

УДК: 519.876.2

МЕХАНИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ
ХВОЙНО-ВИТАМИННОЙ МУКИ В ПНЕВМО-БАРАБАНЫХ СУШИЛКАХ

А. А. Веневитин, С. С. Веневитина

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова»

e-mail: vrcn56@yandex.ru

Сушка частиц влажного растительного материала, находящегося в объеме сушильного барабана происходит в основном путем конвекции, то есть при непосредственном соприкосновении поверхности частиц материала с сушильным агентом. Вращение сушильного барабана вокруг продольной оси и движение сушильного агента внутри него обеспечивают чередование циклов интенсивного теплообмена между частицами материала и теплоносителем и циклов относительного спокойствия частиц, когда теплообмен практически отсутствует. На длительность циклов, совокупность которых составляет время сушки, оказывают влияние конструктивные особенности сушильного агрегата, режимные параметры и индивидуальные свойства сушеного материала. Для выявления основных закономерностей движения частиц влажного материала по сушильному тракту рассмотрим процесс сушки с точки зрения механики, воспользовавшись при этом некоторыми положениями работы [1].

На движущуюся внутри барабана частицу сушеного материала действует сила тяжести F_T и сила напора сушильного агента F_H , направленная параллельно потоку. В результате этого частица переносится на расстояние S , описывая криволинейную траекторию.

На основании второго закона Ньютона, уравнения движения частицы имеет вид:

$$F_x = m \frac{d^2x}{d\tau^2} = m \frac{dv_x}{dt}, \quad (1)$$

$$F_z + mg = m \frac{d^2z}{d\tau^2} = m \frac{dv_z}{dt}, \quad (2)$$

где F_x – сила сопротивления движению частицы в продольном направлении (ось X), кг · м / с²; F_z – сила сопротивления движению частицы в поперечном направлении (ось Z), кг · м / с²; m – масса частицы, кг; v – скорость частицы, м / с; g –

ускорение свободного падения, м / с².

С целью учета аэродинамических условий протекания процесса сушки, обусловленного эффектом витания частиц материала, воспользуемся формулой для определения скорости витания:

$$v_k = \sqrt{\frac{m}{k\rho F_M}}, \quad (3)$$

где v_k – скорость витания частицы, м / с; k – коэффициент лобового сопротивления; ρ – плотность сушильного агента, кг / м³; F_M – Миделево сечение, м².

Значение критерия Рейнольдса, определяющего аэродинамические свойства потока при движении в трубах, для пневмо-барабанных сушилок находится в области критического значения $Re = 2300$. Таким образом, можно предположить, что движение частицы происходит в турбулентном потоке, тогда с учетом коэффициента λ :

$$F_x = \lambda(v_a - v)^2, \quad (4)$$

где v_a – скорость сушильного агента, м / с; v – скорость частицы, м / с;

а сила тяжести частицы:

$$mg = \lambda v_k^2. \quad (5)$$

Выразив из (5) массу частицы и приравняв правые части уравнений (1) и (4), получим уравнение движения частицы в потоке теплоносителя:

$$\frac{v_k^2}{g} \cdot \frac{dv}{dt} = (v_a - v)^2. \quad (6)$$

Для решения дифференциального уравнения (6) разделим переменные

$$\frac{dv}{(v_a - v)^2} = \frac{g}{v_k^2} dt,$$

и проинтегрируем полученное уравнение:

$$-\frac{1}{v - v_a} + C = \frac{g}{v_k^2} (t - t_0). \quad (7)$$

При начальных условиях $v(0) = 0$, $t(0) = t_0$ найдем произвольную постоянную C :

$$C = -\frac{1}{v_a}.$$

Подставим значение C в уравнение (7) и решая его относительно v , получим

$$v = v_a - \frac{1}{v_a^{-1} + \frac{g}{v_k^2}(t - t_0)} = \frac{dx}{dt}. \quad (8)$$

Обозначив величину $t - t_0 = \tau$ (где τ время падения частицы) и проинтегрировав уравнение (8), получим формулу для определения пройденного частицей пути вдоль оси барабана при падении с высоты h_0 :

$$x(\tau) \equiv s = v_a \tau - \frac{v_k^2}{g} \ln \left[v_a^{-1} + \frac{g}{v_k^2} \cdot \tau \right] + s_0, \quad (9)$$

где $s_0 = \frac{v_k}{g} \ln v_a^{-1}$.

Для нахождения времени падения частицы τ составим уравнение движения частицы по оси z . С учетом аэродинамического коэффициента λ

$$F_z = -\lambda v_k^2. \quad (10)$$

Подставив уравнение (10) в (2), получим

$$\frac{dv_z}{dt} = g - \frac{\lambda}{m} \cdot v_k^2. \quad (11)$$

Решим уравнение (11) при начальных условиях $z(0) = -h_0$, $v_z(0) = 0$, $t = t_0$. Разделим переменные

$$\frac{dv}{g - \frac{\lambda}{m} v_k^2} = dt,$$

и интегрируя это равенство, находим

$$\frac{1}{2\sqrt{g\frac{\lambda}{m}}} \ln \frac{\sqrt{g} + \sqrt{\frac{\lambda}{m}}v}{\sqrt{g} - \sqrt{\frac{\lambda}{m}}v} = t - t_0.$$

Отсюда получаем общее решение

$$v = v_k \cdot \frac{e^{\frac{2g(t-t_0)}{v_k}} - 1}{e^{\frac{2g(t-t_0)}{v_k}} + 1} = \frac{dz}{dt}.$$

Интегрируя полученное равенство, находим

$$z(t) = -h_0 + \frac{g}{\alpha} \ln [ch(\alpha(t-t_0))]. \quad (12)$$

Время падения $\tau_{пад}$ есть решение уравнения (12) при $z(\tau) = 0$:

$$\tau_{пад} = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{\alpha h_0}{e^g} + \sqrt{e^{\frac{2\alpha^2 h_0}{g}}} \right\}, \quad (13)$$

где $\alpha = \frac{g}{v_k}$.

Частица, при движении по сушильному тракту совершает несколько циклов падения и отлежки. Число полных циклов определяется формулой

$$N = \frac{L}{S},$$

где L – длина сушильного тракта, м; S – путь, пройденный частицей при падении с высоты h_0 , м.

Время полного цикла $\tau_{ц}$ равно

$$\tau_{ц} = \tau_{пад} + \tau_{отл}. \quad (14)$$

Время отлежки частицы $\tau_{отл}$ на внутренней поверхности барабана

$$\tau_{отл} = \frac{\theta}{\omega_{\sigma}}, \quad (15)$$

где θ – угол поворота барабана, при котором частица лежит на его поверхности, рад; ω_{σ} – скорость вращения барабана, рад/с.

Зная величины L , S и $\tau_{ц}$, можно определить время прохода частицей сушильного тракта, или продолжительность сушки τ_c :

$$\tau_c = \tau_{ц} \cdot \frac{L}{S}.$$

Подставляя в это равенство формулы (9), (13), (14) и (15), получим в окончательном виде

$$\tau_c = \frac{\left(\tau_{над} + \frac{\theta}{\omega} \right) L}{v_a \tau_{над} - \frac{v_k^2}{g} \ln \left[\frac{1}{v_a} + \frac{g}{v_k^2} \tau_{над} \right] + \frac{v_k}{g} \ln \frac{1}{v_a}}, \quad (16)$$

где $\tau_{над}$ определяется по формуле (13).

Уравнение (16) учитывает влияние конструктивных особенностей барабана, таких как L , θ , h_0 , режимных ω_{σ} , v_a и индивидуальных свойств сушимого материала v_k .

Так как реально, по барабану движется поток частиц сушимого материала, а при выводе формулы (16) рассматривалось движение только одной частицы, то на основании принципа квазисуперпозиции [2], можно заключить, что τ_c есть среднее время пребывания материала в объеме барабана или время сушки.

Библиографический список

- 1 Валушис, В. М. Основы высокотемпературной сушки кормов [Текст] / В. М. Валушис. – М. : Колос, 1977. – 139 с.
- 2 Яворский, Б. М. Справочник по физике [Текст] / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1977. – 917 с.