

УДК 66.011

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА КАПСУЛИРОВАНИЯ В АЭРОФОНТАННОМ АППАРАТЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

В.О. Небукин, А.Г. Липин, А.А. Липин

Ивановский государственный химико-технологический университет

В статье описывается новая методика расчета процесса капсулирования, широко применяемого в промышленности. Процесс капсулирования может производиться различными способами. В данном случае капсулирование осуществляется путем распыливания эмульсии полимера на частицы псевдооживленного слоя с помощью пневматических форсунок. Режим фонтанирующего слоя обеспечивает равномерное распределение пленкообразующего вещества. Используя исходные данные, а именно массу обрабатываемых гранул, относительную массу полимерной оболочки, концентрацию эмульсии полимера, температуру псевдооживляющего воздуха под газораспределительной решеткой и его влагосодержание, размер гранул и их теплофизические свойства, программа, основанная на предложенном алгоритме расчета, позволит проектировщику прогнозировать рациональные конструктивные и режимные параметры аэрофонтанного аппарата.

Ключевые слова: капсулирование, степень покрытия, псевдооживленный слой, теплообмен, массообмен, дисперсные материалы.

Капсулирование - это процесс заключения частиц некоторого вещества или смеси веществ в оболочки с целью изменения или придания им каких-либо свойств. Капсулирование широко используемый в промышленности процесс. Например, с его помощью получают композиционные материалы [1], удобрения пролонгированного действия [2, 3]. Капсулирование семян растений позволяет защитить их от воздействия окружающей среды, а так же обеспечить питательными веществами в период прорастания [4]. Использование капсулирования в пищевой промышленности позволяет регулировать окислительно-восстановительные реакции, корректировать вкус, цвет и запах, увеличивать срок годности и т.д. [5].

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 плёнку. Удаление растворителя

путем сушки приводит к отверждению плёнки.

Процесс проводится в режиме фонтанирующего слоя, обеспечивающего интенсивную циркуляцию частиц. Таким образом, создаются условия для многократного прохождения каждой частицы через зону орошения форсунки, что способствует равномерному распределению пленкообразующего вещества по поверхности обрабатываемых гранул.

В статье рассматривается методика расчета аппарата с псевдооживленным слоем периодического действия для капсулирования дисперсных материалов, позволяющая определить его основные габаритные размеры и режимно-технологические параметры процесса капсулирования, обеспечивающие полное покрытие поверхности частиц защитной оболочкой и удаление влаги из пленки капсулянта.

Исходными данными для расчета являются масса обрабатываемых гранул, относительная масса полимерной оболочки, концентрация эмульсии полимера, температура псевдооживляющего воздуха под газораспределительной решеткой и

его влагосодержание, размер гранул и их теплофизические свойства.

На первом этапе определяются основные размеры аппарата: объем и высота конической части, диаметр газорас-

пределительной решетки и сепарационного пространства. Для этого проектировщик дополнительно задает угол раскрытия конуса и геометрические симплексы.

Объем конической части аппарата:

$$V_k = \frac{i_{g1} \cdot m_{gr}}{(1 - \varepsilon_n) \cdot \rho_{gr}}, \quad (1)$$

где i_{g1} – симплекс геометрического подобия, равный доле объема конической части, занимаемой гранулами, ε_n – порозность неподвижного слоя для час-

тиц округлой формы ($\varepsilon_n=0,4$), m_{gr} – масса обрабатываемых гранул, ρ_{gr} – плотность гранул.

Диаметр газораспределительной решетки:

$$D_0 = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_k}{\pi \cdot 2 \cdot i_{g2} \cdot (a^2 + a + 1)}}, \quad (2)$$

где $a = 2 \cdot i_{g2} \cdot \tan(\varphi) + 1$; i_{g2} – симплекс геометрического подобия, φ – угол наклона стенки аппарата.

Диаметр сепарационного пространства:

$$D = D_0 \cdot a. \quad (3)$$

Высота конуса аппарата:

$$H_{ap} = \frac{D - D_0}{2 \cdot \tan(\varphi)}. \quad (4)$$

На втором этапе проводится расчет критических и рабочей скоростей псевдооживления и расхода псевдооживляющего воздуха.

Определяется значение критерия Архимеда для частиц среднего диаметра:

$$Ar_{sr} = \frac{d_{sr}^3 \cdot \rho_{gr} \cdot g \cdot \rho_g}{\mu_g^2}. \quad (5)$$

По формулам Тодеса находятся величины критерия Рейнольдса, соответствующие критическим скоростям псевдооживления:

$$Re_{sr.ps} = \frac{Ar_{sr}}{1400 + 5.22 \cdot \sqrt{Ar_{sr}}}, \quad (6)$$

$$Re_{sr.vit} = \frac{Ar_{sr}}{18 + 0.61 \cdot \sqrt{Ar_{sr}}}. \quad (7)$$

Рассчитываются значения скорости начала псевдооживления, скорости витания частиц и рабочей скорости псевдооживления:

$$W_{sr.ps} = \frac{Re_{sr.ps} \cdot \mu_g}{d_{sr} \cdot \rho_g}, \quad W_{sr.vit} = \frac{R_{sr.vit} \cdot \mu_g}{d_{sr} \cdot \rho_g}, \quad W_{rab} = K_w \cdot W_{sr.ps}, \quad (8)$$

где K_w – число псевдооживления.

Определяется расход воздуха:

$$G_g = \frac{\pi \cdot D_0^2}{4} \cdot W_{rab} \cdot \rho_g. \quad (9)$$

Далее рассчитывается коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от псевдооживляющего воздуха к капсулируемым частицам.

Определяется критерий Нуссельта:

$$Nu = 0.0087 \cdot Re_{rab}^{0.84}. \quad (10)$$

Рассчитывается коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_g / d_{sr}. \quad (11)$$

Находятся значения парциального давления насыщенных водяных паров и

энтальпии воздуха под газораспределительной решеткой:

$$PH = 617 \cdot \exp \frac{17.25 \cdot t}{238 + t}, \quad (12)$$

$$J = (1.01 + 1.97 \cdot x) \cdot t + 2943 \cdot x, \quad (13)$$

где t – температура псевдооживляющего воздуха, x – его влагосодержание.

Температуру мокрого термометра $t_{m,t}$ определяем из уравнения:

$$J - \left(1.01 + 1.97 \cdot 0.622 \cdot \frac{PH}{P_{ap} - PH} \right) \cdot t_{m,t} - 2493 \cdot 0.622 \cdot \frac{PH}{P_{ap} - PH} = 0. \quad (14)$$

Температура воздуха на выходе из аппарата $t_{g,k}$ находится путем решения уравнения:

$$\alpha \cdot F_t \cdot (t_{g,n} - t_{g,k}) / \ln \left(\frac{t_{g,n} - t_{m,t}}{t_{g,k} - t_{m,t}} \right) - G_g \cdot c_g \cdot (t_{g,n} - t_{g,k}) = 0, \quad (15)$$

где c_g – теплоемкость газа; $F_t = \pi \cdot d_{sr}^2 \cdot N_{sl}$ – площадь (теплообмена) поверхности гранул; $N_{sl} = 6 \cdot m_{gr} / (\pi \cdot \rho_{gr} \cdot d_{sr}^3)$ – число частиц в слое.

Рассчитывается тепловой поток от псевдооживляющего воздуха к капсулируемым частицам

$$Q = G_g \cdot c_g \cdot (t_{g.n} - t_{g.k}) \quad (16)$$

Исходя из предположения, что все подведенное тепло затрачивается на испарение влаги из пленки капсулянта, определяется массовый расход эмульсии полимера и оценивается продолжительность процесса капсулирования как время необходимое для подачи требуемого количества эмульсии.

Количество испаряемой воды:

$$G_{isp.v} = Q / r^* \quad (17)$$

где r^* - удельная теплота парообразования.

Расход эмульсии:

$$G_{em} = G_{isp.v} / (1 - C_{pol}) \quad (18)$$

Масса эмульсии полимера:

$$m_{em} = m_{gr} \cdot B / C_{pol} \quad (19)$$

где m_{gr} – масса обрабатываемых гранул, B – массовая доля полимерной оболочки в капсулированной частице, C_{pol} – доля полимера в эмульсии.

Время капсулирования:

$$\tau_k = m_{em} / G_{em} \quad (20)$$

На следующем этапе решается система уравнений:

$$dx_c / d\tau = k_c \cdot (x_{\phi} - x_c) \quad (21)$$

$$dx_{\phi} / d\tau = k_{\lambda} \cdot (1 - x_{\phi}) + k_{\phi} \cdot (x_c - x_{\phi}) \quad (22)$$

описывающая эволюцию средней степени покрытия частиц x_c во времени τ

процесса. В этих уравнениях x_c , x_{ϕ} – средние степени покрытия частиц в псевдооживленном слое и в двухфазной области струи, истекающей из форсунки; $k_{\lambda} = G_{em} \cdot k_{\lambda}^*$ – константа скорости изменения степени покрытия, k_{λ}^* – эмпирический коэффициент, τ – время, с.

Коэффициенты k_c , k_{ϕ} определяются следующим образом:

$$k_{\phi} = G_{\phi} / M_{\phi}, \quad k_c = G_{\phi} / M_{cl} \quad (23)$$

где M_{cl} – масса псевдооживленного слоя, M_{ϕ} – масса частиц в двухфазной области струи, истекающей из форсунки, G_{ϕ} – расход частиц, увлекаемых в движение газовой струей истекающей из форсунки. Расход частиц G_{ϕ} и масса частиц M_{ϕ} рассчитывались по формулам, рекомендованным в работе [6].

Решение системы уравнений (21), (22) осуществляется совместно с уравнениями тепломассопереноса [7], что позволяет прогнозировать изменение во времени процесса капсулирования степени покрытия, температуры обрабатываемых частиц, влагосодержания полимерной пленки, температуры воздуха на выходе из аппарата.

Уравнения (21), (22) дополняются следующими соотношениями.

Уравнение материального баланса по влаге, содержащейся в пленке:

$$dm_{vod} / d\tau = -\beta_r \cdot (P_{n.v.p} \cdot \psi - P_v) \cdot F_{isp.m} + G_{em} \cdot (1 - C_{pol}) \quad (24)$$

При капсулировании частиц равномерно меняется во времени, вследствие изменения степени покрытия частиц.

$$F_{isp} = F_t \cdot x_c \quad (25)$$

Влагосодержание пленки в текущий момент времени находится по формуле:

$$U = \frac{m_{vod}}{G_{em} \cdot C_{pol} \cdot \tau} \quad (26)$$

Уравнение теплового баланса, записанное в дифференциальной форме:

$$dQ / d\tau = \alpha \cdot (t_g - t) \cdot F_t - \beta_r \cdot (P_{n.v.p} \cdot \psi - P_v) \cdot F_{isp.m} \cdot r^* \quad (27)$$

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 :

$$t = \frac{Q}{m_{gr} \cdot c_{gr} + G_{em} \cdot C_{pol} \cdot \tau_k \cdot c_{pol} + m_{vod} \cdot c_{vod}} \quad (28)$$

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

Предполагается, что гранулы контактируют с газом некоторой средней температуры:

$$t_g = 0.5 \cdot (t_{g.n} + t_{g.k}), \quad (29)$$

где $t_{g.n}$ и $t_{g.k}$ - температуры сушильного агента при входе и выходе из аппарата.

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

$$t_{g.k} = \frac{t_{g.n} \cdot G_g \cdot c_g - \alpha \cdot (0.5 \cdot t_{g.n} - t) \cdot F_t}{G_g \cdot c_g + 0.5 \cdot \alpha \cdot F_t} \quad (30)$$

Предложенный алгоритм расчета реализован в компьютерной программе, позволяющей проектировщику прогнозировать рациональные конструкционные и режимные параметры аппарата с псевдооживленным слоем капсулируемых частиц, обеспечивающие нанесение полимерных оболочек с требуемыми характеристиками. Результаты представляются в табличной и графической формах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конгапшев А.А., Мусаев Ю.И. Изготовление деталей из капсулированных порошков композиционных материалов // Сборник статей студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава по результатам VIII Международной научной конференции «Техно-конгресс», 11 марта 2017 г. Кемерово, 2017. С. 20-22.

2. 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.

3. Овчинников Л.Н., Липин А.Г. Капсулирование минеральных удобрений во взвешенном слое: монография. ИГХТУ. Иваново, 2011. 140 с.

4. Копытков В.В., Коновалов В.Н. Исследование технологии получения дражированных семян с использованием композиционных полимерных препаратов. Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 4 (352). С. 30-34.

5. Кролевец А.А., Тырсин Ю.А., Быковская Е.Е. Применение нано- и микрокапсулирования в фармацевтике и пищевой промышленности. Часть I. Основы микрокапсулирования // Вестник РАЕН. 2012. № 4. С. 123-127.

6. Бувеч Ю.А., Минаев Г.А. Струйное псевдооживление. М.: Химия, 1984. 136 с.

7. 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.

Статья публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта №18-03-20102-г.

*Рукопись поступила в редакцию
22.10.2018*

CALCULATION METHOD DEVELOPMENT OF THE ENCAPSULATION PROCESS IN THE AEROFONTANE APPARATUS OF PERIODIC ACTION*V. Nebukin, A. Lipin, A. Lipin*

The article describes a new method for calculating the process of encapsulation widely used in industry. The encapsulation process can be carried out in various ways;. In this case the encapsulation is carried out by spraying the emulsion of the polymer onto the particles of the fluidized bed by means of pneumatic nozzles. The regime of the fountain layer ensures a uniform distribution of the film-forming substance. Using the initial data, namely the mass of the processed pellets, the relative mass of the polymer shell, the concentration of the polymer emulsion, the temperature of the fluidizing air under the gas distribution grid and its moisture content, the size of the granules and their thermophysical properties, the program based on the proposed calculation algorithm will allow the designer to predict rational design and operating parameters of the aerofontane apparatus.

Key words: encapsulation, degree of coating, fluidized bed, heat-exchange, mass transfer, dispersed materials, calculation.

References

1. Kongapshev A.A., Musaev YU.I. Izgotovlenie detalej iz kapsulirovannyh poroshkov kompozicionnyh materialov. Sbornik statej studentov, aspirantov i professorsko-prepodavatel'skogo sostava po rezul'tatam VIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Tekhnokongress», 11 marta 2017 g. Kemerovo, 2017. S. 20-22.
2. Lipin A.G., Nebukin V.O., Lipin A.A. Kapsulirovanie granul v polimernye obolochki kak metod sozdaniya mineral'nyh udobrenij s reguliruemoj skorost'yu vysvobozhdeniya pitatel'nyh veshchestv. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie. 2017. № 3 (51). S. 86-91.
3. Ovchinnikov L.N., Lipin A.G. Kapsulirovanie mineral'nyh udobrenij vo vzveshennom sloe: monografiya. IGHTU. Ivanovo, 2011. 140 s.
4. Kopytkov V.V., Konovalov V.N. Issledovanie tekhnologii polucheniya drazhiroennyh semyan s ispol'zovaniem kompozicionnyh polimernyh preparatov. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal. 2016. № 4 (352). S. 30-34.
5. Krolevec A.A., Tyrsin YU.A., Bykovskaya E.E. Primenenie nano- i mikrokapsulirovaniya v farmaceutike i pishchevoj promyshlennosti. CHast' I. Osnovy mikrokapsulirovaniya. Vestnik RAEN. 2012. № 4. S. 123-127.
6. Buevich YU.A., Minaev G.A. Strujnoe psevdoozhizhenie. M.: Himiya, 1984. 136 s.
7. Lipin A.A., Nebukin V.O., Lipin A.G. Modelirovanie processov teplomassoperenosa pri kapsulirovanii granul v fontaniruyushchem sloe. Izv. vuzov. Himiya i him. tekhnologiya. 2018. T. 61. Vyp. 4-5. S. 98-104.