

*А.А. Дегтярев, М.Ю. Субочева**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СУШКИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ

Существующие в настоящее время математические модели для расчета времени сушки [1] не учитывают время прогрева материала, что для термолабильных продуктов не приемлемо, так как потери целевого продукта могут иметь место, начиная с этой стадии.

Как показывают расчеты, пренебрегая убылью влаги при прогреве, получаем заниженное значение времени периода прогрева (сокращение периода прогрева в два раза) и, следовательно, времени всего процесса сушки.

Предложен подход к моделированию процесса сушки, в котором учитывается массоперенос при прогреве материала, и скорость сушки при отклонении температуры от температуры мокрого термометра,

которую принимаем переменной величиной, зависящей от технологических параметров процесса.

Запишем скорость сушки как поток влаги через элемент поверхности:

$$v_{vl} = \frac{dm_{vl}}{dt dF}, \quad (1)$$

где v_{vl} – скорость сушки, кг/(м²·с); dm_{vl} – масса влаги, кг; t – время, с; F – площадь поверхности сушки.

В первом периоде сушки все подводимое к материалу тепло расходуется на испарение влаги, т.е. выполняется условие

$$(r + E) dm_{вл} = K(t_c - t) dF dt. \quad (2)$$

Имея выражения (1) и (2), получим зависимость для расчета скорости сушки в первом периоде

$$v_{vl} = \frac{K(t_c - t)}{r + E}, \quad (3)$$

где r и E – удельные энергии парообразования и связи влаги с материалом, Дж/кг; t_c и t – температуры сушильного агента и влажного материала, °С; K – коэффициент теплообмена, Дж/(м²·К). Температура материала равна температуре мокрого термометра t_m , которая находится решением системы уравнений [2].

Если материал нерастворим в воде, то можно пренебречь энергией осмотически и физико-механически связанной влаги и приравнять энергию связи влаги с материалом к нулю, если материал растворим в воде, удельная энергия связи рассчитывается по эмпирической формуле [3].

Для аппроксимации скорости сушки во втором периоде наиболее часто используется [1] ее линейная зависимость от влагосодержания. Для построения прямой необходимо знать координаты двух точек. Первая из них – это равенство нулю скорости сушки при достижении равновесного влагосодержания – $[x_p, 0]$, вторая – равенство скоростей сушки для первого и второго периодов при влагосодержании материала, равном критическому – $\left[x_{kr}, \frac{K(t_c - t_m)}{r + E} \right]$, где x_p и x_{kr} – равновесное и критическое влагосодержание материала, кг/кг (однако чаще вместо критического влагосодержания берут точку x_{kr}^* , несколько отличающуюся от x_{kr} [1]).

Скорость сушки для второго периода рассчитывается по зависимости

$$v_{vl} = \frac{K(t_c - t_m)}{(r + E)(x_{kr} - x_p)} (x - x_p), \quad (4)$$

где x – влагосодержание материала, кг/кг.

* Работа выполнена под руководством канд. техн. наук, проф. К.В. Брянкина.

Теперь рассмотрим период прогрева (или охлаждения до температуры мокрого термометра, если материал был перегрет). В этом случае скорость сушки выше чем в первом периоде, если температура материала выше температуры мокрого термометра и ниже, если температура материала ниже температуры мокрого термометра. Принимаем следующую аппроксимацию, удовлетворяющую этим условиям:

$$v_{vl} = \frac{K(t_c - t)}{r + E} \left(\frac{t}{t_m} \right)^{k_1}. \quad (5)$$

Коэффициент k_1 определяется эмпирически.

Введение добавочного множителя $(t/t_m)^{k_1}$ в уравнение (4) повышает точность аппроксимации (среднее квадратичное отклонение от экспериментальных данных по температуре материала уменьшается с 4...7 до 2...4 °С).

Достоверность аппроксимации увеличивается при использовании значений температур, найденных из выражения $t_c - t$ при $t > t_m$ и $t_c - t_m$ при $t < t_m$. Тогда зависимости для аппроксимации скорости сушки будут выглядеть следующим образом:

$$v_{vl} = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{K(t_c - t)}{r + E} \left(\frac{t}{t_m} \right)^{k_1} & x \geq x_{kr} \\ \frac{K(t_c - t)}{(r + E)(x_{kr} - x_p)} (x - x_p) \left(\frac{t}{t_m} \right)^{k_1} & x < x_{kr} \end{array} \right. & t < t_m; \\ \left\{ \begin{array}{ll} \frac{K(t_c - t_m)}{r + E} \left(\frac{t}{t_m} \right)^{k_1} & x \geq x_{kr} \\ \frac{K(t_c - t_m)}{(r + E)(x_{kr} - x_p)} (x - x_p) \left(\frac{t}{t_m} \right)^{k_1} & x < x_{kr} \end{array} \right. & t \geq t_m. \end{cases} \quad (6)$$

Температура мокрого термометра является функцией температуры и влагосодержания сушильного агента $t_m = f(x_c, t_c)$ и определяется решением системы уравнений [2], с максимальными погрешностями аппроксимации $p_{нас}(t) - 5\%$; $c_c(t) - 1\%$; $c_{vp}(t) - 1\%$.

Равновесное влагосодержание определяется по предложенному в [4] уравнению политермы десорбции

$$x_p = k[-A \ln(1 - C\varphi)]^a \exp\left(-\frac{b}{t+273}\right), \quad (7)$$

где k, A, C, a, b – коэффициенты, характерные для конкретного материала; φ – относительная влажность воздуха, которая заменяется на его влагосодержание по формуле [1]:

$$\varphi = \frac{516,5 x_c}{p_{нас}(t) (500 x_c + 311)}. \quad (8)$$

Таким образом, равновесное влагосодержание воздуха выражаем функцией параметров процесса сушки $x_p = f(x_c, t)$.

Кривые температур материала, рассчитанные по зависимостям (6) представлены на рис. 1, кривые влагосодержаний – на рис. 2.

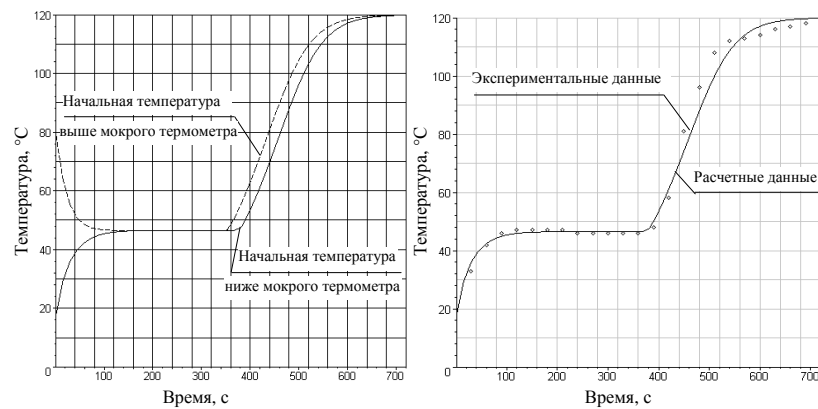


Рис. 1. Изменение температуры материала во времени

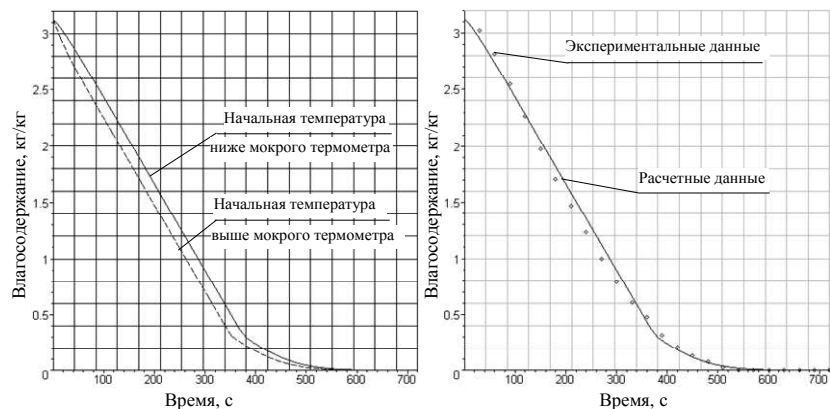


Рис. 2. Изменение влагосодержания материала во времени

Сравнение экспериментальных значений температуры и влагосодержания с рассчитанными данными, с использованием зависимости (6), показывает достаточную адекватность предложенной аппроксимации. Для кривых, приведенных на рис. 1 и 2, среднеквадратичное отклонение по температуре составило 3,13 °С, по влагосодержанию 0,0616 кг/кг. Максимальные ошибки по температуре и влагосодержанию составляли 8...10 %, и имели место в начале второго периода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов, В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. – Л. : Химия, 1987. – 208 с.
2. Фролов, В.Ф. Лекции по курсу ПАХТ / В.Ф. Фролов. – СПб. : Химиздат, 2003. – 608 с.
3. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – 2-е изд. – М. : Энергия, 1968. – 471 с.
4. Ефремов, Г.И. Макрокинетика процессов переноса / Г.И. Ефремов. – М. : Изд-во МГТУ, 2001. – 289 с.

Кафедра «Химические технологии органических веществ»