

ПРОМЫШЛЕННАЯ
ТЕПЛОТЕХНИКАНАУЧНО-
ПРИКЛАДНОЙ
ЖУРНАЛ

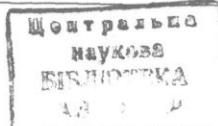
ТОМ 13 № 1 1991

Основан в сентябре 1979 г. Выходит 6 раз в год • Киев Наукова думка

СОДЕРЖАНИЕ

■ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫЕ
ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

Дыбан Е. П., Мазур А. И., Давыденко И. Г.	Теплообмен при взаимодействии системы струй с перфорированной поверхностью	3
Халатов А. А., Коваленко Г. В., Иконникова Е. Э.	Выбор оптимальных параметров системы теп- лообмена газоразрядной камеры	9
Кочубей А. А., Ракита Е. М., Рядно А. А.	Численное моделирование конвективного пе- реноса во вращающихся каналах сложного поперечного сечения методом конечных эле- ментов	16
Галицейский Б. М., Ложкин А. Л., Ушаков А. Н.	Экспериментальное определение коэффициен- та теплоотдачи в пористых материалах неста- ционарным методом	22
Антоненко В. А., Иваненко Г. В.	Особенности распространения паровой фазы внутри пористого покрытия при кипении жид- кости	28
Билека Б. Д., Кабков В. Я.	Применение локально-одномерного метода ре- шения уравнения теплопроводности для оп- ределения теплового состояния охлаждаемых дисков роторов	37
Тучинский Л. И., Векслер Е. М., Галанов Б. А., Переверзева А. А.	Расчет температурного поля конвективно-ох- лаждаемой многоканальной трубы в усло- виях наружного обогрева	43
Повстень С. Г., Тылтин А. А.	Акустическая диагностика процесса вскипа- ния капель воды в жидкометаллическом теп- лоносителе	48
Шилович И. Л., Безродный М. К., Панов Е. Н.	Определение степени заполнения термосифо- нов двухкомпонентным теплоносителем сера- йод	54



ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ (ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ)

УДК 66.021.3/4:66 047.001.24

Выскребцов В. Б., ЛИТВИНЕНКО А. М. РАСЧЕТ ТЕПЛОМАССООБМЕНА
ПРИ СУШКЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
МАТЕРИАЛОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ
СЛОЕ

Приведена математическая модель тепло- и массопереноса для кристаллических материалов в псевдоожигенном слое, процесс сушки которых протекает в основном в первом периоде. Выполнен расчет процесса сушки лимонной кислоты в псевдоожигенном слое на лабораторной установке непрерывного действия. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

Из значительного количества имеющихся в литературе методов расчета процессов конвективной сушки дисперсных материалов в псевдоожигенном слое наиболее характерными являются балансовый и графический [1, 2].

В монографии [3] представлен способ математического описания непрерывного процесса сушки дисперсных материалов, основанный на совместном анализе кинетики сушки и нагрева частиц влажного материала при различных внешних условиях и балансовых соотношениях по теплоте и количеству влаги в материале и в сушильном агенте (макрокинетический метод расчета). Основными упрощающими предположениями являются: полное перемешивание дисперсной фазы и режим полного вытеснения сушильного агента в пределах псевдоожигенного слоя. Применительно к процессу сушки некоторых кристаллических материалов химической, пищевой и других отраслей промышленности, содержащих слабо связанную с поверхностью материала воду, процесс обезвоживания которых заканчивается в основном в первом периоде [4], известна зависимость, определяющая конечную влажность высушиваемого материала [3]:

$$u_k = u_0 - k\tau_{cp} \left[1 - \exp \left(- \frac{u_0 - u_p}{k\tau_{cp}} \right) \right], \quad (1)$$

где

$$\tau_{cp} = \frac{SH(1-\varepsilon)\rho_m}{G} \quad (2)$$

среднее время пребывания высушиваемого материала в кипящем слое;

$$k = \frac{6\alpha f^{1.5}(\bar{t}_r - t_m)}{r\rho_m d} \quad (3)$$

коэффициент скорости сушки; u_k , u_0 и u_p — конечное, начальное и равновесное влагосодержание материала; S — площадь решетки сушилки; H — высота кипящего слоя; ε — порозность кипящего слоя; r — удельная теплота испарения влаги; ρ_m — плотность высушиваемого материала; G — расход высушиваемого материала; α — коэффициент теплоотдачи от сушильного агента к материалу; f — коэффициент фор-

© ВЫСКРЕБЦОВ В. Б., ЛИТВИНЕНКО А. М., 1991

мы частиц высушиваемого материала; d — приведенный размер частиц высушиваемого материала; $\bar{t}_r$ и t_m — средняя температура сушильного агента и материала.

Известна также зависимость, определяющая температуру высушиваемого материала [3]

$$t_m = t_r - (t_r - \bar{t}_r) \exp \left[\frac{u_p - u_0}{BH(\bar{t}_r - t_m)} \right]. \quad (4)$$

Здесь

$$B = \frac{6\alpha_f^{1.5} S (1 - \varepsilon)}{rGd},$$

t_r — температура мокрого термометра.

Преобразовав зависимость (1) с учетом (2) и (3), получим

$$u_0 - \bar{u}_k = BH(\bar{t}_r - t_m) \left\{ 1 - \exp \frac{u_p - u_0}{BH(\bar{t}_r - t_m)} \right\}. \quad (5)$$

Для замыкания системы уравнений (4) и (5), описывающей процесс сушки, предположим, что температура сушильного агента изменяется по высоте h кипящего слоя по экспоненциальному закону

$$t_r(h) - t_m = (t_o - t_m) e^{-\gamma h}, \quad t_r|_{h=0} = t_o, \quad (6)$$

где γ — параметр, численное значение которого подлежит определению. Тогда

$$\bar{t}_r - t_m = \frac{t_o - t_m}{\gamma H} [1 - \exp(-\gamma H)], \quad (7)$$

а конечная температура газа

$$t_{\text{гкон}} = (t_o - t_m) \exp(-\gamma H) + t_m. \quad (8)$$

Для определения параметра γ запишем уравнение теплового баланса слоя

$$Lc(t_o - t_{\text{гкон}}) = rG(u_0 - \bar{u}_k) + c_m G(t_m - t_{\text{ом}}), \quad (9)$$

где L — расход сушильного агента; c и c_m — удельные теплоемкости сушильного агента и материала. Отсюда, принимая во внимание (4), (5) и (8), нетрудно получить

$$\begin{aligned} & \frac{rGB}{Lc\gamma} \left\{ 1 - \exp \frac{(u_p - u_0)\gamma H}{BH(t_o - t_m)[1 - \exp(-\gamma H)]} \right\} + \\ & + \frac{Gc_m}{Lc} \frac{t_m - t_{\text{ом}}}{t_o - t_m} \frac{1}{1 - \exp(-\gamma H)} = 1. \end{aligned} \quad (10)$$

С учетом (7) из зависимости (4) получим

$$\begin{aligned} 1 = & \frac{t_r}{t_m} \left\{ 1 - \exp \frac{(u_p - u_0)\gamma H}{BH(t_o - t_m)[1 - \exp(-\gamma H)]} \right\} + \\ & + \left\{ 1 + \frac{t_o - t_m}{t_m \gamma H} [1 - \exp(-\gamma H)] \right\} \exp \frac{(u_p - u_0)\gamma}{B(t_o - t_m)[1 - \exp(-\gamma H)]}. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, получена система уравнений (10), (11), содержащая неизвестные параметры γ , t_m и u_p .

Последний параметр, как известно из литературных источников [5, 6] и в соответствии с нашими экспериментальными данными, зависит от относительной влажности сушильного агента φ в конце процесса сушки. Эту зависимость можно представить в общем виде как

$$\varphi = \varphi(u_p). \quad (12)$$

В свою очередь, связь между φ , влагосодержанием x и температурой t сушильного агента имеет вид [7]

$$\varphi = \frac{x}{0,004 \exp(0,062 \cdot t)} \quad (13)$$

Для определения равновесных значений влагосодержания и температуры используем уравнения материального баланса

$$G(u_o - u_p) = L(x_p - x_o)$$

и теплового (9), из которых нетрудно получить

$$x_p = \frac{G}{L}(u_o - u_p) + x_o, \quad (14)$$

$$t_p = \frac{Lct_o + Gc_m t_{om} - G(u_o - u_p)r}{Lc + Gc_m} \quad (15)$$

Подставив эти выражения в зависимость (13), получим

$$\varphi(u_p) = \frac{x_o + \frac{G}{L}(u_o - u_p)}{0,004 \exp\left(0,062 \frac{Lct_o + Gc_m t_{om} - G(u_o - u_p)r}{Lc + Gc_m}\right)} \quad (16)$$

Отсюда, используя конкретный вид зависимости (12) для исследуемого продукта, определим u_p . Далее нетрудно, воспользовавшись системой уравнений (10) и (11), вычислить значения параметра γ и температуры материала t_m в кипящем слое, а затем по уравнению (5) и конечную влажность материала на выходе из кипящего слоя.

Рассматривая систему (10), (11), нетрудно убедиться, что процесс сушки характеризуется тремя безразмерными комплексами

$$\frac{Gc_m(t_p - t_{om})}{Lc(t_o - t_p)}; \quad \frac{GBHr}{Lc}; \quad \frac{u_o - u_p}{BH(t_o - t_p)}$$

Здесь t_m заменена на близкое ей значение t_p , а параметр γ , имеющий размерность $1/m$, заменен на величину $1/H$.

Первый из приведенных комплексов определяет долю теплоты, затраченной на нагрев материала.

Второй комплекс после подстановки в него значения параметра B принимает вид

$$\frac{GBHr}{Lc} = \frac{6\alpha f^{1,5} S(1 - \varepsilon) H}{Lcd}$$

Этот параметр характеризует интенсивность процесса теплоотдачи и соответственно нагрева и сушки материала.

Третий комплекс после умножения на второй принимает вид

$$\frac{u_o - u_p}{BH(t_o - t_p)} = \frac{(u_o - u_p) Gr}{(t_o - t_p) Lc}$$

и определяет долю теплоты, затраченной на испарение влаги.

В качестве примера рассмотрим расчет процесса сушки лимонной кислоты в лабораторной сушилке кипящего слоя с мешалкой. Исходные значения параметров, используемые в расчете, соответствуют значениям этих параметров при экспериментальных исследованиях указанной сушилки: $H=0,2-0,3$ м; $S=1,075 \cdot 10^{-2}$ м²; $\rho_m=1540$ кг/м³; $d=0,374 \cdot 10^{-3}$ м; $L=59$ кг/ч; $G=9,0 \dots 14,0$ кг/ч; $u_o=0,014$ кг/кг; $t_o=40 \dots 60$ °С; $X_o=0,009$ кг/кг; $\varepsilon=0,59$; $f=1,31$. Коэффициент тепло-

отдачи от воздуха к кристаллам лимонной кислоты определяется по зависимости, рекомендуемой в монографии [8] для кристаллических продуктов. Теплота испарения влаги в соответствии с [9] принималась $r = 2,76 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Конкретный вид зависимости (12) определяется линейной аппроксимацией наших экспериментальных данных. При $\varphi \geq 0,20$

$$\varphi = 30u_p + 0,2.$$

В диапазоне $0 \leq \varphi \leq 0,20$ в соответствии с данными монографии [6] $u_p = 0$. В экспериментах значения параметров изменялись в следующих диапазонах:

$$0,45 \leq \frac{(u_o - u_p) Gr}{(t_o - t_p) Lc} \leq 0,65; \quad 40 \leq \frac{6\alpha^{1,5} S (1 - \varepsilon) H}{Lcd} \leq 62.$$

Определение влагосодержания лимонной кислоты производилось титрованием по ГОСТ 908—79, причем погрешность составляла $\pm 0,5 \cdot 10^{-3}$ кг/кг.

При $t_o = 41^\circ\text{C}$ расчетное значение $\bar{u}_k$ составило $6,0 \cdot 10^{-3}$ кг/кг, а экспериментальное — $5,2 \cdot 10^{-3}$ кг/кг.

При $t_o = 50^\circ\text{C}$ и $t_o = 60^\circ\text{C}$ расчетные и экспериментальные значения $\bar{u}_k$ составили соответственно $2,65 \cdot 10^{-3}$ и $2,5 \cdot 10^{-3}$; $0,0$ и $0,3 \cdot 10^{-3}$ кг/кг.

Сопоставив эти данные, можно сделать вывод об удовлетворительном согласовании расчетных и опытных значений конечной влажности.

SUMMARY. A mathematical model to calculate the processes of drying of crystalline materials in the fluidized layer is presented. The calculated data are compared with results of laboratory studies.

1. Митев Д. Т. Тепло- и массообмен дисперсных систем в аппаратах со взвешенным слоем. — Черкассы, 1978. — 127 с. Деп. в ОНИИТЭХИМ, № 1975—78.
2. Сушка в условиях пневмотранспорта / А. Н. Плановский, В. И. Муштаев, В. М. Ульянов, А. С. Тимонин. — М.: Химия, 1984. — 230 с.
3. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов. — Л.: Химия, 1987. — 208 с.
4. Определение параметров сушки пищевых кристаллических материалов / В. В. Манк, В. А. Михайлик, Л. А. Орлов, А. М. Литвиненко // Пищ. пром-сть. — 1986. — № 3. — С. 35—36.
5. Смирнов В. А. Пищевые кислоты (лимонная, молочная, винная). — М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1983. — 264 с.
6. Гинзбург А. С., Савина И. М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. — М.: Легкая и пищ. пром-сть, 1982. — 280 с.
7. Мазяк З. Ю. Тепломассообмен при конвективной сушке в непрерывно действующих аппаратах // Пром. теплотехника. — 1987. — 9, № 6. — С. 62—65.
8. Тодес О. М., Цитович О. Б. Аппараты с кипящим зернистым слоем. — Л.: Химия, 1981. — 296 с.
9. Кинетика сушки пищевых моногидратов / А. М. Литвиненко, В. В. Манк, Л. А. Орлов, В. А. Михайлик // Пром. теплотехника. — 1987. — 9, № 6. — С. 59—62.

Ин-т техн. теплофизики АН УССР, Киев
Киевский технологич. ин-т пищ. пром-сти

Получено 15.11.89