

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ПЕРИОДА СУБЛИМАЦИИ ПРИ КОНДУКТИВНОМ ПОДВОДЕ ТЕПЛА В ВАКУУМЕ

Олег ТИОРА, Тудор КРИСТЯ, Леонид ИВАНОВ

Технический университет Молдовы

Учитывая последние тенденции, особенно в странах Европейского союза, использования в пищу продуктов, которые богаты натуральными витаминами, было решено рассмотреть один из методов консервации продуктов. Если взять во внимание, что человеческому организму, для полноценной жизнедеятельности, необходимо ежедневно получать определенное количество витаминов, с которыми летом не возникает никаких проблем, встает вопрос: откуда их взять зимой? Люди различными способами (не всегда эффективными) научились, зачастую в домашних условиях, сохранять качество продуктов питания. Рассмотренный способ сублимационной сушки обладает рядом преимуществ, что подтверждено научными исследованиями.

Ключевые слова: Сушка, Консервация, Качество, Тепловой насос, Сублиматор, Десублиматор.

1. Общие сведения

Сублимация (возгонка) – переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое.

Было замечено, что замороженный продукт, при его правильной заморозке и соответствующем хранении, может долгое время сохранять витамины и питательные вещества. Но при его разморозке теряется большая часть витаминов. Да и сам процесс получения холода, для хранения, энергозатратный.

Существует множество способов консервации продуктов.

2. Методы сохранения питательных веществ (консервирования) продуктов

Различные способы консервирования продуктов имеют свои достоинства и недостатки. Самыми известными являются следующие:

- консервирование (соление, квашение, маринование, кандирование);
- уменьшение содержания влаги (сушка, желирование, копчение, вяление, варенье, повидло, пастила, джем, сиропы);
- герметизация (герметизация и вакуумная упаковка, атмосферная консервация и замена газовой среды);
- температурная обработка (стерилизация, пастеризация, низкие температуры);
- облучение (радиационная стерилизация).

3. Сублимационная сушка

Весь процесс сублимационной сушки можно разделить на 4 основных этапа:

а) предварительная подготовка продукта

Для получения более высоких характеристик конечного продукта необходимым условием является хорошее качество исходного сырья. Поэтому на этом этапе происходит сортировка и отбор высококачественного материала. Возможна термическая обработка продукта. Крупные продукты размельчаются на более мелкие части для уменьшения времени всего процесса.

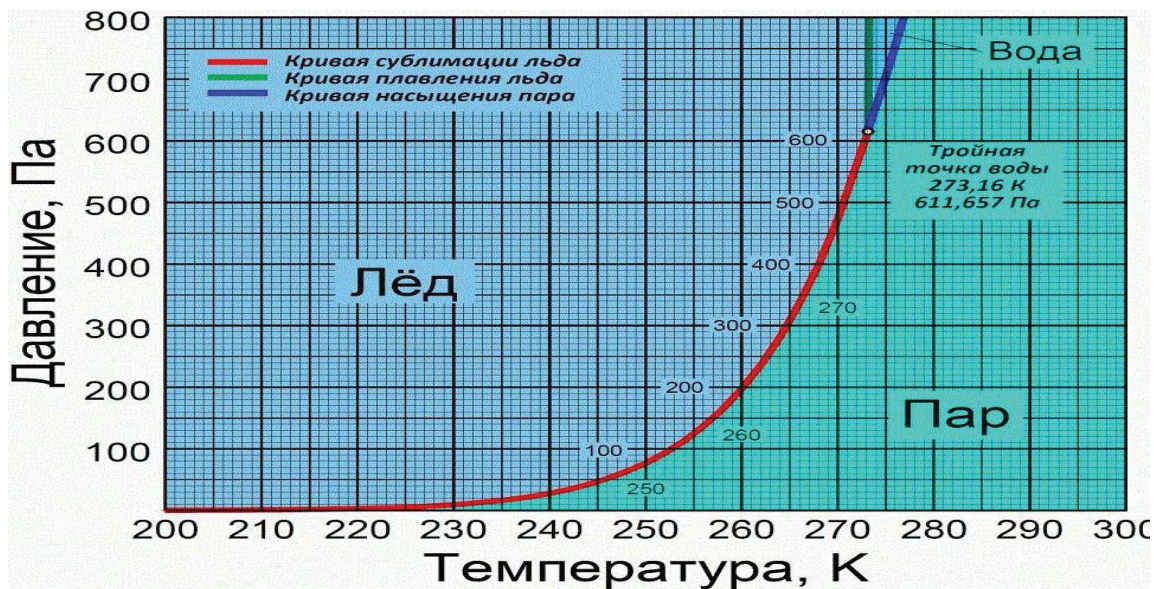
б) заморозка продукта

Производится быстрая заморозка продукта (шоковая заморозка), с предварительным вакуумированием рабочего пространства.

в) сублимационная сушка продукта

Этот этап можно рассматривать как два процесса: процесс постоянной сушки, который занимает по времени и, соответственно, по энергозатратам большую часть времени, и процесс досушки продукта.

В процессе постоянной сушки замороженный продукт, при подводе к нему тепла, размораживается. Для обеспечения фазового перехода лед-пар необходимо соблюдать условия, показанные в графике.



Фиг. 1. Тройная точка воды

Для процесса сублимации необходимо соблюдать следующие необходимые условия: давление меньше 611 Па (около 4.5 мм рт. ст.), в практике эта величина составляет около 1 мм рт. ст.

г) упаковка продукта

К этапу упаковки продукта предъявляются особые требования. Для увеличения срока хранения и для предотвращения потери качества продукта, при упаковке готовой продукции недопустимо попадание в упаковку кислорода.

Рассмотрим самый энергозатратный (и длительный) процесс постоянной сушки.

Особое значение при обезвоживании продуктов и материалов, особенно при обработке термолabileльных, играет роль организация энергоподвода. Перегрев продукта ведет к потере качества, а необоснованное уменьшение подвода к неоправданному замедлению процесса и, как следствие, удорожанию себестоимости продукта.

В связи с этим необходимо знание распределения температуры в обрабатываемом материале как на основной стадии (период постоянной сушки) так и на заключительном – периоде падающей скорости (досушка продукта). Использование теплового насоса в сублимационном обезвоживании является, на наш взгляд, довольно перспективно, так как конденсатор холодильной машины является источником энергии для сублимации замороженной влаги в сублиматоре, а испаритель обеспечивает десублимацию водяных паров в десублиматоре. Особый интерес вызывает совмещение сублиматора и десублиматора при вакуумной сублимационной сушке.

Рассмотрим кондуктивный энергоподвод

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = a * \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \varepsilon * r * \frac{\partial U_i}{\partial \tau} \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial \tau} = a_m * \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \delta * \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} \right) + \varepsilon * \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (2)$$

Граничные условия:

$$T(0, \tau) = T_{\text{кон}} \quad (3)$$

$$T(l, \tau) = T_{\xi} \quad (4)$$

Основной период сушки – это процесс сублимации, на внешней поверхности формируется зона фазового перехода лед – пар. На границе фазового перехода условие сохранения энергии запишется в виде:

$$-\lambda_1 * \frac{dT_i}{dx} + \lambda_2 * \frac{dT_2}{dx} = L * \rho * \frac{dS}{d\tau} \quad (5)$$

При значении $i = 1$ температура определяется в замороженной области, 2 – осушенная влага только в жидкой фазе (связанная).

Распределение температуры в осушенной области опишется квазистационарным уравнением (1)

$$V * \frac{dT}{dx} = a * \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{r}{c} * \frac{dU}{d\tau} \quad (6)$$

Решение уравнения (6) запишем (неоднородное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами):

$$T_2 = \frac{a}{V} * \frac{r}{c} * \frac{\partial U_x}{\partial \tau} x + c_1 + \frac{r}{c} * \frac{\partial U}{\partial \tau} * \frac{a^2}{V^2} l^{-\frac{V*x}{a}} + c_2 \quad (7)$$

Где: a – коэффициент теплопроводности, m^2/c
 r – теплота скрытого фазового перехода, $КДж/кг$
 c – удельная теплоемкость, $КДж/(кг*К)$
 V – скорость конвективного переноса, $м/с$.
 $\frac{dU}{d\tau}$ – скорость сушки в период сублимации постоянна.

Распределение температуры в замороженной области опишется эллиптическим уравнением теплопроводности и в случае отсутствия фазового перехода в объеме замороженной части и отсутствии конвективного переноса решение запишется в виде, в случае принятия коэффициента передачи тепла от кипящего холодильного агента к поверхности продукта соприкасающимся с внешней поверхности конденсатора:

$$T_1 = \frac{(T_\xi - T_k)}{l} * x + T_c \quad (8)$$

В случае необходимости в значения температуры конденсации можно внести поправку.

Скорость сушки продукта можно определить по уравнению (5). Подставляя (7) и (8) в (5), получим:

$$-\lambda_1 \frac{(T_\xi - T_k)}{l} + \frac{a}{V} * \frac{r}{c} * j - \frac{r}{c} * j * \frac{a}{V} * l^{-\frac{V*\xi}{a}} = L * \rho * \frac{d\xi}{d\tau} \quad (9)$$

Где: $j = \frac{dU}{d\tau}$ – скорость сушки, $\frac{кг}{кг*с}$.

Интегрируем уравнение (9) в пределах (0, l):

$$\frac{\xi}{A} \int_l^0 + \frac{1}{\frac{V}{a} * A} \ln(A - D * l^{-\frac{V*\xi}{a}}) \int_l^0 = \frac{\tau}{L * \rho}$$

Где: $A = \frac{\lambda_1(T_\xi - T_k)}{l} + \frac{a * r * j}{V * c}$
 $D = \frac{a * r}{V * c}$

Или

$$\tau = L * \rho * \left[\frac{a}{A * V} * \ln(A - D) - \frac{l}{A} + \frac{a}{A * V} (\ln A + D * l^{-\frac{V*\xi}{a}}) \right] \quad (10)$$

В случае пренебрежением тепла в осушенной области продукта (сушка идет в вакууме) за счет радиационного подвода тепло дополнительно от корпуса к продукту направленно.

$$E = \sigma * \left[\left(\frac{T_k}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{np}}{100} \right)^4 \right]$$

$$\tau = -L * \rho * \frac{l^2}{\lambda_1 * (T_\xi - T_k)} = L * \rho * \frac{l^2}{\lambda_1 * (T_k - T_\xi)} \quad (11)$$

$$T_\xi < T_k$$

Полученное соотношение позволяет определить время периода сублимации.

4. Достоинства сублимационной сушки:



Фиг.2 Сублимированная продукция

Продукт сохраняет до 98% белков и витаминов, температура хранения сублимированного продукта в упаковке от -50 до +50 °С, срок хранения до 5 лет, легко восстанавливается (фрукты достаточно положить на несколько минут в воду и они принимают первоначальную форму и вкус), легче первоначального продукта в 5-10 раз, сохраняет почти ту же форму, сохраняет пищевые качества.

Библиография:

1. Лыков А.В. “Теория сушки” 2 изд., Москва, Энергия, 1968, 472с;
2. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры 2 изд. М.:Физматлит, 2001