

УДК 637.52

## Раздел 2. ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## Двухстадийное размораживание мясных блоков

Д-р техн. наук С. В. ФРОЛОВ, О. А. МУХИНА,  
 СПбГУНиПТ  
 С. Н. ГОРЯЙНОВ,  
 Компания "Парнас-Холдинг"

*A two-stage defrosting of meat blocks consisting in their spraying with water at the first stage and air flowing at the second stage is considered. The calculated relationships for determination of the time of both stages of defrosting process are offered. Theoretical results are compared with experimental data.*

Ранее в работе [6] нами рассматривался новый двухстадийный гидроаэрозольный метод размораживания пищевых продуктов. Суть метода заключается в том, что на первом этапе продукт орошается водой фиксированной температуры путем аэрозольного распыления с использованием пневматической форсунки с мелкодисперсным распылом; на втором — обдувается воздухом также фиксированной, но в общем случае иной температуры. Это, с одной стороны, позволяет посредством подбора температур воды и воздуха и продолжительностей первого и второго этапов уменьшить длительность процесса при сохранении высокого качества продукта. С другой стороны, такая организация процесса позволяет исключить мойку и обсушку продукта после размораживания, поскольку эти операции автоматически проводятся во время процесса оттайки.

Мелкодисперсный распыл воды пневматической форсункой создает тонкую водяную пленку на поверхности продукта (20–50 мкм), что позволяет уменьшить расход питьевой воды до 15–25 г/с на 1 м<sup>2</sup> поверхности продукта.

В настоящей работе мы предлагаем методику расчета двухстадийного размораживания мясных блоков. Трудность этой задачи заключается в том, что при расчете продолжительностей первой и второй стадий процесса (сильно различающихся по значению коэффициента теплоотдачи) необходимо иметь соотношение для скорости движения фронта промораживания. В работе [5] получено соотношение для времени размораживания движения фронта в квазидномерном приближении:

$$\frac{d\tau}{d\Delta} = \frac{q\rho}{t_{cr} - t_a} \times \times \left\{ \left( 1 - \frac{\Delta}{R} \right)^{1/\Phi-1} \left[ \frac{1}{\alpha} + \frac{\Phi R}{\lambda(2\Phi-1)} \right] - \frac{\Phi(R-\Delta)}{\lambda(2\Phi-1)} \right\}, \quad (1)$$

где  $\tau$  — время, прошедшее с начала процесса размораживания, с;

$\Delta$  — толщина оттаявшей части тела, м;

$q$  — удельная теплота плавления льда в теле, Дж/кг;  
 $\rho$  — плотность тела, кг/м<sup>3</sup>;

$R$  — характерный размер тела, представляющий собой расстояние от поверхности тела до наиболее удаленной от нее точки внутри тела, м;

$\lambda$  — теплопроводность оттаявшей части тела, Вт/(м·К);

$t_{cr}$  и  $t_a$  — криоскопическая температура и температура среды соответственно, °C;

$\alpha$  — коэффициент теплоотдачи с поверхности тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\Phi = V/(SR)$  — безразмерный коэффициент формы;

$V$  — объем тела, м<sup>3</sup>;

$S$  — площадь поверхности тела, м<sup>2</sup>.

Однако в работе [4] было показано, что квазидномерное приближение для тел, имеющих форму параллелепипеда (а именно такую форму имеют мясные блоки), слишком неточно и даже приводит к некоторым парадоксальным выводам (например, к равенству времен размораживания куба и вписанного в него шара). Предлагалась более точная формула для времени размораживания параллелепипеда:

$$\tau = \frac{q\rho R}{t_{cr} - t_a} \left( Q \frac{R}{2\lambda} + \Phi \frac{1}{\alpha} \right); \quad \Phi = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_1 \beta_2 + \beta_1 + \beta_2}; \quad (2)$$

$$Q = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_1 \beta_2 + 0,7(\beta_1 + \beta_2) - 0,15};$$

$$\beta_1 = R_1 / R_3 > \beta_2 = R_2 / R_3 > 1,$$

где  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3 = R$  — половины большей, средней и меньшей сторон параллелепипеда соответственно, м.

Для наших целей необходимо откорректировать уравнение движения фронта (1) таким образом, чтобы при интегрировании его по  $\Delta$  в пределах от 0 до  $R$  получалась бы формула (2). Это можно сделать следующим образом:

$$\frac{d\tau}{d\Delta} = \frac{q\rho}{t_{cr} - t_a} \times \times \left\{ \left( 1 - \frac{\Delta}{R} \right)^{1/\Phi-1} \left( \frac{1}{\alpha} + \frac{QR}{\lambda(2\Phi-1)} \right) - \frac{Q(R-\Delta)}{\lambda(2\Phi-1)} \right\}. \quad (3)$$

Пусть на первом этапе размораживания — оросительном — коэффициент теплоотдачи и температура среды равны  $\alpha_1$  и  $t_1$  соответственно, а на втором этапе — обдува —  $\alpha_2$  и  $t_2$ . На первом этапе толщина оттаявшей части растет от 0 до  $\delta$ , на втором — от  $\delta$  до  $R$ . Тогда, интегрируя выражение (3), получим продолжительность первого и второго этапов  $\tau_1$  и  $\tau_2$ :

$$\tau_1 = \frac{q\rho R}{t_1 - t_{cr}} \left\{ \Phi \left[ \frac{1}{\alpha_1} + \frac{QR}{\lambda(2\Phi-1)} \right] \times \times [1 - (1 - \delta/R)^{1/\Phi}] - Q \frac{R^2 - (R-\delta)^2}{2\lambda R(2\Phi-1)} \right\};$$

$$\tau_2 = \frac{q\varrho R}{t_2 - t_{cr}} \left\{ \Phi \left[ \frac{1}{\alpha_2} + \frac{QR}{\lambda(2\Phi-1)} \right] \times \right. \\ \left. \times (1-\delta/R)^{1/\Phi} - Q \frac{(R-\delta)^2}{2\lambda R(2\Phi-1)} \right\}. \quad (4)$$

Для проверки предложенных соотношений нами проводились эксперименты по двухстадийному размораживанию бескостной говядины в блоках (производства Испании). На первой – оросительной – стадии продукт размораживался до определенной толщины (достижение фронтом раздела фаз заданной толщины фиксировалось термопарой), а на второй стадии доразмораживался воздухом. Геометрические параметры блоков и температуры процессов приведены в табл. 1.

Отметим, что коэффициент  $Q$  превышает коэффициент формы  $\Phi$  в среднем на 20 %. Это ведет к заметному увеличению расчетной продолжительности размораживания по сравнению с классической формулой Планка, получаемой интегрированием соотношения (1), особенно на первом оросительном этапе, поскольку чем выше коэффициент теплоотдачи, тем сильнее соотношение (3) отличается от (1).

Теплофизические параметры продукта таковы (см. [1, 7]): плотность  $\varrho = 1030 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; теплопроводность оттаявшей части  $\lambda = 0,46 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ; относительная влажность  $W = 0,74$ ; криоскопическая температура  $t_{cr} = -0,8^\circ\text{C}$ . На первом этапе блоки орошаются водой с расходом 5 г/с, что создает на поверхности продукта пленку толщиной около 100 мкм. Коэффициент теплоотдачи на этапе орошения, вычисленный по известным соотношениям [3], равен  $\alpha_1 = 40 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

На втором этапе блоки обдуваются воздухом со скоростью 1,5 м/с, коэффициент теплоотдачи составит [2]  $\alpha_2 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . В процессе размораживания измеряли температуру в четырех точках блока, отстоящих от поверхности на различные расстояния (чтобы зафикс-

Таблица 2. Экспериментальные и теоретические значения продолжительностей первого и второго этапов размораживания

Номер блока	d/R, %	Продолжительность этапов размораживания, ч			
		Эксперимент		Расчет	
		$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_1$	$\tau_2$
1	0	–	16,7	–	17,5
2	0	–	17,7	–	18,3
3	32	5,0	16,0	4,3	15,2
4	32	5,0	15,0	4,2	14,7
5	45	6,0	13,0	5,2	14,4
6	70	7,0	2,2	7,6	2,8
7	75	7,0	2,0	7,4	2,6
8	100	14,2	–	13,4	–
9	100	11,9	–	10,9	–

сировать момент прохождения фазового перехода). Относительная величина оттаявшей на первом этапе толщины  $\delta/R$ , а также экспериментальные и расчетные значения продолжительностей первого и второго этапов приведены в табл. 2.

Наблюдается достаточно хорошее соответствие теоретических и экспериментальных данных по продолжительности обоих этапов размораживания. Необходимо также отметить, что размораживание на 70 – 75 % толщины на первом (оросительном) этапе сокращает общую продолжительность процесса на 25 – 35 % по сравнению с чисто воздушным способом.

Таблица 1. Параметры блоков говядины и температуры процессов двухстадийного размораживания

Номер блока	Длина блока, м	Ширина блока, м	Высота блока, м	$\Phi$	$Q$	Температура воды, °С	Температура воздуха, °С
1	0,35	0,23	0,16	0,46	0,57	–	19,2
2	0,37	0,24	0,17	0,46	0,57	–	19,2
3	0,40	0,32	0,25	0,42	0,52	20,2	20,2
4	0,38	0,28	0,24	0,40	0,51	20,2	20,2
5	0,52	0,38	0,18	0,55	0,65	19,5	19,9
6	0,40	0,18	0,15	0,45	0,56	22,1	20,2
7	0,30	0,20	0,14	0,46	0,57	22,1	20,2
8	0,40	0,28	0,16	0,51	0,61	20,6	–
9	0,34	0,24	0,15	0,48	0,59	20,6	–

### Список литературы

- Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1980.
- Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979.
- Соколов В.Н., Доманский И.В. Газожидкостные реакторы. – Л.: Машиностроение, 1976.
- Фролов С.В., Кипнис В.Л. О времени промораживания прямоугольного бруса и параллелепипеда // Вестник МАХ. 2003. Вып. 2.
- Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кипнис В.Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Колос-Пресс, 2001.
- Фролов С.В., Куцакова В.Е., Трубников А.Н., Горянинов С.Н. Двухстадийная деформация пищевых продуктов // Вестник МАХ. 2003. Вып. 3.
- Чижков Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая промышленность, 1979.