

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ КАПСУЛИРОВАНИИ ГРАНУЛ В ФОНТАНИРУЮЩЕМ СЛОЕ

А.А. Липин, В.О. Небукин, А.Г. Липин

Андрей Александрович Липин *, Владимир Олегович Небукин, Александр Геннадьевич Липин

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

E-mail: lipin.a@mail.ru *, vlaneb93@gmail.com, 157lipin@mail.ru

Капсулирование гранул в полимерные оболочки проводится с целью изолирования поверхности частиц от негативного воздействия факторов окружающей среды и регулирования скорости выделения активного компонента. В данной работе капсулирование осуществляется путем распыливания водной дисперсии полимера на частицы псевдооживленного слоя с помощью пневматических форсунок. Капли капсулянта, столкнувшись с частицами слоя, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную плёнку. Удаление растворителя путем сушки приводит к отверждению плёнки. Существующие методы расчета процесса капсулирования в аппаратах с псевдооживленным слоем частиц не учитывают влияния закономерностей формирования капсулы на протекание тепло-массообменного процесса удаления растворителя из пленки капсулообразующего вещества. Совместное рассмотрение этих процессов позволяет более достоверно прогнозировать требуемое время пребывания капсулируемого материала в аппарате. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать изменение степени покрытия, влагосодержания капсулируемых частиц, изменения их температуры во времени и требуемое время пребывания в аппарате. Для проверки адекватности разработанной математической модели выполнен физический эксперимент на установке лабораторного масштаба. В ходе эксперимента измерялась температура в псевдооживленном слое частиц и температура воздуха в сепарационном пространстве над слоем. Измерения проводились во времени процесса прогрева как орошаемого, так и не орошаемого псевдооживленного слоя частиц. Экспериментально подтверждено, что температура слоя частиц напрямую зависит от соотношения интенсивностей подвода теплоты конвекцией от псевдооживляющего агента и отвода теплоты с испаренной влагой. Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных данных, показавшее их хорошее соответствие. Таким образом, показано, что учёт изменения поверхности испарения из-за увеличения степени покрытия частиц в процессе капсулирования позволяет более достоверно прогнозировать изменение параметров частиц и выбирать рациональные параметры процесса.

Ключевые слова: моделирование, капсулирование, тепло- и массоперенос, степень покрытия, псевдооживленный слой

SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES UNDER GRANULES CAPSULATION IN FLUIDIZED BED

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

Andrey A. Lipin *, Vladimir O. Nebukin, Aleksandr G. Lipin

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

E-mail: lipin.a@mail.ru *, vlaneb93@gmail.com, 157lipin@mail.ru

The paper studies capsulation of solid particles in a spout fluidized bed. A capsulation is used to protect the particles surface from the negative impact of environmental factors as well as to regulate of active component release rate. In this work, the capsulation is carried out by spraying of polymers dispersions on fluidized bed particles by means of pneumatic nozzles. Drops of polymer dispersion having faced with the particles are spread on their surface, forming a liquid film. Solvent removing by drying causes solidification of the film. Existing calculation methods of capsulation in the apparatuses with fluidized bed have a significant disadvantage. They do not consider the impact of capsule formation on the heat and mass transfer process of the solvent removing from the coating film. Combined modeling these processes allows more accurately predicting the required residence time of the capsulated material in the apparatus. The mathematical model, which allows predicting the change in coverage degree, the moisture content, the temperature of the particles in process time as well as required residence time in the apparatus, was developed. The comparison of the calculated and experimental data shows their good agreement. Taking into account the changes in evaporation surface due to the increasing of particles coverage degree in the capsulation process allows to describe the evolution of the particles parameters more adequately and to select of the process rational parameters.

Key words: modeling, capsulation, heat and mass transfer, coverage degree, fluidized bed

Для цитирования:

Липин А.А., Небукин В.О., Липин А.Г. Моделирование процессов тепломассопереноса при капсулировании гранул в фонтанирующем слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2018. Т. 61. Вып. 4-5. С. 98–104

For citation:

Lipin A.A., Nebukin V.O., Lipin A.G. Simulation of heat and mass transfer processes under granules capsulation in fluidized bed. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2018. V. 61. N 4-5. P. 98–104

ВВЕДЕНИЕ

Заключение различных дисперсных материалов в оболочки защищает их от воздействия окружающей среды, обеспечивает замедленное высвобождение активного вещества, удлиняет сроки хранения неустойчивых и быстропортящихся веществ [1]. Капсулирование широко используют для получения минеральных и органических удобрений пролонгированного действия [2-5]. Для удобрения почвы используют также биокапсулированные микробные модификаторы [6].

В качестве материала оболочек используют полимеры [7-10], некоторые природные материалы, например, лигнин, хитозан, глину [11].

Существует ряд возможных методов процесса капсулирования, например, проведение поликонденсации и полимеризации на поверхности

частиц, распылительная сушка, напыление, пресование, экструзия, и т.д. [1, 10, 12-14].

В данной работе процесс капсулирования гранулированных минеральных удобрений в полимерные оболочки проводился в аппарате с псевдооживленным слоем гранул. Нанесение защитной оболочки осуществляется путем распыливания на частицы кипящего слоя дисперсии стиролакрилового полимера в количестве 10-30% от массы гранул. Капли капсулянта, столкнувшись с гранулами, растекаются по их поверхности, образуя жидкостную пленку. Удаление растворителя путем сушки приводит к отверждению пленки.

Процесс проводился в режиме фонтанирующего слоя, обеспечивающего интенсивную циркуляцию частиц. Таким образом, создаются усло-

вия для многократного прохождения каждой частицы через зону орошения форсунки, что способствует равномерному распределению пленкообразующего вещества по поверхности обрабатываемых гранул.

Исследованию процесса капсулирования гранулированных материалов в аппарате с псевдооживленным слоем посвящен ряд работ [15-17]. В работе [15] получена зависимость для определения комбинированного коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности частицы во время капсулирования в зависимости от высоты слоя. Авторы работы [16] предложили математическую модель кинетики капсулирования гранул минеральных удобрений, учитывающую изменение плотности распределения гранул по размерам на каждой ступени, в полочном многоступенчатом аппарате. В работе приведена оценка эффективности формирования капсул в процессе осаждения частиц мономера на центры конденсации. Получены рекомендации по увеличению этой эффективности [17].

Однако существующие методы расчета процесса капсулирования в аппаратах с псевдооживленным слоем частиц не учитывают влияние закономерностей формирования капсулы на протекание тепло-массообменного процесса удаления растворителя из пленки капсулообразующего вещества. Совместное рассмотрение этих процессов позволило бы более достоверно прогнозировать требуемое время пребывания капсулируемого материала в аппарате. Поэтому разработка математической модели, которая позволяет определять режимно-технологические параметры процесса капсулирования, обеспечивающие полное покрытие поверхности частиц защитной оболочкой и удаление влаги из пленки капсулянта, является актуальной задачей.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

При попадании капель эмульсии на поверхность частиц масса последних увеличивается. В то же время, за счет испарения дисперсионной жидкости (воды) происходит уменьшение массы. Поскольку испарение влаги идет из тонкой пленки, принимаем допущение, что процесс массообмена лимитирован внешней диффузией.

Запишем уравнение материального баланса по влаге, содержащейся в пленке.

$$\frac{dm_{\text{вл}}}{d\tau} = G_{\text{эм}}(1-B) - \beta_p(P_{\text{п}} - P_{\text{г}})F, \quad (1)$$

где β_p – коэффициент массоотдачи, $P_{\text{п}}$, $P_{\text{г}}$ – парциальные давления паров воды над поверхностью

пленки и в сушильном агенте, F – поверхность испарения, $G_{\text{эм}}$ – расход эмульсии, B – массовая доля полимера в эмульсии, τ – время.

Традиционно при моделировании сушки дисперсных материалов поверхность испарения принимается равной площади поверхности частиц. При капсулировании частиц площадь поверхности испарения непрерывно меняется во времени (периодический процесс).

$$F = F_{\text{гр}} X = \pi d_{\text{ср}}^2 N_{\text{сл}} X, \quad (2)$$

где $F_{\text{гр}}$ – площадь поверхности гранул; $d_{\text{ср}}$, $N_{\text{сл}}$ – средний диаметр и число частиц в псевдооживленном слое, X – средняя степень покрытия, под которой понимают долю общей поверхности частиц, покрытой защитной пленкой.

Влагосодержание пленки в текущий момент времени находим по формуле:

$$U = m_{\text{вл}}/m_{\text{п}}, \quad (3)$$

Масса полимера на гранулах к моменту времени τ равна:

$$m_{\text{п}} = G_{\text{эм}} B \tau. \quad (4)$$

Давление паров воды над поверхностью пленки зависит от температуры материала, поэтому математическое описание дополняем уравнением теплового баланса, записанным в дифференциальной форме

$$dQ/d\tau = q_1 - q_2, \quad (5)$$

где Q – теплосодержание капсулируемых гранул, q_1 – тепловой поток от сушильного агента к поверхности гранул, q_2 – тепловой поток, отводимый за счет испарения влаги из пленки. В развернутой форме:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha(t_{\text{г}} - t)F_{\text{гр}} - \beta_p(P_{\text{п}} - P_{\text{г}})F \cdot r^*, \quad (6)$$

где $F_{\text{гр}}$ – поверхность гранул, t – температура частиц, $t_{\text{г}}$ – температура газа, r^* – теплота парообразования воды, α – коэффициент теплоотдачи.

Начальные условия для уравнений (1) и (6): $\tau = 0$, $m_{\text{вл}} = 0$, $Q = m_{\text{гр}}c_{\text{гр}}t_{\text{н}}$.

Рассматривая теплосодержание гранулы с формирующейся защитной пленкой как сумму теплосодержаний гранулы, полимера и влаги, содержащейся в пленке, находим температуру частиц в текущий момент времени τ :

$$t = Q/(m_{\text{гр}}c_{\text{гр}} + m_{\text{п}}c_{\text{п}} + m_{\text{вл}}c_{\text{вл}}), \quad (7)$$

где $m_{\text{гр}}$ – масса обрабатываемых гранул; $c_{\text{гр}}$, $c_{\text{п}}$, $c_{\text{вл}}$ – теплоемкости гранул, полимера и воды.

Вследствие теплообмена с гранулами температура сушильного агента (воздуха) снижается. Частицы в псевдооживленном состоянии интенсивно перемещаются по объему аппарата. Будем

считать, что гранулы контактируют с газом некоторой средней температуры:

$$t_r = 0,5(t_{гн} + t_{гк}), \quad (8)$$

где $t_{гн}$ и $t_{гк}$ – температуры сушильного агента при входе и выходе из аппарата.

Температуру воздуха на выходе из аппарата находим из уравнения теплового баланса:

$$t_{гк} = t_{гн} - \alpha(t_r - t)F_{гр} / (G_r c_r), \quad (9)$$

где G_r – расход воздуха; c_r – теплоемкость воздуха.

Сушильный агент не только отдает часть своей теплоты материалу, но и отводит из аппарата испарившуюся из полимерной пленки влагу. При этом влагосодержание воздуха увеличивается.

Из уравнения материального баланса по испаренной влаге находим влагосодержание воздуха, выходящего из аппарата:

$$x_{гк} = \beta_p(P_n - P_r)X \cdot F_{гр} / G_r + x_{гн}, \quad (10)$$

где $x_{гн}$, $x_{гк}$ – начальное и конечное влагосодержание воздуха.

Среднее влагосодержание воздуха в аппарате в первом приближении оценим как среднеарифметическое:

$$x_r = 0,5(x_{гк} + x_{гн}), \quad (11)$$

Данное значение используется при расчете парциального давления P_r водяных паров в сушильном агенте.

Система уравнений решалась конечно-разностным методом. Использовалась явная схема. При расчете температуры $t_{гк}$ и влагосодержания $x_{гк}$ воздуха на выходе из аппарата в момент времени $\tau + \Delta\tau$ используются средние по слою значения температуры и влагосодержания, вычисленные по формулам (8), (11) на предыдущем шаге расчета. При старте алгоритма ($\tau = 0$) значения t_r и x_r принимаются равными начальным $t_{гн}$ и $x_{гн}$.

Система уравнений (1)-(4) и (6)-(11), позволяет прогнозировать изменение влагосодержания пленки, температуры частиц, влагосодержания и температуры воздуха в псевдооживленном слое во времени процесса капсулирования. Данные уравнения должны быть дополнены соотношениями для расчета степени покрытия частиц и коэффициентов тепло- и массоотдачи.

Средняя степень покрытия, под которой понимают долю общей поверхности частиц, покрытой защитной оболочкой, при проведении процесса в периодическом режиме, может быть рассчитана по формуле [1]:

$$X = k_4 [z_2 - z_1 - z_2 \exp(z_1 \tau) + z_1 \exp(z_2 \tau)] / [z_1 z_2 (z_2 - z_1)] \quad (12)$$

где $k_1 = -k_c$; $k_2 = k_\lambda + k_\phi$; $k_3 = k_c k_\phi$; $k_4 = k_\lambda k_c$; z_1, z_2 – корни характеристического уравнения.

$$z_{1,2} = 0,5 \left[k_1 - k_2 \pm \sqrt{(k_2 - k_1)^2 + 4(k_1 k_2 + k_3)} \right], \quad (13)$$

где k_c, k_ϕ – относительные расходы частиц через зону "слой", через зону "факел"; k_λ – константа скорости роста степени покрытия.

$$k_\lambda = n_k K_p d_k^2 / (4 N_\phi d_{cp}^2), \quad (14)$$

где d_k – диаметр капель, n_k – число капель, производимых форсункой в единицу времени, N_ϕ – число гранул в зоне факела форсунки, K_p – коэффициент растекания.

$$n_k = 6 \cdot G_{эм} / (\pi \cdot \rho_{ж} \cdot d_k^3), \quad (15)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность эмульсии.

$$k_c = n_\phi / N_c = 1/\tau_c, \quad k_\phi = n_\phi / N_\phi, \quad (16)$$

где n_ϕ – количество частиц, циркулирующее через зону орошения в единицу времени; N_c, N_ϕ – соответственно, число частиц в зонах «слой» и «факел»; τ_c – период циркуляции частиц.

$$N_\phi = 6 \cdot M_\phi / (\pi \cdot \rho_r \cdot d_{cp}^3), \quad (17)$$

где M_ϕ – масса частиц в зоне факела форсунки, ρ_r – плотность частицы.

Для расчета периода циркуляции рекомендуется формула [18]:

$$\tau_c = \frac{6,58 H_p (1 - \varepsilon)}{c_1 W_b (1 - \varepsilon_\phi)} \sqrt{\rho_r d_{cp} / \left[k_f \rho_r \left(H_p + \frac{1,1 W_0 r_0}{c_1 W_b} \right) \right]}. \quad (18)$$

Массовый расход частиц через факел форсунки и масса частиц в зоне факела могут быть определены из выражений [18]:

$$G_\phi = \frac{0,1 \pi W_0^2 r_0^2 (1 - \varepsilon_\phi)}{W_b} \sqrt{\frac{k_f \rho_r \rho_r}{d_{cp}} \left(H_p + \frac{1,1 W_0 r_0}{c_1 W_b} \right)}, \quad (19)$$

$$M_\phi = \frac{0,33 \rho_r W_0^2 r_0^2 (1 - \varepsilon_\phi)}{c_1 W_b^3} \left[\frac{1}{2} - \frac{2 g d_{cp} (\rho_r - \rho_g) L_\phi}{45 k_f \rho_r W_b^2 H_p} \right], \quad (20)$$

$$\text{где } L_\phi = W_0 r_0 / (0,366 W_b c_1), \quad (21)$$

$$c_1 = 0,46 (g d_{cp}^3 / v_r^2)^{0,1} \cdot W^{0,32}. \quad (22)$$

В этих формулах: ρ_r, ρ_g – плотности, соответственно, газа и твердых частиц; v_r – кинематический коэффициент вязкости газа; H_p – рабочая высота псевдооживленного слоя; ε – порозность слоя; W – рабочая скорость псевдооживления; W_b – скорость витания частиц; k_f – коэффициент аэродинамического сопротивления; W_0 и r_0 – начальная скорость и радиус газовой струи; ε_ϕ – порозность зоны 'газ-твердые частицы' факела форсунки.

Коэффициенты тепло- и массоотдачи рассчитывались по формулам [19]:

$$\alpha = 0,0125 \frac{\lambda_r}{d_{cp}} Re^{0,84}, \quad (23)$$

$$\beta = 0,0087 \frac{D_r}{d_{cp}} Re^{0,84}. \quad (24)$$

В этих формулах: λ_r – теплопроводность воздуха, D_r – коэффициент диффузии водяных паров в воздухе, Re – число Рейнольдса, рассчитанное по скорости воздуха в сечении газораспределительной решетки.

$$D_r = 21,9 \cdot 10^{-6} \frac{P_0}{P} \left(\frac{t_r + 273}{273} \right), \quad (25)$$

где P_0 – давление при нормальных физических условиях, P – давление в аппарате.

При выражении движущей силы процесса как разности парциальных давлений коэффициент массоотдачи корректируется по формуле

$$\beta_B = \frac{M_B}{22,4} \cdot \frac{273 \cdot \beta}{P_0 \cdot (273 + t_r)}, \quad (26)$$

где M_B – молекулярная масса воды.

Давление паров воды над поверхностью пленки определяется по следующему выражению:

$$P_{п} = \psi \cdot P_{н.в.}, \quad (27)$$

где $P_{н.в.}$ – давление насыщенных паров воды, ψ – эмпирический поправочный коэффициент.

Давление насыщенных паров воды при температуре t , рассчитывается по эмпирической формуле:

$$P_{н.в.} = 617 \cdot \exp(17,25 \cdot t / (t + 238)). \quad (28)$$

Поправочный коэффициент определяется соотношениями: $\psi = 0,87$ при $U > 0,5$ и $\psi = U/U_{кр}$ при $U \leq U_{кр}$. Для применяемой эмульсии $U_{кр} = 0,5$.

ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Проверка математической модели проводилась по данным экспериментов, проведенных на лабораторной установке. Схема аппарата кипящего слоя, в котором осуществлялся процесс капсулирования, изображена на рис. 1. Аппарат имеет цилиндроконическую форму с диаметром решетки 0,07 м. Высота конической части аппарата 0,4 м. Диаметр верхней части 0,21 м.

Такое соотношение размеров позволило организовать в аппарате так называемый аэрофонтанный режим псевдооживления обрабатываемых гранул. При подаче восходящего потока газа в слой частиц через газораспределительную решетку струя газа фонтанирует вдоль вертикальной оси аппарата, увлекая часть слоя вверх. По мере продвижения вверх скорость газа уменьшается, движение твердых частиц замедляется. Частицы при достижении определенной высоты попадают в периферийные зоны и скатываются по стенкам аппарата

до газораспределительной решетки, где снова подхватываются восходящим потоком газа.

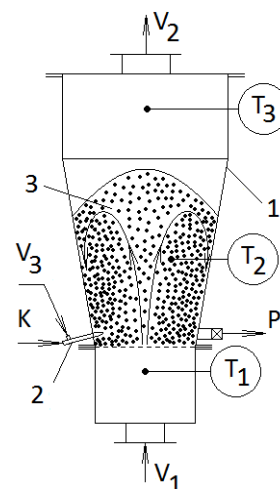


Рис. 1. Схема лабораторного аппарата для капсулирования частиц: 1 – аппарат кипящего слоя, 2 – форсунка, 3 – псевдооживленный слой частиц, V_1 – нагретый воздух, V_2 – отработанный воздух, V_3 – распыливающий воздух, K – раствор капсулянта, P – выгрузка капсулированных частиц
Fig. 1. The scheme of laboratory apparatus for particles capsulation: 1 – fluidized bed device, 2 – nozzle, 3 – fluidized bed of particles, V_1 – heated air, V_2 – exhaust air, V_3 – spraying air, K – polymer solution, P – unloading of capsulated particles

Воздух, подаваемый на псевдооживление, нагревается электронагревателем. Тонкодисперсный распыл эмульсии полимера обеспечивается пневматической форсункой. Измерение температуры в аппарате осуществлялось в трех точках: под газораспределительной решеткой, в псевдооживленном слое частиц, в сепарационном пространстве над слоем. В качестве датчиков температуры использовались термомпары.

Процесс капсулирования осуществлялся периодическим способом, соответственно процессы теплообмена протекали в нестационарном режиме. Обработывалось 0,7 кг гранул карбамида до достижения относительной массы оболочки 10%. Средний диаметр гранул $2,4 \cdot 10^{-3}$ м, плотность 1350 кг/м^3 . Использовалась эмульсия стирол-акрилового полимера с содержанием сухого остатка 33%. Средняя толщина пленки по окончании процесса капсулирования $\sim 0,05 \cdot 10^{-3}$ м. Начальная температура псевдооживляющего воздуха $t_{гн} = 54 \text{ }^\circ\text{C}$. Скорость газа в сечении решетки 2,7 м/с.

На рис. 2 приведены зависимости абсолютного влагосодержания пленки капсулянта U и средней степени покрытия частиц X от времени процесса, рассчитанные с использованием предложенного математического описания.

На рис. 3, 4 представлены зависимости температуры слоя частиц и отработанного воздуха от

времени процесса. Непрерывные линии – расчетные, а точки экспериментальные данные.

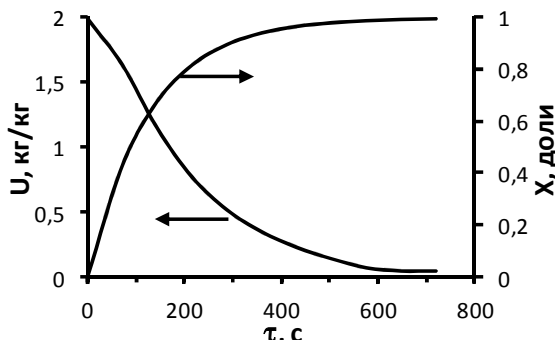


Рис. 2. Изменение параметров частиц во времени процесса
Fig. 2. Evolution of particle parameters in process time

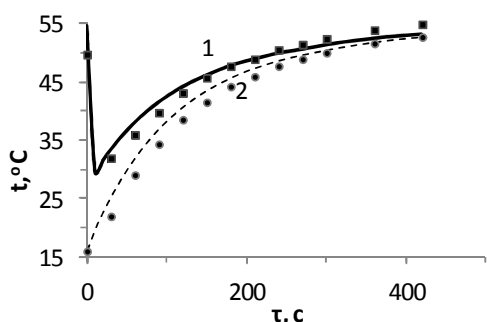


Рис. 3. Изменение температуры во времени процесса прогрева псевдоожиженного слоя частиц: 1 – воздух над слоем, 2 – в слое частиц

Fig. 3. Temperature vs process time of particles heating in a fluidized bed: 1 – in the air above a fluidized bed, 2 – in a fluidized bed

Температура слоя частиц напрямую зависит от соотношения интенсивностей подвода теплоты конвекцией от псевдоожижающего агента и отвода теплоты с испаренной влагой. Хорошее соответствие расчетных и опытных данных, иллю-

ЛИТЕРАТУРА

1. **Овчинников Л.Н., Липин А.Г.** Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: монография. Иваново: ИГХТУ. 2011. 140 с.
2. **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.
3. **Chenab L., Xiea Z., Zhuanga X., Chena X., Jinga X.** Controlled release of urea encapsulated by starch-g-poly(L-lactide). *Carbohydrate Polymers.* 2008. V. 72. N 2. P. 342–348. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.09.003.
4. **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.
5. **Острога Р.А., Юхименко Н.П., Михайловский Я.Э., Литвиненко А.В.** Технология получения гранулированных удобрений на органической основе. *Восточно-европ.*

стрируемое рис. 3, 4, говорит о корректности математической модели тепломассообменных процессов, имеющих место при капсулировании в псевдоожиженном слое. Средняя относительная ошибка не превышает 7%.

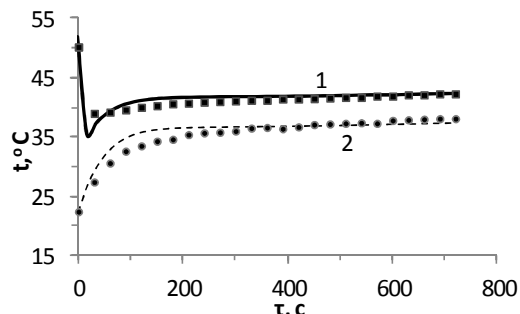


Рис. 4. Изменение температуры во времени процесса прогрева орошаемого псевдоожиженного слоя частиц: 1 – воздух над слоем, 2 – в слое частиц

Fig. 4. Temperature vs process time of particles heating in irrigated fluidized bed: 1 – in the air above a fluidized bed, 2 – in a fluidized bed

ВЫВОДЫ

Учет влияния закономерностей формирования капсулы на протекание процесса сушки пленки капсулообразующего вещества позволяет более достоверно прогнозировать основные параметры процесса капсулирования. Предложенная математическая модель отражает наиболее важные особенности процесса и может быть использована при расчете аппарата с псевдоожиженным слоем капсулируемых частиц.

Работа выполнена в лаборатории “Тепломассообмен в химически реагирующих средах” НИИ Термодинамики и кинетики химических процессов ИГХТУ.

REFERENCES

1. **Ovchinnikov L.N., Lipin A.G.** Encapsulation of fertilizer in fluidized bed. Ivanovo: ISUCT. 2011. 140 p. (in Russian).
2. **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.
3. **Chenab L., Xiea Z., Zhuanga X., Chena X., Jinga X.** Controlled release of urea encapsulated by starch-g-poly(L-lactide). *Carbohydrate Polymers.* 2008. V. 72. N 2. P. 342–348. DOI: 10.1016/j.carbpol.2007.09.003.
4. **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.
5. **Ostroga R.A., Yukhimenko N.P., Mikhailovskiy Ya.E., Litvinenko A.V.** Technology of obtaining granulated fertilizers on organic base. *Vostochno-Evrop. Zhurn. Pered. Tekhnol.* 2015. V. 1. N 6(79). P. 19–26 (in Russian). DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60314.

- журн. передовых технологий. 2015. Т. 1. № 6(79). С. 19-26. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.60314.
6. **Schoebitz M., Lopez M.D., Roldan A.** Bioencapsulation of microbial inoculants for better soil-plant fertilization. A review. *Agronomy for sustainable development*. 2013. V. 33. N 4. P. 751-765. DOI: 10.1007/s13593-013-0142-0.
 7. **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.
 8. **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.
 9. **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.7b0121.
 10. **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.
 11. **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.
 12. **Munmaya Mishra.** Handbook of Encapsulation and Controlled Release. CRC Press. 2015. P. 1512.
 13. **Azeem B., KuShaari K., Man Z.B., Basit A., Thanh T.H.** Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. *J. Controlled Release*. 2014. V. 181. N 10. P. 11-21. DOI: 10.1016/j.jconrel.2014.02.020.
 14. **Chaiyasat P., Pholsrimuang P., Boontung W., Chaiyasat A.** Influence of Poly(L-lactic acid) Molecular Weight on the Encapsulation Efficiency of Urea in Microcapsule Using a Simple Solvent Evaporation Technique. *Polymer-plastics technology and engineering*. 2016. V. 55. N 11. P. 1131-1136. DOI: 10.1080/03602559.2015.1132447.
 15. **Gumnitsky Y.M., Nagursky O.A., Nagursky A.O.** Dynamics of heat mass exchange is in a layer of dispersed material during capsulation in a state of fluidizing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. V. 2. N 8(62). P. 42-44 (in Ukrainian).
 16. **Yukhimenko M., Ostroga R., Artyukhov A.** Hydrodynamic and kinetic of processes of the mineral fertilizer granules encapsulating in the multistage device with suspended layer. *Vostochno-Evrop. Zhurn. Pered. Tekhnol.* 2016. V. 6. N 6(84). P. 22-28 (in Russian). DOI: 10.15587/1729-4061.2016.84179.
 17. **Danilaev D.P., Danilaev M.P., Dorogov N.V.** The capsulation process effectiveness in multiphase gas flows. *Nauchno-tehnicheskiy Vestnik Povolzh'ya*. 2015. N 3. P. 34-37 (in Russian).
 18. **Buevich Yu.A., Minaev G.A.** Jet fluidization. M.: Khimiya. 1984. 136 p. (in Russian).
 19. **Gel'perin N.L., Aiynshtein V.G., Kvasha V.B.** Basics of fluidization techniques. M.: Khimiya. 1967. 664 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 20.11.2017
Принята к опубликованию 13.02.2018

Received 20.11.2017
Accepted 13.02.2018