November, 2021. P. 1–6.
 7. Cross L., Gruère 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.
 8. Рынок минеральных удобрений: азотные удобрения. Итоги 2021 // ID–MarketingИсследовательская компания: [сайт]. 2008–2023. URL: id–marketing.ru (дата обращения: 20.05.2023).
 9. Муравин Э.А., Ромодина Л.В., Литвинский В.А. Агрохимия: учебник для студ. учрежд. высш. обр-я. М.: Изд. центр “Академия”, 2013. 304 с.
 10. Малявин А.С., Миносьянц С.В., Аксентчик К.В., Лапушкин В.М. Производство минеральных удобрений // *Энциклопедия технологий 2.0: Химический комплекс*. М., СПб.: “Центр экол. пром. политики”, 2022. С. 11–88.
 11. 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. P. 1–17.
 12. Meybeck A., Gitz V. Greening the economy with climate–smart agriculture food. Vietnam, Hanoi: FAO, 2012. P. 1–52.
 13. Gil-Ortiz R., Naranjo M.A., Navarro A.R., Mola-da M.C., Atores S., Garcia C., Vicente O. New eco-friendly polymeric-coated urea fertilizers enhanced crop yield in wheat // *Agronomy*. 2020. № 10. P. 1–15.
 14. Wei H., Chen Z., Xing Z., Zhou L., Liu Q., Zhang Z., Jiang Y., Hu Y., Zhu J., Cui P., Zhang H. Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice // *J. Integrat. Agricult.* 2018. № 17(10). P. 2222–2234.
 15. Trenkel M.E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: Inter. Fertil. Industry Associat. (IFA), 2010. 163 p.
 16. Babar S.K., Hassani N.A., Rajpar I., Babar S.A., Shah Z.H., Khan I. Comparison of conventional and encapsulated urea on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*. 2019. V. 6. P. 181–187.
 17. Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Соколов В.В., Кочетова И.М., Рыбин Е.А., Торшин С.П., Лапушкин В.М. Пат. 2776275 С1, РФ, СПК С05G 3/40. Способ получения удобрений с замедленным и контролируемым высвобождением питательных веществ. № 2021126117, заявл. 02.09.2021, опубл. 15.07.2022.

Effectiveness of Long-Acting Urea in the Growing of Spring Wheat

V. M. Lapushkin^{a, #}, M. A. Volkova^{a, b}, A. A. Lapushkina^{a, b}, S. P. Torshin^a, F. G. Igraliev^a, A. M. Norov^c, D. A. Pagaleshkin^c, P. S. Fedotov^c, V. V. Sokolov^c, I. M. Kochetova^c, E. A. Rybin^c

^aRussian State Agrarian University–Moscow Timiryazev Agricultural Academy,
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127434, Russia

^bPryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry,
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia

^cSamoilov Research Institute for Fertilizers and Insectofungicides
Nord highway 75, Vologda region, Cherepovez 162622, Russia

[#]E-mail: lapushkin@rgau-msha.ru

The results of a series of vegetation experiments are presented, in which the effect of urea coated with calcium dihydrogen phosphate granules on the formation of a spring wheat crop was studied. It was shown that encapsulated urea, in comparison with its usual form, provided an increase in the yield of spring wheat grain by 9–13%. The coating of urea granules with calcium dihydrogen phosphate contributed to a more uniform release of fertilizer nitrogen, increasing the efficiency of its use by plants by 10–13%. It was found that the effectiveness of encapsulated urea is directly dependent on the thickness of the coating granules.

Keywords: nitrogen fertilizers, prolonged-acting urea, encapsulated urea, calcium dihydrogen phosphate, spring wheat, yield.