

Е. В. Флисюк

ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРОЦЕССЕ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЯ НА ТАБЛЕТКИ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Санкт-Петербургская Химико-Фармацевтическая Академия

В процессе нанесения покрытия на таблетки в псевдоожигенном слое материал покрытия (обычно водный раствор) вводится в слой с помощью пневматической форсунки и затем, благодаря интенсивному перемешиванию таблеток, равномерно распределяется по поверхности таблеток. При этом процесс протекает циклически: сначала на поверхности таблеток в зоне факела распыла образуется тонкая пленка жидкости, затем в течение короткого промежутка времени она подсыхает в промежуточной области слоя, и цикл вновь повторяется. Таким образом, процесс нанесения покрытия совмещается с процессом сушки. Для расчета этого процесса обычно используют балансовые соотношения тепломассообмена. Однако применение этих соотношений часто приводит к ошибкам в определении параметров процесса, нарушению устойчивости и вызывает необходимость снижения производительности установки.

Проведенные нами исследования показали, что одним из основных параметров, определяющих устойчивость процесса, является кинетика тепломассообмена между таблетками в псевдоожигенном слое и горячим теплоносителем. Кинетика внешнего тепломассообмена в процессе сушки определяется изменением концентрации паров воды и изменением температуры теплоносителя вблизи поверхности таблетки. Градиент концентраций создает поток пара, направленный от поверхности в ядро теплоносителя, а наличие разности температур обеспечивает подвод теплоты к поверхности таблетки.

Строгий теоретический анализ внешнего тепломассообмена проводят на основе системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы переноса импульса энергии, массы и теплоты. При этом взаимное влияние этих процессов друг на друга учитывается с помощью кинетических коэффициентов, входящих в эти уравнения [1]. Однако аналитическое решение внешней задачи тепломассообмена, учитывающее взаимное влияние на кинетику процесса различных факторов, является весьма сложной задачей из-за трудности определения кинетических коэффициентов [2].

В связи с этим при анализе тепломассообменных процессов возникает необходимость в использовании экспериментальных данных.

При нанесении покрытия в начальный момент времени таблетки охлаждаются, так как идет испарение влаги за счет аккумулированного ими тепла. Затем испарение влаги с поверхности при постоянной температуре происходит за счет теплоты теплоносителя и затем следует нагрев таблетки. При этом молекулы воды, находящиеся на поверхности реальной таблетки, диффундируют в поток теплоносителя и частично

вглубь таблетки. Однако диффузия воды вглубь таблетки протекает существенно медленнее, чем с поверхности в поток теплоносителя. Поэтому этим явлением при расчете процесса можно пренебречь.

Кроме того, учитывая, что толщина жидкой пленки в течение каждого цикла покрытия сравнительно мала, можно считать, что скорость тепломассообмена определяется только внешней диффузией. Тогда процесс тепломассообмена можно описать следующим уравнением:

$$\frac{mc}{F} \frac{d\Theta}{d\tau} = \alpha(t - \Theta) - \beta(p^* - p)r, \quad (1)$$

где m — масса таблетки, c — ее удельная теплоемкость, Θ — температура таблетки, F — поверхность таблетки, t — температура теплоносителя, τ — время, α — коэффициент теплоотдачи, β — коэффициент массоотдачи, отнесенный к разности парциальных давлений пара у поверхности испарения и в ядре газовой фазы, p^* — парциальное давление пара, равновесное влажности материала, p — парциальное давление пара в окружающей среде, r — удельная теплота испарения.

Если время τ меньше или равно времени, необходимого для испарения влаги на поверхности таблетки, то второе слагаемое в правой части уравнения (1) — $\beta(p^* - p)r > 0$, если τ — больше, то $\beta(p^* - p)r = 0$.

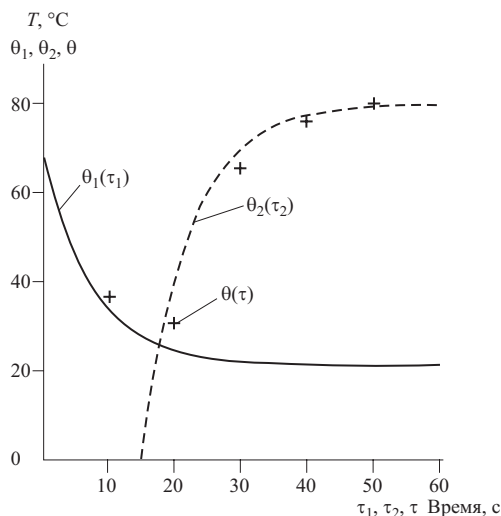
Интегрирование этого уравнения в соответствующих пределах дает выражение для определения температуры частицы:

$$\Theta_{\kappa} = t - (t - \Theta_{\text{н}}) e^{-\frac{\alpha F \tau}{mc}} + \frac{\beta}{\alpha} (p^* - p)r (e^{-\frac{\alpha F \tau}{mc}} - 1) \quad (2)$$

для $\tau > \tau_{\text{исп}}$, при $\beta(p^* - p)r = 0$

$$\Theta_{\kappa} = t - (t - \Theta_{\text{н}}) e^{-\frac{\alpha F \tau}{mc}} \quad (3)$$

Величина коэффициентов α и β , характеризующих интенсивность тепло- и массообмена между нагретым воздухом и твердым материалом, зависит от количества и распределения воды по поверхности тела, а также от внешней конфигурации тела. Для определения коэффициентов α и β , для тел с плоской и сферической поверхностью в случае, если наружная поверхность находится во влажном состоянии, в литературе имеется много различных зависимостей [3, 4]. Однако для тел с иной конфигурацией работ, направленных на изучение тепломассообмена, еще недостаточно. Так, например, для двояковыпуклой — соответствующей основной форме таблеток, в литературе данных не



Изменение температуры частицы в форме таблетки при испарении влаги в потоке нагретого воздуха во времени. $\Theta_1(\tau_1)$ — расчетные значения температуры частицы по формуле (2); $\Theta_2(\tau_2)$ — расчетные значения температуры частицы по формуле (3); $\Theta(\tau)$ — экспериментальные значения температуры частицы

имеется. Вместе с тем было отмечено [3], что изменение фактора формы оказывает существенное воздействие на интенсивность процессов внешнего тепло- и массообмена. Кроме того наши исследования покрытия таблеток в псевдооживленном слое [5] показали, что для частиц такой формы при перемещении в пространстве слоя часто имеет место пульсирующее движение, в результате чего усиливается турбулизация газового потока и повышается интенсивность конвективного теплообмена, лимитирующего скорость переноса теплоты и массы.

В [6] проведено экспериментальное исследование влияния формы тела и ориентации его в потоке газа на конвективный теплообмен и предложено принять в качестве определяющего геометрического размера отношение Π/π , где Π — периметр миделевого сечения тела.

Выбор определяющего геометрического размера для тел сложной конфигурации имеет важное значение и для расчета процессов внутреннего теплообмена.

Предложенные в литературе корреляции для определения коэффициентов теплообмена получены как для одиночной частицы, так и для псевдооживленного слоя частиц. При этом значения коэффициентов, полученных для псевдооживленного слоя, существенно ниже по сравнению со значениями для одиночных частиц.

Однако в работе [4] показано, что в турбулентной области, начиная со значения $Re \geq 200$, значения коэффициентов тепло- и массоотдачи для одиночной закрепленной частицы и псевдооживленного слоя примерно выравниваются.

Поэтому, учитывая, что при псевдооживлении таблеток, имеющих размер от 5 мм и более, всегда будет наблюдаться турбулентный режим, определение коэффициентов тепло- и массообмена целесообразно проводить на одиночной частице.

Для определения кинетических закономерностей обезвоживания таблеток при нанесении покрытия в псевдооживленном слое был изучен теплообмен с поверхностью одиночной таблетки.

Для этой цели во внутрь таблетки, сделанной из меди, была введена термopара и затем подвешенная на термopаре таблетка нагревалась в потоке теплоносителя до температуры $t = 70^\circ\text{C}$. Затем в течение короткого промежутка времени на нее форсункой равномерно подавалась разогретая до той же температуры вода.

Изменение температуры таблетки представлено на рисунке.

По результатам экспериментов была получена критериальная зависимость для расчета критерия Нуссельта —

$$Nu = \frac{\alpha d_3}{\lambda}$$

$$Nu = 0,28 Re^{0,6} Pr^{0,33} \quad (4)$$

в широком диапазоне изменения критерия Рейнольдса — $Re = \frac{wd_3}{\nu}$, $Re = 0,9 \cdot 10^3 \div 6 \cdot 10^4$. В качестве опреде-

ляющего линейного размера d_3 принято отношение Π/π , описанное выше, w — скорость газа, ν — коэффициент кинематической вязкости газа. Здесь $Pr = \nu/a$ — критерий Прандтля, где a — коэффициент температуропроводности.

Эта зависимость позволяет определить величину коэффициента теплоотдачи α . Учитывая, что при умеренных температурах соблюдается подобие полей температур и концентраций влаги в пограничном слое паро-газовой смеси, и допуская аналогию между процессами тепло- и массообмена, можно принять, что массообменный критерий $Nu_d = \beta d/D$, $Nu_d = Nu$, и тогда связь между коэффициентами α и β выразится формулой Льюиса: $\alpha/\beta = \rho c$, где ρ — плотность газа. Рассчитанные по формулам (2) и (3) значения температур показали достаточно хорошую сходимость с результатами экспериментального исследования, проведенного для различных условий обтекания таблетки.

Эти представления могут быть положены в основу изучения теплообмена в процессе нанесения покрытий на таблетки в псевдооживленном слое.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Лыков, *Тепло- и массообмен в процессах сушки*, Госэнергоиздат, Москва – Ленинград (1956).
2. А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов, *Теория тепло- и массопереноса*, Госэнергоиздат, Москва – Ленинград (1963).
3. Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша, *Основы техники псевдооживления*, Химия, Москва (1967).
4. А. Н. Плановский, В. И. Муштаев, В. М. Ульянов, *Сушка дисперсных материалов в химической промышленности*, Химия, Москва (1979).
5. С. П. Налимов Е. В. Флисюк, Л. С. Ефимова и др., *Хим.-фарм. журн.*, **23**(11), 1381 – 1383 (1989).
6. А. С. Гинзбург, *Основы теории и техники сушки пищевых продуктов*, Пищевая промышленность, Москва (1973).

Поступила 15.04.03