

КИНЕТИКА СУШКИ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕРИОДЕ ПАДАЮЩЕЙ СКОРОСТИ

Ольшанский А.И., Коваленко В.С.

Для практики сушки большой интерес представляют инженерные методы расчета кинетики сушки с использованием уравнений, содержащих минимальное количество постоянных, определяемых экспериментально. Причем более предпочтительным являются такие методы, которые основаны на наиболее обобщенных закономерностях процесса сушки, использующих как теорию так и практику сушки [1,2].

В [3,4] получены уравнения, позволяющие определять температуру материала в периоде падающей скорости сушки. Однако, при обобщении экспериментальных данных тепло, затраченное на нагрев материала (число Ребиндера), рассчитывалось для каждой области процесса по эмпирической формуле, а при интегрировании уравнения температурной кривой число Ребиндера принималось ступенчатой функцией. В реальных условиях сушки зависимость числа Ребиндера от влагосодержания непрерывная.

Запишем уравнение баланса энергии и влаги для периода убывающей скорости сушки

$$\bar{\alpha}(t_c - t_n)F = rm_0(d\bar{u} / d\tau) + (c_0 m_0 + c_b \bar{m}_b)(d\bar{t} / d\tau). \quad (1)$$

где $\bar{\alpha}$ - коэффициент теплообмена для периода падающей скорости, $\text{Вт}/\text{м}^2$ град;

t_c, t_n - температуры среды и поверхности материала, $^{\circ}\text{C}$;

F - поверхность материала, м^2 ;

r - теплота парообразования кДж/кг;

m_0, m_b - масса абсолютно сухого материала и воды, кг;

c_0, c_b - теплоемкости сухого материала и воды, кДж/кг град;

$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ - скорость сушки во втором периоде, $1/\text{с}$;

$d\bar{t} / d\tau$ - скорость изменения температуры материала, град/с.

Если учесть, что $\bar{m}_b = m_0 \bar{u}$, и воспользоваться соотношениями [5]:

$$\bar{Nu} / Nu_{kp} = \bar{\alpha} / \alpha_{kp} = (1 + Rb) \exp(0,57 \ln N^*);$$

$$(t_c - t_n) / (t_c - t_m) = \exp(0,43 \ln N^*)$$

уравнение (1) представляется в виде:

$$Fr \rho_0 R_v N (1 + Rb) N^* = rm_0(d\bar{u} / d\tau) + cm_0(d\bar{t} / d\tau). \quad (2)$$

где \bar{Nu}, Nu_{kp} - числа Нуссельта в периоде падающей и постоянной скорости сушки; Rb - число Ребиндера;

N^* - относительная скорость сушки;

ρ_0 - плотность абсолютно сухого тела, $\text{кг}/\text{м}^3$;

R_v - отношение объема абсолютно сухого тела к поверхности, м;

N - скорость сушки в первом периоде, $1/\text{с}$;

$q_1 = \alpha_{kp}(t_c - t_m) = r\rho_0 R_v N$ - плотность теплового потока в первом периоде, Вт/м²;

$c = c_0 + c_b \bar{u}$ - теплоемкость влажного материала, кДж/кг град;

α_{kp} - коэффициент теплообмена в периоде постоянной скорости, Вт/м² град;

t_m - температура мокрого термометра, °С.

Из определения числа Ребиндера имеем

$$d\bar{t} / d\tau = (r / c)Rb(d\bar{u} / d\tau). \quad (3)$$

Поэтому, учитывая равенства $\rho_0 R_v = \rho_0 V_0 / F = m_0 / F$, уравнение (2) принимает вид

$$N(1 + Rb)N^* = (1 + Rb)(d\bar{u} / d\tau) \text{ или } |d\bar{u} / d\tau| = N \cdot N^*.$$

Таким образом, скорость сушки в любой момент времени второго периода определяется по величине скорости сушки N в первом периоде и относительной скорости сушки N^* . Использование числа Ребиндера Rb и относительной скорости сушки N^* позволяет установить связь между теплообменом и влагообменом, а интенсивность теплообмена $q(\tau)$ определять по интенсивности влагообмена N^* , что дает возможность избежать определения коэффициентов теплообмена в периоде падающей скорости сушки.

Для определения температуры материала во втором периоде уравнение (2) с учетом (3) запишем в виде

$$d\bar{t} / d\tau = (r / c)NRbN^* \quad (5)$$

Следовательно, зная закономерности изменения N и Rb от влагосодержания \bar{u} во времени, можно определить интенсивность теплообмена и температуру материала во втором периоде сушки. Из метода обобщения кривых сушки [1,2] следует, что обобщенное время $N\tau$ и относительная скорость сушки N^* являются функциями влагосодержания \bar{u} , т.е.

$$\begin{aligned} N^* &= f_1(\bar{u}), \\ N\tau &= f_2(\bar{u}). \end{aligned} \quad \text{Отсюда } N^* = f(N\tau).$$

Анализ экспериментальных данных [2] для различных материалов независимо от метода энергоподвода показал, что зависимость $N^* = f(N\tau)$ целесообразно взять в виде:

$$N^* = -\exp(-aN\tau). \quad (6)$$

Обработка опытных данных по сушке целого ряда различных капиллярно-пористых материалов [6] позволила установить простое обобщенное соотношение для вычисления величины a в уравнении (6): $a = 8 \cdot 10^{-3} / \bar{u}_{kp}$.

Величина первого критического влагосодержания u по данным различных исследователей [1,2,6] для многих материалов практически не зависит от режимных параметров процесса сушки.

Зависимость числа Ребиндера от влагосодержания дается формулой:

$$Rb = A \exp(-n(\bar{u} - u_p)), \quad (7)$$

где u_p - равновесное влагосодержание материала.

В таблице 1 приведены значения постоянных A и n для некоторых материалов.

Таблица 1. Постоянные A и n в формуле (7)

| Материал | u_p | u_{kp} | Режим сушки | | | A | n |
|--|-------|----------|---------------------|------------|------------------|------|-----|
| | | | $t, ^\circ\text{C}$ | $\phi, \%$ | $V, \text{ м/с}$ | | |
| Войлок шерстяной ($\delta=8-18$ мм) | 0,10 | 0,75 | 90÷120 | 4÷5 | 3÷25 | 0,1 | 6,0 |
| Кожа подошвенная ($\delta=4,5$ мм) | 0,15 | 0,57 | 40÷60 | 15 | 3÷5 | 0,5 | 8,5 |
| Фетр ($\delta=4$ мм) | 0,10 | 0,40 | 50 | 24÷75 | 0,5÷1 | 0,1 | 10 |
| Ткани с сопловым двухсторонним об- дувом | 0,05 | 0,35 | 90÷120 | 4÷5 | 25 | 0,25 | 9,5 |

Используя соотношения для теплоты парообразования r и теплоемкости влажного материала c :

$$r = r_0 - r_1 \bar{t} \quad (\text{кДж/кг}), \quad c = c_0 + c_b \bar{u} \quad (\text{кДж/кг град}),$$

где $r_0 = 2500$ кДж/кг, $r_1 = 2,3$ кДж/кг град,

с учетом (6) и (7), получаем из (5) дифференциальное уравнение для температуры \bar{t} во втором периоде, как функции влагосодержания \bar{u} :

$$d\bar{t} / d\bar{u} = -(r_0 - r_1 \bar{t}) / (c_0 + c_b \bar{u}) A \exp(-n(\bar{u} - u_p)). \quad (8)$$

Разделяя переменные и интегрируя (8), находим уравнение температурной кривой

$$\bar{t}(\bar{u}) = r_0 / r_1 + (t_m - r_0 / r_1) \exp((r_1 / c_b) Rb_{kp} \exp(n(c_0 / c_b + \bar{u}_{kp})) \times \\ \times (E_1(n(c_0 / c_b + \bar{u}_{kp})) - E_1(n(c_0 / c_b + \bar{u}))). \quad (9)$$

где Rb_{kp} определяется по формуле (7) при

$$\bar{u} = u_{kp};$$

$$E_1(x) = \int_x^\infty (\exp(-t) / t) dt.$$

Время сушки в периоде падающей скорости получим интегрированием (4) с учетом (6) и условия $d\bar{u} / d\tau < 0$:

$$\tau = -(1 / aN) \ln(1 - a(u_{kp} - \bar{u})). \quad (10)$$

Учитывая, что $N = (u_0 - u_{kp}) / \tau_1$, обобщенное уравнение кривой сушки запишем в безразмерной форме

$$\tau / \tau_1 = 1 / (a(u_{kp} - u_0)) \ln(1 - a(u_{kp} - \bar{u})). \quad (11)$$

где u_0 - начальное влагосодержание материала, τ_1 - длительность первого периода.

Расчет зависимостей (9), (11) для различных материалов (пористая керамика, войлок, асбест, фетр, глина, подошвенная кожа) проводился на ЭВМ с использованием аппроксимаций функции $E_1(x)$ [7].

Для $0 < x \leq 1$

$$E_1(x) = -\ln x - 0.57721566 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 + e(x),$$

где $e(x) < 2 \cdot 10^{-7}$, $a_1 = 0.99999193$; $a_2 = -0.24991055$; $a_3 = 0.05519968$; $a_4 = -0.00976004$; $a_5 = 0.00107857$.

Для $1 \leq x < \infty$

$$\operatorname{erfc}(x) E_1(x) = (x^4 + a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4) / (x^4 + b_1 x^3 + b_2 x^2 + b_3 x + b_4) + e(x),$$

где $a_1 = 8.5733287401$; $a_2 = 18.0590169730$; $a_3 = 8.6347608925$; $a_4 = 0.2677737343$; $b_1 = 9.5733223454$; $b_2 = 25.6329561486$; $b_3 = 21.0996530827$; $b_4 = 3.9584969228$; $e(x) < 2 \cdot 10^{-8}$.

Результаты расчетов представлены на рис.1 для подошвенной кожи при конвективной сушке в условиях вынужденной конвекции в интервалах изменения $t_0 = 40-60^\circ\text{C}$, скорости воздуха $v = 3-5$ м/с, относительной влажности $\varphi = 15\%$, $u_p = 0,15$ в виде обобщенных зависимостей $\bar{t}/t_m = f_1(\bar{u}/u_{kp})$; $\tau/\tau_1 = f_2(\bar{u}/u_{kp})$.

Сравнение экспериментальных данных с расчетными по формулам (9), (11) показывает удовлетворительное совпадение результатов расчета для целого семейства кривых сушки и температурных кривых до равновесного влагосодержания (u_p).

ВЫВОДЫ

Аналитическое решение уравнения баланса энергии и влаги с привлечением обобщенных закономерностей кинетики сушки, основанных на опытных данных позволило получить новые формулы для важнейших параметров сушки. Такой подход к исследованию тепловлагообмена сближает теорию и практику сушки и позволяет указать наиболее прогрессивные методы анализа эксперимента, и обосновывает наиболее общие эмпирические зависимости. Результаты могут быть полезны при создании теории моделирования сушильных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 470с.
2. Красников В.В. Кондуктивная сушка. - М.: Энергия, 1973. - 288с.
3. Куц П.С., Ольшанский А.И., Шкляр В.Я. Обобщенное уравнение температурной кривой процесса конвективной сушки влажных материалов. - ИФЖ, т.57, N4, 1989. - с.627-631.
4. Шкляр Я.В., Ольшанский А.И., Шкляр В.Я. Расчет температуры материала в сушильных установках легкой промышленности. - Изв.вузов. Технология легкой промышленности, N1, 1986. - с.126-128.
5. Лыков А.В., Куц П.С., Ольшанский А.И. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов. - ИФЖ, т.23, N3, 1972с.401-406.
6. Ольшанский А.И., Куц П.С. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов. - Изв.вузов. Пищевая промышленность, N5, 1977. - с.97-101.
7. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. Под ред. М.Абрамовица и И.Стиган. - М.: Наука, 1979. - 832 с.