

УДК 637.52

Двухстадийная дефростация пищевых продуктов

д-р техн. наук С.В. ФРОЛОВ, д-р техн. наук В.Е. КУЦАКОВА, А.Н. ТРУБНИКОВ

Санкт-Петербургский государственный университет

низкотемпературных и пищевых технологий

С.Н. ГОРЯЙНОВ

Компания «Парнас-Холдинг»

The two-stage defreezing of foodstuffs, including irrigation by water on the first stage and blowing by air on the second stage is considered. It is shown, that the optimal ratio between the durations of this two stages, which minimized the hole defreezing time is exist. Theoretical results are compared with experimental data for thigh quarters of beefs defreezing.

При дефростации пищевых продуктов (мясных туш, полутиш, четвертин, блоков мяса, рыбы и пр.) необходимо, с одной стороны, по возможности быстро проводить процесс, а с другой – обеспечить достаточно высокое качество оттаявшего продукта. Температура оттаявшей части в ходе процесса не должна превышать определенной величины (для мяса это 15...18 °C). Однако эти два требования противоречат друг другу: чем холоднее поверхность продукта (именно она обладает максимальной температурой в процессе дефростации), тем дольше протекает процесс. Поэтому для максимального ускорения процесса желательно поддерживать температуру поверхности продукта при неизменной, максимально возможной температуре (например, для мяса 15...18 °C). Очевидно, что при неизменной температуре нагревающего агента (воздуха или воды) этого достичь нельзя – температура поверхности продукта будет повышаться в ходе процесса. Чтобы температура поверхности продукта не изменялась, следует постоянно изменять температуру нагревающего агента. Это требует сложной системы автоматического регулирования. Хотя подобные устройства и предлагались [1], промышленного применения они не нашли из-за дорогоизны и ненадежности в эксплуатации.

Мы предлагаем проводить дефростацию продукта в два этапа: на первом – продукт орошаются водой с фиксированной температурой путем аэрозольного распыления с использованием пневматической форсунки с мелкодисперсным распылом; на втором – обдувается воздухом также с фиксированной, но уже, возможно, с иной температурой. Это, с одной стороны, позволяет посредством подбора температуры воды и воздуха и продолжительности 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 дефростации, поскольку они автоматически осуществляются во время дефростации. Мелкодисперсный же распыл воды пневматической форсункой позволяет создавать очень тонкую водяную пленку на поверхности продукта (100 – 150 мкм) и уменьшить расход питьевой воды до 10 – 15 г/с на 1 м² поверхности продукта.

Однако для практической реализации этого метода необходимо достаточно точно рассчитывать допустимую температуру воды и воздуха, а также продолжительность первого и второго этапов процесса, что позволяет минимизировать суммарную продолжительность оттаивания. Пусть на первой стадии продукт орошается водой, имеющей температуру t_1 (°C), при этом коэффициент теплоотдачи от поверхности туши составляет некоторую величину α_1 [Вт/(м²·°C)]; на второй же стадии продукт обдувается воздухом, имеющим температуру t_2 , коэффициент теплоотдачи – соответственно α_2 . При этом температура поверхности туши в любой момент времени не должна превышать некоторой фиксированной величины t_0 (°C). Разумеется, $t_0 > t_{cr}$, где t_{cr} – криоскопическая температура, °C. Температура воды и воздуха, а также продолжительность этапов орошения и обдува τ_1 и τ_2 (с) выбираются таким образом, чтобы суммарная продолжительность процесса оттаивания $\tau = \tau_1 + \tau_2$ была минимальной (коэффициенты теплоотдачи полагаются заданными).

Для решения этой задачи воспользуемся следующими соотношениями [7]. Температура поверхности в ходе оттаивания t_s (°C) равна:

$$t_s(\Delta) = t - \frac{t - t_{cr}}{1 + Bi \left\{ \frac{1 - (1 - \Delta/R)^{2-1/\Phi}}{2-1/\Phi} \right\}}; \quad Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}; \quad \Phi = \frac{V}{SR}, \quad (1)$$

где Δ – толщина оттаявшей части туши, м;

t – температура нагревающего агента (т.е. t_1 и t_2 на первом и втором этапах процесса соответственно), °C;

R – характерный размер туши (расстояние от поверхности до наиболее удаленной от нее точки внутри туши), м;

Bi – безразмерное число Био;

α – коэффициент теплоотдачи (т.е. α_1 или α_2), Вт/(м²·°C);

λ – коэффициент теплопроводности оттаявшей части тела, Вт/(м·°C);

Φ – безразмерный коэффициент формы;

V – объем туши, м³;

S – площадь поверхности туши, м².

Из (1) получаем условие для определения температуры нагревающего агента:

$$t - \frac{t - t_{cr}}{1 + Bi \left\{ \frac{1 - (1 - \Delta/R)^{2-1/\Phi}}{2-1/\Phi} \right\}} \leq t_0$$

или, преобразуя и вводя безразмерную температуру агента Θ :

$$\Theta = \frac{t - t_{cr}}{t_0 - t_{cr}} \leq 1 + \frac{2-1/\Phi}{Bi \left[1 - (1 - \delta)^{2-1/\Phi} \right]}; \quad \delta = \frac{\Delta}{R}, \quad (2)$$

где δ – безразмерная толщина оттаявшей части ($\delta = 0$ отвечает началу процесса оттаивания, $\delta = 1$ – концу).

Скорость процесса дефростации определяется следующим соотношением [2]:

$$\begin{aligned} \frac{dFo}{d\delta} &= \frac{1}{\Theta} \left\{ (1 - \delta)^{1/\Phi - 1} \left(\frac{1}{Bi} + \frac{1}{2-1/\Phi} \right) - \frac{1 - \delta}{2-1/\Phi} \right\}; \\ Fo &= \frac{(t_0 - t_{cr}) \lambda \tau}{\rho \rho R^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Fo – безразмерное время (критерий Фурье);

τ – время, прошедшее с начала процесса, с;

q – удельная теплота плавления льда в теле, Дж/кг;

ρ – плотность тела, кг/м³.

Нетрудно видеть, что если вместо Θ подставим в (3) верхнюю границу из (2), то получим:

$$\frac{dFo}{d\delta} = \frac{(1 - \delta)^{1/\Phi - 1} + \delta}{2-1/\Phi}; \quad Fo = \int_0^1 \frac{dFo}{d\delta} d\delta = \frac{\Phi}{2}. \quad (4)$$

Это минимально достижимая продолжительность процесса оттаивания при выполнении условия (2). Однако практически достичь такой продолжительности

достаточно сложно, поскольку для этого необходимо, как следует из (1), постоянно менять температуру нагревающего агента, причем довольно сложным образом. Мы же полагаем, что на каждом этапе процесса температура агента постоянна.

Итак, пусть на первом этапе процесса оттаявший слой достигает некоторой безразмерной толщины $\delta = d$, а на втором – оттаивает слой толщиной от $\delta = d$ до $\delta = 1$. Поскольку согласно (2) верхняя граница для температуры агента – монотонно убывающая функция от δ , то мы должны выбирать температуру воды и воздуха таким образом, чтобы температура поверхности по окончании обоих этапов была равна t_0 , т.е.:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= 1 + \frac{2-1/\Phi}{Bi_1 \left[1 - (1 - d)^{2-1/\Phi} \right]}; \quad Bi_{1,2} = \frac{\alpha_{1,2} R}{\lambda}; \\ \Theta_2 &= \begin{cases} 1 + \frac{2-1/\Phi}{Bi_2}; & \Phi \geq 1/2 \\ 1; & \Phi \leq 1/2 \end{cases} = 1 + \frac{2-1/\Phi}{Bi_2} \chi(\Phi - 1/2), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\chi(x)$ – ступенька Хевисайда, т.е. $\chi(x) = 1$ при $x > 0$ и $\chi(x) = 0$ при $x < 0$.

Неоднозначность в выражении для Θ_2 возникает из-за того, что правая часть выражения (2) имеет различный предел при $\delta \rightarrow 1$ в зависимости от знака выражения $2 - 1/\Phi$. Теперь, подставляя (5) в (3) и интегрируя по δ , получим продолжительности обеих стадий процесса, а следовательно, и суммарную его продолжительность, как функцию d :

$$\begin{aligned} Fo_1 &= \frac{\Phi \left\{ \left(\frac{1}{Bi_1} + \frac{\Phi}{2\Phi - 1} \right) \left[1 - (1 - d)^{1/\Phi} \right] - \frac{1 - (1 - d)^2}{2(2\Phi - 1)} \right\}}{1 + \frac{2-1/\Phi}{Bi_1 \left[1 - (1 - d)^{2-1/\Phi} \right]}}, \\ Fo_2 &= \frac{\Phi \left\{ \left(\frac{1}{Bi_2} + \frac{\Phi}{2\Phi - 1} \right) (1 - d)^{1/\Phi} - \frac{(1 - d)^2}{2(2\Phi - 1)} \right\}}{1 + \frac{2-1/\Phi}{Bi_2} \cdot \chi(\Phi - 1/2)}; \end{aligned}$$

$$Fo = Fo_1 + Fo_2. \quad (6)$$

Результаты численного счета по соотношениям (6) показывают, что функция $Fo(d)$ при любых значениях параметров $Bi_{1,2}$ и Φ имеет минимум внутри отрезка $[0, 1]$, который и определяет оптимальное соотношение продолжительностей стадий процесса. Итак, алгоритм расчета следующий: по соотношениям (6) строим зависимость $Fo(d)$, определяем значение d , при котором она имеет минимум; подставляем это значение в (6), находим необходимые температуры воды и воздуха;

затем по уравнению (6) находим продолжительность обеих стадий процесса.

Для проверки возможности применения исходных соотношений (1) и (3) (эти соотношения получены на основе известной формулы Планка, которая является весьма приближенной) мы провели эксперименты по дефростации четвертин говяжьих туш (бедренная часть) воздушным и двухступенчатым способом. Параметры продукта следующие [2, 5, 6]: масса 50 кг, коэффициент формы $\Phi = 0,56$; характерный размер (половина толщины бедренной части) $R = 0,1$ м; плотность $\rho = 1030 \text{ кг}/\text{м}^3$; теплопроводность оттаявшей части $\lambda = 0,465 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{°C})$; влажность $W = 0,74$; криоскопическая температура $t_{cr} = -2 \text{ °C}$. На первом этапе в результате орошения водой (6 г/с) четвертин туш на поверхности продукта создавалась пленка толщиной 100 мкм. Коэффициент теплоотдачи на этапе орошения, вычисленный по известным соотношениям [3]: $\alpha_1 = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$. На втором этапе четвертины обдуваются воздухом со скоростью 1,5 м/с, коэффициент теплоотдачи составит [4]: $\alpha_2 = 14 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{°C})$, числа Био $Bi_1 = 8$ и $Bi_2 = 3,2$. В первых двух экспериментах начальная температура продукта составляла -12 °C и продукт обдувался воздухом с температурой 15 °C в первом и 20 °C во втором экспериментах соответственно. В процессе дефростации измеряли температуру в центре туши (чтобы зафиксировать момент прохождения фазового перехода в центре тела) и на ее поверхности. Время дефростации составляло 35 ч в первом и 27 ч во втором экспериментах. На рис. 1 и 2 точками показаны значения температуры поверхности продукта в первом и во втором экспериментах в ходе процессов вкупе с теоретическими кривыми, рассчитанными по соотношениям (1) и (3). Наблюдается достаточно хорошее соответствие теории эксперименту, что позволяет сделать вывод о применимости этих соотношений. Максимальная температура поверхности продукта в конце процесса составила 13 °C в первом и 17 °C во втором экспериментах.

Проведены также два эксперимента по двухступенчатой дефростации четвертин туш. В первом начальная температура продукта составляла -18 °C , продукт в течение 3,8 ч орошался водой с температурой 20 °C , а затем обдувался воздухом той же температуры. Во втором эксперименте начальная температура

продукта составляла -14 °C , орошение проводили в течение 5 ч, температуры воздуха и воды также составляли 20 °C . Продолжительность процесса составляла 24 ч в первом и 23,5 ч во втором экспериментах. На рис. 3 и 4 показаны экспериментальные (точками) и теоретические значения температуры поверхности продукта в первом и во втором экспериментах соответственно. Наблюдалась также хорошая корреляция экспериментальных и расчетных данных. В конце оро-

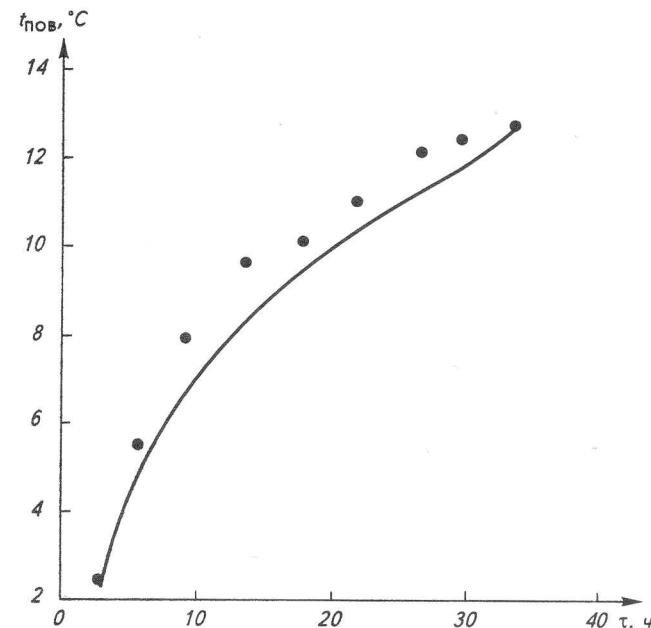


Рис. 1. Воздушное охлаждение четвертины туши (температура воздуха 15 °C)

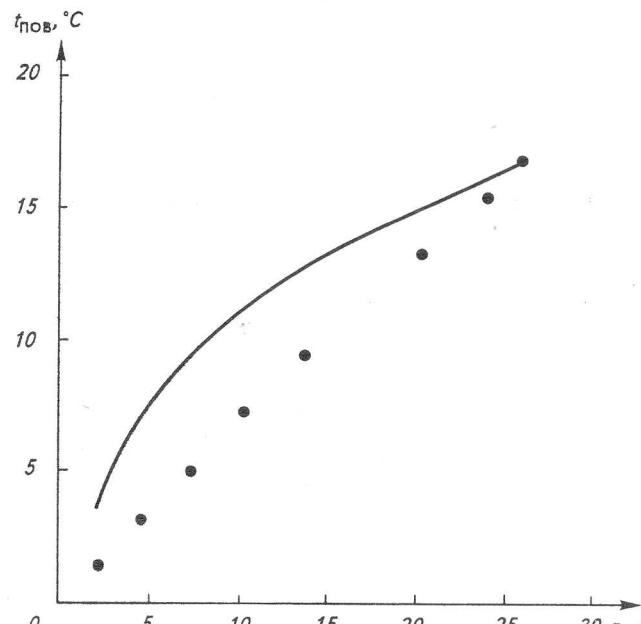


Рис. 2. Воздушное охлаждение четвертины туши (температура воздуха 20 °C)

шения температура поверхности составляла 14 °С в первом и 15 °С во втором экспериментах, а в конце обдува 17 и 16 °С соответственно.

Теперь рассмотрим оптимизацию процесса оттаивания бедренных четвертин говяжьих туш по предложенной выше методике. Температуру воздуха определяем по соотношению (5): $t_2 = 16$ °С. На рис. 5 изображена зависимость $F_o(d)$ для вышеуказанных параметров.

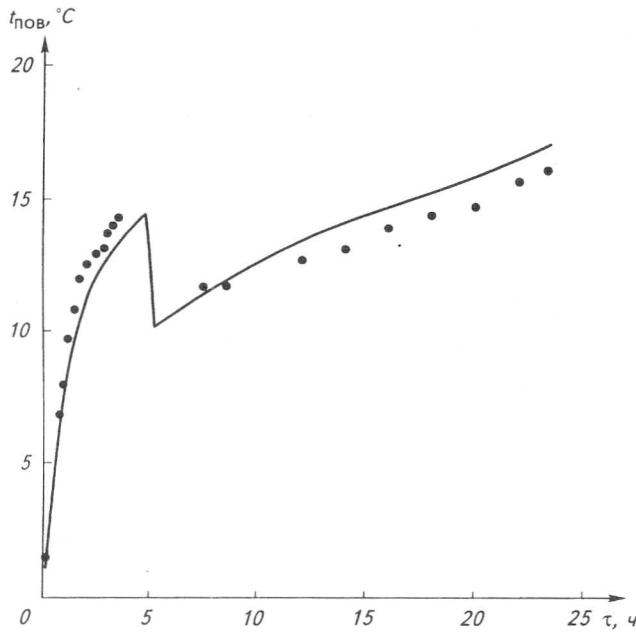


Рис. 3. Двухступенчатая дефростация четвертины туши (продолжительность орошения 3,8 ч)

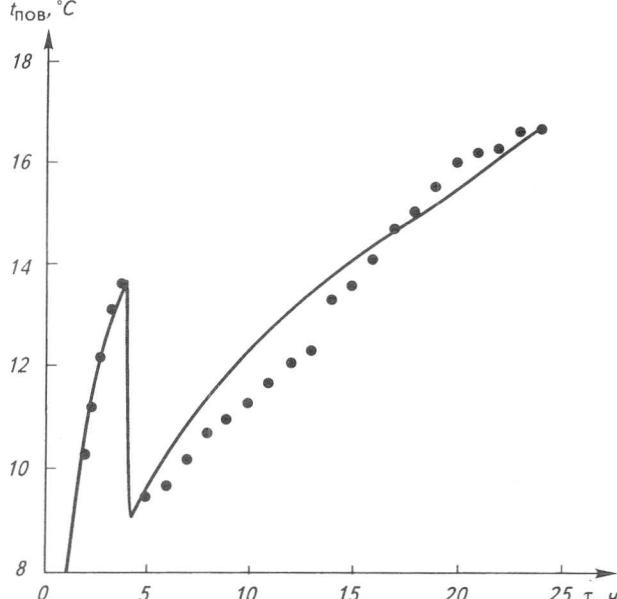


Рис. 4. Двухступенчатая дефростация четвертины туши (продолжительность орошения 5 ч)

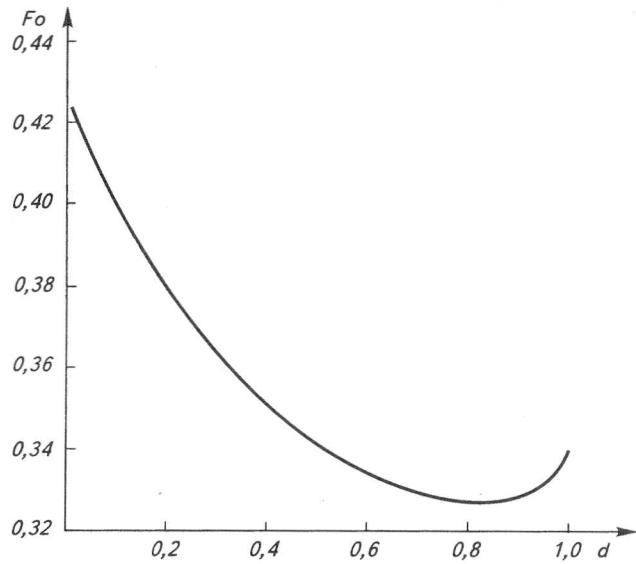


Рис. 5. Зависимость F_o от доли толщины четвертины туши, дефростированной на этапе орошения

Видно, что F_o имеет выраженный минимум при $d = 0,80$, при этом $F_{o1} = 0,27$ и $F_{o2} = 0,06$. Таким образом, необходимая продолжительность орошения и обдува составляла $\tau_1 = 20,5$ ч и $\tau_2 = 5$ ч. Необходимая температура воды $t_1 = 16,5$ °С; суммарная продолжительность процесса $\tau = 25,5$ ч. Отметим, что при одностадийном оттаивании только водой продолжительность процесса составила бы около 26,5 ч, а при оттаивании только воздухом – около 33 ч. Минимально возможная продолжительность процесса (4), которую можно достичь, лишь постоянно меняя температуру нагревающего агента, составит около 21,5 ч.

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 1192763, 1983.
2. Бражников А.М. Теория термической обработки мясопродуктов. – М.: Агропромиздат, 1987.
3. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М. Теплообмен в жидкостных пленках. – Киев: Техника, 1972.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979.
5. Сборник примеров расчетов и лабораторных работ по курсу «Холодильное технологическое оборудование». – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1981.
6. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Пищевая пром-сть, 1979.
7. Фролов С.В., Куцакова В.Е., Кипнис В.Л. Тепло- и массообмен в расчетах процессов холодильной технологии пищевых продуктов. – М.: Колос-пресс, 2001.