

Потери при замораживании и холодильном хранении дикорастущих ягод

Д-р техн. наук С.В. ФРОЛОВ, канд. техн. наук В.В. ДАНИН, канд. техн. наук М.И. КРЕМЕНЕВСКАЯ
СИБГУНиИТ

The method for calculation of possible weight loss during freezing and subsequent cold storage of wild-growing berries is presented. Evaporation resistance coefficients used in the calculations were determined experimentally for four kinds of berries.

Для оценки потерь при замораживании и последующем холодильном хранении дикорастущих ягод представлена методика расчета максимально возможной усушки ягод.

Известно, что скорость усушки падает с увеличением времени хранения [6], однако нами принято допущение о ее постоянстве. При расчете использованы коэффициенты сопротивления испарению (КСИ), полученные экспериментально для четырех видов ягод.

Вид упаковки (короба или мешки) мало влияет на величину усушки. Она будет несколько меньше при замораживании и хранении в мешках. Поэтому в статье представлен расчет усушки при замораживании и хранении в коробах.

Усушка при замораживании

Пусть ягоды замораживаются в коробах размером $0,5 \times 0,4 \times 0,1$ м посредством обдува холодным воздухом вдоль стороны длиной 0,4 м. Скорость обдува составляет 1 м/с при температуре охлаждающего воздуха -35°C . Масса продукта в ящике 10 кг, параметры продукта принимаем следующими [1]: влажность $W = 0,85$; теплопроводность замороженного продукта $\lambda = 1,3$ Вт/(м·К); криоскопическая температура -2°C . «Сухой» коэффициент теплоотдачи, вычисленный по известным соотношениям [3], $\alpha_d = 6,2$ Вт/(м²·°C).

При замораживании ягод происходит испарение влаги с поверхности продукта в охлаждающий воздух, который омывает продукт, что, в свою очередь, приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи и уменьшению продолжительности процесса. Движущей силой этого процесса является разность влагосодержания воздуха у самой поверхности продукта (X_s , кг/м³) и в ядре потока (X_a , кг/м³). То есть процесс имеет место только при условии, что влагосодержание воздуха у поверхности продукта больше, чем в ядре потока ($X_s > X_a$). При этом потерю влаги продуктом dM (кг) за время dt (с) можно рассчитать по формуле

$$dM = \beta_s S_s (X_s - X_a) dt, \quad (1)$$

где S_s — площадь поверхности упаковки продукта, м²;

β_s — коэффициент массоотдачи с поверхности упакованного продукта, м/с.

Влагосодержание воздуха X_a зависит от его температуры и относительной влажности и может быть определено из известной эмпирической формулы Филоненко [2]:

$$X(t, \varphi) = \varphi \exp\left(10,56 - \frac{3654}{t + 230}\right), \quad (2)$$

где φ — относительная влажность воздуха (безразмерная);
 t — температура воздуха, °C.

Температура воздуха в ядре потока равна некоторой известной величине t_a , а его относительная влажность φ_a , как правило, близка к единице. Температура воздуха у самой поверхности продукта равна температуре поверхности t_s , которая за время процесса понижается от некоторой начальной температуры t_0 до конечной t_c . А относительная влажность воздуха у поверхности продукта φ_s зависит от того, в каком периоде идет сушка.

Для нахождения коэффициента массоотдачи с поверхности продукта β_w можно воспользоваться известным соотношением Льюиса [5]:

$$\frac{\alpha_d}{\beta_w} = C_a = 1280 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}), \quad (3)$$

где α_d — «сухой» коэффициент теплоотдачи от поверхности продукта, Вт/(м·К);

C_a — объемная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

Числовое значение приведено для температуры 0°C . С учетом КСИ μ истинный коэффициент массоотдачи β_s будет равен

$$\beta_s = \beta_w / \mu.$$

Используем уравнение теплового баланса:

$$\alpha_w (t_s - t_a) dt = \alpha_d (t_s - t_a) dt + r \beta_s dM, \quad (4)$$

где α_w — «мокрый» коэффициент теплоотдачи, который учитывает потерю тепла за счет испарения влаги и вследствие этого зависит от температуры поверхности;

$r = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг — удельная теплота парообразования воды.

Из формул (1) и (4) получим связь между «мокрым» и «сухим» коэффициентами теплоотдачи:

$$\alpha_w = \alpha_d \left(1 + 1800 \cdot \frac{\varphi_s X_s - \varphi_a X_a}{t_s - t_a} \right). \quad (5)$$

Полная потеря массы продуктом за время замораживания определяется посредством интегрирования формулы (1):

$$M = \frac{\alpha_d S_s}{C_a} \int_0^{\tau_p} \{ \varphi_s X_s [t_s(\tau)] - \varphi_a X_a \} d\tau, \quad (6)$$

где τ_p – общая продолжительность испарения влаги, с;

$t_s(\tau)$ – температура поверхности продукта как функция текущего времени τ .

Продолжительность замораживания, вычисленная по формуле Планка [5], и усушка продукта, вычисленная по соотношению (7), составят соответственно 7 ч и 230 г на короб в предположении, что испарение с поверхности продукта идет в первом периоде. Экспериментальная продолжительность замораживания до среднеобъемной температуры -12°C составляет 6 ч, что подтверждает правильность выбора параметров продукта и процесса. Таким образом, максимальная теоретически возможная усушка продукта при замораживании (без учета КСИ) составляет 2,3 %. Реальная усушка будет несколько меньше. Экспериментально определенный коэффициент сопротивления испарению для этих ягод составил 1,6 для черники; 1,7 для голубики; 2,1 для брусники и 2,6 для клюквы. Видно, что для брусники и клюквы он выше (более плотная кожура), для черники и голубики меньше. Для морошки коэффициент принят равным 1,7. Таким образом, получаем реальную усушку при замораживании: черника – 1,4 %; морошка – 1,4; голубика – 1,4; брусника – 1,1; клюква – 0,9 %. Параметры процесса слабо влияют на усушку, плотная упаковка ягод можете лишь уменьшить ее.

Усушка при хранении

Пусть хранение продукта происходит в помещении, в котором одновременно находится 700 т продукта. Суммарная площадь поверхности коробов продукта $S = 30000 \text{ м}^2$. Температура воздуха в хранилище $t_a = -25^\circ\text{C}$, температура охлаждающих элементов хранилища $t_0 = -35^\circ\text{C}$, их площадь $S_0 = 400 \text{ м}^2$. Коэффициент теплоотдачи от поверхности короба примем равным $\alpha = 3 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ (обдув со скоростью 0,5 м/с, что нормально для естественной конвекции). Соотношение для расчета усушки при хранении в течение времени τ [6]:

$$M = \frac{\alpha}{C_a \rho_a} S \tau \frac{X(t_a) - X(t_0)}{S/S_0 + 1},$$

где $C_a = 1010 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ – теплоемкость воздуха;

$\rho_a = 1,5 \text{ кг}/\text{м}^3$ – его плотность (при -25°C);

$X(t_a)$ – влагосодержание воздуха при 100 % относительной плотности и температуре t , $X(t_a) = 7 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/\text{м}^3$,

$X(t_0) = 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/\text{м}^3$ [2].

Расчет по этому соотношению дает усушку порядка 0,12 % в месяц опять же в предположении, что испарение с поверхности продукта идет, как со свободной поверхности воды (сушка в первом периоде). Реальная усушка будет меньше. Экспериментальные данные по усушке лесных ягод, хранившихся 9 мес в картонных коробах, следующие: черника – 0,7 %; голубика – 0,63; брусника – 0,52; клюква – 0,43 %. Отсюда и были получены приведенные выше КСИ, примерно совпадающие с литературными данными для ягод с близкой по свойствам кожей [3]).

Таким образом, получаем расчетную усушку за 2 года хранения: черника – 1,9 %; морошка – 1,9; голубика – 1,7; брусника – 1,4; клюква – 1,1 %.

Следует иметь в виду, что в силу отмеченного выше уменьшения скорости испарения влаги с поверхности ягод (из-за обезвоживания поверхностных слоев) экстраполяция экспериментальных данных с девятимесячного хранения на двухлетнее, скорее всего, приведет к завышенному значению усушки (то есть реальная цифра будет несколько меньше).

Суммируя вышеприведенные данные по усушке при замораживании и хранении в течение 2 лет, получим полную величину возможной усушки.

Вид ягоды	Усушка, %
Черника	3,3
Голубика	3,1
Брусника	2,5
Клюква	2

Список литературы

1. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов. – М.: Агропромиздат, 1987.
2. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. – М.: Пищевая пром-сть, 1973.
3. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982.
4. Кугателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970.
5. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кипнис В.Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Колос-Пресс, 2001.
6. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая пром-сть, 1979.