

РАСЧЕТ СКОРОСТИ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ С ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УСЛОВИЙ ЕЕ НАХОЖДЕНИЯ ПРИ ВАКУУМНО-ТЕПЛОВОЙ СУШКЕ

В.А. Захаренко, П.Л. Пахомов, Ю.Р. Князев, А.Н. Богдан

*Харьковская государственная академия технологии и организации питания,
г. Харьков, ул. Клочковская, 333*

Теоретичне та експериментальне дослідження кінетики випарювання вільної води з поверхні та її конденсації при порядку зовнішнього тиску 7,6...280 мм рт.ст. та температурі 50...90 °С.

Теоретическое и экспериментальное исследование кинетики испарения свободной воды с поверхности и ее конденсации при порядке наружного давления 7,6...280 мм рт.ст. и температуре 50...90 °С.

The theoretical and experimental research of evaporation kinetics from the free water surface is conducted in the range of external pressure 7,6...280 mm Hg by heater temperatures 50...90 °С.

В сообщении [1] нами был сделан теоретический анализ тепловой вакуум-сушки растительного сырья с целью установления влияния различных параметров сушки (давления в камере загрузки, температуры нагревателя) на оптимальный технологический режим, а также были приведены экспериментальные результаты кинетики сушки картофеля, свеклы, подтверждающие теоретические выводы.

На характер вакуумно-конденсационной сушки различного сырья влияют процессы, регулирующие испарение свободной воды при различных разрежениях в камере и температуре нагревателя. Представлялось желательным изучение физических явлений, которые наблюдаются при испарении свободной воды с открытой поверхности в зависимости от режимных параметров сушки.

Условия эксперимента: кювета из алюминия находится на поверхности плоского нагревателя; в ней вода высотой 10 мм. Нагреватель в центре цилиндрической камеры, внутренние стенки которой представляют собой конденсатор (десублиматор) с температурой 0 °С. Из камеры может откачиваться

воздух при помощи форвакуумного насоса. Тогда из энергетических соображений можно записать

$$q = r \cdot u = \bar{\lambda} \frac{\Delta t}{h} = \frac{\lambda (t_H - t_n)}{h}, \quad (1)$$

где q - величина теплоподвода ($\text{Вт}/\text{м}^2$), r - удельная теплота испарения воды ($\text{Дж}/\text{кг}$); $\bar{\lambda}$ - коэффициент теплопроводности воды ($\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$); h - толщина водяного слоя в кювете (м); t_n, t_H - температура нижнего слоя воды (вблизи нагревателя) и верхнего слоя (на поверхности воды); u - скорость сушки ($\text{кг}/\text{м}^2\cdot\text{с}$), которую можно записать:

$$u = - \frac{1}{S_u} \cdot \frac{dm}{d\tau} = - \rho \frac{dh}{d\tau}, \quad (2)$$

где S_u - площадь поверхности испарения воды (м^2); ρ - плотность воды, τ - время.

Причем $t_n = t_s = f(P_k)$, $h = h(\tau)$, $h(\tau=0) = h_0$, $r = f(t_s)$, $\rho = f(t_s)$, $\lambda = f(\bar{t})$, $t = \frac{t_H - t_n}{2}$, где t_s - температура насыщения водяных паров; P_k - давление в камере за-

Из (1) и (2) имеем:

$$\frac{\lambda \cdot \Delta t}{r \cdot h} = -\rho \frac{dh}{d\tau} \quad (3)$$

Интегрирование этого уравнения дает

$$h = \sqrt{h_0^2 - 2B\tau}; \quad B = \frac{\lambda \cdot \Delta t}{r \cdot \rho} \quad (3a)$$

Далее, подставляя это уравнение в (1), получим для скорости испарения воды

$$-\frac{dm}{S_u \cdot d\tau} = \frac{B \cdot \rho}{\sqrt{h_0^2 - 2B \cdot \tau}} \quad (4)$$

решение которого дает нам кинетику убыли массы воды в кювете.

$$m = \rho \cdot S_u \cdot \sqrt{h_0^2 - 2B \cdot \tau} \quad (5)$$

А для скорости испарения

$$u(\tau_\kappa) = \frac{\Delta m}{S_u \tau_\kappa} = \frac{\rho \cdot h_0}{\tau_\kappa} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2B \cdot \tau_\kappa}{h_0^2}} \right) \quad (6)$$

Поскольку $B=f(t_s, \bar{t})=f(P_\kappa, t_n)$, то и $u(\tau_\kappa)=f(P_\kappa, t_n)$ при заданных h_0 и τ_κ .

При расчете скорости испарения воды брали во внимание то, что в эксперименте $h_0=10$ мм, $\tau_\kappa=1800$ с, а пар был насыщенный, что соответствовало действительности, так как при низких давлениях через стеклянный колпак, который закрывал камеру, мы видели кипение воды, т.е. $t_s = t_n$.

Сравнение расчетных значений по формуле (6) с экспериментально измеренной скоростью испарения воды, которые приведены в [2], показывает, что при рассматриваемых условиях, когда температура вблизи поверхности воды соответствует температуре насыщения пара, расчетные значения хорошо согласуются с экспериментальными. При небольших разрежениях (200...400 мм рт.ст.), когда скорость испарения небольшая, плотность водяного пара вблизи поверхности будет значительно меньше, так как скорость отвода паров диффузии практически не меняется и создается впечатление быстрого отвода паров десублиматора. Поэтому для полного рассмотрения испарения воды необходимо учесть наличие десублиматора (конденсатора), влияние его температуры на процесс диффузии и в конечном счете на скорость испарения воды.

Литература

1. В.А.Захаренко, Ю.Р.Князев, П.Л.Пахомов. К расчету режима вакуумной сушки растительного пищевого сырья // *Труды Украинского вакуумного общества*. Т.1. Киев, 1995, с.377.
2. В.А.Захаренко, П.Л.Пахомов, Ю.Р.Князев. Исследование скорости испарения воды с открытой поверхности в зависимости от давлений и температуры // *ВАНТ. Серия: «Вакуум чистые материалы, сверхпроводники»*, 1998, вып. 4(5), 5(6), с.118-119.