

*A. M. БАЙТУРЕЕВ*

(Таразский государственный университет им. М. Х. Дулати, Тараз, Казахстан)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУШКИ В СУШИЛЬНЫХ БАРАБАНАХ СО СМЕШАННЫМ РЕЖИМОМ ТЕРМООБРАБОТКИ С УЧЕТОМ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА МАТЕРИАЛА НА ВЫХОДЕ ИЗ СУШИЛКИ

**Аннотация.** 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, позволяющее рассчитать конечный средний эквивалентный диаметр частицы ( $d_k$ ) на выходе из барабана.

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

**Тірек сөздер:** барабанды кептіргіш, фракциялық құрамы, еңкіш бұрыш, термоөндөу, тұра ағыс, қарама-карсы ағыс, аралас режим.

**Keywords:** barrel type dryers, factious composition, slopping corner, heat treatment, forward blow, counter-blow, mixed regime.

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

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

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

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

Таким образом, разработка тепло- и массообменного процесса сушки в сушильных барабанах, учитывающая его начальный и конечный диаметр материала, является актуальной задачей [2].

$$G = \frac{1360 \cdot \varphi^{0,34} L_6^{0,34} \cdot \left( \frac{\omega_k}{\omega_h \cdot (\omega_h - \omega_k)} \right)^{0,34} \left( \frac{n^2}{1800} \right)^{0,21} \cdot D_6^2 \cdot (\sin \alpha)^{0,4}}{A^{0,237} \cdot d_h \cdot (\rho_c g_c)^{0,139}} \times \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c g_c) D_6^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426} \quad (1)$$

где [1]

$$M = \frac{1360 \varphi^{0,39} L_6^{0,39} K^{0,34} \cdot \left( \frac{n^2}{1800} \right)^a \cdot D^{a_1} \sin \alpha^{b_1}}{A^{0,34} d_h^{0,526} \cdot (\rho_c g_c)^{0,136}} \quad (2)$$

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

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

Начальный средний эквивалентный диаметр частицы –  $d_n$  равен [3]:

$$d_n = d_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k \cdot \left(1 + \frac{\omega_h}{100 - \omega_h}\right)}{\rho_h \cdot \left(1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k}\right)}} \quad (5)$$

В формулах (1-4):  $G$  – производительность сушилки по сухому продукту, кг/ч; 1360,  $A$  – коэффициенты;  $\Pi$  – температурный коэффициент;  $K$  – коэффициент влажности;  $t_{\text{вх}}$  – температура агента сушики на входе в барабан, °С;  $t_{\text{вых}}$  – температура сушильного агента на выходе из барабана, °С;  $\rho_c \vartheta_c$  – 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;  $D_b$  – диаметр барабана, м;  $\varphi$  – коэффициент заполнения барабана, %;  $L_b$  – длина барабана, м;  $\omega_i$  и  $\omega_e$  – начальная и конечная влажность материала, %;  $n$  – частота вращения барабана, об/мин;  $\alpha$  – угол наклона барабана, град;  $d_n$  – начальный средний эквивалентный диаметр частицы;  $d_k$  – конечный средний эквивалентный диаметр частицы.

Коэффициент заполнения барабана –  $\varphi$  определяем по формуле (4) [2]:

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

Подставив значение уравнения (5) в уравнение (1), получим:

$$G = \frac{1360\varphi^{0,34} L_b^{0,34} \cdot \left(\frac{\omega_k}{\omega_h \cdot (\omega_h - \omega_k)}\right)^{0,34} \left(\frac{n^2}{1800}\right)^{0,21} \cdot D_b^2 (\sin \alpha)^{0,4}}{A^{0,237} \cdot \left(d_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k \cdot \left(1 + \frac{\omega_h}{100 - \omega_h}\right)}{\rho_h \cdot \left(1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k}\right)}} \cdot (\rho_c \vartheta_c)^{0,139}\right)^{0,526}} \cdot \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c \vartheta_c) \cdot D_b^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426}. \quad (7)$$

Преобразовав уравнение (7) относительно конечного среднего эквивалентного диаметра частицы –  $d_k$ , получим:

$$\begin{aligned} & \left(d_k \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k \cdot \left(1 + \frac{\omega_h}{100 - \omega_h}\right)}{\rho_h \cdot \left(1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k}\right)}}\right)^{0,526} = \frac{1360\varphi^{0,34} L_b^{0,34} \cdot \left(\frac{\omega_k}{\omega_h \cdot (\omega_h - \omega_k)}\right)^{0,34} \left(\frac{n^2}{1800}\right)^{0,21} \cdot D_b^2 (\sin \alpha)^{0,4}}{G \cdot A^{0,237} (\rho_c \vartheta_c)^{0,139}} \times \\ & \times \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c \vartheta_c) \cdot D_b^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426}. \end{aligned} \quad (8)$$

Решим уравнение (8) относительно конечного среднего эквивалентного диаметра частицы –  $d_k$ :

$$\begin{aligned}
& d_k^{0,526} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k}{\rho_h} \cdot \frac{1 + \frac{\omega_h}{100 - \omega_h}}{1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k}}}^{0,526} = \\
& = \frac{1360 \varphi^{0,34} L_6^{0,34} \cdot \left( \frac{\omega_k}{\omega_h \cdot (\omega_h - \omega_k)} \right)^{0,34} \left( \frac{n^2}{1800} \right)^{0,21} \cdot D_\delta^2 (\sin \alpha)^{0,4}}{G \cdot A^{0,237} \cdot (\rho_c g_c)^{0,139}} \times \\
& \quad \times \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c g_c) \cdot D_\delta^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426}. \tag{9}
\end{aligned}$$

Отсюда

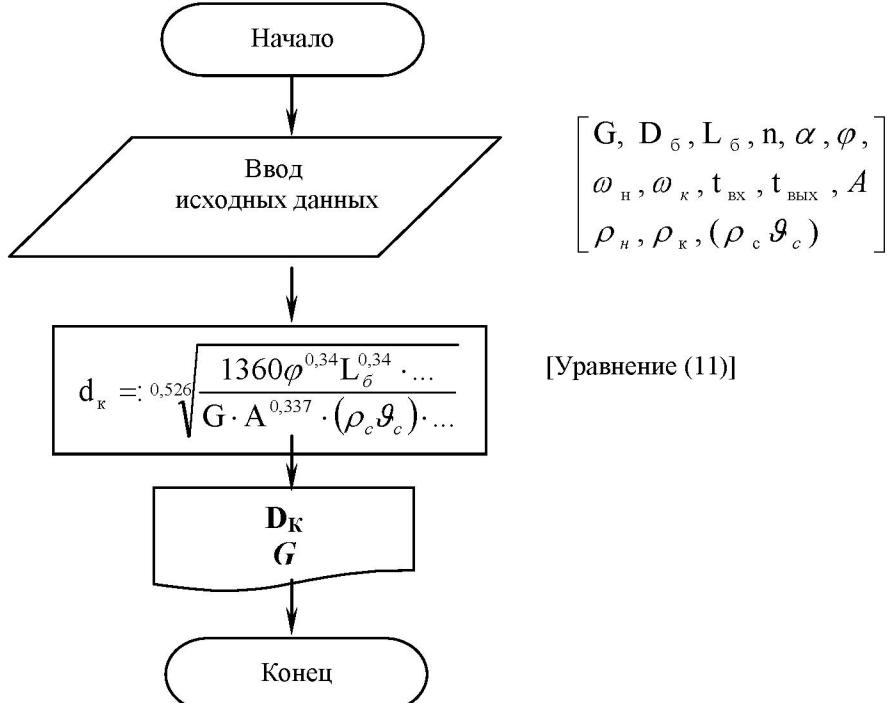
$$\begin{aligned}
d_k^{0,526} &= \frac{1360 \cdot \varphi^{0,34} L_6^{0,34} \cdot \left( \frac{\omega_k}{\omega_h \cdot (\omega_h - \omega_k)} \right)^{0,34} \left( \frac{n^2}{1800} \right)^{0,21} \cdot D_\delta^2 \cdot (\sin \alpha)^{0,4}}{G \cdot A^{0,237} \cdot (\rho_c g_c)^{0,139} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k}{\rho_h} \cdot \frac{1 + \frac{\omega_h}{100 - \omega_h}}{1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k}}}}^{0,526} \times \\
& \quad \times \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c g_c) D_\delta^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426}. \tag{10}
\end{aligned}$$

Тогда конечный средний эквивалентный диаметр частицы –  $d_k$  равен:

$$\begin{aligned}
d_k &= \sqrt[0,526]{\frac{1360 \cdot \varphi^{0,34} L_6^{0,34} \cdot \left( \frac{\omega_k}{\omega_h \cdot (\omega_h - \omega_k)} \right)^{0,34} \left( \frac{n^2}{1800} \right)^{0,21} \cdot D_\delta^2 \cdot (\sin \alpha)^{0,4}}{G \cdot A^{0,237} \cdot (\rho_c g_c)^{0,139} \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_k}{\rho_h} \cdot \frac{1 + \frac{\omega_h}{100 - \omega_h}}{1 + \frac{\omega_k}{100 - \omega_k}}}}}^{0,526} \times \\
& \quad \times \sqrt{\frac{t_{\text{вых}} - 30}{t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}} + 10}} \cdot (\rho_c g_c) D_\delta^2 \cdot t_{\text{вх}}^{0,426}. \tag{11}
\end{aligned}$$

В результате математической обработки получено кинетическое уравнение процесса сушки сыпучих и дисперсных материалов (11) в сушильных барабанах со смешанным режимом термообработки, позволяющее рассчитать конечный средний эквивалентный диаметр частицы ( $d_k$ ) на выходе из барабана, и разработана блок-схема вычисления.

Блок-схема:



Алгоритм вычисления конечного среднего эквивалентного диаметра частицы ( $d_k$ ) на выходе из барабана

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанеры и древесностружечных плит. – М.: Лесная промышленность, 1977. – 383 с.
- 2 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.
- 3 Байтуреев А.М. Математическое моделирование и получение универсального кинетического уравнения процесса сушки в сушильных барабанах со смешанным режимом термообработки, учитывающее начальный и конечный диаметр, плотность и влагосодержание высушиваемого материала // Вестник НАН РК. – 2013. – № 5. – С. 59-63.

#### REFERENCES

- 1 Sterlin D.M. Sushka v proizvodstve fanery i drevesnostruzhechnykh plit. M.: Lesnaja promyshlennost', 1977. 383 s.
- 2 Baitureyev A. M. Matematicheskoe modelirovaniye i poluchenie kriterial'nogo uravnenija processa sushki dispersnyh materialov v barabannoj sushilke so smeshannym rezhimom termoobrabotki. Himija i himicheskaja tehnologija. Tashkent, 2009. N 2(24). S. 69-71.
- 3 Baitureyev A.M. Matematicheskoe modelirovaniye i poluchenie universal'nogo kineticheskogo uravnenija processa sushki v sushil'nyh barabanh so smeshannym rezhimom termoobrabotki, uchityvajushhee nachal'nyj i konechnyj: diametr, plotnost' i vlagosoderzhanie vysushivayemogo materiala. Vestnik NAN RK. Almaty, 2013. N 5. S. 59-63.

#### Резюме

A. M. Байтуреев

(М. Х. Дулати атындағы Тараз мемлекеттік университеті, Тараз, Қазақстан)

КЕПТИРГІШТЕРДЕҢ ШЫҒАРДАҒЫ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ФРАКЦИЯЛЫҚ ҚҰРАМЫН ЕСКЕРПП  
АРАЛАС РЕЖИМДЕ ТЕРМОӨҢДЕЙТІН КЕПТИРГІШ БАРАБАНДАРДА  
КЕПТИРУ ҮРДІСІН МАТЕМАТИКАЛЫҚ ҮЛГІЛЕУ

Аралас режимде термоөңдейтін кептіргіш барабандарда сусымалы және шашыранды материалдарды кептіруді математикалық өндөу нәтижесінде барабаннан шығардағы бөлшектердің соңғы орташа эквивалентті диаметрін ( $d_c$ ) есептеуге мүмкіндік беретін кептіру үрдісінің кинетикалық тендеуі алынды.

**Тірек сөздер:** барабанды кептіргіш, фракциялық құрамы, еңкіш бұрыш, термоөңдеу, тұра ағыс, қарама-қарсы ағыс, аралас режим.

## Summary

*A. M. Baitureyev*

(M. Kh. Dulaty Taraz state University, Taraz, Kazakhstan)

### MATHEMATICAL MODELING OF THE DRYING PROCESS IN BARREL TYPE DRYER WITH MIXED REGIME OF HEAT TREATMENT TING INTO ACCOUNT FACTIOUS COMPOSITION OF THE MATERIAL AT THE DRYER OUTPUT

As a result of mathematical processing kinetic equation of the drying process of loose and disperse material in barrel type dryer heat treatment that allow to calculate final average equivalent diameter of the particle ( $d_{\text{out}}$ ) at the dryer output.

**Keywords:** barrel type dryers, factious composition, slopping corner, heat treatment, forward blow, counter-blow, mixed regime.