

Прогнозирование равномерности нанесения покрытия
при капсулировании в многосекционном аппарате
с псевдооживленным слоем

А. Г. Липин^{*}, А. А. Липин^{*,1}

^{} Ивановский государственный химико-технологический университет,
Иваново, Россия*

Аннотация

Путем капсулирования зернистых материалов можно устранять их слеживаемость, обеспечивать замедленное выделение активного вещества. При нанесении тонких полимерных оболочек очень важно определение режимных параметров процесса, обеспечивающих сплошность защитного покрытия. В данной работе качество проведения процесса капсулирования оценивалось по величине степени покрытия, которая равна доле общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой. В статье представлена математическая модель, позволяющая прогнозировать степень покрытия частиц в многосекционном аппарате кипящего слоя, работающем в непрерывном режиме. Рабочий объём каждой секции аппарата псевдооживленного слоя рассматривали как систему, состоящую из двух взаимодействующих зон: сушки и орошения. В зоне орошения фонтанки происходит формирование покрытия, в зоне сушки — отверждение плёнки и смешение вновь поступающих частиц. Предложен алгоритм численного решения системы уравнений математического описания, позволяющий рассчитать функцию распределения частиц по степени покрытия. Показано влияние числа секций в аппарате, расхода раствора пленкообразующего вещества, расхода обрабатываемого материала и скорости циркуляции частиц через зону орошения на равномерность нанесения покрытия. Установлено, что на выходе из четырехсекционного аппарата практически все капсулируемые частицы имеют степень покрытия 100 %.

Ключевые слова

Капсулирование, моделирование, псевдооживленный слой, степень покрытия, функция распределения частиц, равномерность покрытия.

Введение. Процесс нанесения пленочных покрытий на частицы зернистых материалов используется в различных отраслях промышленности и сельском хозяйстве для достижения ряда целей. В

фармацевтической промышленности лекарственные препараты покрываются материалами, которые растворяются в организме человека и высвобождают активный ингредиент с желаемой скоростью, а

¹ Для переписки:

Email: lipin.a@mail.ru

также скрывают запах или вкус. В химической промышленности частицы часто капсулируют, чтобы облегчить их дальнейшую обработку или повысить стабильность при хранении. В пищевой промышленности частицы защищают слоем покрытия, чтобы избежать поглощения или выделения воды и улучшить сыпучесть [1–4]. Для сельского хозяйства разработаны капсулированные минеральные удобрения, равномерно выделяющие питательные вещества в течение вегетационного периода растений, что позволяет существенно повысить коэффициент их использования [5–7]. Процессы нанесения покрытий могут проводиться с использованием различных типов оборудования в зависимости от требуемой производительности и особенностей взаимодействия пленкообразующих материалов и покрываемых частиц. Оборудование включает дисковые и барабанные грануляторы, а также грануляторы с псевдоожиженным слоем, причем последние находятся в центре внимания данной работы.

В грануляторах с псевдоожиженным слоем частицы псевдоожижаются вертикальным воздушным потоком, проходящим через газораспределительную решетку, расположенную в нижней части аппарата. Материал для нанесения покрытия, который может быть расплавом, суспензией, эмульсией или раствором, распыляется на псевдоожиженные частицы с помощью форсунок. Капли, столкнувшись с частицами слоя, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную плёнку, при этом растворитель постоянно испаряется. Оставшийся твердый компонент осаждается на поверхности частиц и образует оболочку, наблюдается увеличение размера частиц. Целью этого процесса является равномерное распределение капель на одной частице и на всей совокупности частиц, что имеет решающее значение для

достижения однородной толщины слоя покрытия.

Процесс нанесения покрытия в псевдоожиженном слое может осуществляться двумя различными способами, а именно в периодическом режиме или непрерывно. При периодическом нанесении покрытия все капсулируемые частицы первоначально загружаются в аппарат. Частицы обрабатываются в течение определенного периода времени, а затем одновременно выгружаются. В случае непрерывного процесса частицы постоянно подаются в псевдоожиженный слой и выводятся из него, при этом они имеют разное индивидуальное время пребывания в аппарате. Поэтому частицы, которые подаются одновременно, могут быть выгружены через разные промежутки времени. Выгрузка в разное время приводит к распределению по времени пребывания, что вызывает проблемы в достижении вышеупомянутой цели — получения однородной толщины слоя по совокупности частиц, поскольку частицы с более высоким индивидуальным временем пребывания имеют большую толщину слоя покрытия, чем другие частицы. Однако по экономическим причинам непрерывный процесс имеет преимущество в снижении трудоемкости и времени простоя по сравнению с периодическим процессом, поэтому он пользуется большим спросом в промышленности и является предметом данной работы.

Чтобы свести к минимуму неравномерность в распределении материала покрытия по капсулируемым частицам, необходимо сузить их распределение по времени пребывания. Для этого можно использовать горизонтальный псевдоожиженный слой, в котором частицы подаются с одной стороны камеры, подобной каналу, и транспортируются в псевдоожиженном состоянии по каналу до тех пор, пока они не будут выгружены с другой стороны.

В этом случае соотношение длины и ширины псевдоожиженного слоя является значительным. Другим способом повлиять на структуру потока частиц и, следовательно, на разброс по времени пребывания является установка вертикальных перегородок в аппарате (рисунок 1).

Для описания процесса капсулирования используют как феноменологические, так и эмпирические математические модели [3]. Эмпирические модели [8] могут включать до 15 параметров, при этом аппарат рассматривается как «черный ящик». Среди феноменологических моделей можно выделить модели, прогнозирующие возникновение явления агломерации, распределения частиц по массам нанесенного покрытия или размерам частиц, рассматривающие закономерности движения частиц в аппарате, сушки защитного покрытия.

В математических моделях процесса капсулирования часто используются уравнения популяционного баланса [9–12], представляющие собой дифференциальные уравнения в частных производных, которые учитывают изменение функции плотности распределения числа частиц за счет различных механизмов и межфазных взаимодействий. Для решения таких

уравнений применяют численные методы, стохастические методы, метод моментов.

При моделировании процесса капсулирования в псевдоожиженном слое обычно используют двухзонную модель, когда в объеме аппарата выделяют две зоны: зону орошения и зону сушки. При этом уравнения баланса частиц записывают отдельно для каждой зоны [10, 12].

Актуальной задачей является создание математического описания процесса капсулирования, дающего возможность прогнозировать равномерность нанесения пленкообразующего вещества. Обычно для характеристики равномерности используют распределение частиц по массам покрытия или размерам частиц. В случае нанесения тонких оболочек эти характеристики малоинформативны. В данной работе в качестве количественной характеристики равномерности используется величина степени покрытия, под которой понимают долю общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой. Разработано математическое описание процесса капсулирования в аппарате псевдоожиженного слоя непрерывного действия, позволяющее рассчитывать функцию распределения частиц по степени покрытия.

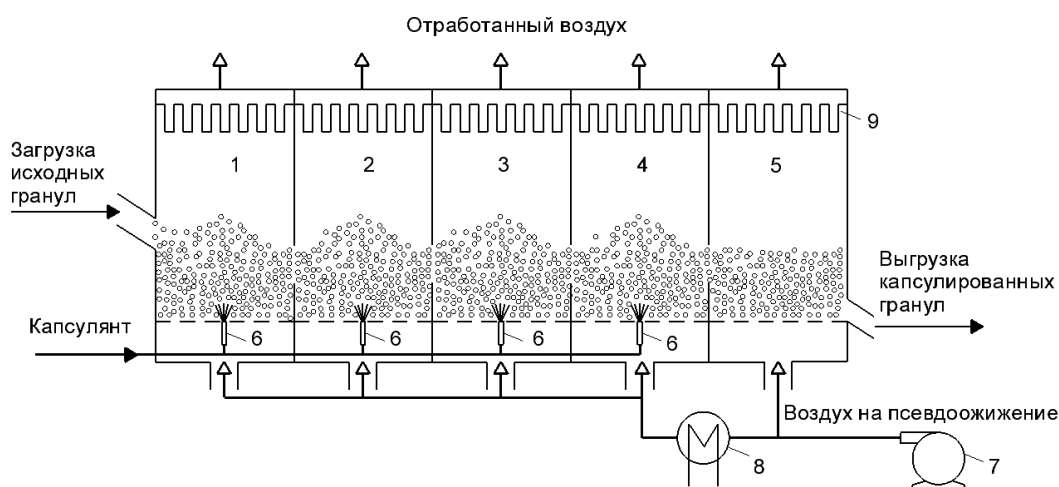


Рисунок 1 — Схема многосекционного аппарата для капсулирования в псевдоожиженном слое:

1–4 — секции капсулирования; 5 — секция охлаждения; 6 — пневматические форсунки;
7 — воздуходувка; 8 — электронагреватель; 9 — рукавный фильтр

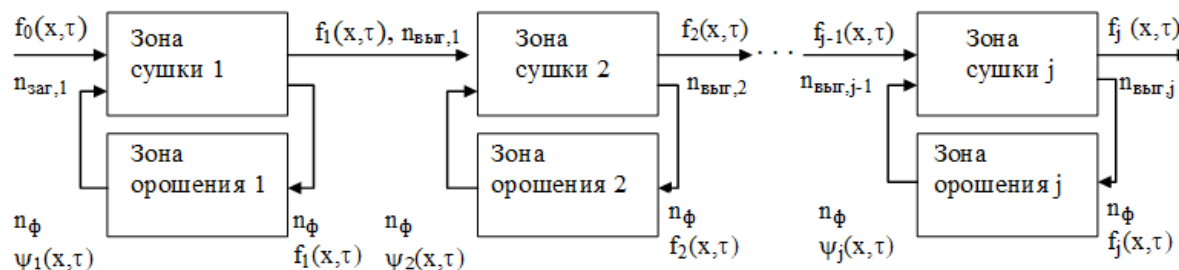


Рисунок 2 — Схема потоков

Математическая модель процесса капсулирования в многосекционном аппарате с псевдоожиженным слоем

При разработке математической модели рабочий объём каждой секции аппарата псевдоожиженного слоя рассматривали как систему, состоящую из двух взаимодействующих зон: сушки и орошения (рисунок 2). В зоне орошения форсунки происходит формирование покрытия, в зоне сушки отверждение плёнки и смешение вновь поступающих частиц.

Для каждой секции аппарата запишем уравнения баланса для изменения числа частиц в системе.

Уравнение (1) представляет собой баланс частиц со степенью покрытия x в

произвольный момент времени τ в зоне сушки, уравнение (2) — баланс числа частиц для зоны орошения. В этих уравнениях $f_j(x, \tau)$ и $\psi_j(x, \tau)$ — функции плотности распределения частиц по степени покрытия в зонах сушки и орошения; N_c , N_ϕ — число частиц в зонах сушки и орошения; $\lambda(x)$ — скорость изменения степени покрытия; $n_{заг,j}$, $n_{выг,j}$ — количество загружаемых и выгружаемых частиц из j -й секции аппарата в единицу времени; $n_{\phi,j}$ — количество частиц, циркулирующее через зону орошения в единицу времени; $f_0(x)$ — функция плотности распределения по степени покрытия загружаемых в аппарат частиц; j — номер секции; K — число секций в аппарате.

$$N_c \partial f_j(x, \tau) / \partial \tau = n_{заг,j} f_{j-1}(x, \tau) + n_\phi \psi_j(x, \tau) - n_\phi f_j(x, \tau) - n_{выг,j} f_j(x, \tau), \quad (1)$$

$$N_\phi \partial \psi_j(x, \tau) / \partial \tau + N_\phi \partial [\lambda(x) \cdot \psi_j(x, \tau)] / \partial x = n_\phi f_j(x, \tau) - n_\phi \psi_j(x, \tau) \quad (2)$$

$$n_{заг,j} = n_{выг,j-1}, \text{ при } j=2, 3...K. \quad (3)$$

Запишем уравнения (1), (2) в виде:

$$\partial f_j(x, \tau) / \partial \tau = k_{заг} f_{j-1}(x, \tau) + k_c \psi_j(x, \tau) - k_c f_j(x, \tau) - k_{выг} f_j(x, \tau), \quad (4)$$

$$\partial \psi_j(x, \tau) / \partial \tau + \partial [\lambda(x) \psi_j(x, \tau)] / \partial x = k_\phi f_j(x, \tau) - k_\phi \psi_j(x, \tau), \quad (5)$$

где $k_{заг}$, k_c , k_ϕ , $k_{выг}$ — относительные расходы частиц при загрузке, через зону сушки, через зону орошения форсунки, при выгрузке.

$$k_{заг} = n_{заг} / N_c, \quad k_c = n_\phi / N_c, \quad k_\phi = n_\phi / N_\phi, \quad k_{выг} = n_{выг} / N_c. \quad (6)$$

Принимая допущение о монодисперсности частиц слоя, можно записать:

$$k_{заг} = G_{заг} / M_{сл}, \quad k_c = G_\phi / M_{сл}, \quad k_\phi = G_\phi / M_\phi, \quad k_{выг} = G_{в} / M_{сл}, \quad (7)$$

где G_ϕ , $G_{заг}$, $G_{в}$ — расходы частиц через зону орошения, при загрузке и выгрузке; $M_{сл}$, M_ϕ — масса частиц в зоне сушки и в зоне орошения.

Формулы для расчета величин M_ϕ и G_ϕ приведены в работе [14].

Скорость роста степени покрытия пропорциональна доле поверхности гранул, свободной от покрытия $(1-x)$:

$$\lambda(x) = k_\lambda(1-x), \quad (8)$$

где k_λ — константа скорости роста степени покрытия, зависящая от режима работы форсунки и свойств пленкообразующего вещества.

В стационарном режиме

$$\partial f_j(x, \tau) / \partial \tau = 0 \text{ и } \partial \psi_j(x, \tau) / \partial \tau = 0,$$

$$k_{\text{выг}} = k_{\text{заг}}.$$

Подставим в (5) выражение (8), получим следующую систему уравнений:

$$f_j(x) = \frac{[k_{\text{заг}} \cdot f_{j-1}(x) + k_c \cdot \psi_j(x)]}{(k_c + k_{\text{заг}})}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{k_\lambda d [(1-x) \cdot \psi_j(x)]}{dx} = \\ = k_\phi f_j(x) - k_\phi \psi_j(x) \end{aligned} \quad (10)$$

$j=1, 2 \dots K.$

Для многосекционного аппарата кипящего слоя функцию распределения частиц по степени покрытия целесообразно находить, решая уравнения (9), (10) численным методом, последовательно для каждой секции. Путем алгебраических преобразований получаем уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} [(1-x) \cdot \psi_j(x)] = \\ = \frac{k_\phi \cdot k_{\text{заг}}}{k_\lambda \cdot (k_c + k_{\text{заг}})} \cdot f_{j-1}(x) - \\ - \frac{k_\phi \cdot k_{\text{заг}}}{k_\lambda \cdot (k_c + k_{\text{заг}})} \cdot \psi_j(x) \end{aligned} \quad (11)$$

Численный метод решения уравнений модели. Для решения системы уравнений математического описания численным методом интервал $[0, 1]$ изменения x разбивается на n равных частей точками $x_i = \Delta x \cdot i$, $i=0, 1, \dots, n$. Применение метода конечных разностей к уравнению (11) приводит к следующим расчетным формулам для функции распределения частиц по

степени покрытия в зоне орошения форсунки ψ_i (12).

$$\psi_{j,i} = \frac{[(1-x_{i-1})\psi_{j,i-1} + b \cdot \Delta x \cdot f_{j-1,i}]}{(1-x_i + b \cdot \Delta x)}, \quad (12)$$

$i = 1, 2, \dots, n; \quad \psi_{j,0} = 0$

где $b = k_\phi k_{\text{выг}} / [k_\lambda (k_c + k_{\text{выг}})]$.

В первую секцию поступают непокрытые частицы, функция распределения загружаемых частиц будет определена следующим образом:

$$f_{0,1} = 1/\Delta x, \quad f_{0,i} = 0 \quad (13)$$

для $i = 2, 3, \dots, n$.

Далее в соответствии с формулой (9) определяем функцию распределения частиц по степени покрытия в зоне сушки:

$$f_{j,i} = (k_{\text{заг}} f_{j,i} + k_c \psi_{j,i}) / (k_c + k_{\text{заг}}), \quad (14)$$

$i = 1, \dots, n$.

Значения интегральной функции распределения рассчитываем по формуле:

$$F_{j,i} = \sum_{k=1}^i f_{j,k} \cdot \Delta x, \quad (15)$$

$i = 1, \dots, n$.

При расчете многосекционного аппарата найденные значения f_i будут являться значениями функции загрузки для последующей секции $f_{0,i} = f_i$.

Результаты. На рисунке 3 представлены графики функций $F(x)$, рассчитанные по изложенной методике, при разном количестве секций в аппарате.

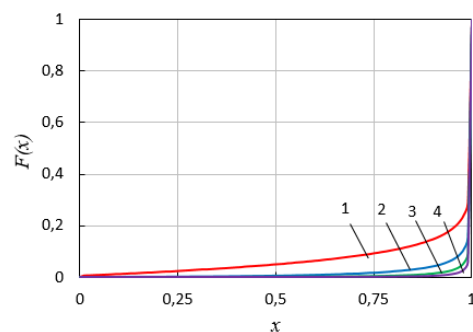


Рисунок 3 — Интегральная функция распределения частиц по степени покрытия на выходе из многосекционного аппарата кипящего слоя. Номер кривой соответствует количеству секций в аппарате. $k_{\text{заг}}=0,00083$, $k_c=0,066$, $k_\phi=15,9$

Графики этого рисунка иллюстрируют существенное улучшение равномерности покрытия при увеличении числа секций в аппарате. При заданных параметрах процесса капсулирования практически все частицы на выходе из четвертой секции имеют степень покрытия 100 %.

На рисунке 4 приведены интегральные кривые распределения частиц по степени покрытия, рассчитанные при различных значениях коэффициента k_c . Уменьшение коэффициента k_c при неизменной массе обрабатываемых частиц M_{cl} означает снижения расхода частиц G_ϕ через зону орошения. Таким образом, уменьшение интенсивности циркуляции частиц через зону орошения приводит к снижению равномерности покрытия частиц.

На рисунке 5 изображены функции распределения по степени покрытия, рассчитанные при различных значениях коэффициента k_λ .

Как и следовало ожидать, увеличение скорости роста степени покрытия улучшает равномерность распределения пленкообразующего вещества по поверхности частиц. На практике к увеличению k_λ приводит увеличение расхода покрывающего вещества, снижение диаметра капель, производимых форсункой.

Кривые на рисунке 6 иллюстрируют влияние соотношения расхода обрабатываемых частиц и массы частиц в зоне сушки $k_{zag} = G_{zag}/M_{cl}$. С увеличением этой величины возрастает доля частиц со степенью покрытия $x < 1$. Поскольку обратная величина $1/k_{zag}$ равна среднему времени пребывания частиц в зоне сушки, можно сказать, что увеличение времени пребывания способствует увеличению равномерности покрытия частиц.

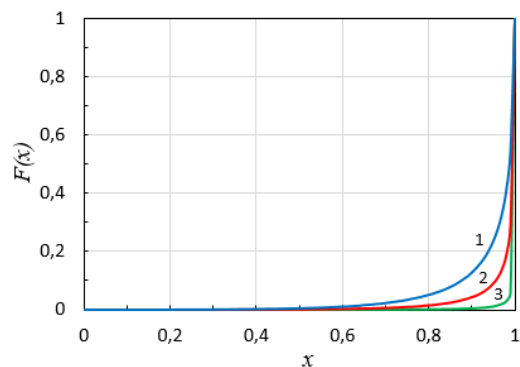


Рисунок 4 — Интегральные функции распределения частиц по степени покрытия на выходе из четырехсекционного аппарата при различных значениях k_c :
1 — 0,022; 2 — 0,033; 3 — 0,066.
 $k_{zag}=0,00083$, $k_\lambda=3,1$, $k_\phi=15,9$

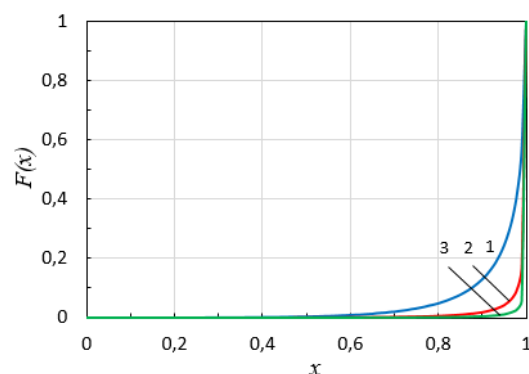


Рисунок 5 — Интегральные функции распределения частиц по степени покрытия на выходе из четырехсекционного аппарата при различных значениях k_λ :
1 — 1,0; 2 — 2,0; 3 — 3,1.
 $k_{zag}=0,00083$, $k_c=0,066$, $k_\phi=15,9$

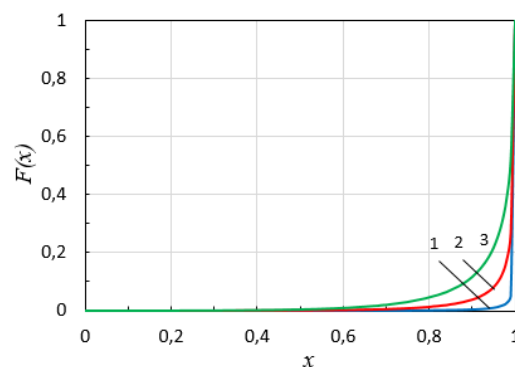


Рисунок 6 — Интегральные функции распределения частиц по степени покрытия на выходе из четырехсекционного аппарата при различных значениях k_{zag} :
1 — 0,0008; 2 — 0,0016; 3 — 0,0024.
 $k_\lambda=3,1$, $k_c=0,066$, $k_\phi=15,9$

Закключение

В качестве количественного критерия равномерности нанесения пленки в процессе капсулирования предложено использовать величину степени покрытия, под которой понимают долю покрытой поверхности гранул. Разработана математическая модель процесса капсулирования дисперсных материалов путем распыливания пленкообразующего вещества на частицы псевдооживленного слоя, позволяющая прогнозировать функцию распределения частиц по степени покрытия. Для многосекционного аппарата предложен алгоритм численного расчета функции распределения. Показано, что увеличение коэффициента k_d приводит к улучшению равномерности покрытия частиц. Это достигается увеличением расхода раствора покрывающего вещества, снижением диаметра капель, производимых форсункой. Уменьшение расхода частиц G_{ϕ} через зону орошения (уменьшение коэффициента k_c) приводит к ухудшению равномерности покрытия частиц при фиксированном времени обработки. При принятых параметрах процесса капсулирования практически все частицы на выходе из четырехсекционного аппарата имеют степень покрытия 100 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Guignon B., Duquenoy A., Dumoulin E. D. Fluid bed encapsulation of particles: principles and practice. *Dry. Technol.*, 2002, vol. 20, pp. 419-447.
- [2]. Zuidam N. J., Nedovic V. A. Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. New York, Springer Science, 2010.
- [3]. Tolve R., Galgano F., Caruso M.C., et al. Encapsulation of health-promoting ingredients: applications in foodstuffs. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 2016, vol. 67, pp. 888-918.
DOI: 10.1080/09637486.2016.1205552.
- [4]. Gibbs B.F., Kermasha S., Ali I. Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences Nutrition*, 1999, vol. 50, pp. 213-224.
- [5]. 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. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*, 2017, № 3 (51), С. 86-91.
- [6]. Beig B., Niazi M. B. Kh, Jahan Z., et al. Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, vol. 43, N 10, pp. 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. vol. 51, N 2, pp. 413-417.
DOI: 10.1021/jf020800o.
- [8]. Nguyen T. H., Tran A. M. N., Tran N., Trinh D. V. Modelling of the Spray Coating Process with Biodegradable Polymer Solution for Production of Controlled-Release Fertiliser. *Chemical Engineering Transactions*, 2020, vol. 78, pp. 91-96.
DOI: 10.3303/CET2078016.
- [9]. Dürr R., Bück A. Approximate Moment Methods for Population Balance Equations in Particulate and Bioengineering Processes. *Processes*, 2020, vol. 8, article 414.
doi:10.3390/pr8040414.
- [10]. Bachmann P., Chen K., Bück A., Tsotsas E. Prediction of particle size and layer-thickness distributions in a continuous horizontal fluidized-bed coating process.

Particuology, 2020, vol. 50, pp. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.06.005>.

[11].Nemati H., Shekoohi S. A. Particle number balance approach for simulation of a multi-chamber fluidized bed urea granulator; Modeling and validation. *Powder Technology*, 2020, vol. 369, pp. 96–105.

[12].Hampel N., Bück A., Peglow M., Tso-tsas E. Continuous Pellet Coating in a

Wurster Fluidized Bed Process. *Chem. Eng. Sci.*, 2013, vol. 86, pp. 87–98.

DOI: 10.1016/j.ces.2012.05.034.

[13].Липин А. А., Небукин В. О., Липин А. Г. Моделирование процессов тепло-массопереноса при капсулировании гранул в фонтанирующем слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*, 2018, т. 61, N 4-5. с. 98–104.

DOI: 10.6060/tcct.20186104-05.5624.

Липин Александр Геннадьевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет (Российская Федерация, 153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, д. 7).

Липин Андрей Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-технологический университет (Российская Федерация, 153000, г. Иваново, Шереметевский проспект, д. 7).

Prediction of coating uniformity during fluidized bed coating in a multistage apparatus

A. G. Lipin^{*}, A. A. Lipin^{*,1}

^{*} *Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Ivanovo, Russia*

Abstract

Coating of particulate materials prevents them from caking and provides a delayed release of the active substance. When thin polymer shells are applied, it is very important to determine the process parameters that ensure the coating uniformity. In this work the quality of the coating process was evaluated by the degree of coverage, which is equal to the fraction of the total surface area of the particles coated by the protective shell. The paper presents a mathematical model, which allows to predict the degree of coverage of particles in a multistage fluidized bed apparatus operated in the continuous mode. The process chamber of each stage was virtually divided into two compartments: drying zone and spraying zone. In the spraying zone the coating is formed, in the drying zone the film solidification and mixing of newly incoming particles takes place. An algorithm for the numerical solution of model equations for multistage apparatus was developed. The algorithm allows to calculate the particle distribution function by degree of coverage. Influence of the number of stages in the unit, flow rate of film-forming agent solution, flow rate of treated material and circulation speed of particles through the spraying zone on coating uniformity was shown. It was found that at the outlet of the four-stage apparatus practically all encapsulated particles have 100% degree of coverage.

Keywords

Coating, coating coverage, coating uniformity, fluidized bed, mathematical modeling, particle distribution function.

REFERENCES

- [1]. Guignon B., Duquenoy A., Dumoulin E. D. Fluid bed encapsulation of particles: principles and practice. *Dry. Technol.*, 2002, vol. 20, pp. 419–447.
- [2]. Zuidam N. J., Nedovic V. A. Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. New York, Springer Science, 2010.
- [3]. Tolve R., Galgano F., Caruso M. C., et al. Encapsulation of health-promoting ingredients: applications in foodstuffs. *Int. J. Food Sci. Nutr.*, 2016, vol. 67, pp. 888–918. DOI: 10.1080/09637486.2016.1205552.
- [4]. Gibbs B.F., Kermasha S., Ali I. Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences Nutrition*, 1999, vol. 50, pp. 213–224.

¹ *Corresponding author:*
Email: lipin.a@mail.ru

- [5]. Lipin A. G., Nebukin V. O., Lipin A. A. Kapsulirovanie granul v polimernye obolochki kak metod sozdaniya mineral'nyh udobrenij s reguliruemoj skorost'ju vysvobozhdeniya pitatel'nyh veshhestv [Encapsulation of granules into polymer shells as a method of creating controlled release fertilizers]. *Sovremennye naukoemkie tehnologii. Regional'noe prilozhenie* [Modern knowledge-based technologies. Regional application], 2017, N 3 (51), pp. 86–91. (In Russ.)
- [6]. Beig B., Niazi M.B.Kh, Jahan Z., et al. Coating materials for slow release of nitrogen from urea fertilizer: a review. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, vol. 43, N 10, pp. 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. vol. 51, N 2, pp. 413–417.
DOI: 10.1021/jf020800o.
- [8]. Nguyen T. H., Tran A. M. N., Tran N., Trinh D. V. Modelling of the Spray Coating Process with Biodegradable Polymer Solution for Production of Controlled-Release Fertiliser, *Chemical Engineering Transactions*, 2020, vol. 78, pp. 91–96.
DOI: 10.3303/CET2078016.
- [9]. Dürr R., Bück A. Approximate Moment Methods for Population Balance Equations in Particulate and Bioengineering Processes. *Processes*, 2020, vol. 8, article 414.
DOI: 10.3390/pr8040414.
- [10]. Bachmann P., Chen K., Bück A., Tsotsas E. Prediction of particle size and layer-thickness distributions in a continuous horizontal fluidized-bed coating process. *Particuology*, 2020, vol. 50, pp. 1–12.
DOI: 10.1016/j.partic.2019.06.005.
- [11]. Nemati H., Shekoohi S.A. Particle number balance approach for simulation of a multi-chamber fluidized bed urea granulator; Modeling and validation. *Powder Technology*, 2020, vol. 369, pp. 96–105.
- [12]. Hampel N., Bück A., Peglow M., Tsotsas E. Continuous Pellet Coating in a Wurster Fluidized Bed Process. *Chem. Eng. Sci.*, 2013, vol. 86, pp. 87–98.
DOI: 10.1016/j.ces.2012.05.034.
- [13]. Lipin A.A., Nebukin V.O., Lipin A. G. Modelirovanie processov tepломассопереноса при капсулировании гранул в фонтанирующемся слое [Simulation of heat and mass transfer processes under granules capsulation in fluidized bed]. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2018, vol. 61, N 4-5. pp. 98–104. (In Russ.)

Lipin A. G. — Dr. Sc. (Eng.), Head of the Department of Processes and Devices of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Sheremetevskiy av., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation).

Lipin A. A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Processes and Devices of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and Technology (Sheremetevskiy av., 7, Ivanovo, 153000, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Прогнозирование равномерности нанесения покрытия
при капсулировании в многосекционном аппарате с псевдооживленным слоем /
А. Г. Липин, А. А. Липин // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2 № 1.
С. 39 – 49.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-39-49

Please cite this article as:

Lipin A. G., Lipin A. A. Prediction of coating uniformity during fluidized bed coating in a multistage apparatus. Industrial processes and Technologies, 2022, vol. 2, no. 1, pp. 39 – 49.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-39-49