

КИНЕТИКА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ АЗОТА ИЗ ГРАНУЛ МОЧЕВИНЫ С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ

А.Г. Липин, А.А. Липин

Александр Геннадьевич Липин (ORCID 0000-0003-2011-9503), Андрей Александрович Липин (ORCID 0000-0002-7984-1691)

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет, Шереметевский пр., 7, 153000, г. Иваново, Россия

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

Статья посвящена расчетной и экспериментальной оценке продолжительности действия удобрений с регулируемым высвобождением питательных веществ. Для исследования кинетики выделения питательных веществ были получены образцы мочевины, капсулированной в оболочку из акрилового полимера, с содержанием покрытия от общей массы гранул 9, 16, 20, 23, 26%. Установлены характер и продолжительность выделения мочевины из капсулированных гранул. Например, для гранул с массовой долей оболочки 9% отсутствует индукционный период, для гранул с массовой долей оболочки 16% индукционный период составил 1 сут., для гранул с относительной массовой долей оболочки 23% – 14 сут. Поскольку продолжительность высвобождения для большинства удобрений пролонгированного действия составляет от 3 до 6 мес, и экспериментальная проверка общей продолжительности действия удобрения за короткое время невозможна, в статье предложена математическая модель процесса высвобождения мочевины из гранул с полимерным покрытием. Модель может быть использована для оперативного прогнозирования сроков высвобождения мочевины из капсулированных гранул. Для параметрической идентификации математической модели путем решения обратной задачи определялось значение эффективного коэффициента диффузии мочевины через капсулу, обеспечивающее хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. Значение эффективного коэффициента диффузии для капсулированных гранул мочевины с относительной массовой долей покрытия 9, 16, 23% составило $2,7 \cdot 10^{-13}$ м²/с. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели опытным данным. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения мочевины из капсулированных гранул показало их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка не превышала 0,031.

Ключевые слова: мочевина, капсулированные удобрения, кинетика высвобождения, моделирование, диффузия

NITROGEN RELEASE FROM POLYMER-COATED UREA GRANULES

A.G. Lipin, A.A. Lipin

Aleksandr G. Lipin (ORCID 0000-0003-2011-9503), Andrey A. Lipin (ORCID 0000-0002-7984-1691)*

Department of Processes and Apparatus of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

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

The paper presents results of experiments and calculations of nitrogen release process from controlled release fertilizers. Samples of acrylic polymer coated with urea with a coating content of 9, 16, 20, 23, and 26% of the total granule mass were obtained. The pattern and duration of urea release from coated granules were determined. For example, for granules with a mass fraction of the coating 9% there is no induction period, for granules with a mass fraction of the coating 16% the induction period was 1 day, for granules with a relative mass fraction of the shell 23% - 14 days.

Since the release duration for most controlled release fertilizers is 3-6 months, and quick experimental verification of the total release time is not possible, this article proposes a mathematical model of nitrogen release from polymer-coated urea granules. For parametric identification of the mathematical model by solving the inverse problem, the value of the effective diffusion coefficient of urea through the capsule was determined, ensuring good agreement between the calculated and experimental data. The value of the effective diffusion coefficient for encapsulated urea granules with a relative mass fraction of coating 9, 16, 23% was $2.7 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$. The adequacy of the proposed mathematical model to the experimental data was checked. Comparison of the calculated and experimental values of urea fractional release showed their good agreement. The root mean square error did not exceed 0.031.

Key words: urea, controlled release fertilizer, release, modeling, diffusion

Для цитирования:

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.

For citation:

Lipin A.G., Lipin A.A. Nitrogen release from polymer-coated urea granules. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 7. P. 100–106. DOI: 10.6060/ivkkt.20226507.6635.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее эффективным источником питательных веществ в современном сельском хозяйстве являются удобрения на основе мочевины [1, 2]. Однако чрезмерное выделение питательных веществ из удобрений, содержащих мочевину, может привести к загрязнению грунтовых вод из-за утечки аммиака, нитратов и растворимых в воде солей [3, 4]. Часть питательных веществ вымывается дождем, что так же может привести к загрязнению поверхностного водоносного слоя. В процессе разложения мочевины в почве часть аммиака испаряется, прежде чем успевает гидролизироваться до ионов аммония, подвергнуться нитрификации и поглотиться растением. На потерю азота в результате разложения мочевины влияют повышенная температура и рН почвы. Например, культурой риса поглощается только 38,2–44,8% азотных удобрений [5, 6].

Одним из вариантов повышения эффективности удобрений и снижения токсичности почвы является использование удобрений с регулируемым высвобождением питательных веществ (controlled release fertilizer (CRF)) [7–9]. К такому типу удобрений относится, например, мочевина, покрытая серой или синтетическими полимерами [10]. Потенциальным преимуществом удобрений с контролируемым высвобождением является возможность регулировать скорость и продолжительность высвобождения питательных веществ, чтобы удобрение можно было применять один раз в год для обеспечения потребности в питательных веществах в течение всего годового вегетационного периода [8, 9]. Продолжительность высвобождения

питательных веществ может варьироваться в течение нескольких месяцев в зависимости от характеристик покрытия и продолжительности роста урожая.

Проверка характера высвобождения питательных веществ из CRF имеет решающее значение при оценке эффективности этих удобрений для обеспечения растений питательными веществами в соответствии с потребностями культуры и продолжительностью роста культуры. Высвобождение питательных веществ из CRF удобрений в значительной степени зависит от характеристик материалов покрытия, его толщины и от температуры [11]. Несмотря на то, что в прошлом разрабатывалось множество моделей прогнозирования и методов оценки высвобождения питательных веществ [12–17], на сегодняшний день не существует согласованного и стандартизированного метода. Актуальной остается задача разработки метода прогнозирования кинетики выделения питательных веществ на базе достаточно простой математической модели процесса, отражающей его основные особенности и требующей экспериментального определения минимального числа параметров модели.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ВЫДЕЛЕНИЯ МОЧЕВИНЫ ИЗ КАПСУЛИРОВАННЫХ ГРАНУЛ

Для исследования кинетики выделения питательных веществ из CRF были использованы гранулы мочевины с покрытием из акрилового полимера. Капсулирование гранулированной мочевины проводилось в лабораторном аппарате с псевдооживленным слоем частиц [18]. Нанесение защитной оболочки осуществлялось путём распыливания на частицы кипящего слоя эмульсии полимера.

Капли, столкнувшись с частицами слоя, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную пленку, при этом растворитель постоянно испаряется. Оставшийся твердый компонент осажается на поверхности частиц и образует оболочку. Был использован режим фонтанирующего слоя, обеспечивающий интенсивную циркуляцию частиц. Таким образом, создавались условия для многократного прохождения каждой частицы через зону орошения форсунки, что способствовало равномерному распределению пленкообразующего вещества по поверхности обрабатываемых гранул [19, 20].

Процесс капсулирования осуществлялся в аппарате кипящего слоя цилиндрической формы с диаметром решетки 70 мм. Высота конической части аппарата 400 мм. Диаметр верхней части 210 мм. Тонкодисперсный распыл эмульсии полимера обеспечивался пневматической форсункой, установленной в нижней части аппарата.

Были получены образцы капсулированной в полимерную оболочку мочевины с содержанием покрытия от общей массы гранул 9, 16, 20, 23, 26%. На рис. 1 приведена фотография среза гранулы, полученная на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA3 с увеличением 294 х. Хорошо видна кристаллическая структура ядра мочевины. Содержание полимерного покрытия 16%. В слое покрытия нет дефектов, толщина покрытия достаточно равномерная. Среднее значение толщины слоя покрытия 0,08 мм.

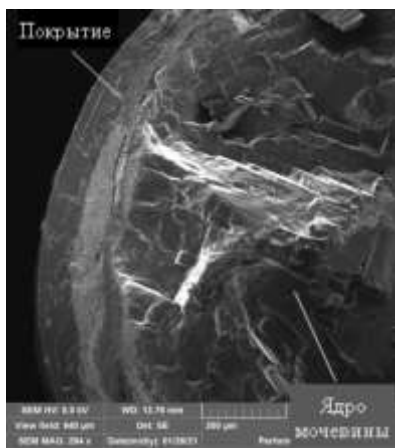


Рис. 1. SEM изображение среза капсулированной гранулы мочевины

Fig. 1. SEM of coated urea granule

Тесты на выделение питательных веществ из гранул мочевины с полимерным покрытием проводились в водной среде в статическом режиме. Пять грамм капсулированных гранул помещались в 50 мл дистиллированной воды. В определенные

моменты времени отбирались пробы раствора (по 1 мл) и заменялись свежей водой. В отобранных пробах определялась концентрация высвобождающейся мочевины. Концентрация мочевины в растворе определялась рефрактометрическим методом. Измерялся показатель преломления раствора на рефрактометре ИРФ-454 Б2М, после чего по калибровочному графику определялась концентрация мочевины в растворе. Калибровочным служил график зависимости показателя преломления от концентрации водного раствора мочевины. Для построения данной зависимости использовались результаты измерения показателя преломления у специально приготовленных растворов мочевины известных концентраций. Соотношение текущей концентрации и максимально возможной при полном растворении ядра гранулы характеризует степень выделения мочевины из капсулированных гранул.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Графики рис. 2 характеризуют кинетику выделения мочевины в воде из капсулированных гранул, отличающихся разной массовой долей оболочки.

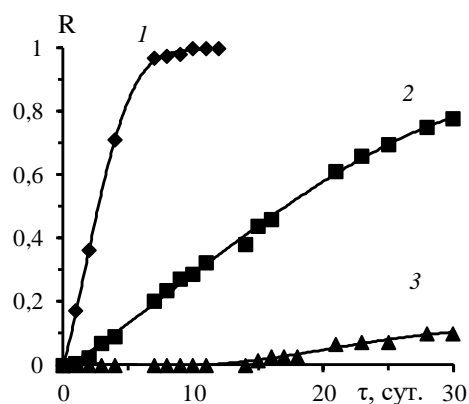


Рис. 2. Зависимость степени выделения мочевины от времени процесса. Массовая доля оболочки, %: 1 – 9; 2 – 16; 3 – 23
Fig. 2. Dependence of the degree of urea release on the time of the process. Mass fraction of the coating, %: 1 – 9; 2 – 16; 3 – 23

Для гранул с массовой долей оболочки 9% (толщина покрытия 0,04 мм) отсутствует индукционный период, вся мочевина выделилась за 10 сут. Для гранул с массовой долей оболочки 16% (толщина покрытия 0,08 мм) индукционный период составил 1 сут., за 30 сут. степень выделения составила 0,78. Для гранул с относительной массовой долей оболочки 23% (толщина покрытия 0,12 мм) индукционный период составил 14 сут., за 30 сут. степень выделения составила 0,1. Таким образом, с

ростом толщины покрытия форма кривой выделения мочевины изменяется. Появляется период задержки выделения (индукционный), во время которого происходит пропитка слоя покрытия влагой. После накопления достаточного количества воды в грануле начинается выделение мочевины по диффузионному механизму. На графиках зависимости степени выделения от времени имеется прямой участок, соответствующий постоянной скорости выделения мочевины. В этот период происходит растворение твердого ядра, которое окружено слоем насыщенного раствора мочевины. Устанавливается равновесие между диффузионными потоками воды внутрь гранулы и мочевины в окружающий гранулу раствор. Нелинейные участки кривых 1, 2 на рис. 2 соответствуют периоду убывающей скорости процесса. В период убывающей скорости твердое ядро уже отсутствует и концентрация раствора мочевины внутри капсулы уменьшается, что приводит к уменьшению движущей силы процесса.

Однако экспериментальная проверка характера высвобождения питательных веществ и общей продолжительности действия удобрения занимает много времени, поскольку продолжительность высвобождения для большинства CRF составляет от 3 до 6 мес. Отсюда возникает необходимость быстрой оценки продолжительности высвобождения питательных веществ из капсулированных удобрений. Желательно иметь математическую модель, позволяющую прогнозировать продолжительность выделения питательных веществ из CRF с помощью измерения выделения питательных веществ в течение короткого периода времени (по сравнению с ожидаемым сроком действия).

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВЫДЕЛЕНИЯ МОЧЕВИНЫ ИЗ КАПСУЛИРОВАННОЙ ГРАНУЛЫ

Выделение мочевины начинается после завершения периода пропитки полимерного покрытия водой и образования на его внутренней стороне пленки насыщенного раствора мочевины с концентрацией $C_{нас}$, кг/м³ (рис. 3). Индукционный период не являлся предметом данного исследования. Экспериментальные данные свидетельствуют (рис. 2), что он либо отсутствует, либо его продолжительность мала по сравнению с общим временем высвобождения мочевины из капсулированной гранулы.

Процесс переноса мочевины через слой полимерного покрытия ядра гранулы в раствор описывается дифференциальным уравнением диффузии (1) с граничным условием первого рода на внутренней поверхности покрытия и граничным условием третьего рода на наружной поверхности.

Из-за малой толщины слоя покрытия по сравнению с размерами ядра ($\delta_n \ll R_j$) он рассматривается как плоская пластина.

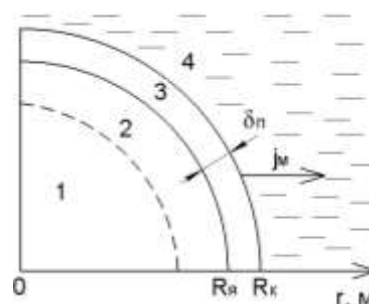


Рис. 3. Расчетная схема: 1 – твердое ядро; 2 – насыщенный раствор; 3 – слой покрытия; 4 – окружающая жидкость
Fig. 3. Calculation scheme: 1 – solid core; 2 – saturated solution; 3 – coating layer; 4 – surrounding liquid

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial r^2}, \quad R_я < r < R_к, \quad (1)$$

где D_m – эффективный коэффициент диффузии мочевины через слой покрытия, м²/с; C – концентрация мочевины, кг/м³; τ – время, с; r – радиальная координата, м; $R_я$ – радиус ядра гранулы, м; $R_к$ – радиус капсулы, м.

Граничное условие для уравнения (1) на внутренней поверхности покрытия записывается в предположении, что на внутренней поверхности покрытия устанавливается равновесное значение концентрации мочевины:

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

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

где ε – коэффициент распределения; $C_{гр}$ – концентрации мочевины внутри капсулы, кг/м³; $C_{нас}$ – концентрации насыщенного раствора мочевины, 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 мочевины).

На наружной поверхности покрытия предполагается массообмен по закону массоотдачи:

$$-D_m \frac{\partial C(R_к, \tau)}{\partial \tau} = \beta \left[\frac{C(R_к, \tau)}{\varepsilon} - C_ж \right] = j_m, \quad (4)$$

где j_m – плотность массового потока мочевины через поверхность раздела твердой и жидкой фаз, т.е.

потока мочевины в окружающую гранулу жидкость, кг/(м²·с); β – коэффициент массоотдачи, м/с; С_ж – концентрация мочевины в окружающей гранулу жидкости, кг/м³.

В теории массопередачи показано [21], что для неподвижных частиц критерий Шервуда $Sh = \frac{\beta d_k}{D_{mw}} = 2$. Следовательно, $\beta = \frac{2D_{mw}}{d_k} = \frac{D_{mw}}{R_k}$, где D_{mw} – коэффициент диффузии мочевины в воде, d_к – диаметр капсулы. Согласно данным работы [22]:

$$D_{mw} = (1,38 - 0,0782C_{ж} + 0,00464 C_{ж}^2) \cdot 10^{-9}. \quad (5)$$

Концентрация мочевины в окружающей жидкости находится из уравнения:

$$V_{ж} \frac{dC_{ж}}{d\tau} = 4\pi R_k^2 N_{гр} j_m, \quad (6)$$

где V_ж – объем окружающей жидкости, N_{гр} – число гранул. При τ = 0 C_ж = 0.

Для определения границ разных периодов процесса выделения мочевины используется условная величина концентрации мочевины внутри капсулы C_{гр}:

$$\frac{dC_{гр}}{d\tau} = -\frac{4\pi R_k^2 j_m}{V_{я}}, \quad (7)$$

где V_я = $\frac{4}{3}\pi R_{я}^3$ – объем ядра. При τ = 0 C_{гр} = ρ_{тв}. По

физическому смыслу C_{гр} – отношение массы мочевины внутри капсулы к начальному объему ядра.

Таким образом, система уравнений (1)-(7) представляет собой математическую модель процесса выделения мочевины из капсулированной гранулы в водной среде. Для решения системы уравнений математического описания использовался метод конечных разностей. Программная реализация модели выполнена в системе Mathcad.

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ И ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

На первом этапе моделирования процесса выделения мочевины из капсулированных гранул проводилась параметрическая идентификация математической модели. Путем решения обратной задачи определялось значение эффективного коэффициента диффузии мочевины через капсулу, обеспечивающее хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. На втором этапе проводилось прогнозирование хода процесса на более длительном интервале времени.

Для ряда значений эффективного коэффициента диффузии мочевины через капсулу D_м решалось решение системы уравнений (1)-(7)

математического описания. Далее для каждого варианта рассчитывалась среднеквадратичное отклонение опытных значений степени выделения R_э от расчетных R_и

$$f(D_m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_э} (R_{э_i} - R_i)^2}{N_э}}, \quad (8)$$

где N_э – количество экспериментальных значений.

Значение D_м, доставляющее минимум функции f(D_м), использовалось далее для прогнозных расчетов. Для процедуры параметрической идентификации модели взяты экспериментальные данные по кинетике выделения мочевины из капсулированных гранул с относительной массовой долей покрытия 9, 16, 23% (рис. 2). Значение эффективного коэффициента диффузии мочевины составило 2,7·10⁻¹³ м²/с. На рис. 4 приведены зависимости степени выделения мочевины от времени процесса для гранул с различной толщиной покрытия на значительно большем интервале времени, чем экспериментальные данные, использованные для идентификации эффективного коэффициента диффузии.

Непрерывные линии – прогноз по математической модели, точки соответствуют экспериментальным данным. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения мочевины из капсулированных гранул показывает их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка составила 0,019; 0,031; 0,022 для гранул с массовой долей оболочки 20; 23; 26%, соответственно.

ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель процесса высвобождения мочевины из гранул с полимерным покрытием. Модель описывает весь период процесса выделения и отражает влияние размера гранул и толщины слоя покрытия на кинетику процесса выделения мочевины. Предложенная модель может быть использована для оперативного прогнозирования сроков высвобождения мочевины из капсулированных гранул, поскольку продолжительность высвобождения для большинства CRF составляет от 3 до 6 мес, и экспериментальная проверка общей продолжительности действия удобрения затруднительна. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели опытным данным. Для этого были проведены эксперименты по капсулированию гранул мочевины в полимерные оболочки различной тол-

щины. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения мочевины из капсулированных гранул показало их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка не превышала 0,031.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

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

The study was conducted using the resources of the Center for the Collective Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Russian Ministry of Education and Science, agreement No. 075-15-2021-671).

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

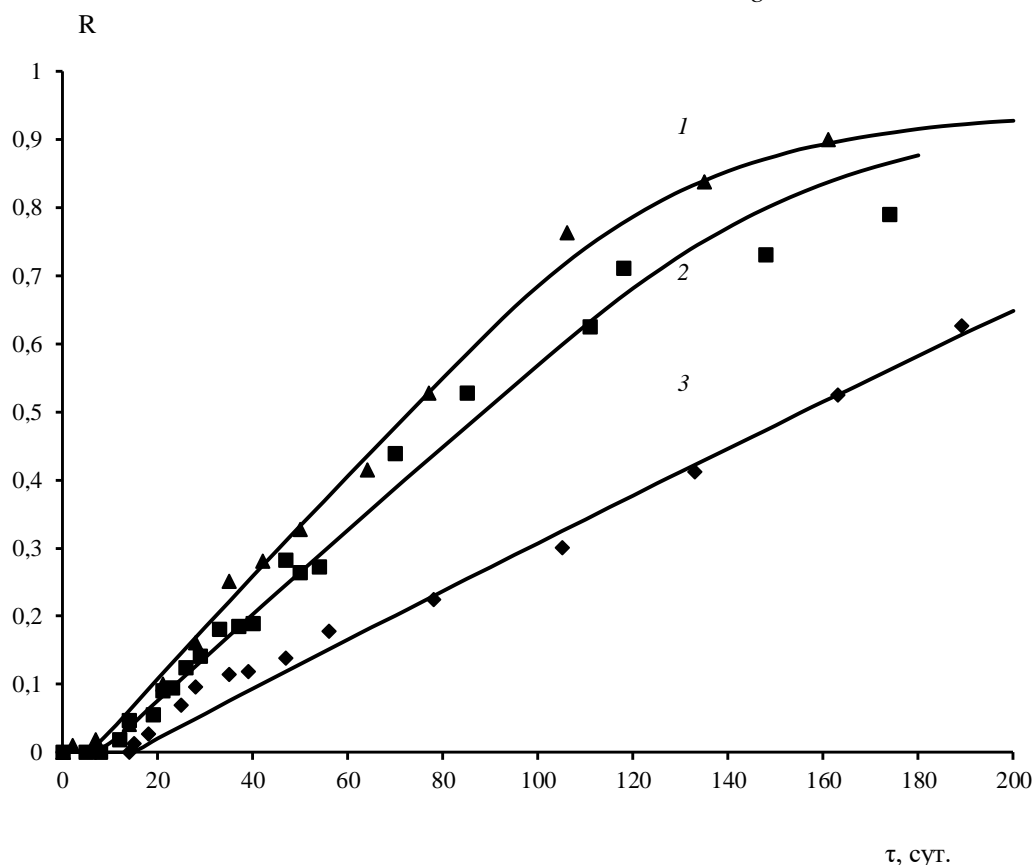


Рис. 4. Изменение степени выделения мочевины из капсулированных гранул во времени. Массовая доля оболочки, %: 1 – 20; 2 – 23; 3 – 26

Fig. 4. Change in the degree of release of urea from encapsulated granules over time. Symbols- experiment, lines-calculations/ Mass fraction of the coating, %: 1 – 20; 2 – 23; 3 – 26

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **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. Art. 238. DOI: 10.3390/plants10020238.
2. **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. P. 1510-1533. DOI: 10.1080/01904167.2020.1744647.
3. **Conrad Y., Fohrer N.** Modelling of nitrogen leaching under a complex winter wheat and red clover crop rotation in a drained agricultural field. *Phys. Chem. Earth*. 2009. V. 34. N 8-9. P. 530-540. DOI: 10.1016/j.pce.2008.08.003.
4. **Qiao D., Liu H., Yu L., Bao X., Simon G.P., Petinakis E., Chen L.** Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. *J. Carbohydr. Polym.* 2016. V. 147. P. 146-154. DOI: 10.1016/j.carbpol.2016.04.010.
5. **Rahman M.M., Ahsan A., Salleh M.A.M., Hossain M.M., Ra C.S., Rashid U.** Production of slow release crystal fertilizer from wastewaters through struvite crystallization - A review. *Arab. J. Chem.* 2014. V. 7. P. 139-155. DOI: 10.1016/j.arabjc.2013.10.007.

6. **Chen Z., Wang Q., Ma J., Zou P., Jiang L.** Impact of controlled-release urea on rice yield, nitrogen use efficiency and soil fertility in a single rice cropping system. *Sci. Rep.* 2020. V. 10. P. 1-10. DOI: 10.1038/s41598-020-67110-6.
7. **Xiang Y., Ji-yun J., Ping H., Ming-zao L.** Recent advances on the technologies to increase fertilizer use efficiency. *Agric. Sci. China.* 2008. V. 7. P. 469–479. DOI: 10.1016/S1671-2927(08)60091-7.
8. **Timilsena Y.P., Adhikari R., Casey P., Muster T., Gill H., Adhikari B.** Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns. *J. Sci. Food Agr.* 2015. V. 95. P. 1131–1142. DOI: 10.1002/jsfa.6812.
9. **Shaviv A.** Advances in controlled-release fertilizers. *Adv. in Agronomy.* 2001. V. 71. P. 1-49. DOI: 10.1016/S0065-2113(01)71011-5.
10. **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.
11. **Одинцов А.В., Липин А.Г., Туркова Н.Д.** Оценка пролонгирующего эффекта композиционных оболочек гранул минерального удобрения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2010. Т. 53. Вып. 8. С. 68-70. **Odintsov A.V., Lipin A.G., Turkova N.D.** Estimation of prolonging effect of granules composition coats of mineral fertilizer. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2010. V. 53. N 8. P. 68-70 (in Russian).
12. **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.
13. **Al-Zahrani S.M.** Controlled-Release of Fertilizers: Modeling and Simulation. *Int. J. Eng. Sci.* 1998. V. 37. N 10. P. 1299-1307. DOI: 10.1016/S0020-7225(98)00120-7.
14. **Shen Y. Z., Du C. W., Zhou J. M., Ma F.** Modeling nutrient release from swelling polymer-coated urea. *Appl. Eng. Agric.* 2015. V. 31. N 2. P. 247-254. DOI: 10.13031/aea.31.10733.
15. **Shaviv A., Raban S., Zaidel E.** Modeling Controlled Nutrient Release from a Population of Polymer Coated Fertilizers: Statistically Based Model for Diffusion Release. *Environ. Sci. Technol.* 2003. V. 37. N 10. P. 2257-2261. DOI: 10.1021/es0205277.
16. **Du C., Tang D., Zhou J., Wang H., Shaviv A.** Prediction of Nitrate Release from Polymer-Coated Fertilizers Using an Artificial Neural Network Model. *Bioproc. Biosyst.* 2007. V. 99. N 4. P. 478-486. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2007.12.003.
17. **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. N 4. P. 562–568. DOI: 10.3311/PPCh.14100.
18. **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.
19. **Lipin A.A., Lipin A.G.** Prediction of coating uniformity in batch fluidized-bed coating process. *Particuology.* 2022. V. 61. P. 41-46. DOI: 10.1016/j.partic.2021.03.010.
20. **Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А.** Оценка степени покрытия при капсулировании зернистых материалов в псевдооживленном слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2019. Т. 62. Вып. 5. С. 84-90. DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5793. **Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A.** Assessment of coverage degree during granular material encapsulation in fluidized bed. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 5. P. 84-90 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt201962fp.5793.
21. **Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N.** Transport Phenomena. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2002. 912 p.
22. **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.

Поступила в редакцию 04.02.2021
Принята к опубликованию 29.03.2022

Received 04.02.2021
Accepted 29.03.2022