

УДК 66.047.57

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКОГО  
УРАВНЕНИЯ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛЬНОМ БАРАБАНЕ  
СО СМЕШАННЫМ РЕЖИМОМ ТЕРМООБРАБОТКИ, УЧИТЫВАЮЩЕЕ  
НАЧАЛЬНЫЙ И КОНЕЧНЫЙ ДИАМЕТР, ПЛОТНОСТЬ  
И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ ВЫСУШИВАЕМОГО МАТЕРИАЛА**

**Байтурсев А.М.***Республиканское государственное предприятие на праве хозяйственного ведения**«Таразский государственный университет имени М.Х. Дулати»**Министерства образования и науки Республики Казахстан, Тараз, e-mail: bam150348@mail.ru*

В результате математического моделирования и анализа исследований опытно-промышленных испытаний получено кинетическое уравнение процесса сушки сыпучих и дисперсных материалов в сушильных барабанах со смешанным режимом термообработки, учитывающее начальный и конечный диаметр, плотность и влагосодержание высушиваемого материала.

**Ключевые слова:** сушильный барабан, угол наклона, термообработка, прямоток, противоток, смешанный режим

**MATHEMATICAL MODELING AND GETTING OF THE KINETIC EQUATION  
OF THE DRYING PROCESS IN BARREL TYPE DRYER WITH MIXED REGIME  
OF HEAT TREATMENT TAKING INTO ACCOUNT INITIAL AND FINAL:  
DIAMETER, DENSITY AND HUMIDITY OF THE DRYING MATERIAL**

**Baytureev A.M.***The Republican state government enterprise «Taraz State University after M.H. Dulaty»**of the Ministry Science and Education of the Republic of Kazakhstan, Taraz, e-mail: bam150348@mail.ru*

As a result of mathematical modeling and analysis of the studies, industrial-experienced test, universal kinetic equation of the drying process of the grain materials in barrel type dryer with mixed regime of heat treatment, is received taking into account initial and final: diameter, density and humidity of the drying material.

**Keywords:** barrel type dryers, sloping corner, heat treatment, directflow, counterflow, mixed mode regime

Тепло- и массообменные процессы сушки в барабанных сушильных агрегатах широко представлены в различных производствах химической, нефтехимической, металлургической, легкой и пищевой промышленности Казахстана и стран СНГ. Они используются в качестве основного технологического оборудования для проведения процессов сушки сыпучих и дисперсных материалов. Широкий спектр областей применения тепло- и массообменных аппаратов показывает их доминирующую роль в вышеперечисленных отраслях промышленности, т.е. они определяют технико-экономические показатели производств.

Анализ показывает, что среди всего многообразия конструкций сушильных установок широкое распространение (более 80%) получили барабанные сушильные агрегаты. Такую популярность они имеют благодаря надежности в работе, простоте конструкции и эксплуатации. Барабанные сушилки универсальны, поскольку позволяют подвергать термообработке широкий спектр материалов, отличающихся как физическими свойствами, так и дисперсным составом (галит, измельченная древесина, семена подсолнечника, семена хлопчатника,

хлопок-сырец и др.). Они позволяют достичь равномерной влажности готового продукта и имеют высокую производительность при небольших рабочих объемах.

Сушка является одной из важнейших операций, определяющих не только качество готовой продукции, но и технико-экономические показатели производства в целом.

Так как процесс сушки является весьма энергоемким, то разработка высокоэффективных сушилок указанного типа и методов повышения их эффективности имеет важное экономическое значение.

Анализ литературных и патентных данных показывает, что на сегодняшний день при проектировании барабанных сушилок используются устаревшие данные и методы расчета. К тому же, на протяжении многих лет комплексных исследований, направленных на интенсификацию процессов тепло- и массообмена в них, практически не проводились, а результаты немногочисленных проведенных работ можно использовать только для решения узких задач, т.к. они связаны либо с конкретным материалом, либо с определенной конструкцией сушилки.

Однако в настоящее время отсутствует научно обоснованная методика расчета тепло- и массообменного процесса сушки, учитывающая особенности начального и конечного диаметра, плотности и влагосодержания материала.

Таким образом, разработка тепло- и массообменного процесса сушки в сушильных барабанах, учитывающая его начальный и конечный диаметр, плотность и влагосодержание материала, является актуальной задачей.

В процессе сушки сыпучих и дисперсных материалов в барабанных сушильных агрегатах с наклоном в сторону загрузки в качестве критерия оптимальности выбрана производительность по сухому продукту (1)–(4) [1]:

$$G = M\Pi(\rho_c \vartheta_c) D_6^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,425}, \quad (1)$$

$$G = \frac{1360\varphi^{0,34} L_6^{0,34} \cdot \left( \frac{\omega_k}{\omega_n \cdot (\omega_n - \omega_k)} \right)^{0,34} \cdot \left( \frac{n^2}{1800} \right)^{0,21} \cdot D_6^2 (\sin \alpha)^{0,4}}{A^{0,337} d_n^{0,526} \cdot (\rho_c \vartheta_c)^{0,139}} \times \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c \vartheta_c) \cdot D_6^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426}. \quad (5)$$

В формулах (1)–(5):

$G$  – производительность сушилки по сухому продукту, кг/ч;  $M$ ;  $A$  – коэффициенты;  $\Pi$  – температурный коэффициент;  $K$  – коэффициент влажности;  $t_{\text{вх}}$  – температура агента сушки на входе в барабан, °C;  $t_{\text{вых}}$  – температура сушильного агента на выходе из барабана, °C;  $\rho_c \vartheta_c$  – массовая скорость сушильного агента в барабане, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho_c$  – плотность газа (воздуха), кг/м<sup>3</sup>;  $\vartheta_c$  – скорость сушильного агента, м/с;  $D_6$  –

где

$$M = \frac{1360\varphi^{0,39} L_6^{0,39} K^{0,34} \cdot \left( \frac{n^2}{1800} \right)^a \cdot D^a \sin \alpha^b}{A^{0,34} d_n^{0,526} \cdot (\rho_c \vartheta_c)^{0,136}}; \quad (2)$$

$$K^{0,34} = \left[ \frac{\omega_k}{\omega_n (\omega_n - \omega_k)} \right]^{0,34}; \quad (3)$$

$$\Pi = \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}}. \quad (4)$$

В результате опытно-промышленных испытаний сушильного барабана со смешанным режимом термообработки [2] и математической обработки экспериментальных данных получено кинетическое уравнение процесса сушки дисперсных материалов (галита) в сушильном барабане со смешанным режимом термообработки [3]:

диаметр барабана, м;  $\varphi$  – коэффициент заполнения барабана, %;  $L_6$  – длина барабана, м;  $\omega_n$  и  $\omega_k$  – начальная и конечная влажность материала, %;  $n$  – частота вращения барабана, об/мин;  $\alpha$  – угол наклона барабана, град;  $d_n$  – начальный средний эквивалентный диаметр частицы (определяется по фракционному составу при просеивании), м.

Коэффициент заполнения барабана –  $\varphi$  определяем по формуле (6) [3]:

$$\varphi = \left[ (220 - 30,3\rho_c \vartheta_c - 57\alpha - 15,7\alpha\rho_c \vartheta_c) \ln(28,8 - 4\alpha) - 62\rho_c \vartheta_c n + 6,46\alpha\rho_c \vartheta_c + 97,8\alpha \cdot n + 3,12n\rho_c \vartheta_c - 127\alpha \cdot t_{\text{вх}} + 4,5\alpha - 12,5\rho_c \vartheta_c - 44,4n + 0,21 \cdot t_{\text{вх}} - 8,6 \right] \cdot 0,001. \quad (6)$$

Однако вышеуказанное уравнение (5) не учитывает изменения диаметра, плотности и влагосодержания материала в процессе сушки.

Плотность частиц дисперсного материала определяется массой в единице объема частицы [4]:

$$\rho_m = G_m / V_m. \quad (7)$$

Плотность твердой фазы в материале (скелета тела) определяется отношением массы сухого вещества (твердой фазы) к объему, занимаемому сухим веществом [4]:

$$\rho_T = G_T / V_T. \quad (8)$$

Плотность  $\rho_T$  называют также плотностью скелета тела, а иногда – истинной плотностью.

Важными характеристиками состояния дисперсных систем является относительная пористость частиц  $\varepsilon_m$  и пористость неподвижного слоя  $\varepsilon_0$ . С помощью этих параметров можно установить связь между плотностями дисперсных систем.

Таким образом, критическую плотность материала [4]

$$\rho_{\text{м.кр}} = \rho_T (1 - \varepsilon_m) + \rho_{\text{ж}} \varepsilon_m \quad (9)$$

можно рассчитывать по плотностям твердой и жидкой фаз, пользуясь принципом аддитивности.

В момент образования агломерата составляющие частички стремятся к максимально

плотной упаковке, что обусловлено стремлением системы к уменьшению свободной энергии [5]. При правильной гексагональной укладке сферических монодисперсных частиц в агломерате относительная пористость ( $\epsilon_m$ ) достигает 0,2595 [4]. Для полидисперсных сферических частиц относительная пористость  $\epsilon_m$  может достигать 0,15–0,2, для частиц неправильной формы относительная пористость  $\epsilon_m \approx 0,4$  [4].

При изменении состояния частицы от суспензии (капли) до агломерата (твердой частицы) размер ее изменяется в соответствии с плотностью и влагосодержанием (влажностью). При этом конечный размер частицы ( $d_k$ ) ограничен критическим влагосодержанием ( $C_{кр}$ ). Если частицы суспензии способны деформироваться, то плотность и размер агломератов будут изменяться и после достижения критической влажности. Иногда аномальные изменения наблюдаются и на более ранних стадиях. Например, при сушке некоторых коллоидных растворов и латексов плотность вторичных образований уменьшается, а размеры увеличиваются. Это может быть следствием внутреннего парообразования и формирования полых структур [5].

Конечное значение плотности материала ( $\rho_k$ ) при известной начальной плотности ( $\rho_n$ ) определяется выражением (10) [4]:

$$\rho_k = \rho_n \left( \frac{d_n}{d_k} \right)^3 \left( \frac{1+C_k}{1+C_n} \right), \quad (10)$$

где  $\rho_n$  – начальная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_k$  – конечная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $d_n$  – начальный диаметр частицы, м;  $d_k$  – конечный диаметр частицы после сушки, м;  $C_n$  – начальное влагосодержание материала;  $C_k$  – конечное влагосодержание материала.

Преобразуем выражение (10) относительно начального диаметра частицы  $d_n$ :

$$\left( \frac{d_n}{d_k} \right)^3 = \frac{\rho_k}{\rho_n} \left( \frac{1+C_n}{1+C_k} \right); \quad (11)$$

$$\frac{d_n^3}{d_k^3} = \frac{\rho_k}{\rho_n} \left( \frac{1+C_n}{1+C_k} \right); \quad (12)$$

$$d_n^3 = d_k^3 \cdot \frac{\rho_k}{\rho_n} \left( \frac{1+C_n}{1+C_k} \right); \quad (13)$$

$$d_n = d_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k}{\rho_n} \cdot \frac{(1+C_n)}{(1+C_k)}}. \quad (14)$$

Если влажность материала ( $\omega$ ) задана в процентах от общей его массы, то начальное и конечное влагосодержание целесообразно пересчитать по формулам (15), (16) [4]:

$$C_n = \frac{\omega_n}{100 - \omega_n}; \quad (15)$$

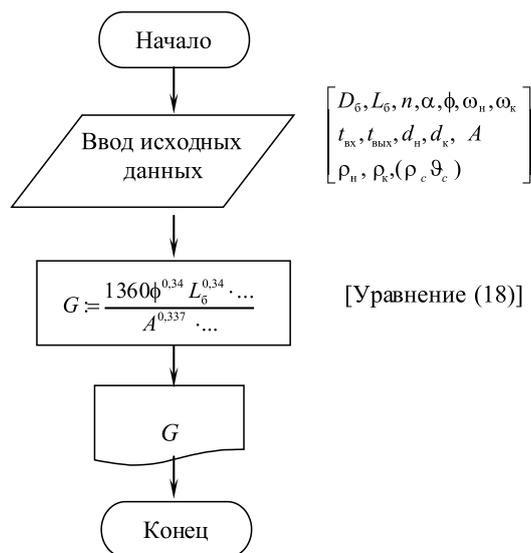
$$C_k = \frac{\omega_k}{100 - \omega_k}. \quad (16)$$

Выразив начальное и конечное влагосодержание  $C_n$  и  $C_k$  через начальную и конечную влажности  $\omega_n$  и  $\omega_k$  согласно выражениям (15), (16), получим

$$d_n = d_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k}{\rho_n} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{\omega_n}{100 - \omega_n} \right)}{\left( 1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k} \right)}}. \quad (17)$$

В результате преобразования кинетического уравнения (5), т.е. поставив значение начального диаметра  $d_n$  (17) и математической обработки с помощью персонального компьютера (ПК) и применения новых инновационных технологий согласно разработанной блок-схеме (рисунок), получено универсальное кинетическое уравнение процесса сушки сыпучих и дисперсных материалов в сушильном барабане со смешанным режимом термообработки (18), учитывающее начальный и конечный диаметр, плотность и влагосодержание высушиваемого материала:

$$G = \frac{1360\phi^{0,34} L_6^{0,34} \cdot \left( \frac{\omega_k}{\omega_n \cdot (\omega_n - \omega_k)} \right)^{0,34} \left( \frac{n^2}{1800} \right)^{0,21} \cdot D_6^2 (\sin \alpha)^{0,4}}{A^{0,337n} \left( d_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k}{\rho_n} \cdot \frac{\left( 1 + \frac{\omega_n}{100 - \omega_n} \right)}{\left( 1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k} \right)}} \right)^{0,526}} \cdot (\rho_c \vartheta_c)^{0,139} \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c \vartheta_c) \cdot D_6^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426}. \quad (18)$$



Блок-схема алгоритма расчета процесса сушки сыпучих и дисперсных материалов в сушильном барабане со смешанным режимом термообработки

Уравнение (18) справедливо только для сушильных барабанов, установленных с наклоном в сторону загрузки.

В результате математического моделирования и анализа исследований опытно-промышленных испытаний получено кинетическое уравнение процесса сушки сыпучих и дисперсных материалов в сушильном барабане со смешанным режимом термообработки, учитывающее начальный и конечный диаметры, плотность и влагосодержание высушиваемого материала.

#### Список литературы

1. Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. – М.: Лесная промышленность. – 1977. – 383 с.
2. Байтуреев А.М., Турдалиев Т.Т., Байтуреев С.А., Турдалиев Б.Т. Способ сушки сыпучих и зернистых материалов // Инновационный патент Республики Казахстан № 27779. 2013. Бюл. № 12.
3. Байтуреев А.М. Математическое моделирование и получение критериального уравнения процесса сушки

дисперсных материалов в барабанной сушилке со смешанным режимом термообработки // Химия и химическая технология. Ташкент. – 2009. – № 2(24). – С. 69–71.

4. Плановский А.Н., Муштаев В.И., Ульянов В.М. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности. – М.: Химия. – 1978. – 288 с.

5. Ульянов В.М., Овчинников Ю.В. Коллоидный журнал. – 1971. – Т. 33, № 5. – С. 757–763.

#### References

1. Sterlin D.M. Sushka v proizvodstve fanery i drevestruzhnykh плит. M.: Lesnaja promyshlennost'. 1977. 383 p.
2. Bajtureev A.M., Turdaliev T.T., Bajtureev S.A., Turdaliev B.T. Sposob sushki sypuchih i zernistyh materialov // Innovacionnyj patent Respubliki Kazahstan no. 27779. 2013. Bjul. no. 12.
3. Bajtureev A.M. Matematicheskoe modelirovanie i poluchenie kriterial'nogo uravnenija processa sushki dispersnyh materialov v barabannoj sushilke so smeshannym rezhimom termoobrabotki // Himija i himicheskaja tehnologija. Tashkent. 2009. no. 2(24). pp. 69–71.
4. Planovskij A.N., Mushtaev V.I., Ul'janov V.M. Sushka dispersnyh materialov v himicheskoj promyshlennosti. M.: Himija. 1978. 288 pp.
5. Ul'janov V.M., Ovchinnikov Ju.V. Kolloidnyj zhurnal. 1971. T. 33, no. 5. pp. 757–763.