

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ И ДЕФРОСТАЦИИ ПЛОДООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

Ялпачик В.Ф., к.т.н.,<sup>1</sup>

Стручаев Н.И., к.т.н.,

Ялпачик Ф.Е., к.т.н.

*Таврический государственный агротехнологический университет*

**Аннотация** – в статье приведены результаты исследования теплофизики замораживания и дефростации плодоовощной продукции. Приведены полученные расчетные формулы для определения основных параметров замораживания и дефростации.

**Ключевые слова** – замораживание, дефростация, плодоовощная продукция, теплофизические характеристики, время замораживания и размораживания.

*Постановка проблемы.* Современные тенденции формирования стратегии обеспечения населения Украины высококачественной плодоовощной продукцией круглый год включают несколько составляющих. Одним из важных направлений является замораживание овощей в период массового сбора с последующим хранением в замороженном виде и дефростацией по мере необходимости для переработки или непосредственного потребления.

Для практического применения замораживания и дефростации необходимо выполнять теплофизические расчеты, которые до настоящего времени носят фрагментарный характер.

Традиционно их проводят на основе решения уравнения теплового баланса и уравнения Планка. Поэтому проблема обобщения и совершенствования теплофизических расчетов при замораживании и дефростации плодоовощной продукции является актуальной.

*Анализ последних достижений.* Вопрос определения теплофизических характеристик пищевой продукции неоднократно затрагивался в работах Громова М.Д., Гиндзбурга А.С., Платоновой Е.С. [1-5]. Ими обобщены данные различных исследователей и получены эмпирические формулы. Однако не нашло отображения их применение в теплофизических расчетах замораживания и дефростации плодоовощной продукции.

*Основная часть.* Для определения основных теплофизических параметров процессов замораживания и дефростации необходимо совместное решение дифференциального уравнения теплопроводности (1) и уравнения Фурье (2).

---

\* Ялпачик В.Ф., к.т.н., доц., Стручаев Н.И., к.т.н., доц., Ялпачик Ф.Ю., к.т.н., проф.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{c \cdot \rho} \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] + \frac{q_v}{c \cdot \rho}, \quad (1)$$

$$Q = \frac{\alpha}{\delta} \cdot F (t_2 - t_x) \cdot \tau, \quad (2)$$

где  $t$  - температура, С°;

$\tau$  - время, с;

$c$  - удельная теплоемкость, кДж/кг·К;

$\rho$  - плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$x, y, z$  - координаты, м;

$q_v$  - мощность внутренних источников теплоты, Вт/м;

$Q$  - количество теплоты, кДж;

$\delta$  - толщина слоя, м;

$F$  - площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Решение этих уравнений сводится к прямой и обратной задачам, где прямая задача - это определение количества теплоты при известных теплофизических характеристиках, геометрических размерах и форме плода, рабочих и криоскопических температурах и времени процесса.

Обратная задача сводится к:

1 – определению времени замораживания или дефростации;

2 – подбору геометрических размеров и формы кусочков плодов;

3 – подбору температуры в холодильной камере.

Обычно дополнительно составляется уравнение теплового баланса (3)

$$Q_{зам} = Q_{охл} + Q_{ф.п} + Q_{хр}, \quad (3)$$

где  $Q_{зам}$  - количество теплоты, необходимое для замораживания, кДж;

$Q_{охл}$  - количество теплоты, необходимое для охлаждения, кДж;

$Q_{ф.п}$  - количество теплоты, необходимое для фазового перехода, кДж;

$Q_{хр}$  - количество теплоты, необходимое для замораживания до температуры хранения, кДж.

При решении прямой задачи необходимо указать граничные и краевые условия, для этого необходимо знать размеры и форму тела, условия теплообмена или распределение температур, теплофизические характеристики и время процесса.

Наиболее сложным моментом является нахождение коэффициента теплопроводности, который входит в формулы (1) и (2). Это связано с тем, что коэффициент теплопроводности значительно изменяется для различных диапазонов температур и имеет 3 отчетливых участка. Он изменяется от 0,4 Вт/(м·К) до 1,4 Вт/(м·К) для основных групп овощей.

Нами были проведены исследования и предложена эмпирическая зависимость на первом участке (от + 40°C до 0°C)

$$\lambda = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5 + a_6T^6 + \dots + a_9T^9$$

или  $\lambda_i = a_0 + \sum_{i=1}^9 a_i T^i$ , (4)

где  $a_0 \dots a_9$  - эмпирические коэффициенты, Вт/(м·Т<sup>2</sup>);  
 $T$  - температура, К.

Значения коэффициентов представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Значения коэффициентов для овощей на первом участке (положительные температуры от + 40°C до 0°C)

Коэффициент	Овощи			
	баклажан	кукуруза	перец	тыква
$a_0$	$8,38 \cdot 10^8$	$-1,6 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^7$
$a_1$	$-2,29 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^4$	$-8,6 \cdot 10^8$	$-5,9 \cdot 10^5$
$a_2$	$2,75 \cdot 10^5$	$-1,4 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^7$	$6,1 \cdot 10^3$
$a_3$	$-1,88 \cdot 10^3$	0,036	$-9,5 \cdot 10^4$	-3,5
$a_4$	8,04	0,002	$4,9 \cdot 10^2$	0,12
$a_5$	-0,02	$-1 \cdot 10^{-5}$	-1,7	-0,002
$a_6$	$3,75 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,004	$2,8 \cdot 10^{-7}$
$a_7$	$-3,67 \cdot 10^{-8}$	$-1,1 \cdot 10^{-11}$	$-5,7 \cdot 10^{-6}$	$-1,4 \cdot 10^{-10}$
$a_8$	$1,56 \cdot 10^{-11}$	0	$4,9 \cdot 10^{-9}$	0
$a_9$	0	0	$-1,9 \cdot 10^{-12}$	0

На втором участке  $\lambda_k = b + d \cdot T$ , (5) где  $b, d$  - коэффициенты.

Таблица 2 – Значения коэффициентов на втором участке (от 0°C до температуры -15°C)

Коэффициент	Овощи			
	баклажан	кукуруза	перец	тыква
$b$	22	19	16	20
$d$	-0,081	-0,068	-0,06	-0,072

На третьем участке от температуры -15°C до -40°C происходит плавное повышение теплопроводности плодов

$$\lambda_i = f_0 + \sum_{i=1}^5 f_i T^i, \quad (6)$$

где  $f_i$  - эмпирические коэффициенты, Вт/(м·Т<sup>2</sup>);  
 $T$  – текущая температура, К.

Таблица 3 – Значения коэффициентов на третьем участке

Коэффициент	Овощи			
	баклажан	кукуруза	перец	тыква
$f_0$	$-1,6 \cdot 10^3$	$-7,2 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^5$	$3,2 \cdot 10^4$
$f_1$	5,92	$1,19 \cdot 10^2$	$-1,05 \cdot 10^3$	$-6,7 \cdot 10^2$
$f_2$	0,18	0,73	8,67	5,65
$f_3$	-0,0017	0,002	-0,04	-0,024
$f_4$	$5,4 \cdot 10^{-6}$	$-2,1 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$4,99 \cdot 10^{-5}$
$f_5$	$-6,1 \cdot 10^{-9}$	0	$-6,2 \cdot 10^{-8}$	$-4,19 \cdot 10^{-8}$

С учетом уравнения (1-6) можно получить время послойного промерзания овощей (Табл.1-3).

$$\tau = \frac{\left[ (1 - \mu_{\text{сух}}) \cdot r + c_{\text{пл}} \cdot \rho_{\text{пл}} (t_{\text{пл}} - t_{\text{кр}}) \right]}{2(t_{\text{кр}} - t_{\text{пл}})} \cdot \left[ (D_1^2 - D_i^2) \left( \frac{1}{\alpha \cdot D_1} + \frac{1}{4\lambda} \right) + \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{D_i^2}{2} \cdot \ln \frac{D_1}{D_i} \right], (7)$$

где  $\mu_{\text{сух}}$  - доля сухих веществ;

$r$  - теплота кристаллизации воды, 335 кДж/кг;

$c_{\text{пл}}$  - теплоемкость плодов, кДж/кг·град;

$\rho_{\text{пл}}$  - плотность плодов, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{\text{пл}}$  - начальная температура плода, °С;

$t_{\text{кр}}$  - криоскопическая температура плода, °С;

$D_1$  - внешний диаметр плода, м;

$D_i$  - диаметр  $i$ - го не промерзшего слоя, м;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/м·град.

Анализ уравнения (7) показывает, что наиболее низкий темп охлаждения наблюдается для слоев, удаленных от поверхности на одну треть диаметра. Это объясняется тем, что градиент температур здесь меньше, чем при замерзании поверхностных слоев, а количество теплоты, оставшееся в незамерзшей части, еще достаточно велико, кроме того, начинает сказываться увеличение концентрации растворенных веществ: кислот, сахаров и т.д.

Следующей разновидностью обратной задачи является нахождение толщины  $\delta$  (см. уравнение 2) кусочков плодов или овощей, оптимальной для данной технологии замораживания и параметров холодильной машины.

Решение этой задачи актуально как при замораживании крупноплодных овощей, таких как тыква, кабачки, баклажаны, а также в случае замораживания суповых наборов или наборов для рагу, где все овощи измельчают в виде отдельных кусочков.

Из уравнения теплового баланса (3) находим количество теплоты, которое необходимо отвести для охлаждения, подмораживания (фазового перехода), а затем и замораживания кусочков до температуры хранения. Подставив его в уравнение теплопроводности (2) получим уравнение для оптимальной толщины кусочков плода (принимаемых обычно в виде кубиков или пластин)

$$\rho \cdot (2\delta)^3 \cdot c \cdot (t_{нл} - t_{кр}) = \frac{\lambda}{\delta} (2\delta)^2 \cdot (t_{нл} - t_{ср}) \cdot \tau, \quad (8)$$

где  $\rho$  - плотность плода кг/м<sup>3</sup>;

$\delta$  - половина толщины кусочка, м;

$(2\delta)^3$  - объем кусочка, м<sup>3</sup>;  $(2\delta)^2$  - площадь кусочка, м<sup>2</sup>;

$c$  - теплоемкость плода, кДж/кг·К;

$t_{нл}$  - температура плода, °С;

$t_{кр}$  - криоскопическая температура, °С;

$t_{ср}$  - температура охлаждения среды, °С;

$\tau$  - время, с.

Дальнейшее решение осуществляется графоаналитическим способом [5].

Следующий член уравнения теплопроводности - криоскопическая температура (температура фазового перехода  $t_{кр}$ ) до настоящего времени не имеет аналитического решения и практически не освещен в литературе. Криоскопическая температура в значительной степени зависит не только от вида плодов и овощей, но даже от сорта, условий произрастания и погоды во время вегетации, что объясняется различным содержанием минеральных солей, органических кислот, сахаров, эфирных масел, глицеринподобных веществ и т.д. Однако температуру фазового перехода можно определить для конкретного вида плодовоовощной продукции экспериментальным путем. Для этого необходимо укрепить несколько термопар по глубине плода, начиная от поверхности до центра и начать замораживание, фиксируя значение температур каждой термопары через небольшие промежутки времени (например, 1-5 минут в зависимости от температуры в холодильной камере, а затем построить график зависимости температуры от времени. Четко наблюдается ровная площадка постоянной температуры (см. рис.1). Эта температура и будет равна криоскопической для данного типа плодов при данном давлении.

Например, на графике замораживания баклажан (рис.1) видим площадку постоянной температуры  $t_{кр} = -0,86^\circ\text{С}$ .

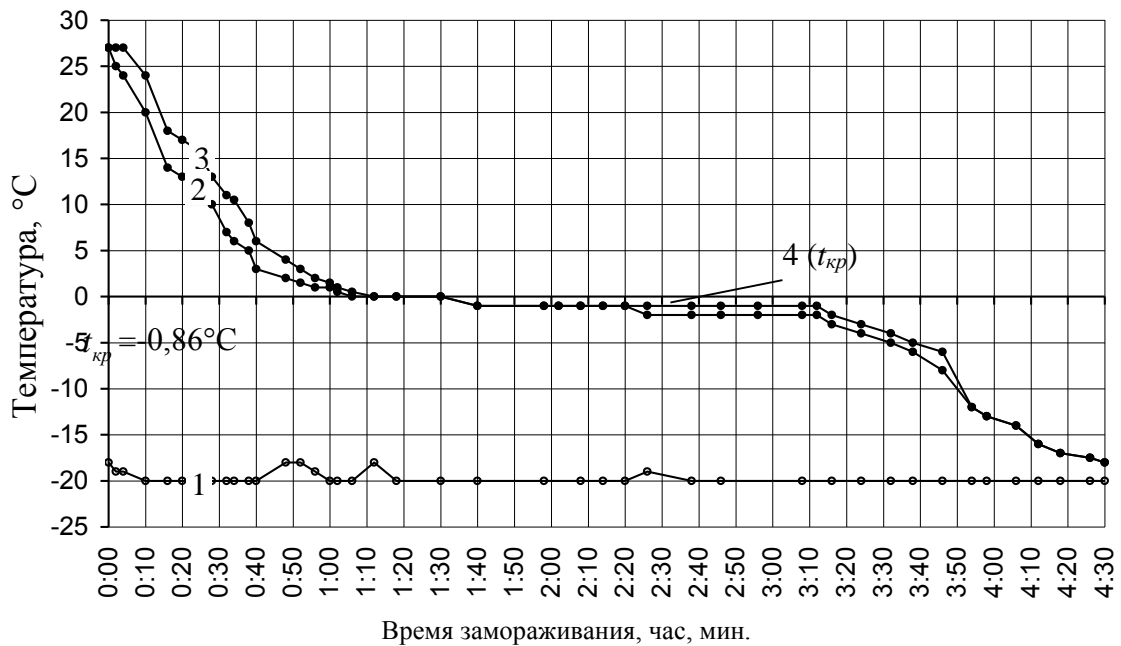


Рис. 1. Определение криоскопической температуры баклажан при давлении  $P=101325$  Па:

1 – температура воздуха в камере; 2 - температура поверхности; 3 – температура центра; 4 – криоскопическая температура.

Рекордсменом по части криоскопической температуры является чеснок, у которого  $t_{кр} = -3,6^{\circ}\text{C}$ .

Определим количество теплоты, необходимой для размораживания овощей или фруктов.

Составим уравнение теплового баланса

$$Q_1 = \sum_{i=1}^4 Q_i = Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (9)$$

где  $Q_1$  - количество теплоты, необходимое для дефростации, кДж;

$Q_2$  - количество теплоты, необходимое для нагревания плода от температуры низкотемпературного хранения до температуры фазового перехода, кДж;

$Q_3$  - количество теплоты, необходимое для фазового перехода льда, находящегося в плодах в жидком состоянии, кДж;

$Q_4$  - количество теплоты, необходимое для нагревания плода от температуры фазового перехода до температуры переработки или потребления, кДж.

Определим составляющие теплового баланса

$$Q_1 = m_T \cdot c_T \cdot (t_{Т.Н.} - t_{Т.К.}), \quad (10)$$

где  $m_T$  - масса греющего теплоносителя, кг;  
 $c_T$  - теплоемкость греющего теплоносителя, кДж/кг·К;  
 $t_{T.H.}, t_{T.K.}$  - температура греющего теплоносителя начальная и конечная, соответственно, К.

$$Q_2 = m_{nl} \cdot c_{nl} \cdot (t_{плав} - t_{xp.}), \quad (11)$$

где  $m_{nl}$  - масса плода, кг;  
 $c_{nl}$  - теплоемкость плода при отрицательных температурах, кДж/кг·К;  
 $t_{плав}$  - температура плавления, К;  
 $t_{xp.}$  - температура хранения К.

$$Q_3 = q_{nl} \cdot m_l, \quad (12)$$

где  $m_l$  - масса льда в плоде, кг;  
 $q_{nl}$  - удельная теплота плавления льда, 335 кДж/кг.

$$Q_4 = m_{nl} \cdot c_{nl}^+ \cdot (t_{переп} - t_{плав.}), \quad (13)$$

где  $c_{nl}^+$  - теплоемкость плода при положительных температурах, кДж/кг·К;  
 $t_{переп}$  - температура переработки или потребления, К;

Есть еще один вид задач, когда необходимо подобрать температуру в холодильной камере ( $t_{xk}$ ). Этот вид задач возникает в том случае, когда технологи четко указывают время замораживания, то-есть, необходимо подобрать такое холодильное оборудование, которое обеспечит необходимый температурный переход, скорость, а значит и время замораживания.

Для ее решения необходимо предварительно определить количество теплоты  $Q$ , которое требуется отвести. Далее определяют коэффициент теплопроводности (как показано выше: уравнения 4,5,6 и табл. 1,2,3), определяют или задают толщину образца  $\delta$ , экспериментально определяют криоскопическую температуру  $t_{kp}$  (рис.1). Специально необходимо определить площадь поверхности плода (если он замораживается в целом виде) или кусочков  $F$ . Время ( $\tau$ ) замораживания в данном случае не вычисляют, а используют значение, указанное технологами, тогда

$$t_{x.k} = t_{kp} - \frac{Q \cdot \delta}{\lambda \cdot F \cdot \tau}, \quad (14)$$

*Выводы.* Предлагаемая методика позволяет выполнять теплофизические расчеты для широкого круга задач, возникающих при разработке процессов замораживания и дефростации плодоовощной продукции:

- решать прямую задачу, то-есть, определять количество теплоты  $Q$ , которое необходимо отвести при замораживании плодоовощной продукции и далее рассчитывать холодильную мощность холодильной машины;
- решать ряд обратных задач, как-то:
  - определять коэффициент теплопроводности  $\lambda$  плодоовощной продукции по предлагаемым и апробированным эмпирическим зависимостям;
  - определять оптимальную толщину продукции  $\delta$ ;
  - определять криоскопическую температуру  $t_{кр}$ ;
- подбирать температуру в холодильной камере  $t_{х.к}$  для обеспечения заданной технологами скорости замораживания, то есть, подбирать тип холодильной машины и марку хладагента;
- определять продолжительность послойного замораживания,  $\tau$ ;
- определять количество теплоты, необходимое для дефростации при заданном давлении.

Литература:

1. *Гиндзбург А.С.* Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А.С. Гиндзбург, М.А. Громов. – М.: Колос, 1984. – 304 с.
2. *Громов М.А.* Универсальное уравнение для расчета коэффициентов теплопроводности соков / М.А. Громов // Консервная и овощная промышленность. – 1972. - №8. – с.32-33.
3. *Громов М.А.* Теплофизические характеристики плодов при отрицательных температурах / М.А. Громов // Консервная и овощная промышленность. – 1972. - №2. – с.34-35.
4. *Платонова Е.С.* Определение теплофизических характеристик пищевых продуктов в области кристаллизации связанной влаги / Е.С. Платонова // Вестник международной академии холода. – 1999. – Вып.1. – с.41-44
5. *Стручаев К.Н.* Методика определения оптимальных кусочков тыквы при замораживании / К.Н. Стручаев, В.Ф. Ялпачик // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку аграрної механіки». – Дніпропетровськ, 2004.- с.92-94

## **ТЕПЛОФІЗИЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРИ ЗАМОРОЖУВАННІ І ДЕФРОСТАЦІЇ ПЛОДООВОЧЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ**

Ялпачик В.Ф., Стручаев М.І., Ялпачик Ф.Ю.

**Анотація** - у статті наведені результати дослідження теплофізики заморожування і дефростації плодоовочевої продукції. Наведено отримані



**розрахункові формули для визначення основних параметрів заморожування і дефростації.**

**THERMOPHYSICAL CALCULATIONS FREEZING AND THAWING  
HORTICULTURAL PRODUCTS**

V.Yalpachik, N. Struchaev, F.Yalpachik

*Summary*

**The results of the study Thermophysics freezing and defrosting produce. Shows the obtained formulas for calculating the basic parameters of freezing and defrosting.**