

**КИНЕТИКА ВЫСВОБОЖДЕНИЯ ПИТАТЕЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ
ИЗ ГРАНУЛ НРК-УДОБРЕНИЯ С ПОЛИМЕРНЫМ ПОКРЫТИЕМ**

А. А. Липин, А. Г. Липин

*Кафедра «Процессы и аппараты химической технологии», piaxt@isuct.ru;
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический
университет», Иваново, Россия*

Ключевые слова: диффузия; капсулирование; кинетика высвобождения; моделирование; полимерное покрытие; НРК-удобрения.

Аннотация: Представлены результаты исследования кинетики выделения питательных веществ из капсулированных гранул НРК-удобрения. Установлены характер и продолжительность выделения питательных веществ из капсулированных гранул с различной толщиной оболочки. Предложена математическая модель процесса высвобождения питательных веществ из гранул с полимерным покрытием, позволяющая оперативно прогнозировать его продолжительность. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели опытным данным. Сопоставлены расчетные и экспериментальные значения степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул.

Обозначения

V – степень выделения;	$N_{\text{э}}$ – число экспериментальных значений;
$C, C_{\text{гр}}, C_{\text{ж}}$ – концентрации питательных веществ в оболочке, внутри капсулы и в окружающей гранулу жидкости соответственно, кг/м ³ ;	$R_{\text{к}}, R_{\text{я}}$ – радиусы капсулы и ядра гранулы соответственно, м;
$C_{\text{нас}}$ – концентрация насыщенного раствора НРК-удобрения, кг/м ³ ;	r – координата по радиусу, м;
$D_{\text{НРК}}$ – эффективный коэффициент диффузии питательных веществ через слой покрытия, м ² /с;	Sh – критерий Шервуда;
$D_{\text{в}}$ – коэффициент диффузии питательных веществ в воде, м ² /с;	$V_{\text{ж}}$ – объем окружающей гранулу жидкости, м ³ ;
$d_{\text{к}}$ – диаметр капсулы, м;	$V_{\text{я}}$ – объем ядра гранулы, м ³ ;
$j_{\text{НРК}}$ – плотность массового потока питательных веществ в окружающую гранулу жидкость, кг/(м ² ·с);	$N_{\text{гр}}$ – число гранул;
	β – коэффициент массоотдачи, м/с;
	$\delta_{\text{п}}$ – толщина покрытия, м;
	ε – коэффициент распределения;
	$\rho_{\text{ТВ}}$ – плотность ядра гранулы, кг/м ³ ;
	τ – время, с

Введение

Рост населения во всем мире значительно увеличил спрос на продовольствие и, чтобы удовлетворить его, необходима большая площадь плодородных земель. Однако такие факторы, как индустриализация, деградация почв и урбанизация, значительно сократили площадь сельскохозяйственных земель. Для получения больших объемов урожая в условиях ограниченных площадей плодородных земель требуется большое количество удобрений. Недостаток обычных удобрений – быстрое высвобождение питательных веществ, что может привести к их потерям вследствие испарения, выщелачивания. Кроме того, растения в начальной стадии развития не могут усвоить все поступающие с удобрениями питательные вещества, поэтому их избыток вымывается в грунт, вызывая эвтрофикацию почвы [1 – 4].

Один из вариантов повышения эффективности удобрений и снижения токсичности почвы – использование удобрений с регулируемым высвобождением питательных веществ (*англ.* Controlled Release Fertilizer (CRF)) [1 – 5]. К такому типу удобрений относится, например, NPK-удобрение, покрытое полимерной оболочкой [6]. Потенциальным преимуществом удобрений с контролируемым высвобождением является возможность регулировать скорость и продолжительность высвобождения питательных веществ, чтобы их можно было применять один раз в год для обеспечения потребности в питательных веществах в течение всего годового вегетационного периода [3 – 5]. 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 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 температуры [7]. Несмотря на то что в прошлом разрабатывалось множество моделей прогнозирования и методов оценки высвобождения питательных веществ [8 – 12], 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 питательных веществ из капсулированных гранул

Для исследования кинетики выделения питательных веществ из CRF использовались гранулы NPK-удобрения с покрытием из акрилового полимера. Капсулирование гранулированного NPK-удобрения проводилось в лабораторном аппарате с псевдооживленным слоем частиц [13]. Нанесение защитной оболочки осуществлялось путем 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 осаждается на поверхности частиц и образует оболочку. Применялся 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 [14, 15].

Процесс капсулирования осуществлялся в аппарате кипящего слоя цилиндрикоконической 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.

Получены образцы капсулированного в полимерную оболочку NPK-удобрения с содержанием покрытия от общей массы гранул 13, 16, 20, 23, 26 %. На рисунке 1 приведена фотография среза гранулы, полученная на электронном сканирующем микроскопе TESCAN VEGA3 с увеличением $\times 88$. Хорошо видна оболочка, нанесенная на ядро гранулы. Содержание полимерного покрытия 26 %. В слое покрытия нет дефектов, толщина покрытия достаточно равномерная, среднее значение толщины слоя покрытия 0,194 мм.

Тесты на выделение питательных веществ из гранул NPK-удобрения 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 высвобождающихся питательных веществ рефрактометрическим методом. Измерялся показатель преломления раствора на рефрактометре ИРФ-454 Б2М, после чего по калибровочному графику определялась концентрация питательных веществ в растворе. Калибровочным служил график зависимости показателя преломления от концентрации водного раствора удобрения. Для построения данной зависимости использовались результаты измерения показателя преломления у специально приготовленных растворов NPK-удобрения известных концентраций. Соотношение текущей концентрации и максимально возможной при полном растворении ядра гранулы характеризует степень выделения питательных веществ из капсулированных гранул.



Рис. 1. SEM-изображение среза капсулированной гранулы NPK-удобрения

Результаты экспериментов и их обсуждение

Графики рис. 2 характеризуют кинетику выделения питательных веществ в воде из капсулированных гранул NPK-удобрения, отличающихся разной массовой долей оболочки.

Для гранул с массовой долей оболочки 13 % (толщина покрытия 0,06 мм) индукционный период составил 1 сутки, степень выделения за 30 суток – 0,70; с массовой долей оболочки 16 % (толщина покрытия 0,08 мм) индукционный период – 5 суток, степень выделения за 30 – 0,58; с массовой долей оболочки 20 % (толщина покрытия 0,10 мм) индукционный период – 10 суток, степень выделения за 30 суток – 0,18; с массовой долей оболочки 23 % (толщина покрытия 0,13 мм) индукционный период – 18 сут., степень выделения за 30 суток – 0,035.

Таким образом, с ростом толщины покрытия форма кривой выделения питательных веществ изменяется. Увеличивается продолжительность периода задержки выделения (индукционного), во время которого происходит пропитка слоя покрытия влагой. После накопления достаточного количества воды в грануле начинается выделение питательных веществ по диффузионному механизму. На графиках зависимости степени выделения от времени имеется прямой участок, соответствующий постоянной скорости процесса. В этот период происходит растворение твердого ядра, которое окружено слоем насыщенного раствора питательных веществ. Устанавливается равновесие между диффузионными потоками воды внутрь гранулы и питательных веществ в окружающий гранулу раствор. Нелинейные участки кривых 1, 2 соответствуют периоду убывающей скорости процесса (см. рис. 2). В период убывающей скорости твердое ядро уже отсутствует, и концентрация раствора питательных веществ внутри капсулы уменьшается, что приводит к снижению 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 месяцев. Отсюда возникает необходимость быстрой оценки продолжительности высвобождения питательных веществ из капсулированных удобрений. Желательно иметь математическую модель, позволяющую прогнозировать продолжительность выделения питательных веществ из CRF после наблюдения за процессом в течение короткого периода времени (по сравнению с ожидаемым сроком действия).

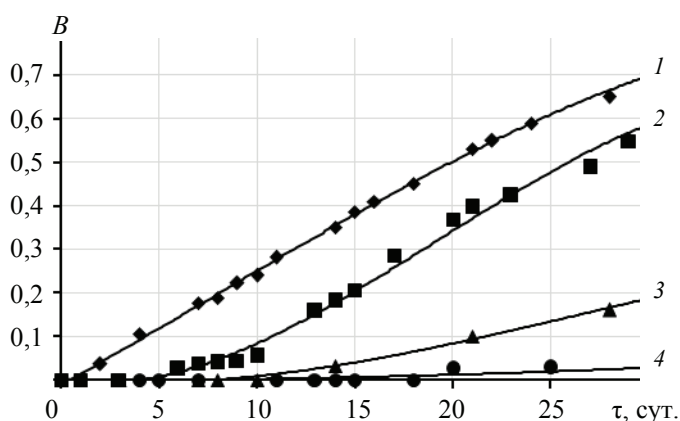


Рис. 2. Зависимость степени выделения питательных веществ от времени процесса при массовой доле оболочки, %:
1 – 13; 2 – 16; 3 – 20; 4 – 23

Математическая модель процесса выделения питательных веществ из капсулированной гранулы

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

Процесс переноса питательных веществ через слой полимерного покрытия ядра гранулы в раствор описывается дифференциальным уравнением диффузии (1) с граничными условиями первого и третьего рода соответственно на внутренней и наружной поверхностях. Из-за малой толщины слоя покрытия, по сравнению с размерами ядра ($\delta_{\text{пл}} \ll R_{\text{я}}$), он рассматривается как плоская пластина

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

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

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

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

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 НПК-удобрения).

На наружной поверхности покрытия предполагается массообмен по закону массоотдачи

$$-D_{\text{NPK}} \frac{\partial C(R_{\text{к}}, \tau)}{\partial r} = \beta \left[\frac{C(R_{\text{к}}, \tau)}{\varepsilon} - C_{\text{ж}} \right] = j_{\text{NPK}}. \quad (4)$$

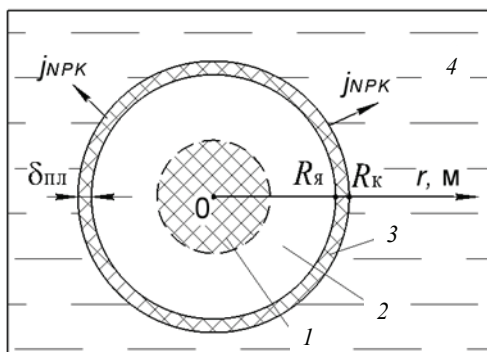


Рис. 3. Расчетная схема:

1 – твердое ядро; 2 – насыщенный раствор; 3 – слой покрытия; 4 – окружающая жидкость

В теории массопередачи показано [16], что для неподвижных частиц критерий Шервуда $Sh = \frac{\beta d_k}{D_w} = 2$. Следовательно, $\beta = \frac{2D_w}{d_k} = \frac{D_w}{R_k}$.

Концентрация питательных веществ в окружающей жидкости находится из уравнения

$$V_{ж} \frac{\partial C_{ж}}{\partial \tau} = 4\pi R_k^2 N_{гр} j_{NPK} \quad (5)$$

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

$$\frac{\partial C_{гр}}{\partial \tau} = \frac{4\pi R_k^2 j_{NPK}}{V_{я}} \quad (6)$$

Начальные условия для уравнений (5) и (6): $C_{ж} = 0$ и $C_{гр} = \rho_{тв}$ при $\tau = 0$. По физическому смыслу $C_{гр}$ – отношение массы NPK-удобрения внутри капсулы к начальному объему ядра.

Таким образом, система уравнений (1) – (6) представляет собой математическую модель процесса выделения питательных веществ из капсулированной гранулы NPK-удобрения 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 питательных веществ из капсулированных гранул проводилась параметрическая идентификация математической модели. Путем решения обратной задачи определялось значение эффективного коэффициента диффузии питательных веществ 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 питательных веществ через капсулу D_{NPK} реализовывалось решение системы уравнений (1) – (6) математического описания. Далее для каждого варианта рассчитывалось среднеквадратичное отклонение опытных значений степени выделения B_{3i} от расчетных B_i

$$f(D_{NPK}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_3} (B_{3i} - B_i)^2}{N_3}} \quad (7)$$

Значение D_{NPK} , доставляющее минимум функции $f(D_{NPK})$, использовалось далее для прогнозных расчетов. Для процедуры параметрической идентификации модели взяты экспериментальные данные по кинетике выделения питательных веществ из капсулированных гранул (см. рис. 2). Значение эффективного коэффициента диффузии D_{NPK} составило $9,5 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$. На рисунке 4 приведены

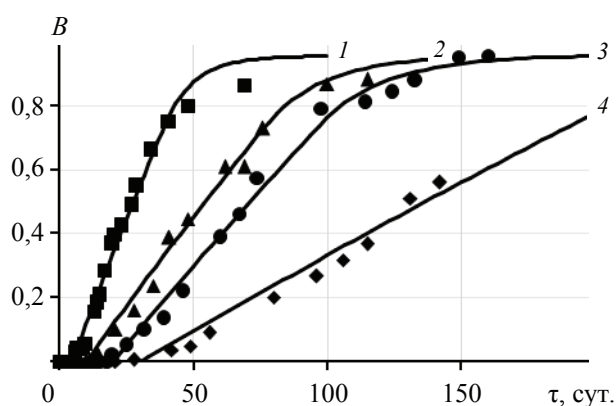


Рис. 4. Изменение степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул во времени при массовой доле оболочки, %:
1 – 16; 2 – 20; 3 – 23; 4 – 26

зависимости степени выделения питательных веществ от времени процесса для гранул с различной массовой долей 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 питательных веществ из капсулированных гранул показывает их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка составила 0,018; 0,010; 0,013; 0,014 для гранул с массовой долей оболочки, %, соответственно 16; 20; 23; 26.

Заключение

Разработана математическая модель процесса высвобождения питательных веществ из гранул с полимерным покрытием. Модель описывает весь период процесса выделения и отражает влияние размера гранул и толщины слоя покрытия на кинетику процесса выделения питательных веществ из капсулированных гранул NPK-удобрения. Предложенная модель может быть использована для оперативного прогнозирования сроков высвобождения питательных веществ из капсулированных гранул, поскольку продолжительность высвобождения для большинства CRF составляет от 3 до 6 месяцев и экспериментальная проверка общей продолжительности действия удобрения затруднительна. Выполнена проверка адекватности предложенной математической модели опытным данным. Для этого проведены эксперименты по капсулированию гранул NPK-удобрения в полимерные оболочки различной толщины. Сопоставление расчетных и экспериментальных значений степени выделения питательных веществ из капсулированных гранул показало их хорошее соответствие. Среднеквадратичная ошибка не превышала 0,018.

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

Список литературы

1. A Review of Mathematical Modeling and Simulation of Controlled-Release Fertilizers / S. A. Irfan, R. Razali, K. KuShaari [et al.] // J. Controlled Release. – 2018. – Vol. 271. – P. 45 – 54. doi: 10.1016/j.jconrel.2017.12.017

2. Lawrencia, D. Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release / D. Lawrencia, S. K. Wong, D. Y. S. Low [et al.] // *Plants*. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – Art. 238. doi: 10.3390/plants10020238
3. Timilsena, Y. P. Enhanced Efficiency Fertilisers: a Review of Formulation and Nutrient Release Patterns / Y. P. Timilsena, R. Adhikari, P. Casey [et al.] // *J. Sci. Food Agr.* – 2015. – Vol. 95, No. 6. – P. 1131 – 1142. doi: 10.1002/jsfa.6812
4. Shaviv, A. Advances in Controlled-Release Fertilizers / A. Shaviv // *Advances in Agronomy*. – 2001. – Vol. 71. – P. 1 – 49. doi: 10.1016/S0065-2113(01)71011-5
5. Липин, А. Г. Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ / А. Г. Липин, В. О. Небукин, А. А. Липин // *Соврем. науко-емкие технологии. Региональное приложение*. – 2017. – № 3 (51). – С. 86 – 91.
6. A Rapid Technique for Prediction of Nutrient Release from Polymer Coated Controlled Release Fertilizers / Sh. Wang, A. K. Alva, Yu. Li, M. Zhang // *Open Journal of Soil Science*. – 2011. – Vol. 1, No. 2. – P. 40 – 44. doi: 10.4236/ojss.2011.12005
7. Одинцов, А. В. Оценка пролонгирующего эффекта композиционных оболочек гранул минерального удобрения / А. В. Одинцов, А. Г. Липин, Н. Д. Туркова // *Известия вузов. Химия и хим. технология*. – 2010. – Т. 53, № 8. – С. 68 – 70.
8. Al-Zahrani, S. M. Controlled-Release of Fertilizers: Modeling and Simulation / S. M. Al-Zahrani // *Int. J. Eng. Sci.* – 1998. – Vol. 37, No. 10. – P. 1299 – 1307.
9. Shaviv, A. Modeling Controlled Nutrient Release from a Population of Polymer Coated Fertilizers: Statistically Based Model for Diffusion Release / A. Shaviv, S. Raban, E. Zaidel // *Environ. Sci. Technol.* – 2003. – Vol. 37, No. 10. – P. 2257 – 2261.
10. Prediction of Nitrate Release from Polymer-Coated Fertilizers Using an Artificial Neural Network Model / C. Du, D. Tang, J. Zhou [et al.] // *Bioprocesses and Biosystems*. – 2007. – Vol. 99, No. 4. – P. 478 – 486.
11. Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers / V. Vakal, I. Pavlenko, S. Vakal [et al.] // *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*. – 2020. – Vol. 64, No. 4. – P. 562 – 568.
12. Mathematical Model for Potassium Release from Polymer-coated Fertiliser / C. Du, J. Zhou, A. Shaviv, H. Wang // *Biosystems Engineering*. – 2004. – Vol. 88, No. 3. – P. 395 – 400.
13. Lipin, A. G. Calculation of Degree of Coverage in Fluidized Bed Coating / A. G. Lipin, A. A. Lipin, R. Wójtowicz // *Drying Technology*. – 2022. – Vol. 40, No. 1. – P. 30 – 41. doi: 10.1080/07373937.2020.1777153
14. Lipin, A. A. Prediction of Coating Uniformity in Batch Fluidized-Bed Coating Process / A. A. Lipin, A. G. Lipin // *Particuology*. – 2022. – Vol. 61. – P. 41 – 46. doi: 10.1016/j.partic.2021.03.010
15. Липин, А. Г. Оценка степени покрытия при капсулировании зернистых материалов в псевдооживленном слое / А. Г. Липин, В. О. Небукин, А. А. Липин // *Известия вузов. Химия и хим. технология*. – 2019. – Т. 62, № 5. – С. 84 – 90. doi: 10.6060/ivkkt201962fp.5793
16. Берд, Р. Явления переноса / Р. Берд, В. Стьюарт, Е. Лайтфут ; пер. с англ. Н. Н. Кулова, В. С. Крылова ; под ред. Н. М. Жаворонкова, В. А. Малюсова. – М. : Химия, 1974. – 688 с.

Kinetics of Nutrient Release from Polymer Coated NPK Fertilizer Granules

A. A. Lipin, A. G. Lipin

*Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology, piact@isuct.ru;
Ivanovo State Chemical-Technological University, Ivanovo, Russia*

Keywords: diffusion; encapsulation; release kinetics; modeling; polymer coating; NPK fertilizers.

Abstract: The results of a study of the kinetics of nutrient release from encapsulated NPK fertilizer granules are presented. The nature and duration of the release of nutrients from encapsulated granules with different shell thicknesses have been established. A mathematical model of the process of releasing nutrients from polymer-coated granules is proposed, which makes it possible to quickly predict its duration. The adequacy of the proposed mathematical model to experimental data has been verified. The calculated and experimental values of the degree of release of nutrients from encapsulated granules are compared.

References

1. 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, doi: 10.1016/j.jconrel.2017.12.017
2. Lawrencja D., Wong S.K., Low D.Y.S. [et al.] Controlled Release Fertilizers: A Review on Coating Materials and Mechanism of Release, *Plants*, 2021, vol. 10, no. 2, art. 238, doi: 10.3390/plants10020238
3. 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, vol. 95, no. 6, pp. 1131-1142, doi: 10.1002/jsfa.6812
4. Shaviv A. Advances in Controlled-Release Fertilizers, *Advances in Agronomy*, 2001, vol. 71, pp. 1-49, doi: 10.1016/S0065-2113(01)71011-5
5. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. [Encapsulation of granules in polymer shells as a method for creating mineral fertilizers with a controlled release rate of nutrients], *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii. Regional'noye prilozheniye* [Modern high-tech technologies. Regional application], 2017, no. 3 (51), pp. 86-91. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Wang Sh., Alva A.K., Li Yu., Zhang M. A Rapid Technique for Prediction of Nutrient Release from Polymer Coated Controlled Release Fertilizers, *Open Journal of Soil Science*, 2011, vol. 1, no. 2, pp. 40-44, doi: 10.4236/ojss.2011.12005
7. Odintsov A.V., Lipin A.G., Turkova N.D. [Evaluation of the prolonging effect of composite shells of mineral fertilizer granules], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of the Universities. Chemistry and chemical technology], 2010, vol. 53, no. 8, pp. 68-70. (In Russ.)
8. Al-Zahrani S.M. Controlled-Release of Fertilizers: Modeling and Simulation, *Int. J. Eng. Sci.*, 1998, vol. 37, no. 10, pp. 1299-1307.
9. 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, vol. 37, no. 10, pp. 2257-2261.
10. Du C., Tang D., Zhou J., Wang H., Shaviv A. Prediction of Nitrate Release from Polymer-Coated Fertilizers Using an Artificial Neural Network Model, *Bioprocesses and Biosystems*, 2007, vol. 99, no. 4, pp. 478-486.

11. Vakal V., Pavlenko I., Vakal S., Hurets L., Ochowiak M. Mathematical Modeling of Nutrient Release from Capsulated Fertilizers, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 2020, vol. 64, no. 4, pp. 562-568.

12. Du C., Zhou J., Shaviv A., Wang H. Mathematical Model for Potassium Release from Polymer-coated Fertiliser, *Biosystems Engineering*, 2004, vol. 88, no. 3, pp. 395-400.

13. Lipin A.G., Lipin A.A., Wójtowicz R. Calculation of Degree of Coverage in Fluidized Bed Coating, *Drying Technology*, 2022, vol. 40, no. 1, pp. 30-41, doi: 10.1080/07373937.2020.1777153

14. Lipin A.A., Lipin A.G. Prediction of Coating Uniformity in Batch Fluidized-Bed Coating Process, *Particuology*, 2022, vol. 61, pp. 41-46, doi: 10.1016/j.partic.2021.03.010

15. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. [Estimation of the degree of coverage during encapsulation of granular materials in a fluidized bed], *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Proceedings of the Universities. Chemistry and chemical technology], 2019, vol. 62, no. 5, pp. 84-90, doi: 10.6060/ivkkt201962fp.5793 (In Russ., abstract in Eng.)

16. Berd R., St'yuart V., Layfut Ye., Zhavoronkov N.M., Malyusov V.A. [Eds.] *Yavleniya perenosa* [Transfer Phenomena], Moscow: Khimiya, 1974, 688 p. (In Russ.)

Kinetik der Nährstofffreisetzung aus NPK-Granulat-polymerbeschichtetem Dünger

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse einer Studie zur Kinetik der Nährstofffreisetzung aus eingekapselten NPK-Düngemittelgranulaten vorgestellt. Art und Dauer der Freisetzung von Nährstoffen aus eingekapselten Granulaten mit unterschiedlichen Schalendicken sind ermittelt. Es ist ein mathematisches Modell des Prozesses der Freisetzung von Nährstoffen aus polymerbeschichteten Granulaten vorgeschlagen, das es ermöglicht, seine Dauer schnell vorherzusagen. Die Eignung des vorgeschlagenen mathematischen Modells für experimentelle Daten ist verifiziert. Die berechneten und experimentellen Werte des Freisetzungsgrades von Nährstoffen aus eingekapselten Granulaten sind verglichen.

Cinétique de la libération des nutriments à partir des granulés d'engrais NPK revêtus de polymère

Résumé: Sont présentés les résultats d'une étude sur la cinétique d'excrétion des nutriments à partir de granulés d'engrais NPK encapsulés. Sont établies la nature et la durée de la libération des nutriments à partir des granules encapsulés avec de différentes épaisseurs de coque. Est proposé un modèle mathématique du processus de la libération des nutriments à partir des granulés revêtus de polymère permettant de prédire rapidement sa durée. Est vérifiée l'adéquation du modèle mathématique proposé aux données expérimentales. Sont comparées les valeurs calculées et celles expérimentales du degré d'excrétion des nutriments à partir des granulés encapsulés.

Авторы: *Липин Андрей Александрович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химической технологии»; *Липин Александр Геннадьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и аппараты химической технологии», ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет», Иваново, Россия.