

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЧАСТИЦ ПО МАССАМ ПОКРЫТИЯ  
ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ КАПСУЛИРОВАНИЯ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ****А.Г. Липин, А.А. Липин**

Александр Геннадьевич Липин, Андрей Александрович Липин\*

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

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

*Статья посвящена математическому моделированию процесса капсулирования дисперсных материалов. Одним из главных показателей качества капсулированного продукта является равномерность распределения материала покрытия между капсулируемыми частицами. Показано, что при нанесении толстых оболочек для характеристики равномерности распределения пленкообразующего вещества по частицам целесообразно применять функцию распределения частиц по массам покрытия. В статье предложена математическая модель периодического процесса капсулирования в псевдоожигенном слое, позволяющая прогнозировать функцию распределения частиц по массам покрытия. Модель основана на уравнениях баланса частиц, составленных для двух зон аппарата: сушки и орошения. Предложен алгоритм численного расчета изменения дифференциальной функции распределения частиц по относительным массам покрытия во времени. Программная реализация предложенного алгоритма выполнена в математическом пакете Mathcad. Показано влияние основных параметров процесса на равномерность покрытия частиц псевдоожигенного слоя. Снижение скорости роста массы покрытия  $\lambda$  приводит к улучшению равномерности покрытия частиц, о чем свидетельствует более узкая кривая функции распределения. Это достигается уменьшением расхода раствора покрывающего вещества, распыляемого пневматической форсункой. Уменьшение расхода частиц через зону орошения приводит к ухудшению равномерности покрытия частиц при фиксированном времени обработки. Для количественной оценки неравномерности распределения покрывающего вещества по капсулируемым частицам предлагается использовать величину среднего относительного отклонения CV. Результаты моделирования показали уменьшение величины CV во времени процесса, что свидетельствует об уменьшении неравномерности распределения массы пленкообразующего вещества между частицами при выбранных параметрах процесса.*

**Ключевые слова:** моделирование, капсулирование, равномерность покрытия, псевдоожигенный слой**PARTICLE MASS DISTRIBUTION IN BATCH FLUIDIZED BED COATING PROCESS****A.G. Lipin, A.A. Lipin**

Aleksandr G. Lipin, 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, lipin.a@mail.ru\*

*The paper deals with mathematical modeling the coating process of particulate materials. Inter-particle coating variability is one of the main indicators of the encapsulated product quality. The function of particle distribution according to the mass of coverage was shown can be used to characterize the inter-particle coating variability when the thick shells are applied. The paper presents a mathematical model of the batch fluidized bed coating. The model allows predicting the*

*function of particle distribution according to the mass of coverage. The model bases on the population balance equations, derived for the two compartments: a spraying zone and a drying zone. An algorithm for the numerical solution of the function of particle distribution according to the mass of coverage is described. The influences of the main process parameters on the coating uniformity are shown. As the growth rate of the coating mass decreases, the coating variability of the particles decreases too. This is achieved by reducing the flow rate of the coating solution sprayed by the nozzle. As the flow rate of particles through the spraying zone decreases, the coating variability increases at a fixed processing time. The coating variability value CV was proposed for assessment of the coating substance distribution over the encapsulated particles. The simulation results showed a decrease in the CV value during the process, which indicates a decrease in the ununiformity distribution of the mass of the film-forming substance between the particles at the selected process parameters.*

**Key words:** modeling, encapsulation, coating variability, fluidized bed

**Для цитирования:**

Липин А.Г., Липин А.А. Распределение частиц по массам покрытия при периодическом процессе капсулирования в псевдооживленном слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2021. Т. 64. Вып. 12. С. 84–90

**For citation:**

Lipin A.G., Lipin A.A. Particle mass distribution in batch fluidized bed coating process. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2021. V. 64. N 12. P. 84–90

**ВВЕДЕНИЕ**

В последние десятилетия процесс капсулирования широко применяется в производстве различных продуктов в области фармацевтики, пищевой индустрии, промышленности минеральных удобрений и моющих средств [1-4]. Целями данного процесса являются регулирование доставки целевых веществ, модификация поверхности частиц, маскировка вкуса, добавление активных компонентов [5-8].

Во всех этих приложениях одним из главных показателей качества конечного продукта является равномерность распределения материала покрытия между капсулируемыми частицами. Часто ее выражают как отношение среднего квадратичного отклонения массы покрытия к ее среднему значению [9].

Анализ литературы показал, что большинство работ посвящено изучению равномерности нанесения покрытия при капсулировании методом окатывания [10-17]. Такой способ капсулирования применяется в фармацевтической промышленности при производстве таблеток [18]. Капсулирование методом окатывания осуществляется в аппаратах тарельчатого [10-15] и барабанного [16, 17] типа. Для моделирования процесса капсулирования в тарельчатых и барабанных грануляторах чаще всего применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD) и дискретных элементов (DEM) [10-15].

Имеется ряд работ, в той или иной степени касающихся проблемы равномерности нанесения покрытия при капсулировании в псевдооживленном слое [19-24]. Для прогнозирования равномерности распределения частиц по массам покрытия авторы работы [19] предложили стохастическую модель процесса капсулирования в аппарате псевдооживленного слоя с трубой Вюрстера, разработанную на базе метода Монте-Карло. Этот же метод использовали авторы работы [20] для моделирования распределения частиц по размерам в ходе процесса капсулирования в псевдооживленном слое. Однако существенным недостатком стохастических методов является то, что для их реализации требуются предварительно измеренные параметры процесса, которые должны быть получены экспериментально [9].

В последнее время для моделирования процесса капсулирования в псевдооживленном слое применяются методы вычислительной гидродинамики (CFD), дискретных элементов (DEM), а также комбинация этих методов (CFD-DEM) [21-24].

В работе [22] для моделирования процесса капсулирования в аппарате Вюрстера применен комбинированный метод, включающий методы вычислительной гидродинамики, дискретных элементов и дискретных капель (CFD-DEM-DDM). Исследовано влияние динамики распыления капсулянта и его взаимодействия с гранулами на равномерность покрытия. Показано, что увеличение угла распыления при сохранении постоянного размера

капель приводит к наиболее однородному распределению частиц по массам покрытия. В работах [23] и [24] CFD-DEM подход используется для моделирования равномерности нанесения покрытия на каждой частице слоя. Модели прогнозируют либо нанесенный объем покрытия [23], либо изменение толщины оболочки [24].

CFD-DEM методы требуют применения сложного и дорогостоящего программного обеспечения, поэтому создание относительно простого математического описания процесса капсулирования, дающего возможность прогнозировать равномерность нанесения защитного покрытия, по-прежнему остается актуальной задачей. В работе [25] в качестве количественной характеристики равномерности использовалась величина степени покрытия, под которой понимают долю общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой. При нанесении тонких оболочек этого критерия достаточно для характеристики равномерности распределения пленкообразующего вещества по частицам. В случае нанесения толстых оболочек с момента достижения степени покрытия равной единице, этот параметр перестает быть информативным, хотя процесс капсулирования продолжается и растет толщина оболочки. В этот период для характеристики равномерности распределения пленкообразующего вещества по частицам можно применить функцию распределения частиц по массам покрытия. Причем удобно использовать не абсолютную, а относительную массу покрытия, т.е. отношение массы оболочки к массе ядра.

Это иллюстрирует рис. 1, где показаны кривые изменения степени покрытия частиц  $x$  и средней относительной массы покрытия  $y$ , рассчитанные по формулам, приведенным в работе [25]. Например, после 1500 с ведения процесса частицы становятся полностью покрытыми оболочкой, так как  $x = 1$ . Однако, на момент времени 1500 с эта оболочка тонкая, ее масса по отношению к массе ядра  $y_{ср}$  составляет всего 10%. С увеличением продолжительности капсулирования оболочка растет, например, на момент времени 3000 с ее относительная масса составляет 20% от массы ядра.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

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.

При разработке математической модели этого процесса, рабочий объем аппарата псевдооживленного слоя рассматривали как систему, состоящую из двух взаимодействующих зон: сушки и орошения (рис. 2). В зоне орошения форсунки происходят формирование покрытия, а в зоне сушки отверждение пленки и смешение вновь поступающих частиц.

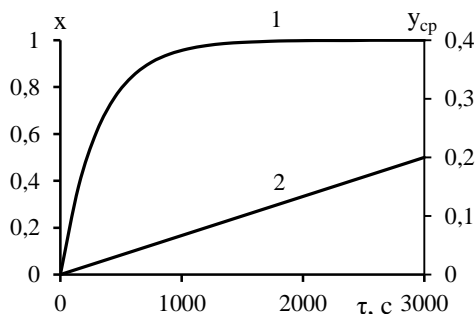


Рис. 1. Изменение степени покрытия  $x$  (1) и средней относительной массы покрытия  $y$  (2) во времени  $\tau$  процесса капсулирования

Fig. 1. Degree of coverage  $x$  (1) and average relative mass of coverage  $y$  (2) vs time of the coating process  $\tau$

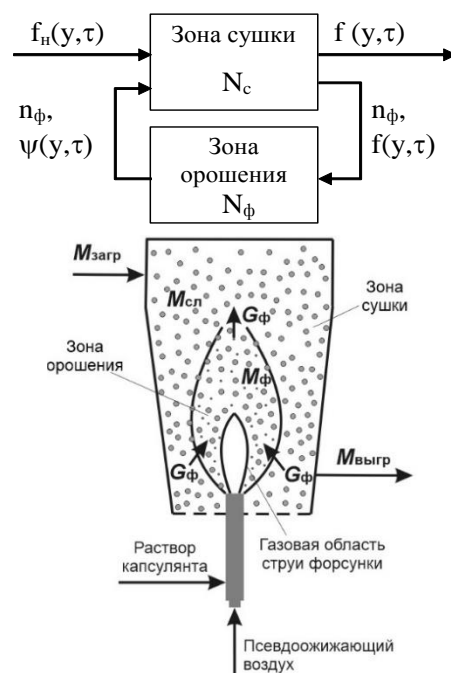


Рис. 2. Структурная и физическая схемы потоков  
Fig. 2. Structural and physical balance schemes

Принимались следующие допущения: частицы в слое идеально перемешаны (это предположение оправдывается интенсивной циркуляцией в аппарате); частицы имеют форму шара; все капли пленкообразующего вещества попадают на части-

цы материала, находящиеся в зоне орошения; вероятность попадания частиц в зону орошения не зависит от массы частиц; активная циркуляция частиц в слое предотвращает слипание частиц. Аппарат работает в периодическом режиме.

Запишем уравнения баланса для изменения числа частиц в системе.

$$N_c \partial f(y, \tau) / \partial \tau = n_\phi \psi(y, \tau) - n_\phi f(y, \tau), \quad (1)$$

$$N_\phi \partial \psi(y, \tau) / \partial \tau + N_\phi \partial [\lambda \cdot \psi(y, \tau)] / \partial y = n_\phi f(y, \tau) - n_\phi \psi(y, \tau). \quad (2)$$

При  $\tau = 0$   $f(y, \tau) = \psi(y, \tau) = f_n(y)$ .

Уравнение (1) представляет собой баланс частиц с относительной массой оболочки  $y$  в произвольный момент времени  $\tau$  в зоне сушки, уравнение (2) – то же самое для зоны орошения. В этих уравнениях  $y = m_o/m_n$  – относительная масса оболочки;  $m_o$  – масса покрытия на грануле;  $m_n$  – масса ядра;  $f(y, \tau)$  и  $\psi(y, \tau)$  – функции плотности распределения частиц по относительной массе оболочки в зонах сушки и орошения;  $n_{заг}$ ,  $n_{выг}$  – количество, соответственно, загружаемых и выгружаемых из аппарата частиц в единицу времени;  $n_\phi$  – количество частиц, циркулирующее через зону орошения в единицу времени;  $N_c$ ,  $N_\phi$  – соответственно, число частиц в зонах сушки и орошения;  $\lambda$  – скорость изменения массы оболочки;  $f_n(y)$  – функция плотности распределения по массе покрытия загружаемых частиц.

Введем обозначения:

$$k_c = n_\phi / N_c, \quad k_\phi = n_\phi / N_\phi, \quad (3)$$

где  $k_c$ ,  $k_\phi$  – относительные расходы частиц через зоны сушки и орошения форсунки, соответственно.

Можно записать:

$$k_c = G_\phi / M_{сл}, \quad k_\phi = G_\phi / M_\phi, \quad (4)$$

где  $M_{сл}$ ,  $M_\phi$  – масса частиц в зоне сушки и в зоне орошения, кг;  $G_\phi$  – расход частиц через зону орошения. Выражения для расчета величин  $M_\phi$  и  $G_\phi$  приведены в работе [26].

Допустим, что скорость роста относительной массы покрытия пропорциональна расходу пленкообразующего вещества и обратно пропорциональна массе гранул в зоне орошения:

$$\lambda = G / M_\phi, \quad (5)$$

где  $G$  – массовый расход пленкообразующего вещества. Таким образом принимается, что скорость роста не зависит от относительной массы покрытия.

С учетом выражений (4), получим следующую систему уравнений:

$$\partial f(y, \tau) / \partial \tau = k_c \psi(y, \tau) - k_c f(y, \tau), \quad (6)$$

$$\partial \psi(y, \tau) / \partial \tau + \lambda \partial \psi(y, \tau) / \partial y = k_\phi f(y, \tau) - k_\phi \psi(y, \tau). \quad (7)$$

Решение этой системы численным методом напрямую весьма затруднительно, поскольку она представляет собой жесткую систему дифференциальных уравнений. Значение коэффициента  $k_\phi$  на 2-3 порядка больше  $k_c$ . Упростить задачу можно, приняв физические допущения о квазистационарности процесса формирования покрытия в зоне орошения форсунки. Принимая  $\partial \psi(y, \tau) / \partial \tau \approx 0$ , получаем следующую систему уравнений относительно функции распределения частиц по относительной массе покрытия в псевдооживленном слое:

$$\partial f(y, \tau) / \partial \tau = k_c \psi(y, \tau) - k_c f(y, \tau), \quad (8)$$

$$\lambda \partial \psi(y, \tau) / \partial y = k_\phi f(y, \tau) - k_\phi \psi(y, \tau). \quad (9)$$

При численном решении интервал  $[0, 1]$  изменения величины  $y$  разбивается на  $n$  равных частей точками  $y_j = \Delta y \cdot i$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ . Производные в уравнениях (8), (9) заменяем конечными разностями. Конечно-разностные аналоги уравнений имеют вид:

$$(f_i^* - f_i) / \Delta \tau = k_c \psi_i - k_c f_i, \quad (10)$$

$$\lambda (\psi_i - \psi_{i-1}) / \Delta y = k_\phi \cdot (f_i - \psi_i), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (11)$$

где  $f_i^*$  – значение функции в момент времени  $\tau + \Delta \tau$ .

Отметим, что использование конечно-разностных аналогов подразумевает введение дискретной ступенчатой аппроксимации непрерывной кривой функции распределения. По физическому смыслу значение  $\psi_i \cdot \Delta y$  равно доле частиц, имеющих относительную массу покрытия в интервале от  $y_{i-1}$  до  $y_i$ . Условие нормирования функций распределения примет вид:

$$\sum_{i=1}^n \psi_i \cdot \Delta y = 1, \quad \sum_{i=1}^n f_{n,i} \cdot \Delta y = 1. \quad (12)$$

Таким образом, если загружаются непокрытые частицы, функция распределения будет определена следующим образом:

$$f_{n,1} = 1 / \Delta y, \quad f_{n,i} = 0 \quad \text{для } i = 2, 3, \dots, n. \quad (13)$$

Путем алгебраических преобразований уравнений (10), (11) получаем расчетные соотношения. На каждом временном шаге расчета вычисляем

$$\psi_i = [\psi_{i-1} + a \cdot f_i] / (1 + a), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad \psi_0 = 0, \quad (14)$$

где  $a = \Delta y \cdot k_\phi / \lambda$ , а затем определяем функцию распределения частиц по массам покрытия в зоне сушки:

$$f_i^* = f_i + k_c (\psi_i - f_i) \cdot \Delta \tau, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Значения интегральной функции распределения рассчитываем по формуле:

$$F_i = \sum_{k=1}^i f_k \cdot \Delta y, \quad i = 1, \dots, n. \quad (16)$$

Найденные значения  $f_i^*$  будут являться значениями функции  $f_i$  для последующего момента времени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычислительного эксперимента с использованием данной методики представлены ниже. Изменение во времени дифференциальной функции  $f(y)$  распределения частиц по относительной массе покрытия  $y$  показано на рис. 3.

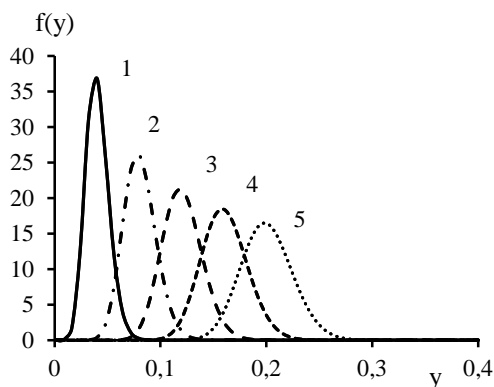


Рис. 3. Изменение во времени дифференциальной функции распределения частиц по относительной массе покрытия при  $k_c=0,05$ ,  $\lambda=0,016$ ,  $k_\phi=11,9$ . Время процесса, с: 1 – 600; 2 – 1200; 3 – 1800; 4 – 2400; 5 – 3000

Fig. 3. Evolution of differential function of particle distribution according to the relative mass of coverage with process time.  $k_c=0,05$ ,  $\lambda=0,016$ ,  $k_\phi=11,9$ . Time, s: 1 – 600; 2 – 1200; 3 – 1800; 4 – 2400; 5 – 3000

Из вида дифференциальных функций распределения частиц по относительной массе покрытия в различные моменты времени вида можно заключить, что неравномерность покрытия во времени процесса капсулирования увеличивается. Однако визуально большая ширина кривой распределения в данном случае не означает больший разброс величины массы покрытия относительно ее среднего значения, так как оно увеличивается во времени.

Количественно неравномерность распределения покрывающего вещества по капсулируемым частицам может быть охарактеризована величиной среднего относительного отклонения CV (coating variability), рассчитываемой по формуле [9]:

$$CV = \sigma/M, \tag{17}$$

где  $\sigma$  – стандартное отклонение;  $M$  – математическое ожидание (среднее значение относительной массы покрытия).

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 f_i \Delta y - \left(\sum_{i=1}^n y_i f_i \Delta y\right)^2}, \tag{18}$$

$$M = \sum_{i=1}^n y_i f_i \Delta y. \tag{19}$$

Зависимость величины среднего относительного отклонения CV от времени процесса, приведенная на рис. 4, иллюстрирует уменьшение неравномерности распределения массы пленкообразующего вещества между частицами в процессе капсулирования.

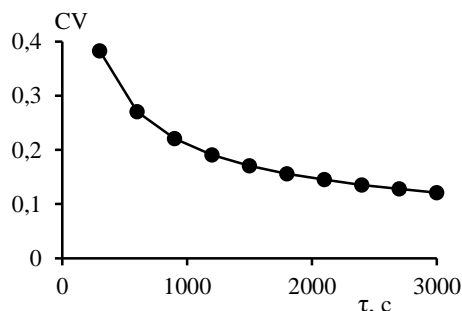


Рис. 4. Изменение неравномерности покрытия во времени процесса капсулирования

Fig. 4. Coating variability vs. time of coating process

На рис. 5 показаны дифференциальные функции плотности распределения частиц по относительной массе покрытия в конце процесса капсулирования при различных скоростях роста массы покрытия. Увеличение скорости роста массы покрытия  $\lambda$  ведет к увеличению неравномерности покрытия частиц, о чем свидетельствует более широкая кривая функции распределения. На практике к увеличению  $\lambda$ , а, следовательно, к уменьшению времени процесса капсулирования, приводит увеличение расхода раствора покрывающего вещества.

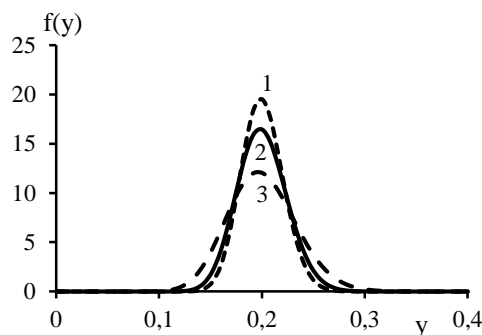


Рис. 5. Функции плотности распределения частиц по относительной массе покрытия при различных значениях  $\lambda$ : 1 –  $\lambda=0,011$ ; 2 –  $\lambda=0,016$ ; 3 –  $\lambda=0,032$ ;  $k_c=0,05$ ;  $k_\phi=11,9$ . Время процесса: 1 – 4500 с; 2 – 3000 с; 3 – 1500 с

Fig. 5. Differential function of particle distribution according to the relative mass of coverage at different  $\lambda$ : 1 –  $\lambda=0,011$ ; 2 –  $\lambda=0,016$ ; 3 –  $\lambda=0,032$ ;  $k_c=0,05$ ;  $k_\phi=11,9$ . Time: 1 – 4500 s; 2 – 3000 s; 3 – 1500 s

С увеличением продолжительности процесса капсулирования при неизменной конечной массе наносимого покрытия кривая распределения

становится более узкой, т.е. отклонение от среднего значения относительной массы покрытия меньше. При больших временах (формально стремящихся к бесконечности) кривая распределения примет вид вертикальной линии, т.е. все частицы будут иметь одинаковую массу покрытия.

На рис. 6 приведены дифференциальные функции плотности распределения частиц по относительной массе покрытия, рассчитанные при различных значениях коэффициента  $k_c$ . Уменьшение коэффициента  $k_c$  при неизменной массе обрабатываемых частиц  $M_c$  означает снижения расхода частиц  $G_\phi$  через зону орошения. Это приводит к уширению кривой распределения, т.е. увеличивается неравномерность распределения покрытия по обрабатываемым частицам.

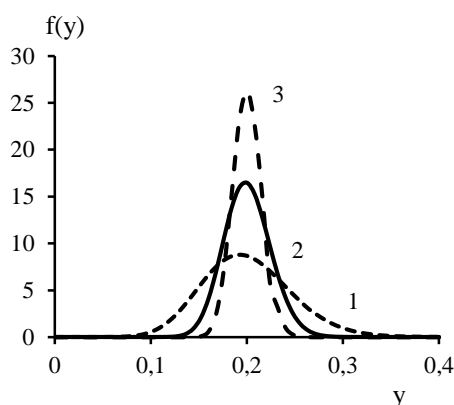


Рис. 6. Функции плотности распределения частиц по относительной массе покрытия при различных значениях  $k_c$ : 1 –  $k_c=0,013$ ; 2 –  $k_c=0,05$ ; 3 –  $k_c=0,15$ . Время процесса 3000 с,  $\lambda=0,016$

Fig. 6. Differential function of particle distribution according to the relative mass of coverage at different  $k_c$ : 1 –  $k_c=0.013$ ; 2 –  $k_c=0.05$ ; 3 –  $k_c=0.15$ . Time 3000 s,  $\lambda=0.016$

### ВЫВОДЫ

Разработана математическая модель процесса капсулирования дисперсных материалов путем распыливания пленкообразующего вещества на частицы псевдооживленного слоя, позволяющая прогнозировать функцию распределения частиц по массам покрытия. Для аппарата периодического действия предложен алгоритм численного расчета эволюции функции распределения во времени. Показано, что снижение коэффициента  $\lambda$  приводит к улучшению равномерности покрытия частиц. Это достигается уменьшением расхода раствора покрывающего вещества, распыляемого форсункой. Уменьшение расхода частиц  $G_\phi$  через зону орошения (уменьшение коэффициента  $k_c$ ) приводит к ухудшению равномерности покрытия частиц при фиксированном времени обработки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ (стипендия СП-1951.2021.1).

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.

This work was financially supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (scholarship SP-1951.2021.1).

The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

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

### ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Guignon B., Duquenoy A., Dumoulin E.D.** Fluid bed encapsulation of particles: principles and practice. *Dry. Technol.* 2002. V. 20. P. 419-447. DOI: 10.1081/DRT-120002550.
2. **Zuidam N.J., Nedovic V.A.** Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. New York: Springer Science. 2010. 392 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1008-0.
3. **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. наукоем. технол. Регионал. приложение.* 2017. № 3 (51). С. 86-91.
4. **Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A.** Encapsulation of granules in polymer shells as a method of creating controlled release fertilizers. *Sovr. Naukoem. Tekhnol. Regional. Prilozhenie.* 2017. N 3 (51). P. 86-91 (in Russian).
5. **Tolve R., Galgano F., Caruso M.C., Tchuenu-Magaia F.L., Condelli N., Favati F., Zhang Z.** Encapsulation of health-promoting ingredients: applications in foodstuffs. *Int. J. Food Sci. Nutr.* 2016. V. 67. P. 888-918. DOI: 10.1080/09637486.2016.1205552.
6. **Beig B., Niazi M.B.Kh, Jahan Z., Hussain A., Zia M.H., Mehran M.T.** Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review. *J. Plant Nutrition.* 2020. V. 43. N 10. P. 1510-1533. DOI: 10.1080/01904167.2020.1744647.
7. **Jarosiewicz A., Tomaszewska M.** Controlled-Release NPK Fertilizer Encapsulated by Polymeric Membranes. *J. Agric. Food Chem.* 2003. V. 51. N 2. P. 413-417. DOI: 10.1021/jf020800o.
8. **Ray S., Raychaudhuri U., Chakraborty R.** An overview of encapsulation of active compounds used in food products by drying technology. *Food Biosci.* 2016. V. 13. P. 76-83. DOI: 10.1016/j.fbio.2015.12.009.
9. **Šibanca R., Turkb M., Dreu R.** An analysis of the mini-tablet fluidized bed coating process. *Chem. Eng. Res. Des.* 2018. V. 134. P. 15-25. DOI: 10.1016/j.cherd.2018.03.020.

9. **Toschkoff G., Khinast J.G.** Mathematical modeling of the coating process. *Int. J. Pharm.* 2013. V. 457. P. 407–422. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2013.08.022.
10. **Sahni E., Chaudhuri B.** Experiments and numerical modeling to estimate the coating variability in a pan coater. *Int. J. Pharm.* 2011. V. 418. P. 286–296. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2011.05.041.
11. **Pei Ch., Elliott J.A.** Asymptotic limits on tablet coating variability based on cap-to-band thickness distributions: A discrete element model (DEM) study. *Chem. Eng. Sci.* 2017. V. 172. P. 286–296. DOI: 10.1016/j.ces.2017.06.029.
12. **Li L., Kemp I., Palmer M.** A DEM-based mechanistic model for scale-up of industrial tablet coating processes. *Powder Technol.* 2020. V. 364. P. 698–707. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.01.087.
13. **Dubey A., Hsia R., Saranteas K., Brone D., Misra T., Muzio F.J.** Effect of speed, loading and spray pattern on coating variability in a pan coater. *Chem. Eng. Sci.* 2011. V. 66. N 21. P. 5107–5115. DOI: 10.1016/j.ces.2011.07.010.
14. **Suzzi D., Toschkoff G., Radl S., Machold D., Fraser S.D., Glasser B.J., Khinast J.G.** DEM simulation of continuous tablet coating: Effects of tablet shape and fill level on inter-tablet coating variability. *Chem. Eng. Sci.* 2012. V. 69. P. 107–121. DOI: 10.1016/j.ces.2011.10.009.
15. **Xie C., You Y., Ma H., Zhao Y.** Mechanism of inter-tablet coating variability: Investigation about the motion behavior of ellipsoidal tablets in a pan coater. *Powder Technol.* 2021. V. 379. P. 345–361. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.10.088.
16. **Ban J., Kumar R., Agarwal S.** Scaling Inter-Tablet Coating Variability in a Horizontal Rotating Drum. *AIChE J.* 2017. V. 63. N 9. P. 3743–3755. DOI: 10.1002/aic.15758.
17. **Venkataramana R., Kapura P.C., Gupta S.S.** Modelling of granulation by a two-stage auto-layering mechanism in continuous industrial drums. *Chem. Eng. Sci.* 2002. V. 57. P. 1685–1693. DOI: 10.1016/S0009-2509(02)00070-2.
18. **Seo K-S., Bajracharya R., Lee S.H., Han H-K.** Pharmaceutical Application of Tablet Film Coating. *Pharmaceutics.* 2020. N 12(9). Art. 853. DOI:10.3390/pharmaceutics12090853.
19. **Ku Shaari K.Z., Pandey P., Song Y., Turton R.** Monte Carlo simulations to determine coating uniformity in a Wurster fluidized bed coating process. *Powder Technol.* 2006. V. 166. P. 81–90. DOI: 10.1016/j.powtec.2006.05.001.
20. **Rieck C., Bück A., Tsotsas E.** Stochastic Modelling of Particle Coating in Fluidized Beds. *Procedia Eng.* 2015. V. 102. P. 996–1005. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.222.
21. **Kieckhefen P., Lichtenegger T., Pietsch S., Pirker S., Heinrich S.** Simulation of spray coating in a spouted bed using recurrence CFD. *Particuology.* 2019. V. 42. P. 92–103. DOI: 10.1016/j.partic.2018.01.008.
22. **Norouzi H.R.** Simulation of pellet coating in Wurster coaters. *Int. J. Pharm.* 2020. N 590. P. 119931. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2020.119931.
23. **Hilton J.E., Ying D.Y., Cleary P.W.** Modelling spray coating using a combined CFD-DEM and spherical harmonic formulation. *Chem. Eng. Sci.* 2013. V. 99. P. 141–160. DOI: 10.1016/j.ces.2013.05.051.
24. **Jiang Zh., Rieck C., Bück A., Tsotsas E.** Modeling of inter- and intra-particle coating uniformity in a Wurster fluidized bed by a coupled CFD-DEM-Monte Carlo approach. *Chem. Eng. Sci.* 2020. V. 211. Art. 115289. DOI: 10.1016/j.ces.2019.115289.
25. **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.
26. **Липин А.А., Небукин В.О., Липин А.Г.** Моделирование процессов теплопереноса при капсулировании гранул в фонтанирующем слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 4–5. С. 98–104. DOI: 10.6060/tcct.20186104-05.5624.
- Липин А.А., Небукин В.О., Липин А.А.** 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.
- Липин А.А., Небукин В.О., Липин А.А.** Simulation of heat and mass transfer processes under granules capsulation in fluidized bed. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2018. V. 61. N 4–5. P. 98–104 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20186104-05.5624.

Поступила в редакцию 20.05.2021  
Принята к опубликованию 17.08.2021

Received 20.05.2021  
Accepted 17.08.2021