

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ПОКРЫТИЯ ПРИ КАПСУЛИРОВАНИИ ЗЕРНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

А.Г. Липин, В.О. Небукин, А.А. Липин

Александр Геннадьевич Липин, Владимир Олегович Небукин*, Андрей Александрович Липин
Кафедра процессов и аппаратов химической технологии, ФГБОУ ВО Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Российская Федерация, 153000
E-mail: 157lipin@mail.ru, vlaneb93@gmail.com*, lipin.a@mail.ru

Путем капсулирования зернистых материалов можно устранять их слеживаемость, обеспечивать замедленное выделение активного вещества. В данной работе капсулирование осуществляется путем распыливания эмульсии полимера на частицы псевдооживленного слоя с помощью пневматических форсунок. Капли капсулянта, столкнувшись с частицами слоя, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную пленку. Удаление растворителя путем сушки приводит к отверждению пленки. Качество проведения процесса капсулирования оценивалось по величине степени покрытия, которая равна доле общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой. При нанесении тонких полимерных оболочек очень важно определение режимных параметров процесса, обеспечивающих сплошность защитного покрытия. В статье представлена математическая модель, позволяющая прогнозировать степень покрытия частиц в аппарате кипящего слоя. Предполагается, что скорость роста степени покрытия пропорциональна доле непокрытой поверхности и расходу пленкообразующего вещества. Для идентификации параметров разработанной математической модели и проверки ее адекватности выполнен физический эксперимент на установке лабораторного масштаба. В ходе эксперимента из аппарата с интервалом 1 мин отбирались образцы частиц для определения их степени покрытия. Методика определения степени покрытия основана на сравнительном анализе кривых растворения исходных и обработанных гранул. Приведены графические зависимости, характеризующие эволюцию степени покрытия гранул во времени при различных расходах пленкообразующего вещества. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных данных, показавшее их хорошее соответствие. Таким образом, показано, что предложенная математическая модель формирования защитного покрытия на частицах в аппарате кипящего слоя позволяет достоверно прогнозировать степень покрытия частиц в процессе капсулирования и выбирать рациональные параметры процесса.

Ключевые слова: моделирование, капсулирование, степень покрытия, псевдооживленный слой

ASSESSMENT OF COVERAGE DEGREE DURING GRANULAR MATERIAL ENCAPSULATION IN FLUIDIZED BED

A.G. Lipin, V.O. Nebukin, A.A. Lipin

Aleksandr G. Lipin, Vladimir O. Nebukin *, Andrey A. Lipin
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, vlaneb93@gmail.com*, lipin.a@mail.ru

By encapsulating granular materials, it is possible to eliminate caking, to provide a delayed release of the active substance. In this work the encapsulation is carried out by spraying the polymer emulsion onto the particles of the fluidized bed by means of pneumatic nozzles. Drops of the polymer emulsion, having faced with the particles are spread on their surface, forming a liquid film. Solvent removing by drying causes solidification of the film. The quality of the encapsulation process was evaluated by the degree of coverage, which is equal to the fraction of the total surface

area of the particles coated with a protective coating. When thin polymer shells are applied, it is very important to determine the process parameters that ensure the continuity of the protective coating. A mathematical model, which allows to predict the particles coverage degree in the fluidized bed apparatus, is given. It is assumed that the growth rate of the degree of coverage is proportional to the fraction of the uncoated surface and the consumption of the film-forming material. To identify the parameters of the developed mathematical model and verify of its adequacy, a physical experiment was exercised on a laboratory scale installation. During the experiment, samples of particles were taken from the apparatus at intervals of one minute to determine their degree of coverage. The method for determining the degree of coverage is based on a comparative analysis of the dissolution curves of the initial and processed pellets. Graphic dependencies characterizing the evolution of coverage degree of granules in time at different flow rates of the film-forming substance are given. The comparison of the calculated and experimental data, which showed their good agreement, was performed. Thus, it is shown that the proposed mathematical model of the formation of a protective coating on particles in the apparatus of the fluidized bed allows to predict reliably the degree of coverage of particles and to choose the rational parameters of the encapsulation process.

Key words: modeling, encapsulation, coverage degree, fluidized bed

Для цитирования:

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

For citation:

Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. Assessment of coverage degree during granular material encapsulation in fluidized bed. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2019. V. 62. N 5. P. 84–90

ВВЕДЕНИЕ

Капсулирование – это физико-химический или механический процесс заключения мелких частиц вещества в оболочку из пленкообразующего материала. Капсулирование широко применяется в различных отраслях промышленности. Капсулированные вещества используются при получении композиционных материалов [1-3], создании реагентов с регулируемым выпуском активного компонента [4-7], удобрений пролонгированного действия [8-21]. Капсулирование семян различных растений применяется для защиты от негативного воздействия окружающей среды и обеспечения питательными веществами в период прорастания [22-24]. В пищевой промышленности капсулирование биоактивных компонентов используется для регулирования окислительно-восстановительных реакций, корректирования вкуса, цвета и запаха, увеличения срока годности и т.д. [25, 26].

Имеются работы, посвященные моделированию процесса капсулирования. В работе [27] получена зависимость для определения комбинированного коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности частицы во время капсулирования в зависимости от высоты слоя. Авторы работы [28] предложили математическую модель кинетики капсулирования гранул минеральных удобрений в полочном многоступенчатом аппарате, учитывающую

изменение плотности распределения гранул по размерам на каждой ступени. Вместе с тем создание математического описания процесса капсулирования, дающего возможность прогнозировать его качество, является актуальной задачей. Качество капсулированного продукта обычно оценивают по величине степени покрытия, под которой понимают долю общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАПСУЛИРОВАНИЯ

Одним из способов создания водозащитных оболочек является распыление водной дисперсии полимера на псевдооживленный слой гранул с помощью пневматических форсунок. Капли капсулянта, столкнувшись с частицами слоя, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную пленку. Удаление растворителя путем сушки приводит к отверждению пленки.

Ранее в работе [21] нами предложена математическая модель, учитывающая наиболее важные особенности процесса, но достаточно простая с точки зрения применения в инженерных приложениях. Предполагается, что скорость роста степени покрытия пропорциональна доле непокрытой поверхности. Частицы в псевдооживленном слое идеально перемешаны и монодисперсны. Все капли пленкообразующего вещества попадают на частицы

материала, увлеченные в движение газовой струей, истекающей из форсунки.

Система уравнений, описывающих изменение средней степени покрытия во времени при непрерывном осуществлении процесса, имеет вид [21]:

$$\frac{dx_c}{dt} = k_{зар} \cdot x_0 + k_c(x_\phi - x_c) - k_в \cdot x_c, \quad (1)$$

$$\frac{dx_\phi}{dt} = k_\lambda(1 - x_\phi) + k_\phi(x_c - x_\phi), \quad (2)$$

где x_c, x_ϕ, x_0 – средние степени покрытия частиц в псевдооживленном слое, в двухфазной области струи, истекающей из форсунки и загружаемых частиц. В этих уравнениях $k_\lambda = G_p \cdot k_\lambda^*$ – константа скорости изменения степени покрытия; G_p – расход пленкообразующего вещества, кг/с; k_λ^* – эмпирический коэффициент; t – время, с. Коэффициенты $k_{зар}, k_c, k_\phi, k_в$ определяются следующим образом:

$$k_{зар} = \frac{G_{зар}}{M_{сл}}, \quad k_\phi = \frac{G_\phi}{M_\phi}, \quad k_c = \frac{G_\phi}{M_{сл}}, \quad k_в = \frac{G_в}{M_{сл}}, \quad (3)$$

где $M_{сл}$ – масса слоя; M_ϕ – масса частиц в двухфазной области струи, истекающей из форсунки; G_ϕ – расход частиц, увлекаемых в движение газовой струей, истекающей из форсунки; $G_{зар}, G_в$ – расходы частиц при загрузке и выгрузке, соответственно.

Для периодического процесса, когда отсутствуют потоки загрузки и выгрузки, система уравнений (1), (2) принимает вид:

$$\frac{dx_c}{dt} = k_c(x_\phi - x_c), \quad (4)$$

$$\frac{dx_\phi}{dt} = k_\lambda(1 - x_\phi) + k_\phi(x_c - x_\phi), \quad (5)$$

с начальными условиями $x_c = 0, x_\phi = 0$ при $t = 0$.

Решение системы (4), (5) относительно x_c имеет вид:

$$x_c = \frac{k_4}{z_1 \cdot z_2(z_2 - z_1)} (z_2 - z_1 - z_2 \exp(z_1 t) + z_1 \exp(z_2 t)), \quad (6)$$

где $k_1 = -k_c; k_2 = k_\lambda + k_\phi; k_3 = k_c \cdot k_\phi; k_4 = k_\lambda \cdot k_c;$

z_1, z_2 – корни характеристического уравнения:

$$z_{1,2} = 0,5 \left(k_1 - k_2 \pm \sqrt{(k_2 - k_1)^2 + 4(k_1 \cdot k_2 + k_3)} \right).$$

Формула (6) позволяет рассчитать среднюю степень покрытия гранул в любой момент времени t в односекционном аппарате с псевдооживленным слоем при осуществлении процесса в периодическом режиме.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью проверки применимости данной математической модели были проведены опыты по нанесению пленки стиролакрилового полимера на гранулы карбамида. Схема лабораторной установки представлена на рис. 1. 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.

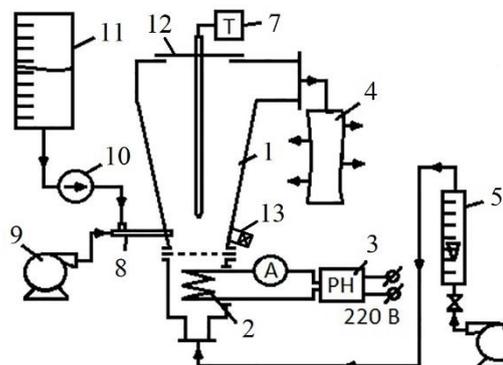


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 – аппарат кипящего слоя, 2 – электронагреватель, 3 – регулятор напряжения, 4 – рукавный фильтр, 5 – ротаметр, 6 – газодувка, 7 – измеритель температуры, 8 – форсунка, 9 – мембранный компрессор, 10 – насос-дозатор, 11 – емкость раствора капсулянта, 12 – съемная крышка, 13 – штуцер с запорным устройством
Fig. 1. Scheme of laboratory set-up: 1 – fluidized bed apparatus, 2 – electric heater, 3 – voltage regulator, 4 – bag filter, 5 – rotameter, 6 – blower, 7 – temperature measurer, 8 – nozzle, 9 – membrane compressor, 10 – dosing pump, 11 – vessel with polymer emulsion, 12 – removable cover, 13 – choke with locking device

Воздух, подаваемый на псевдооживление, нагревается электронагревателем 2. Регулирование температуры воздуха осуществляется путем изменения силы тока через спираль электронагревателя с помощью регулятора напряжения 3. Атмосферный воздух подается в электронагреватель газодувкой 6. Для контроля над расходом воздуха предусмотрен ротаметр 5. Интенсивное движение частиц в аппарате 1 может стать причиной их истирания. Для очистки воздуха, выходящего из аппарата, от пылевидной фракции обрабатываемого продукта предусмотрен рукавный фильтр 4. Тонкодисперсный распыл эмульсии полимера обеспечивается пневматической форсункой 8. Эмульсия полимера дозируется в форсунку из емкости 11 насосом перистальтического типа 10. Сжатый воздух подается в форсунку с помощью мембранного компрессора 9. Для контроля над температурой слоя частиц в аппарате установлен измеритель температуры 7 типа УКТ-38. В качестве датчика температуры используется термопара.

Процесс капсулирования осуществлялся в периодическом режиме при расходах эмульсии 3, 5 и 12 мл/мин и содержании полимера в эмульсии 33%. Масса исходных гранул 0,7 кг. Из аппарата с интервалом 1 мин отбирались 5 образцов частиц для определения их степени покрытия.

Степень покрытия гранул оценивалась по соотношению скоростей растворения навесок обработанного и необработанного карбамида. Навески гранул массой 5 г растворялись в одинаковых условиях. Объем жидкой фазы составлял 20 мл. Через определенные промежутки времени отбирались пробы раствора. Концентрация карбамида в растворе определялась рефрактометрически. Показатель преломления раствора измерялся с помощью рефрактометра ИРФ-454. Значение концентрации карбамида в растворе определялось с помощью графика, отображающего зависимость показателя преломления водного раствора карбамида от его концентрации. Этот график был получен путем измерения показателя преломления растворов известных концентраций.

Зависимости, характеризующие изменение концентрации раствора во времени при растворении гранул карбамида с различной степенью покрытия, приведены на рис. 2. Растворялись гранулы, полученные в процессе капсулирования при расходе эмульсии 5 мл/мин.

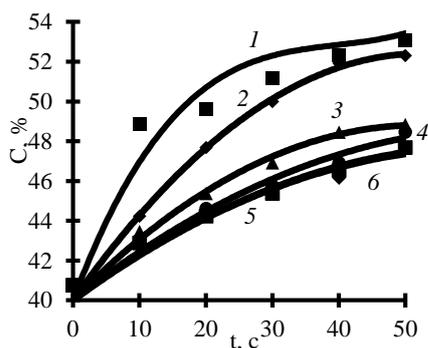


Рис. 2. Кривые растворения карбамида. Массовая доля покрытия, %: 1 – 0; 2 – 0,24; 3 – 0,48; 4 – 0,72; 5 – 0,96; 6 – 1,19
 Fig. 2. Dissolution curves of urea. Mass fraction of coating, %: 1 – 0; 2 – 0.24; 3 – 0.48; 4 – 0.72; 5 – 0.96; 6 – 1.19

Скорость увеличения концентрации раствора пропорциональна потоку растворенного вещества, величину которого можно определить из уравнения массоотдачи. Для навесок гранул со степенями покрытия x_1 и x_2 будем иметь:

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{\beta}{V} \cdot F (1 - x_1) \cdot \Delta C, \quad (7)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{\beta}{V} \cdot F (1 - x_2) \cdot \Delta C, \quad (8)$$

где V – объем раствора; C – концентрация карбамида в растворе; t – время; β – коэффициент массоотдачи; F – общая площадь поверхности гранул; ΔC – движущая сила процесса растворения, равная разности концентраций насыщенного раствора и

действительной концентрации. Одинаковый коэффициент массоотдачи обеспечивается идентичными гидродинамическими условиями.

Возьмем отношения левых и правых частей этих уравнений:

$$\frac{dC_1}{dt} / \frac{dC_2}{dt} = \frac{1 - x_1}{1 - x_2} \quad (9)$$

Данное соотношение будет справедливо для начального периода процесса растворения навесок гранул, когда движущие силы можно принять одинаковыми. Для практического применения соотношения (9) в качестве первой навески целесообразно взять необработанные гранулы с нулевой степенью покрытия, а скорости изменения концентраций определить как тангенсы угла наклона касательных к концентрационным кривым в начальный момент времени (рис. 3).

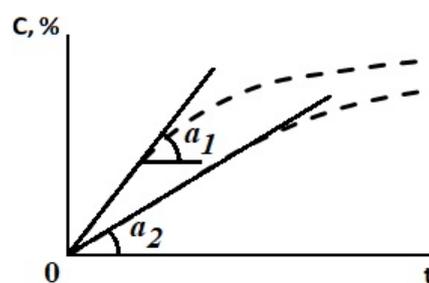


Рис. 3. Пример обработки кривых растворения
 Fig. 3. Example of processing of dissolution curves

Тогда соотношение (9) примет вид:

$$\frac{\text{tga}_1}{\text{tga}_2} = \frac{1}{1 - x_2} \quad (10)$$

Таким образом, средняя степень покрытия гранул равна:

$$x_2 = 1 - \frac{\text{tga}_2}{\text{tga}_1} \quad (11)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием данной методики проведена обработка кривых растворения, представленных на рис. 2. Результаты приведены в таблице.

Аналогичным образом была определена степень покрытия образцов гранул, полученных в процессе капсулирования при расходах эмульсии 3 и 12 мл/мин. На рис. 4 приведены графики зависимости степени покрытия гранул от времени пребывания в аппарате. Опытные данные, полученные при подаче раствора $G_p = 5$ мл/мин, были использованы для определения эмпирического коэффициента k_λ^* . Путем решения обратной задачи для системы (1), (2) найдено значение $k_\lambda^* = 6436$. Расход

частиц, увлекаемых в движение газовой струей, истекающей из форсунки G_f , и масса частиц M_f в двухфазной (газ-твердое) области струи рассчитывались по формулам, рекомендованным в работе [29]. Сравнение опытных (точки) и расчетных данных (линии), приведенных на рис.4, показывает их удовлетворительное соответствие. Средняя относительная ошибка составляет (рис. 4.): 1 – 3,5%, 2 – 1,6%, 3 – 4,8%.

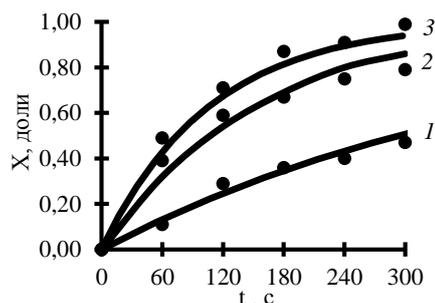


Рис. 4. Изменение степени покрытия гранул во времени процесса. Расход эмульсии, мл/мин: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 12
 Fig. 4. Degree of granules coating vs process time. Emulsion consumption, ml/min: 1 – 3; 2 – 5; 3 – 12

Таблица

Таблица опытных данных
 Table. Experienced data

Образец	Отношение масс оболочки и гранул, %	tga_i	tga_i/tga_0	Средняя степень покрытия, доли
Непокрытые гранулы	0	0,338	1	0
1	0,24	0,206	0,61	0,39
2	0,48	0,139	0,41	0,59
3	0,72	0,112	0,33	0,67
4	0,96	0,085	0,25	0,75
5	1,19	0,071	0,21	0,79

ВЫВОДЫ

Предложена методика определения степени покрытия капсулированных частиц, основанная на сравнительном анализе скорости растворения исходных и обработанных гранул. Проведена проверка ее практической применимости.

Осуществлена проверка адекватности математической модели формирования защитного покрытия на частицах кипящего слоя, позволяющей прогнозировать качество получаемых оболочек.

ЛИТЕРАТУРА

REFERENCES

1. **Смирнов А.В., Синева И.В.** Капсулирование микрочастиц вольфрама в полистирол. Тез. докл. междунауч. конф. «ПОЛИКОМТРИБ-2015». Беларусь: Ин-т механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси. 2015. С. 172.
2. **Конгапшев А.А., Мусаев Ю.И.** Изготовление деталей из капсулированных порошков композиционных материалов. Сб. ст. студ., асп. и проф.-преп. сост. по рез. VIII Междунауч. конф. «Техноконгресс». (11 марта 2017 г.) 2017. Кемерово. С. 20-22.
3. **de Oliveira A.M., da Silva M.L.C.P., Alves G.M., de Oliveira P.C., dos Santos A.M.** Encapsulation of TiO_2 by emulsion polymerization with methyl metacrylate (MMA). *Polymer Bull.* 2005. V. 55. N 6. P. 477-484. DOI: 10.1007/s00289-005-0457-3.
4. **Deyrail Y., Zydowicz N., Cassagnau P.** Polymer crosslinking controlled by release of catalyst encapsulated in polycarbonate microspheres. *Polymer.* 2004. 45. N 18. P. 6123-6131. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.06.064.
5. **Воловченко А.В., Жуков А.Ю., Софронов А.В., Асмаев О.С.** Опыт применения капсулированного ингибитора коррозии Scimol WSC в скважинах Когалымского месторождения. *Нефть. хоз-во.* 2013. № 5. С. 87-89.
6. **Солодов В.В., Палей Р.В., Мубаракوف А.И., Зайков Е.Н.** Капсулированные продукты – недорогая таблетка от проблем. *Нефтегазовая вертикаль.* 2016. № 6. С. 104-108.
7. **Васильева Э.А., Ибрагимова А.Р., Миргородская А.Б., Яцкевич Е.И., Добрынин А.Б., Низамеев И.Р., Кадиров М.К., Захарова Л.Я., Зув Ю.Ф., Коновалов А.И.** Полиэлектролитные микро- и нанокapsулы с варь-
1. **Smirnov A.V., Sineva I.V.** Encapsulation of tungsten microparticles in polystyrene. Abstracts of the International Scientific and Technical Conference "POLIKOMTRIB-2015". Belarus: Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems name V.A. Belogo NAS of Belarus. 2015. P. 172. (in Russian).
2. **Kongapshv A.A., Musaev Yu.I.** Production of details from encapsulated powders of composite materials. Proceedings of the VIII International Scientific Conference "Technocongress". March 11, 2017. Kemerovo. 2017. P. 20-22 (in Russian).
3. **de Oliveira A.M., da Silva M.L.C.P., Alves G.M., de Oliveira P.C., dos Santos A.M.** Encapsulation of TiO_2 by emulsion polymerization with methyl metacrylate (MMA). *Polymer Bull.* 2005. V. 55. N 6. P. 477-484. DOI: 10.1007/s00289-005-0457-3.
4. **Deyrail Y., Zydowicz N., Cassagnau P.** Polymer crosslinking controlled by release of catalyst encapsulated in polycarbonate microspheres. *Polymer.* 2004. 45. N 18. P. 6123-6131. DOI: 10.1016/j.polymer.2004.06.064.
5. **Volovodenco A.V., Zhukov A.Yu., Sofronov A.V., Asmaev O.S.** Experience of encapsulated corrosion inhibitors application in wells of Kogalymskoye oil field. *Neft. Khoz.* 2013. N 5. P. 87-89 (in Russian).
6. **Solodov V.V., Paley R.V., Mubarakov A.I., Zaykov E.N.** Capsulated products – an inexpensive tablet from problems. *Neftegaz. Vertical.* 2016. N 6. P.104-108 (in Russian).
7. **Vasilyeva E.A., Ibragimova A.R., Mirgorodskaya A.B., Yatskevich E.I., Dobrynin A.B., Nizameev I.R., Kadirov M.K., Zakharova L.Ya., Zuev Yu.F., Kononov A.I.** Polyelectrolyte micro- and nanocapsules with variable permeability of the shell as a means of controlling the rate of the reaction of ester hydrolysis. *Izv. Akad. Nauk. Ser. Khim.* 2014. V. 63. N 1. P. 232-238 (in Russian).

- ируемой проницаемостью оболочки как средство контроля скорости реакции гидролиза сложных эфиров. *Изв. Акад. наук. Сер. хим.* 2014. Т. 63. № 1. С. 232-238.
8. **Липин А.Г., Небукин В.О., Липин А.А.** Капсулирование гранул в полимерные оболочки как метод создания минеральных удобрений с регулируемой скоростью высвобождения питательных веществ. *Совр. наукоемк. технологии. Регион. приложение.* 2017. № 3 (51). С. 86-91.
 9. **Морозов Р.В., Таран А.Л., Пынькова Т.И., Таран Ю.А., Семченко М.С., Таран А.В.** Процесс догранулирования и капсулирования послойным нанесением внешнего ре- тура. *Хим. технология.* 2014. Т. 15. № 4. С. 232-236.
 10. **Таран А.Л.** Эффективные технологии капсулирования гранул азотсодержащих удобрений. *Хим. пром-ть сегодня.* 2003. № 7. С. 5-10.
 11. **Xiang Y., Ru X., Shi J., Song J., Zhao H., Liu Y., Guo D., Lu X.** Preparation and Properties of a Novel Semi-IPN Slow-Release Fertilizer with the Function of Water Retention. *J. Agric. Food Chem.* 2017. 65 (50). P. 10851–10858. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b03827.
 12. **Chenab L., Xiea Z., Zhuanga X., Chena X., Jinga X.** Controlled release of urea encapsulated by starch-g-poly(L-lactide). *Carbohydr. Polym.* 2008. V. 72. N 2. P. 342-348. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.09.003.
 13. **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 Agricult.* 2015. V. 95. N 6. P. 1131–1142. DOI: 10.1002/jsfa.6812.
 14. **Острога Р.А., Юхименко Н.П., Михайловский Я.Э., Литвиненко А.В.** Технология получения гранулированных удобрений на органической основе. *Вост.-европ. журн. передовых технологий.* 2015. Т. 1. № 6(79). С. 19-26. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60314.
 15. **Devassine M., Henry F., Guerin P., Briand X.** Coating of fertilizers by degradable polymers. *Internat. J. Pharmaceut.* 2002. V. 242. N 1-2. P. 399-404. DOI: 10.1016/S0378-5173(02)00225-9.
 16. **Jarosiewicz A., Tomaszewska M.** Controlled-Release NPK Fertilizer Encapsulated by Polymeric Membranes. *J. Agric. Food Chem.* 2003. 51 (2). P. 413–417. DOI: 10.1021/jf020800o.
 17. **Boyandin A.N., Kazantseva E.A., Varygina D.E., Volova T.G.** Slow-Release Formulations of Ammonium Nitrate Fertilizer Based Constructing on Degradable Poly(3-hydroxybutyrate). *J. Agric. Food Chem.* 2017. 65 (32). P. 6745–6752. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b01217.
 18. **Tomaszewska M., Jarosiewicz A.** Encapsulation of mineral fertilizer by polysulfone using a spraying method. *Desalination.* 2006. V. 198. P. 346-352. DOI: 10.1016/j.desal.2006.01.032.
 19. **Messa L.L., Froes J.D., Souza C.F., Faez R.** Chitosan-clay hybrid for encapsulation of fertilizers and release sustained of potassium nitrate fertilizer. *Quimica Nova.* 2016. V. 39. N 10. P. 1215-1220. DOI: 10.21577/0100-4042.20160133.
 20. **Острога Р.О., Юхименко М.П.** Капсулювання азотовісних добрив суспензією курячого посліду в апараті киплячого шару. *Вост.-Европ. журн. передових технологій.* 2014. Т. 2. № 6 (68). С. 11-15.
 21. **Овчинников Л.Н., Липин А.Г.** Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое. Иваново: ИГХТУ. 2011. 140 с.
 22. **Будков В.А., Пухальская Н.В.** Дrajирование семян сельскохозяйственных культур. *Плодородие.* 2009. № 2. С. 17-19.
 23. **Иванова Е.А., Якубова О.С., Байрамбеков Ш.Б., Полякова Е.В.** Результаты испытаний по капсулированию
 8. **Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A.** Encapsulation of granules in polymeric shells as a method of creating mineral fertilizers with a controlled release rate of nutrients. *Sovr. Naukoemk. Tekhnol. Region. Prilozh.* 2017. N 3 (51). P. 86-91 (in Russian).
 9. **Morozov R.V., Taran A.L., Pynkova T.I., Taran Yu.A., Semchenko M.S., Taran A.V.** The process of extrapolation and encapsulation by layer-by-layer application of the external contour. *Khim. Tekhnol.* 2014. V. 15. N 4. P. 232-236 (in Russian).
 10. **Taran A.L.** Effective technologies for encapsulating nitrogen fertilizer granules. *Khim. Prom. Segodnya.* 2003. N 7. P. 5-10 (in Russian).
 11. **Xiang Y., Ru X., Shi J., Song J., Zhao H., Liu Y., Guo D., Lu X.** Preparation and Properties of a Novel Semi-IPN Slow-Release Fertilizer with the Function of Water Retention. *J. Agric. Food Chem.* 2017. 65 (50). P. 10851–10858. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b03827.
 12. **Chenab L., Xiea Z., Zhuanga X., Chena X., Jinga X.** Controlled release of urea encapsulated by starch-g-poly(L-lactide). *Carbohydr. Polym.* 2008. V. 72. N 2. P. 342-348. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.09.003.
 13. **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 Agricult.* 2015. V. 95. N 6. P. 1131–1142. DOI: 10.1002/jsfa.6812.
 14. **Ostroga R.A., Yukhimenko N.P., Mikhailovsky Ya.E., Litvinenko A.V.** The technology of obtaining granular fertilizers on an organic basis. *Vost.-Evrop. Zhurn. Pered. Tekhnol.* 2015. V. 1. N 6 (79). P. 19-26 (in Russian). DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60314.
 15. **Devassine M., Henry F., Guerin P., Briand X.** Coating of fertilizers by degradable polymers. *Internat. J. Pharmaceut.* 2002. V. 242. N 1-2. P. 399-404. DOI: 10.1016/S0378-5173(02)00225-9.
 16. **Jarosiewicz A., Tomaszewska M.** Controlled-Release NPK Fertilizer Encapsulated by Polymeric Membranes. *J. Agric. Food Chem.* 2003. 51 (2). P. 413–417. DOI: 10.1021/jf020800o.
 17. **Boyandin A.N., Kazantseva E.A., Varygina D.E., Volova T.G.** Slow-Release Formulations of Ammonium Nitrate Fertilizer Based Constructing on Degradable Poly(3-hydroxybutyrate). *J. Agric. Food Chem.* 2017. 65 (32). P. 6745–6752. DOI: 10.1021/acs.jafc.7b01217.
 18. **Tomaszewska M., Jarosiewicz A.** Encapsulation of mineral fertilizer by polysulfone using a spraying method. *Desalination.* 2006. V. 198. P. 346-352. DOI: 10.1016/j.desal.2006.01.032.
 19. **Messa L.L., Froes J.D., Souza C.F., Faez R.** Chitosan-clay hybrid for encapsulation of fertilizers and release sustained of potassium nitrate fertilizer. *Quimica Nova.* 2016. V. 39. N 10. P. 1215-1220. DOI: 10.21577/0100-4042.20160133.
 20. **Ostroga R.O., Yukhymenko M.P.** Capacity of nitrogen sugar suspension used in a muscle boiler. *Vost.-Evrop. Zhurn. Pered. Tekhnol.* 2014. V. 2. N 6 (68). P. 11-15 (in Ukraine).
 21. **Ovchinnikov L.N., Lipin A.G.** Capsulation of mineral fertilizers in a suspended layer: monograph. Ivanovo: IGHTU. 2011. 140 p. (in Russian).
 22. **Budkov V.A., Pukhalskaya N.V.** Draining of seeds of agricultural crops. *Plodorodie.* 2009. N 2. P. 17-19 (in Russian).
 23. **Ivanova E.A., Yakubova O.S., Bairambekov Sh.B., Polyakova E.V.** Results of tests on encapsulation of cotton seeds with polymer compositions based on fish glue. Perfection of the elements of technologies for cultivating agricultural crops in irrigated conditions of the Lower Volga region: Collection of scientific works. Astrakhan. 2015. P. 95-97 (in Russian).

- семян хлопчатника полимерными композициями на основе рыбного клея. Совершенствование элементов технологий возделывания сельскохозяйственных культур в орошаемых условиях Нижнего Поволжья. Сб. науч. трудов. Астрахань. 2015. С. 95-97.
24. **Копытков В.В., Коновалов В.Н.** Исследование технологии получения дражированных семян с использованием композиционных полимерных препаратов. *Изв. вузов. Лесной журн.* 2016. № 4 (352). С. 30-34. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.4.30.
 25. **Какимова Ж.Х., Какимов А.К., Бепеева А.Е., Хуторянский В.В.** Капсулирование пробиотиков в гидрофильные полимеры. Биотехнология и общество в XXI веке. Сб. ст. Междун. науч.-практич. конф. Барнаул: Алтайский гос. ун-т. 2015. С. 176-179.
 26. **Кролевец А.А., Тырсин Ю.А., Быковская Е.Е.** Применение нано- и микрокапсулирования в фармацевтике и пищевой промышленности. Часть I. Основы микрокапсулирования. *Вестн. РАЕН.* 2012. № 4. С. 123-127.
 27. **Гумницький Я.М., Нагурський О.А., Нагурський А.О.** Динаміка тепломасообміну у шарі дисперсного матеріалу під час капсулювання у стані псевдозрідження. *Вост.-европ. журн. передових технологій.* 2013. Т. 2. № 8(62). С. 42-44.
 28. **Юхименко М., Острога Р., Артюхов А.** Исследование гидродинамики и кинетики процесса капсулирования гранул минеральных удобрений в многоступенчатом аппарате взвешенного слоя. *Вост.-европ. журн. передових технологій.* 2016. Т. 84. № 6. С. 22-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.84179.
 29. **Бувич Ю.А., Минаев Г.А.** Струйное псевдооживление. М.: Химия. 1984. 136 с.
 24. **Kopytkov V.V., Konovalov V.N.** The seed pelleting technology with the use of the composite polymer preparations. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Lesnoy Zhurn.* 2016. N 4 (352). P. 30-34. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.4.30 (in Russian).
 25. **Kakimova Zh.Kh., Kakimov A.K., Bepееva A.E., Khutoryansky V.V.** Encapsulation of probiotics in hydrophilic polymers. Biotechnology and society in the 21st century: Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Barnaul: Altayskiy gos. un-t. 2015. P. 176-179 (in Russian).
 26. **Krolevets A.A., Tyrsin Yu.A., Bykovskaya E.E.** Application of nano and micro capsulation in pharmaceutical and food industry. Part I. Fundamentals of microencapsulation. *Vestn. RAEN.* 2012. N 4. P. 123-127 (in Russian).
 27. **Gumnitsky Y.M., Nagursky O.A., Nagursky A.O.** Dynamics of heat and mass transfer in a layer of disperse material during encapsulation in a state of fluidization. *Vost.-Evrop. Zhurn. Pered. Tekhnol.* 2013. V. 2. N 8 (62). P. 42-44 (in Ukraine).
 28. **Yukhimenko M., Ostroga R., Artyukhov A.** Investigation of the hydrodynamics and kinetics of the process of encapsulating granules of mineral fertilizers in a multi-stage suspended bed apparatus. *Vost.-Evrop. Zhurn. Pered. Tekhnol.* 2016. V. 84. N 6. P. 22-28 (in Russian). DOI: 10.15587/1729-4061.2016.84179.
 29. **Buevich Yu.A., Minaev G.A.** Jet fluidization. M.: Khimiya, 1984. 136 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 22.03.2018
Принята к опубликованию 29.10.2018*

*Received 22.03.2018
Accepted 29.10.2018*