УДК 664.642.1:66.047

Профессор Ю.И. Шишацкий, доцент С.В. Лавров,
аспирант Е.И. Голубятников
(Воронеж. гос. ун-т инж. технол.) кафедра промышленной энергетики,
тел. (473) 255-44-66

Научное обоснование замены макрокинетической задачи микрокинетическим уровнем решения при моделировании процесса сушки дисперсных материалов в псевдоожиженном слое

Показано, что процесс сушки в псевдоожиженном слое можно исследовать на уровне отдельной частицы, поскольку вся совокупность частиц находится в равных гидро- и тепломассообменных условиях.

It is shown that the drying process in a fluidized bed can be investigated at the level of individual particles, since the entire set of particles is equal to the hydro-and heat and mass transfer conditions.

Ключевые слова: псевдоожиженный слой, макрокинетический подход, микрокинетический уровень.

Псевдоожиженный слой обладает рядом уникальных свойств, обеспечивающих ему многочисленные приложения: высокая теплопроводность, теплоотдача, низкое внутридиффузионное сопротивление при работе с дисперсным материалом, эффективное использование рабочего объема, простота конструкции аппарата, легкость ввода и вывода материала и др. Эти достоинства псевдоожиженного слоя делают его особенно привлекательным для проведения процессов сушки. Сушка в псевдоожиженном слое дает наилучшие результаты в смысле равномерности обезвоживания. При этом практически устраняется комкование и прилипание материала к внутренним частям сушильной камеры.

Объектами процесса сушки являлись хлебопекарные дрожжи, свекловичный жом, а также другое сырье растительного происхождения с развитой поверхностью межфазового влагообмена в процессе обезвоживания. Движение теплоносителя через слой дисперсного материала показано на рис.1 [1].

Принято считать, что в псевдоожиженном слое все частицы находятся в одинаковых гидродинамических условиях. Интенсивное перемешивание частиц гарантирует и одинаковые массообменные условия [2].

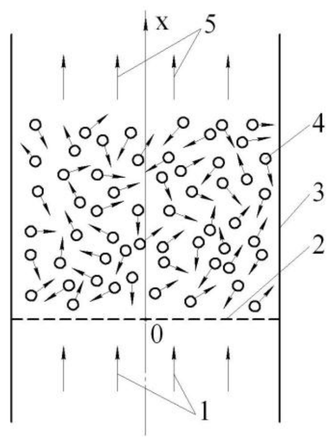

Рис. 1. Общая схема процесса: 1 – теплоноситель; 2 – газораспределительная решетка; 3 – сушильная камера; 4 – ожиженная частица; 5 – отработанный теплоноситель

На основе макроскопического подхода выполнена количественная оценка массообменного условия.

Пусть h – высота псевдоожиженного слоя, S – площадь поперечного (проходного) сечения рабочей камеры. Выделим на высоте x элементарный объем высотой ∂x и рассмотрим совокупность материальных потоков в нем. Масса влаги (в кг), входящая и выходящая из сечений x и $x+\partial x$ за время $\partial\tau$, составит:

$$\partial m(x,\tau)=\upsilon c(x,\tau)S\partial\tau\,; \tag{1}$$

$$\partial m(x+\partial x,\tau)=\upsilon c(x+\partial x,\tau)S\partial\tau\,, \tag{2}$$

где υ - скорость сушильного агента в слое, м/с; $\upsilon=\text{const}$; $c(x,\tau)$ - концентрация влаги в сушильном агенте, кг.

За то же самое время $\partial\tau$ в элементарном объеме произойдет съем влаги с дисперсных частиц в размере

$$\partial m_0(x,\tau)=\beta[c_0(x,\tau)-c(x,\tau)]S\partial x\partial\tau\,, \tag{3}$$

где β - коэффициент массоотдачи влаги с поверхности дисперсной фазы в объем сушильного агента, м/с; $c_0(x,\tau)$ - текущее содержание влаги в частицах, находящихся в элементарном объеме.

Тогда изменение массы влаги в элементарном объеме составит

$$\begin{aligned}&\partial M(x,\tau)=\partial m(x,\tau)-\\&-\partial m(x+\partial x,\tau)+\partial m_0(x,\tau).\end{aligned} \tag{4}$$

На основании (1) – (4) запишем

$$\begin{aligned}&\partial M(x,\tau)=\upsilon \tilde{n}(x,\tau)S\,d\tau-\upsilon c(x+\partial x,\tau)\times\\&\times S d\tau+\beta[c_0(x,\tau)-c(x,\tau)]S\partial x\partial\tau.\end{aligned} \tag{5}$$

Используя разложение в ряд Тейлора [3] $c(x+\partial x,\tau)$ в окрестности точки x и одновременно деля правую и левую части (5) на $S\partial x\partial\tau$, имея в виду, что по определению

$$\partial M(x,\tau)/S\partial x\partial\tau=\partial c/\partial\tau\,,$$

получим

$$\frac{\partial c(x,\tau)}{\partial\tau}=-\upsilon\frac{\partial c(x,\tau)}{\partial x}+\beta[c_0(x,\tau)-c(x,\tau)]. \tag{6}$$

Уравнение для изменения концентрации влаги в дисперсных частицах в элементарном объёме [4] примет вид, в предположении об интенсивном перемешивании твёрдой фазы в нём

$$\frac{\partial c_0(x,\tau)}{\partial\tau}=-k[c_0(x,\tau)-c(x,\tau)], \tag{7}$$

где k – коэффициент сушки, 1/с.

Будем иметь в виду, что в течение процесса $c_0>>c$, поэтому система (6) - (7) может быть существенно упрощена до квазинесопряженного вида

$$\frac{\partial c(x,\tau)}{\partial\tau}=-\upsilon\frac{\partial c(x,\tau)}{\partial x}+\beta c_0(x,\tau)\,; \tag{8}$$

$$\frac{\partial c_0(x,\tau)}{\partial\tau}=-kc_0(x,\tau) \tag{9}$$

с очевидными граничными условиями

$$c(x,0)=\tilde{n}(0,\tau)=0\,; \tag{10}$$

$$\tilde{n}_0(0,\tau)=c_{\acute{i}}\,. \tag{11}$$

Из (9) и (11) следует, что

$$\tilde{n}_0(x,\tau)=c_{\acute{i}}\exp(-k\tau)\,. \tag{12}$$

На основании (12) задача (8) и (10) запишется в виде

$$\begin{aligned}&\frac{\partial c(x,\tau)}{\partial\tau}=-\upsilon\frac{\partial c(x,\tau)}{\partial x}+\\&+\beta c_{\acute{i}}\exp(-k\tau),\end{aligned} \tag{13}$$

$$c(x,0)=\tilde{n}(0,\tau)=0\,. \tag{14}$$

Введём относительные переменные:

$$X=x/h\,;\ \theta=k\tau\,;$$
$$H=\upsilon/(kh)\,;\ C(X,\theta)=c(x,\tau)/c_{\acute{i}}\,,$$

и с достаточной степенью точности для инженерных расчётов $\beta \approx k$, тогда задача (13) и (14) в безразмерном виде будет

$$\frac{\partial C(X,\theta)}{\partial \theta} = -A\frac{\partial C(X,\theta)}{\partial X} + \exp(-\theta), \quad (15)$$

$$C(X,0) = C(0,\theta) = 0. \quad (16)$$

Решение (15)-(16) получаем интегральным преобразованием Лапласа по переменной θ, причём в пространстве изображений получим

$$A\frac{d\tilde{C}(X,s)}{dX} + s\tilde{C}(X,s) - \frac{1}{s+1} = 0, \quad (17)$$

$$\tilde{\tilde{N}}(0,s) = 0, \quad (18)$$

где s и $\tilde{\tilde{N}}(X,s)$ - изображения θ и $\tilde{N}(X,s)$.

Решение (17) и (18):

$$\tilde{\tilde{N}}(X,s) = \frac{1}{s(s+1)}[1-\exp(-\frac{X}{A}s)]. \quad (19)$$

Переходя для (19) к оригиналу, имеем выражение

$$\tilde{N}(X,\theta) = 1-\exp(-\theta) - 1 - \\ -\left(\theta - \frac{X}{A}\right)\left\{1-\exp\cdot\left[-(\theta-\frac{X}{A})\right]\right\}, \quad (20)$$

которое является решением поставленной задачи, причём 1 (...) есть функция Хевисайда. Из (20) следует, что на выходе из слоя сушильного агента относительная концентрация влаги в нем составит

$$\tilde{N}(1,A^{-1}) = 1-\exp(-A^{-1}). \quad (21)$$

Зададимся приемлемой величиной изменения концентрации δ (на практике эта величина составляет ≈ 0.1 %) на выходе, то есть

$$1-\exp(\frac{1}{A}) \le \delta,$$

откуда

$$A \le -1/\ln(1-\delta),$$

или в размерном виде

$$\frac{1/k}{h/\upsilon} \ge 10^3. \quad (22)$$

Условие, что отношение обратной величины коэффициента сушки ко времени пребывания сушильного агента в аппарате с псевдоожиженным слоем должно быть больше 10^3, означает правомерность того, что все частицы псевдоожиженного слоя будут находиться в равных массообменных условиях.

Если проводить и теплообменную аналогию, то можно получить такого же приблизительно вида условие, как и (22), в котором вместо коэффициента сушки будет фигурировать, например, приведённый коэффициент теплоотдачи.

Таким образом, обосновано рассмотрение вопроса на уровне отдельной частицы в псевдоожиженном слое, поскольку вся совокупность частиц находится в равных гидро- и тепломассообменных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии [Текст]: учебник для вузов / А.Г. Касаткин. − 15-е изд., стереотипное. − М. : Альянс, 2009 . – 750 с.

2. Шишацкий, Ю.И. Сушка хлебопекарных дрожжей в псевдоожиженном слое при осциллирующем теплоподводе [Текст]: монография / Ю.И. Шишацкий, Г.В. Агафонов, С.М. Замаев, С.В. Лавров. – М.: Пищевая промышленность, 2009. – 162 с.

3. Выгодский, М.Я. Справочник по высшей математике [Текст] / М.Я. Выгодский. − М.: АСТ: Астрель, 2006. − 991 с.

4. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой [Текст] / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. − 248 с.