

А. А. Липин (к.т.н., доц.), А. Г. Липин (д.т.н., проф., зав. каф.), В. А. Крисанова (студ.)

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НА КИНЕТИКУ ВЫДЕЛЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ КАПСУЛИРОВАННОГО УДОБРЕНИЯ

*Ивановский государственный химико-технологический университет,
кафедра процессов и аппаратов химической технологии
153000, г. Иваново, Шереметьевский проспект, 7; e-mail: lipin.a@mail.ru*

A. A. Lipin, A. G. Lipin, V. A. Krisanova

EFFECT OF TEMPERATURE ON THE KINETICS OF NUTRIENT RELEASE FROM ENCAPSULATED FERTILISER

*Ivanovo State University of Chemistry and Technology
7, Sheremetyevskiy Prospekt Str., 153000, Ivanovo, Russia; e-mail: lipin.a@mail.ru*

Исследована кинетика выделения питательных веществ из капсулированных гранул карбамида в водной среде в статическом режиме при различных температурах. Выявлена зависимость эффективного коэффициента диффузии карбамида через слой полимерного покрытия от температуры. Предложена математическая модель процесса выделения питательных веществ из капсулированных гранул удобрения, позволяющая прогнозировать изменение степени выделения питательных веществ во времени и учитывающая изменение температуры окружающей среды. Проведен вычислительный эксперимент, который показал различия в скорости выделения питательных веществ из одного и того же удобрения в разных климатических регионах.

Ключевые слова: диффузия; капсулированное удобрение; кинетика выделения; математическое моделирование; питательные вещества; полимерное покрытие; прогнозирование; раствор; скорость; температура окружающей среды.

Капсулированными называются удобрения, гранулы которых покрыты защитной оболочкой, чаще всего полимерной. Они обеспечивают выделение питательных веществ в течение заданного промежутка времени в количестве, необходимом растению на данном этапе роста¹⁻⁶. Применение капсулированных удобрений в сельском хозяйстве позволяет решить ряд проблем, связанных с обычными удобрениями. К ним относятся: потери питательных веществ, их неполное усвоение растениями, как следствие этого – загрязнение грунтовых вод, водоемов, необходимость многократно-

The kinetics of nutrient release from encapsulated urea granules in aqueous medium in static mode at different temperatures has been studied. The dependence of urea diffusion coefficient through the polymer coating layer on temperature was revealed. A mathematical model of nutrient release from encapsulated fertiliser granules is proposed. The model allows predicting the change in the degree of nutrient release in time and takes into account the change in ambient temperature. A computational experiment was carried out, which showed the differences in the rate of nutrient release from the same fertiliser in different climatic regions.

Key words: ambient temperature; diffusion; encapsulated fertiliser; mathematical modeling; nutrients; polymer coating; prediction; release kinetics; solution; rate.

го внесения удобрений, влекущая дополнительные трудо- и капиталозатраты аграриев¹⁻³.

Скорость выделения питательных веществ из капсулированного удобрения определяется прежде всего диффузионными свойствами оболочки. Диффузионные свойства зависят от материала и температуры среды, в которой оболочка находится. Поэтому одно и то же удобрение может работать по-разному в разных климатических регионах. Кроме того, даже в одном регионе температурный режим может изменяться в течение вегетационного периода. Это необходимо учитывать при создании удобрения.

Дата поступления 12.02.24

Методы математического моделирования широко и успешно используются в исследованиях, связанных с капсулированными удобрениями ^{7, 8}. Прогнозирование кинетики выделения питательных веществ из капсулированных удобрений с помощью математических моделей позволяет оперативно оценить свойства произведенных удобрений, сократив время экспериментальных исследований до минимума. Известны как эмпирические, так и феноменологические модели, прогнозирующие кинетику выделения питательных веществ из капсулированных удобрений ^{9–12}. Феноменологические модели более универсальны, так как могут быть применены к различным типам удобрений. Однако существующие модели не учитывают влияние температурного режима на кинетику выделения питательных веществ. Ранее авторами настоящей работы моделировался процесс выделения питательных веществ без учета влияния температуры ^{13, 14}.

Целью работы является разработка феноменологической модели, позволяющей прогнозировать кинетику выделения питательных веществ из капсулированного удобрения с учетом изменения температуры среды.

Материалы и методы исследования

Для исследования кинетики выделения питательных веществ из капсулированных гранул использовались гранулы карбамида с покрытием из акрилового полимера, полученные авторами настоящей работы в лабораторном аппарате с фонтанирующим слоем частиц ¹⁵. Нанесение оболочки осуществлялось распылением через пневматическую форсунку полимерной эмульсии на частицы псевдооживленного слоя. Капли, столкнувшись с частицами слоя, растекались по их поверхности, образуя жидкостную пленку, при этом растворитель постоянно испарялся. Оставшийся твердый компонент осаждался на поверхности частиц и образовывал оболочку. Использование фонтанирующего слоя, обеспечивающего интенсивную циркуляцию частиц, обусловлено стремлением создать условия для многократного прохождения каждой частицы через зону орошения форсунки. Это, в свою очередь, способствовало равномерному распределению пленкообразующего вещества по поверхности обрабатываемых гранул карбамида ^{16, 17}.

Исследование кинетики выделения питательных веществ из капсулированных гранул карбамида осуществлялось в водной среде в статическом режиме. Капсулированные гранулы общей массой 5 г с массовой долей оболочки 25% поме-

щались в 50 мл дистиллированной воды, налитой в банки с крышкой. Банки помещались в воздушный термостат, где выдерживались при заданной температуре. В определенные моменты времени отбирались пробы раствора (по 1 мл) и заменялись свежей водой. В отобранных пробах рефрактометрическим методом определялась концентрация выделяющегося карбамида. Для этого на рефрактометре ИРФ-454 Б2М измерялся показатель преломления раствора, после чего по калибровочному графику определялась концентрация карбамида в этом растворе. Калибровочным служил график зависимости показателя преломления от концентрации водного раствора карбамида. Для построения данной зависимости использовались результаты измерения показателя преломления у специально приготовленных растворов карбамида известных концентраций. Соотношение текущей концентрации и максимально возможной при полном растворении ядра гранулы характеризует степень выделения карбамида из капсулированных гранул. Выполнено несколько серий опытов при разной температуре (рис. 2).

Математическая модель процесса выделения питательных веществ из капсулированных гранул

Для вывода уравнений математической модели процесса выделения питательных веществ из капсулированного удобрения рассмотрим его физическую картину. При попадании в воду капсулированной гранулы начинается процесс диффузии воды через оболочку внутрь капсулы – индукционный период. В настоящей работе этот период не рассматривался, поскольку часто он либо отсутствует, либо его продолжительность мала по сравнению с общим временем выделения питательных веществ из капсулы ^{9, 10, 13}. По мере проникновения воды внутрь капсулы начинается растворение ее твердого ядра **1** (рис. 1), оно уменьшается в размерах, а между ним и оболочкой появляется слой насыщенного раствора питательных веществ **2**. Одновременно с этим начинается диффузия питательных веществ через оболочку **3** в окружающую среду **4** – период постоянной скорости выделения. После растворения ядра концентрация питательных веществ внутри капсулы начинает уменьшаться, наступает период убывающей скорости выделения.

Принимались следующие допущения: гранулы шарообразные; слой монодисперсный либо расчет ведется на средний диаметр гранул; слой покрытия рассматривается как плоская пластина из-за его малой толщины по сравнению с размерами ядра ($\delta \ll R_{\text{я}}$).

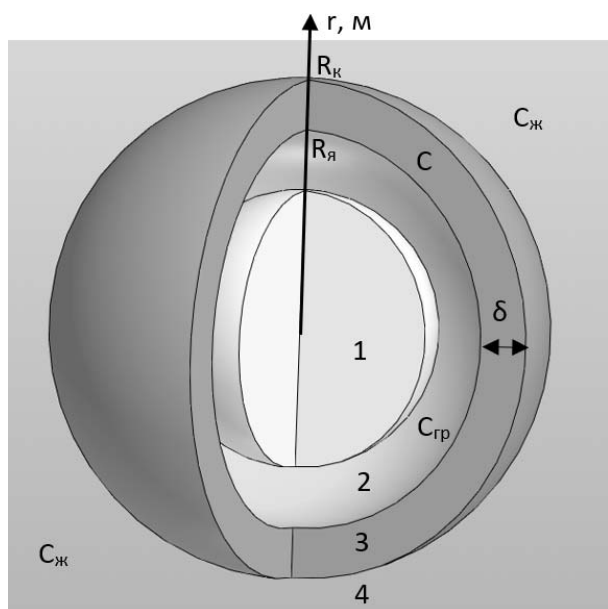


Рис. 1. Расчетная схема: 1 – твердое ядро; 2 – насыщенный раствор; 3 – слой покрытия; 4 – окружающая жидкость

Процесс переноса питательных веществ через слой покрытия в раствор описывается дифференциальным уравнением диффузии (1) с граничными условиями первого и третьего рода соответственно на внутренней и наружной поверхностях.

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D(t) \frac{\partial^2 C}{\partial r^2}, \quad R_{\text{я}} < r < R_{\text{к}}, \quad (1)$$

где $D(t)$ – эффективный коэффициент диффузии питательных веществ через слой покрытия, зависящий от температуры, м²/с;

C – концентрация питательных веществ, кг/м³;

τ – время, с;

r – радиальная координата, м;

$R_{\text{я}}$ – радиус ядра гранулы, м;

$R_{\text{к}}$ – радиус капсулы, м.

Граничное условие для уравнения (1) на внутренней поверхности покрытия (при $r=R_{\text{я}}$) записывается в предположении, что на ней устанавливается равновесное значение концентрации питательных веществ:

$$C(R_{\text{я}}, \tau) = \varepsilon C_{\text{нас}} \text{ при } C_{\text{гр}} \geq C_{\text{нас}}, \quad (2)$$

$$C(R_{\text{я}}, \tau) = \varepsilon C_{\text{гр}} \text{ при } C_{\text{гр}} < C_{\text{нас}}, \quad (3)$$

где ε – коэффициент распределения;

$C_{\text{гр}}, C_{\text{нас}}$ – концентрации питательных веществ внутри капсулы и их насыщенного раствора, соответственно, кг/м³.

Предположение основано на том, что перенос компонентов в растворе осуществляется значительно быстрее, чем в слое покрытия. Суммарный

процесс переноса лимитирован переносом в слое покрытия. Соотношение (2) имеет место при наличии твердого ядра в период растворения, а соотношение (3) после растворения твердого ядра. Коэффициент распределения ε характеризует долю пустот в слое покрытия, заполненных жидкостью (раствором питательных веществ).

На наружной поверхности покрытия предполагается массообмен по закону массоотдачи:

$$-D(t) \frac{\partial C(R_{\text{к}}, \tau)}{\partial r} = \beta \left[\frac{C(R_{\text{к}}, \tau)}{\varepsilon} - C_{\text{жс}} \right] = j_{\text{м}}, \quad (4)$$

где $j_{\text{м}}$ – плотность массового потока питательных веществ через поверхность раздела твердой и жидкой фаз, т.е. потока питательных веществ в окружающую гранулу жидкость, кг/(м²·с);

β – коэффициент массоотдачи, м/с;

$C_{\text{жс}}$ – концентрация питательных веществ в окружающей гранулу жидкости, кг/м³.

Коэффициент массоотдачи определялся из критерия Шервуда $Sh = \beta d_{\text{к}} / D_{\text{w}}$. Из теории массопередачи известно, что для неподвижных частиц $Sh = 2$. Тогда формула для расчета коэффициента массоотдачи имеет вид:

$$\beta = \frac{2D_{\text{w}}}{d_{\text{к}}} = \frac{D_{\text{w}}}{R_{\text{к}}}, \quad (5)$$

где D_{w} – коэффициент диффузии питательных веществ в воде;

$d_{\text{к}}$ – диаметр капсулы.

Для карбамида согласно данным работы ¹⁰:

$$D_{\text{w}} = (1.38 - 0.0782 C_{\text{жс}} + 0.00464 C_{\text{жс}}^2) \cdot 10^{-9}. \quad (6)$$

Эффективный коэффициент диффузии питательных веществ через слой покрытия D аппроксимирован уравнением Аррениуса:

$$D(t) = D_0 \cdot e^{-\frac{E}{R(t+273)}}. \quad (7)$$

В настоящей работе константы в уравнении (7) определены для карбамида: $D_0 = 6.311$, $E = 73540$. О выводе температурной зависимости коэффициента диффузии карбамида в слое покрытия изложено в разделе «Результаты и обсуждение».

Концентрация питательных веществ в окружающей жидкости находится из уравнения:

$$V_{\text{жс}} \frac{dC_{\text{жс}}}{d\tau} = 4\pi R_{\text{к}}^2 N_{\text{гр}} j_{\text{м}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{жс}}$ – объем окружающей жидкости;

$N_{\text{гр}}$ – число гранул. При $\tau = 0$ $C_{\text{жс}} = 0$.

Для определения границ разных периодов процесса выделения питательных веществ используется условная величина концентрации питательных веществ внутри капсулы C_{zp} :

$$\frac{dC_{zp}}{d\tau} = -\frac{4\pi R_{\kappa\text{ж}}^2 j_{\text{м}}}{V_{\text{я}}}, \quad (9)$$

где $V_{\text{я}} = \frac{4}{3}\pi R_{\text{я}}^3$ – объем ядра. При $\tau = 0$ $C_{zp} = \rho_{\text{тв}}$. По физическому смыслу C_{zp} – отношение массы питательных веществ внутри капсулы к начальному объему ядра.

Таким образом, система уравнений (1)–(9) представляет собой математическую модель процесса выделения питательных веществ из капсулированной гранулы в водной среде с учетом температурного режима. Для решения системы уравнений математического описания использовался метод конечных разностей. Программная реализация модели выполнена в системе Mathcad.

Результаты и их обсуждение

Опытные данные, полученные в результате экспериментального исследования кинетики выделения карбамида из капсулированных гранул в воде, показаны точками на рис. 2. Эксперименты проводились при температурах 19, 27 и 35 °С. Результаты эксперимента позволяют сделать вывод, что с повышением температуры скорость выделения карбамида из капсул возрастает. Это является следствием увеличения коэффициента диффузии карбамида через оболочку капсулы.

Для вывода зависимости коэффициента диффузии от температуры сначала были определены его значения при температурах опытов. Для этого решалась обратная задача: производился расчет степени выделения карбамида по предложенной математической модели с заданными значениями коэффициента диффузии D . Затем выбиралось то значение D , которое обеспечивало наибольшую сходимость опытных и расчетных данных. Кривые на рис. 2 иллюстрируют прогнозные зависимости степени выделения карбамида от времени, полученные с помощью математической модели. Среднее значение среднего квадратического отклонения опытных и расчетных данных составило $8.41 \cdot 10^{-3}$.

Определенные по описанной выше методике значения коэффициента диффузии показаны точками на рис. 3. Далее была выполнена аппроксимация этих значений уравнением Аррениуса (7). Кривая на рис. 3 иллюстрирует полученную зависимость.

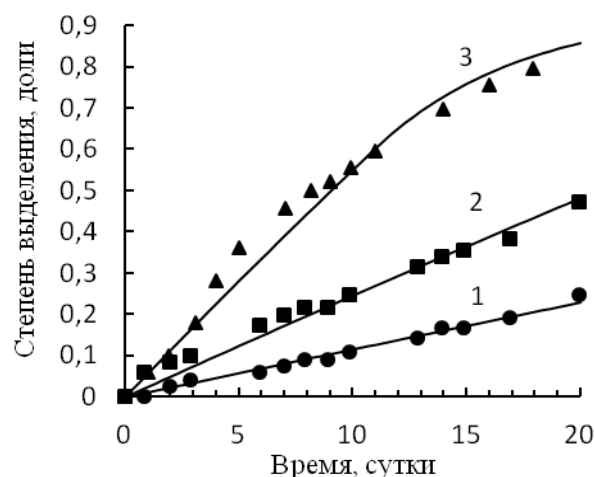


Рис. 2. Изменение степени выделения карбамида во времени при различных температурах: 1 – $t = 19$ °С; 2 – $t = 27$ °С; 3 – $t = 35$ °С; точки – опытные данные, линии – расчет по модели

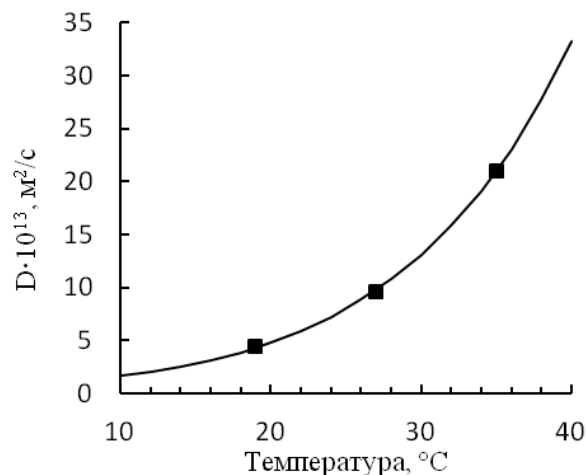


Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузии карбамида от температуры: точки – опытные данные, линия – расчет по модели

Необходимость учета зависимости коэффициента диффузии от температуры иллюстрируют кривые рис. 4. Здесь представлены зависимости степени выделения карбамида от времени, спрогнозированные с помощью модели. Кривая 1 получена с учетом изменения температуры по месяцам вегетационного периода (май–сентябрь), а кривая 2 – при средней температуре за этот период. Значения среднемесячной температуры были взяты для города Иваново (рис. 5). В первые два месяца температура ниже средней за летний сезон, поэтому кривая 1 имеет на участке 0–50 суток меньший наклон, чем кривая 2. В третий и четвертый месяцы, наоборот, температура выше средней и кривая 1 имеет больший наклон, чем кривая 2, пересекая ее в точке, соответствующей 75 сут.

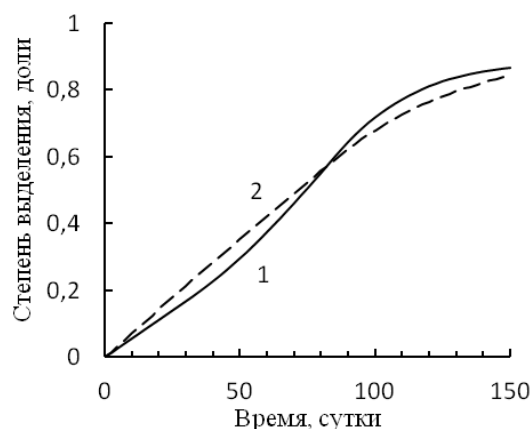


Рис. 4. Изменение степени выделения карбамида во времени для Ивановского региона: 1 – расчет с учетом изменения температуры; 2 – расчет при средней температуре

Одно и то же удобрение может использоваться в разных регионах, где среднемесячная температура может сильно отличаться. На рис. 5 приведено сравнение среднемесячной температуры для Ивановской, Воронежской областей и Краснодарского края.

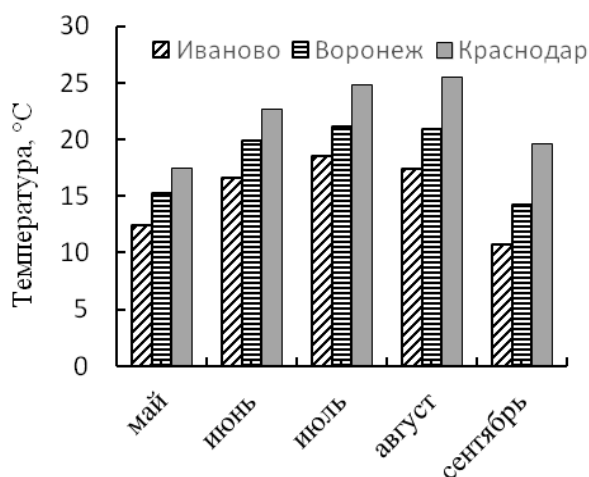


Рис. 5. Изменение температуры по месяцам для различных регионов: 1 – Иваново; 2 – Воронеж; 3 – Краснодар

С помощью разработанной математической модели спрогнозировано выделение карбамида из капсулированных гранул с одинаковой массовой долей оболочки в условиях разных регионов (рис. 6). В регионе с большими среднемесячными температурами (Краснодарский край) скорость выделения карбамида из капсул выше и время полного выделения питательных веществ соответственно меньше. Следовательно, для южных регионов целесообразно применять удобрения с более длительным сроком выделения питательных веществ, что может быть достигнуто, например, увеличением толщины оболочки.

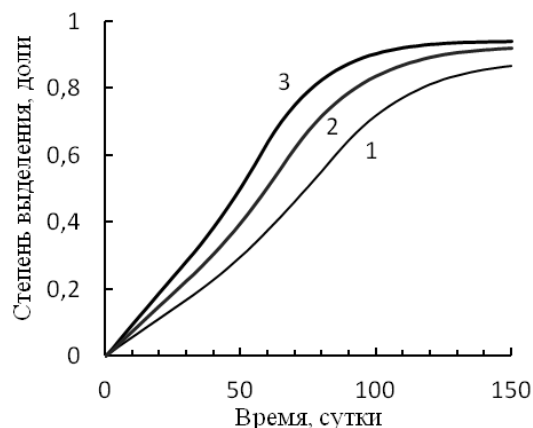


Рис. 6. Изменение степени выделения карбамида во времени для различных регионов: 1 – Иваново; 2 – Воронеж; 3 – Краснодар

Предложенная математическая модель может быть использована для оперативного прогнозирования сроков выделения питательных веществ из капсулированных гранул, поскольку продолжительность выделения для большинства капсулированных удобрений составляет от 3 до 6 месяцев, и экспериментальная проверка общей продолжительности действия удобрения затруднительна.

Литература

1. Shanmugavel D., Rusyn I., Solorza-Feria O., Kamaraj S.-K. Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications // *Sci. Total Environ.* – 2023. – V.904. – Art.166729.
2. 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. – Pp.53967-53995.
3. 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, №2. – Art.238.

References

1. Shanmugavel D., Rusyn I., Solorza-Feria O., Kamaraj S.-K. [Sustainable SMART fertilizers in agriculture systems: A review on fundamentals to in-field applications]. *Sci. Total Environ.*, 2023, vol.904, art.166729.
2. 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, vol.29, pp.53967-53995.
3. 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, vol.10, no.2, art. 238.

4. Beig B., Niazi M.B.K., Jahan Z., Hussain A., Zia M.H., Mehran M.T. Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review // *J. Plant Nutr.*– 2020.– V.43.– Pp.1510-1533.
5. Wang X., Yang Y., Zhong Sh., Meng Q., Li Y., Wang J., Gao Y., Cui X. Advances in controlled-release fertilizer encapsulated by organic-inorganic composite membranes // *Particuology*.– 2024.– V.84.– Pp.236-248.
6. Taran Yu. A., Fufaeva V. M. Production of encapsulated controlled-release fertilizers based on prilled and granular urea // *Chemical and Petroleum Engineering*.– 2022.– V.58, №5-6.– Pp.499-504.
7. 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. Controlled Release*.– 2018.– V.271.– Pp.45-54.
8. 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.– Art.116075.
9. 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.– Pp.146-150.
10. 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.– Pp.34-42.
11. 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.– Pp.49-55.
12. Vakal V., Pavlenko I., Vakal S., Hurets L., Ochowiak M. Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers // *Period. Polytech. Chem. Eng.*– 2020.– V.64, №4.– Pp.562-568.
13. Липин А.Г., Липин А.А. Кинетика высвобождения азота из гранул мочевины с полимерным покрытием // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*.– 2022.– Т.65, №7.– С.100-106.
14. Lipin A.A., Lipin A.G. Modelling nutrient release from controlled release fertilisers // *Biosyst. Eng.*– 2023.– V.234.– Pp.81-91.
15. Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А. Оценка степени покрытия при капсулировании зернистых материалов в псевдоожиженном слое // *Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология*.– 2019.– Т.62, №5.– С.84-90.
16. Lipin A. A., Lipin A. G. Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process // *Particuology*.– 2022.– V.61.– Pp.41-46.
17. Lipin A.G., Lipin A.A., Wojtowicz R. Calculation of degree of coverage in fluidized bed coating // *Dry. Technol.*– 2022.– V.40, №1.– Pp.30-41.
4. Beig B., Niazi M.B.K., Jahan Z., Hussain A., Zia M.H., Mehran M.T. [Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review]. *J. Plant Nutr.*, 2020, vol.43, pp.1510-1533.
5. Wang X., Yang Y., Zhong Sh., Meng Q., Li Y., Wang J., Gao Y., Cui X. [Advances in controlled-release fertilizer encapsulated by organic-inorganic composite membranes]. *Particuology*, 2024, vol.84, pp.236-248.
6. Taran Yu. A., Fufaeva V. M. [Production of encapsulated controlled-release fertilizers based on prilled and granular urea]. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2022, vol.58, no.5-6, pp.499-504.
7. 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. Controlled Release*, 2018, vol.271, pp.45-54.
8. 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, vol.192, art.116075.
9. 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, vol.8, pp.146-150.
10. 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, vol.130, pp.34-42.
11. 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, vol.228, pp.49-55.
12. Vakal V., Pavlenko I., Vakal S., Hurets L., Ochowiak M. [Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers]. *Period. Polytech. Chem. Eng.*, 2020, vol.64, no.4, pp.562-568.
13. Lipin A.G., Lipin A.A. Кинетика высвобождения азота из гранул мочевины с полимерным покрытием [Nitrogen release from polymer-coated urea granules]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [ChemChemTech], 2022, vol.65, no.7, pp.100-106.
14. Lipin A.A., Lipin A.G. [Modelling nutrient release from controlled release fertilisers]. *Biosyst. Eng.*, 2023, vol.234, pp.81-91.
15. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. *Otsenka stepeni pokrytiya pri kapsulirovani zernistykh materialov v psevdoozhizhennom sloye* [Assessment of coverage degree during granular material encapsulation in fluidized bed]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [ChemChemTech], 2019, vol.62, no.5, pp.84-90.
16. Lipin A. A., Lipin A. G. [Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process]. *Particuology*, 2022, vol. 61, pp.41-46.
17. Lipin A.G., Lipin A.A., Wojtowicz R. [Calculation of degree of coverage in fluidized bed coating]. *Dry. Technol.*, 2022, vol.40, no.1, pp.30-41.