

# Расчет продолжительности процесса сублимационной сушки пищевых продуктов

Канд. техн. наук А.У. ШИНГИСОВ, д-р техн. наук, академик НАН РК У.Ч. ЧОМАНОВ  
РГП «НПЦ перерабатывающей и пищевой промышленности»

**A method for the calculation on freeze-drying time of cultured beverages – shubat and kumiss – as compared to the experimental data is presented in the article. The calculation formulae have been derived for two-sided energy supply, supposing that in the time of decreasing energy supply the energy in the zone of sublimation is transferred through the dehydrated zone of the product, and the pressure in the dehydrated layer is constant in the process of drying. The equation for the coefficient of resistance to the evaporation depending on the water activity has been obtained.**

Одним из основных факторов, влияющих на технико-экономические показатели вакуумной сублимационной сушильной установки, является продолжительность процесса сушки продукта.

В настоящее время используются различные расчетные формулы для определения продолжительности процесса сублимационной сушки пищевых продуктов [1,2,3].

В основе этих расчетных формул лежит дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\nabla^2 T + \frac{\omega}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (1)$$

где  $\nabla^2$  – оператор Лапласа;

$T$  – температура, К;

$\omega$  – мощность внутреннего источника теплоты, Вт;

$\lambda$  – теплопроводность, Вт/(м·К);

$a$  – температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – время, с.

Решение этого уравнения или упрощенных его вариантов при различных граничных условиях составляет, по существу, математическую теорию процесса сублимационной сушки. Известные решения (аналитические и численные) получены лишь на основе дальнейших упрощений уравнения (1). Таким упрощением является рассмотрение решения этого уравнения для одномерных случаев: для тел в форме пластины, цилиндра и сферы. Другие известные решения были получены при условии пренебрежения производной по времени (квазистационарное приближение) и в отсутствие распределенных источников тепла.

Анализ существующих методов расчета продолжительности позволил установить, что во всех методах не учитывается характер связи влаги, содержащейся в продуктах, с его сухим каркасом.

На наш взгляд, при определении продолжительности процесса сублимационной сушки, использование тер-

модинамических характеристик продуктов позволяет с наибольшей достоверностью и точностью производить расчет.

В предлагаемом методе формулы выведены для двустороннего подвода энергии в предположении, что в периоде убывающего энергоподвода энергия к зоне сублимации передается через обезвоженную зону продукта и давление в осушеннем слое постоянно в процессе сушки.

С учетом приведенных выше предположений уравнение теплового баланса для бесконечно малого промежутка времени  $d\tau$  и толщины продукта  $d\delta$  запишется в виде

$$q d\tau = (a_h - a_k) \rho_0 L d\delta, \quad (2)$$

где  $q$  – плотность потока энергии, Вт/м<sup>2</sup>;

$a_h$ ,  $a_k$  – активность воды соответственно в начале и конце сушки;

$\rho_0$  – плотность сухого материала, кг/м<sup>3</sup>;

$L$  – теплота фазового перехода лед – пар, Дж/кг.

Известно, что при организации сублимационной сушки продуктов на всех стадиях процесса должно соблюдаться условие, выражающееся уравнением [2]:

$$q = L \frac{dw}{d\tau}, \quad (3)$$

где  $dw$  – бесконечно малое изменение скорости сушки за бесконечно малый промежуток времени  $d\tau$ .

В работе [5] авторами предложена формула для определения кривой скорости сушки, учитывающая изменение активности воды, содержащейся в продукте в процессе сублимационной сушки, и имеющая следующий вид:

$$\frac{dw}{d\tau} = 0,622 \cdot \frac{\alpha_t}{\mu c_p} \frac{P_b}{B} \frac{a_h - a_k}{\ln \frac{a_h - \varphi}{a_k - \varphi}}, \quad (4)$$

где  $\alpha_t$  – коэффициент аккомодации, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\mu$  – коэффициент сопротивления испарению;

$c_p$  – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К);  
 $\frac{P_B}{B}$  – критерий давления, характеризующий влияние общего давления на процесс сушки;  
 $\varphi$  – относительная влажность воздуха.

Подставляя выражение (3) в формулу (2) с учетом (4) и решая его относительно  $\tau$ , получим выражение

$$\tau = \frac{\rho_0 \mu c_p}{0,622 \alpha_r} \cdot \frac{B}{P_b} \ln \frac{a_h - \varphi}{a_k - \varphi}. \quad (5)$$

Основную трудность в использовании уравнения (5) представляет определение коэффициента сопротивления испарению  $\mu$ , характеризующего уменьшение испарительной способности поверхности льда. Существующие в настоящее время методики по определению коэффициента  $\mu$  базируются на различных представлениях о физике процесса испарения влаги с поверхности продукта. Наиболее приемлемой физической моделью, объясняющей механизм поверхностного испарения, представляется модель G.Gomini. Согласно этой модели процесс массопереноса у поверхности продукта рассматривается как результат процессов испарения с поверхности и диффузии влаги из внутренней части продукта.

Как известно, сушка сублимацией характеризуется непрерывным углублением зоны сублимации в толщу продукта. Молекула пара, оторвавшаяся от зоны сублимации, совершает сложный путь, преодолевая сопротивление сухого слоя. По мере проникновения зоны сублимации в толщу продукта поверхностные слои обезвоживаются, концентрация влаги в них уменьшается и испарение замедляется ( $\mu$  растет).

Если воспользоваться такой схемой влагопереноса, то в качестве интегральной характеристики, определяющей влажностное состояние поверхностного слоя, может служить активность воды продукта  $a_w$ .

Для выяснения характера зависимости коэффициента сопротивления испарению от активности воды продукта, а также для проверки расчетных данных экспериментом была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Подробнее описание установки и методика проведения исследования приведены в работе [4]. В качестве объектов исследования были выбраны кисломолочные продукты – шубат и кумыс.

Результаты экспериментов представлены в виде графиков на рис. 1 и 2.

На основе обработки опытных данных (см. рис. 1) методом наименьших квадратов было получено уравнение для коэффициента сопротивления испарению в зависимости от активности воды:

$$\mu = 1/a_w. \quad (6)$$

Полученные значения коэффициента сопротивления

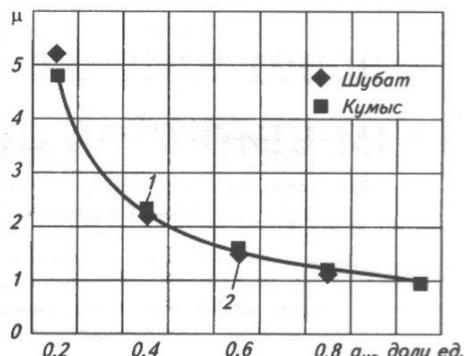


Рис. 1. Зависимость коэффициента сопротивления испарению от активности воды

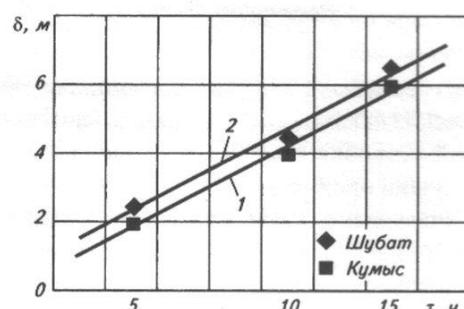


Рис. 2. Зависимость продолжительности сушки от толщины продукта

испарению  $\mu$  хорошо согласуются с литературными данными [1,2].

На рис. 2 приведено влияние толщины высушиваемого продукта шубата и кумыса на продолжительность процесса сублимационной сушки.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что предлагаемая формула для расчета продолжительности процесса сублимационной сушки дает хорошую сходимость с экспериментальными данными, что свидетельствует о правомерности выбранной модели процесса и тех предположений, которые легли в основу при постановке задачи исследований.

#### Список литературы

- Вольнец А.З. Тепло- и массообмен в технологии сублимационного обезвоживания в вакууме: Автoref. дис... д-ра техн. наук – М., 1980.
- Гуйго Э.И., Журавская Н.К., Каухчешвили Э.И. Сублимационная сушка пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность. 1972.
- Камовников Б.П., Мильков Л.С., Вакобойников В.А. Вакуум-сублимационная сушка пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1985.
- Чоманов У.Ч., Шингисов А.У., Тимурбекова А.К. Исследование влияния магнитного поля на процесс сублимационной сушки в СВЧ поле молочных продуктов // Пищевая технология и сервис. – Алматы, 2003. № 2.
- Шингисов А.У., Чоманов У.Ч. Совершенствование метода расчета процесса сублимационной сушки пищевых продуктов // Пищевая технология и сервис. – Алматы. 2003. № 2.