

УДК 641.528

## Оценка длительности замораживания продукта при переменной температуре теплоотводящей среды

Канд. техн. наук **Цуранов О.А.**, канд. техн. наук **Крысин А.Г.** jol9912@yandex.ru  
Санкт-Петербургский государственный торгово-экономический университет

д-р техн. наук **Вороненко Б.А.** voronenkoboris@yandex.ru  
Университет ИТМО

Институт холода и биотехнологий  
921002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

**Аннотация:** Предложена методика оценки длительности замораживания продуктов при интенсивном теплоотводе от поверхности. Замораживание рассматривается как двухстадийный процесс. За начальное распределение температуры во второй стадии принята среднеобъемная температура продукта в фазе охлаждения. Достоверность расчета подтверждена экспериментально.

**Ключевые слова:** теплоперенос, температурное поле, переменная температура среды, замораживание.

---

## Assessment of duration of freezing of a product at a variable temperature of the heat-removing environment

**Tsuranov O. A. Krysin A.G.** jol9912@yandex.ru  
St. Petersburg state trade and economic university

**Voronenko B. A.** voronenkoboris@yandex.ru  
University ITMO

Institute of Refrigeration and Biotechnologies  
191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

**Summary:** The technique of an assessment of duration of freezing of products is offered at the intensive heat sink from a surface. Freezing is considered as two-phasic process. Medium-volume temperature of a product is taken for initial distribution of temperature in the second stage in a cooling phase. Reliability of calculation is confirmed experimentally.

**Keywords:** heat transfer, temperature field, variable temperature of the environment, freezing.

---

Определяющим технологическим параметром процесса замораживания является его длительность. Эта величина неразрывно связана с качеством конечного продукта, технологией его производства, энергетическими затратами на осуществление процесса, выбором типа и холодопроизводительности холодильной машины.

При аналитической оценке длительности замораживания продукта заданной стереометрической формы прибегают к решению уравнения нестационарной теплопроводности Фурье, что сопряжено с затруднениями из-за нелинейности граничных условий. Обычно процесс замораживания описывают дифференциальными уравнениями теплового баланса. Мера точности решения определяется адекватностью температуры действительному ее распределению в замороженном слое.

Процесс замораживания тела рассматривается как процесс промерзания с движущейся границей раздела фаз лед - влага. Отвод тепла льдообразования осуществляется через

замороженный слой от поверхности продукта.

Длительность замораживания для тел стандартной стереометрической формы оценивается выражением [1]

$$\tau = \frac{q_3 \cdot \rho \cdot R}{t_{кр} - t_c} \cdot \left( \frac{R}{2\lambda_m} + \frac{1}{\alpha} \right), \quad (1)$$

где  $q_3$  - удельная теплота замораживания, Дж/кг,

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

$t_{кр}$  - криоскопическая температура замерзания продукта, °С,

$R$  - определяющий геометрический размер продукта, м,

$\lambda_m$  - теплопроводность замороженного продукта, Вт/(м·К),

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от поверхности продукта к теплоотводящей среде, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Удельная теплота замораживания может быть выражена в виде слагаемых процесса, - теплоты охлаждения, льдообразования и домораживания:

$$q_3 = C_o(t_n - t_c) + L \cdot \omega \cdot W + C_m(t_{кр} - t_{v2}).$$

Для тел конечного размера следует учитывать теплоотвод от полной поверхности продукта. Поэтому на практике чаще прибегают к видоизмененной формуле Р. Планка для условий обтекания потоком воздуха продукта со всех сторон. Время замораживания определяется выражением

$$\tau = \frac{(i_{v1} - i_{v2}) \cdot \rho \cdot \delta}{t_{кр} - t_c} \left( K \frac{\delta}{\lambda_m} + P \frac{1}{\alpha} \right), \quad (2)$$

где  $i_{v1}$  - теплосодержание продукта при средней конечной температуре в конце первой фазы замораживания продукта (фазы охлаждения), Дж/кг;

$i_{v2}$  - теплосодержание продукта при средней конечной температуре в конце процесса замораживания продукта, Дж/кг:

$\delta = 2R$  - полная толщина продукта, м;

$K, P$  - коэффициенты, зависящие от формы и относительных размеров продукта.

Для тела, форма которого подобна бесконечной плоскопараллельной пластины:

- при одностороннем теплоотводе  $K=0.5$ ;  $P=1$ ;

- при двухстороннем теплоотводе,  $K=0.125$ ;  $P=0.5$ ;

- для тела, форма которого подобна шару,  $K=0.0417$ ;  $P=0.1667$ .

Для упрощения постановки задачи для оценки длительности охлаждения и замораживания температуру воздуха принимают постоянной. Между тем этот процесс происходит при переменной температуре воздуха. Горячий продукт, как правило, помещается в предварительно охлажденную камеру шкафа интенсивного охлаждения. Воздух при соприкосновении с продуктом нагревается, после чего за счет работы холодильной машины он вместе с продуктом постепенно охлаждается.

Первая фаза замораживания продукта - его охлаждение - протекает без изменения агрегатного состояния тканевой влаги, вторая - в условиях льдообразования в продукте.

Для второй фазы замораживания продукта важным фактором является знание распределения температуры в объеме продукта. В простейшем случае начальную температуру продукта для второй фазы - фазы замораживания - можно принять равной среднеобъемной температуре продукта в конце фазы охлаждения. Это логическое представление принято за основу для оценки полной длительности замораживания.

Таким образом, отличительной особенностью предлагаемого математического описания процесса замораживания является совмещение решения для охлаждения продукта при переменной температуре теплоотводящей среды с традиционной методикой оценки длительности замораживания продукта конечного размера (стадии замораживания от  $t_{v1}$  до  $t_{v2}$ ), где  $t_{v1}$ ,  $t_{v2}$  - среднеконечные температуры каждой фазы, °С.

Для I стадии решение соответствующей краевой задачи теплопроводности (охлаждение поверхности продукта до принятой температуры, например, 5°С) получено авторами методом интегрального преобразования Лапласа в следующем безразмерном виде:

$$T_1(X, Fo) = \frac{t_o - t_1(x, \tau)}{t_o - t_m} = 1 + \frac{Bi_1}{\varphi(Pd)} \cos(\sqrt{Pd} X) e^{-PdFo} - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{A_m}{1 - \frac{\mu_m^2}{Pd}} \cos(\mu_m X) e^{-\mu_m^2 Fo} \quad , \quad (3)$$

где  $\mu_m$  - последовательные положительные корни характеристического уравне-



Рис. 1. Экспериментальная установка, включающая шкаф интенсивного охлаждения DM-1, измеритель – Termodat и ноутбук.

ния  $ctg\mu = \frac{\mu}{Bi_1}$ ;

$Pd = \frac{k R^2}{a}$  - число Предводителя,

$k$  – коэффициент затухания, 1/с,  $a$  – коэффициент температуропроводности продукта,  $m^2/c$ .

Для второй стадии решение описывается выражением (2).

К числу достоинств предлагаемого решения следует отнести возможность описания температурного поля продукта в конце первой стадии замораживания (стадии охлаждения). При достижении поверхностью продукта заданной температуры, например  $+5^{\circ}\text{C}$ , имеется возможность оценить среднеобъемную температуру продукта  $t_{v1}$ , которая может



Рис. 2. Замораживаемый картофель с термопарами.

быть принята в качестве начальной температуры второй фазы - фазы замораживания продукта.

$i_{v2}$  - выбирается по температуре последующего холодильного хранения продукта, ис-

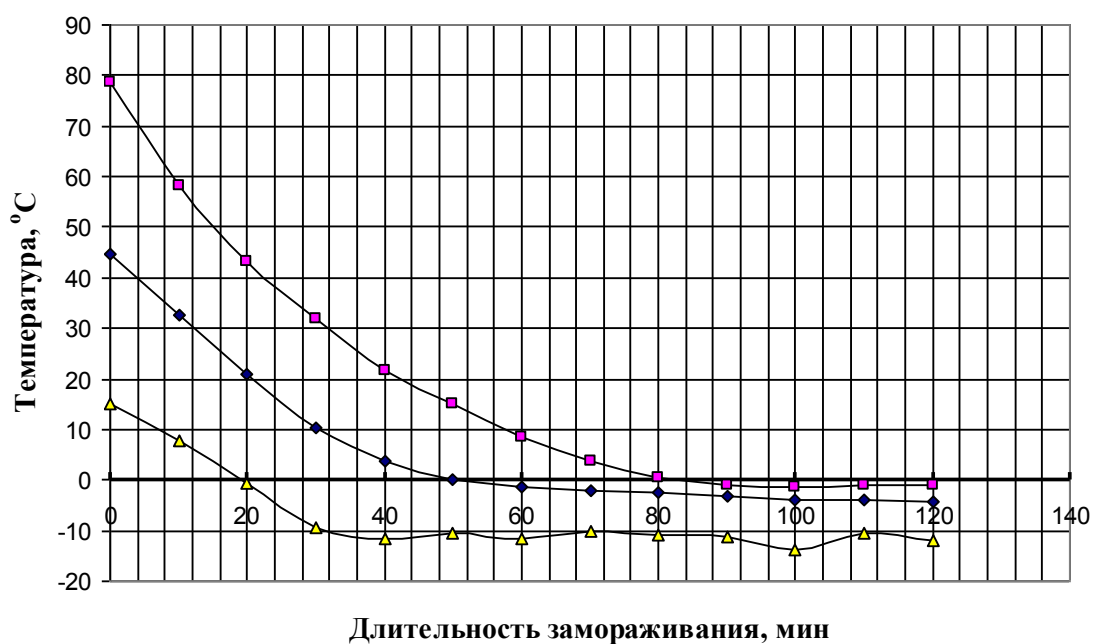


Рис. 3. Изменение температуры в центре, на поверхности замораживаемого продукта и воздуха в холодильном шкафу (сверху вниз).

ходя из технологических соображений.

### **Объект замораживания.**

В качестве объекта для замораживания использованы картофель и свекла.

Экспериментальная установка отражена на рис. 1. Измерение температуры осуществлялось в геометрическом центре продукта и на его поверхности. Температура воздуха измерялась в набегающем потоке вблизи продукта (рис. 2).

### **Измерительный комплекс.**

### Экспериментальные данные замораживания продукта

Время, мин	Температура поверхности продукта, °С	Температура центра продукта, °С	Температура воздуха, °С
0	44.8	78.6	15.2
10	32.6	58.2	7.9
20	21	43.4	-0.5
30	10.3	31.9	-9.3
40	3.7	21.5	-11.7
50	0.1	15	-10.5
60	-1.5	8.6	-11.7
70	-2	3.8	-10.3
80	-2.6	0.3	-10.7
90	-3.3	-0.9	-11.4
100	-3.8	-1.2	-13.8
110	-4.1	-1.1	-10.4
120	-4.4	-1.1	-12.1

Измерительный комплекс состоял из регистратора температуры Termodat с термопарами. Запись температуры фиксировалась компьютером (ноутбуком).

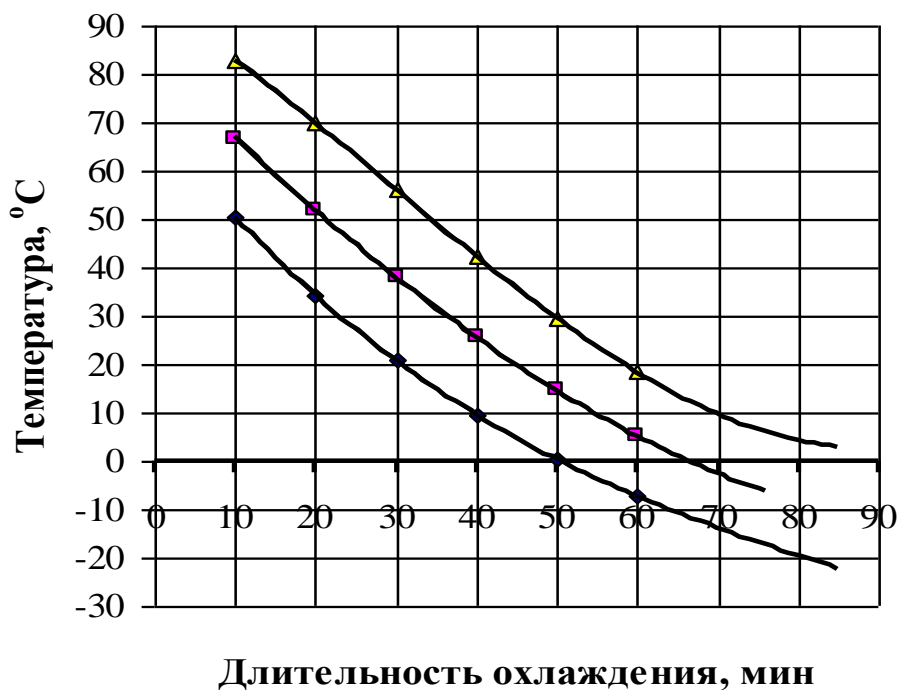


Рис. 4. Расчетные значения температур центра, поверхности продукта и температуры воздуха (сверху вниз).

#### **Результаты эксперимента.**

Результаты эксперимента отражены в таблице 1.

Графическое представление экспериментальных данных показано на рисунке 3. Анализ температурного поля на стадии охлаждения продукта (рис. 4) свидетельствует о сходимости расчетных и экспериментальных результатов.

Длительность первой стадии процесса охлаждения (для центра продукта) составляет 90 минут.

Средняя объемная температура на первой фазе охлаждения – замораживания - соста-

вила  $t_{v1}=2.8^{\circ}\text{C}$ .

Средняя объемная температура в конце процесса замораживания принята равной  $t_{v2} = -18^{\circ}\text{C}$ .

Расчетная температура воздуха в шкафу принята постоянной, равной  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Коэффициент теплоотдачи равен  $\alpha \approx 25 \frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2 \cdot \text{К})}$  (при скорости движения воздуха  $v = 5 \text{ м/с}$ ).

Определяющий геометрический размер продукта  $R=0.02\text{м}$ .

Приведем расчет с принятыми исходными данными:

$$\tau = \frac{(i_{ск1} - i_{ск2})\rho}{t_{кр} - t_c} \delta \left( K \frac{\delta}{\lambda_m} + P \frac{1}{\alpha} \right) = \frac{(59 - 1.8) \cdot 4.19 \cdot 1000 \cdot 0.04}{(-1 - (-25))} \times \\ \times \left( 0.0417 \frac{0.04}{1.2} + 0.1667 \frac{1}{25} \right) = 58 (\text{мин}) \quad (6)$$

Полная расчетная длительность замораживания продукта от температуры  $t_H = 90^{\circ}\text{C}$  до  $t_{v2} = -18^{\circ}\text{C}$  составила 128 мин (2ч. 8мин).

### **Выводы по работе.**

1. Для аналитической оценки длительности замораживания продукта при непрерывно понижающейся температуре воздуха в холодильном шкафу использована методика, соединяющая достоинства традиционной методики оценки длительности замораживания [1] и методики оценки времени замораживания продукта конечного размера, разработанного авторами.

2. Экспериментальная проверка подтвердила возможность практического применения рассматриваемой методики.

3. Совершенствование методики оценки длительности замораживания предполагает описание фазы “домораживания” продукта, т.е. фазы льдообразования от криоскопической температуры до средней объемной температуры в конце процесса. Это решение в научной литературе отсутствует. Работа в этом направлении является самостоятельным научным исследованием.

### **Литература**

1. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 145с.
2. Цуранов О.А., Крысин А.Г. Бурылин Д.А., Вороненко Б.А. Особенности охлаждения продуктов в шкафу интенсивного охлаждения при переменной температуре воздуха. // “Новые технологии”, рецензируемый реферируемый научный журнал, вып. 2, Майкоп, 2011.- с.50-54.

### **Literatura**

1. Chizhov G. B. Heatphysical processes in refrigerating technology of foodstuff. – М.: Food industry, 1971. – 145с.
2. Tsuranov O. A. Krysin A.G. Burylin D. A. Voronenko B. A. Features of cooling of products in a case of intensive cooling at variable air temperature. // "New technologies", the reviewed reviewed scientific magazine, вып. 2, Maikop, 2011. - page 50-54.