

Расчет продолжительности глазирования замороженных продуктов

Д-р техн. наук С.В. ФРОЛОВ, д-р техн. наук В.Е. КУЦАКОВА, канд. техн. наук В.Б. ДАНИН, С.А. ТОЛКАЧ

Glazing – the creation of ice layer on the surface of the frozen product (meat, fish) increases storage life of products by 30 – 50 %. A simple, thermophysical model of the glazing process is offered which includes the immersion of the frozen product into drinking water with the temperature 1...4 °C for 5 – 10 s. The calculation relationships for the determination of the optimum time for the product to be in the water and of the thickness of the formed ice layer have been obtained.

Одним из способов предохранения пищевых продуктов, например замороженных рыбы или мяса, от окисления и усушки во время хранения является глазирование, заключающееся в создании слоя льда на поверхности замораживаемого продукта. Глазированию подвергают только что замороженное мясо и рыбу как в блоках, так и россыпью, используя чаще всего погружной способ, являющийся преимущественным по сравнению с оросительным [4]. Замороженный продукт, имеющий температуру не выше $-18...-20^{\circ}\text{C}$, погружают в питьевую воду с температурой $1...4^{\circ}\text{C}$ на $5 - 10$ с.

Глазирование значительно увеличивает сроки хранения пищевых продуктов (для разных видов мороженой рыбы это увеличение составляет $30 - 50\%$).

Поверхность филе, рыбы или блока после глазирования должна быть равномерно покрыта ледяной корочкой. Количество глазури зависит от формы объекта, температур воды и продукта, продолжительности глазирования, числа погружений.

Как правило, в промышленности продолжительность пребывания продуктов различного состава и конфигурации в воде определяют опытным путем.

В настоящей работе предложена простая теплофизическая модель процесса глазирования, позволяющая рассчитать оптимальное время глазирования продукта и соответствующую толщину образующейся ледяной корки. Масса ледяной глазури по отношению к общей массе продукта должна колебаться от 2 до 4% для различных продуктов.

Продукт, имеющий начальную температуру $t_b (^{\circ}\text{C})$, погружается в жидкость с температурой $t_f (^{\circ}\text{C})$. Поскольку температура продукта ниже криоскопической $t_c (^{\circ}\text{C})$, на поверхности продукта начнет образовываться пленка льда. Однако температура жидкости выше криоскопической, и через некоторое время пленка начнет таять.

Так как толщина пленки льда мала по сравнению с размерами продукта, полагаем, что температура пленки во всех ее точках одинакова и равна криоскопической. Поскольку образование пленки происходит быстро и за это время успевает прогреться лишь поверхностный слой про-

дукта, мы можем считать продукт полубесконечным.

Количество теплоты dQ , поглощаемое единицей площади поверхности продукта за время $d\tau$, равно

$$dQ = q_i \rho_i d\Delta + \alpha (t_f - t_c) d\tau, \quad (1)$$

где Δ – толщина пленки льда (как функция текущего времени τ), м;

$q_i = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг – удельная теплота кристаллизации льда;

$\rho_i = 900$ кг/м³ – плотность льда;

α – коэффициент теплоотдачи от жидкости к продукту.

Первое слагаемое в правой части уравнения (1) – теплота кристаллизации льда, а второе – теплота, передаваемая от жидкости к продукту.

С другой стороны, при нагревании полубесконечного тела с первым краевым условием на границе подводимая теплота равна [2]

$$dQ = (t_c - t_b) \sqrt{\frac{\lambda_p c_p \rho_p}{\pi \tau}} d\tau, \quad (2)$$

где λ_p , c_p , ρ_p – соответственно теплопроводность, удельная теплоемкость и плотность продукта.

Приравняв выражения (1) и (2) и интегрируя результат с учетом начального условия $\Delta(0) = 0$, получим:

$$\Delta = \frac{2(t_c - t_b)}{q_i \rho_i} \sqrt{\frac{\lambda_p c_p \rho_p \tau}{\pi}} - \frac{\alpha (t_f - t_c) \tau}{q_i \rho_i}. \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет рассчитать необходимую продолжительность глазирования и толщину образующейся пленки льда. Видно, что при малых τ превалирует первое слагаемое и толщина пленки увеличивается, а при больших – наоборот. Нетрудно определить время τ_{\max} образования ледяной корки максимальной толщины Δ_{\max} :

$$\tau_{\max} = \left(\frac{t_c - t_b}{\alpha (t_f - t_c)} \right)^2 \frac{\lambda_p c_p \rho_p}{\pi},$$

$$\Delta_{\max} = \frac{(t_c - t_b)^2}{\alpha (t_f - t_c) q_i \rho_i} \frac{\lambda_p c_p \rho_p}{\pi}.$$

Экспериментальные и расчетные значения
толщины слоя льда

Время глазирования τ , с	$t_f = 18^\circ\text{C}$		$t_f = 4^\circ\text{C}$	
	$\Delta_{\text{эксп}}$, мм	$\Delta_{\text{теор}}$, мм	$\Delta_{\text{эксп}}$, мм	$\Delta_{\text{теор}}$, мм
1	0,08	0,06	0,11	0,11
2	0,05	0,05	0,12	0,14
3	–	0,03	0,15	0,17

Для проверки вышеизложенной теории нами были проведены эксперименты по глазированию филе трески. Куски филе, выдержанные при температуре $t_b = -18^\circ\text{C}$, погружали в воду в течение определенного времени. После этого их извлекали из воды, обсушивали от избытков влаги и взвешивали. По разности масс кусков до и после глазирования рассчитывали толщину пленки льда. Эксперименты проводили при двух значениях температуры жидкости: t_f : 18 и 4°C . Параметры филе принимали следующими [1]: плотность $\rho_p = 1060 \text{ кг/м}^3$; теплопроводность $\lambda_p = 1,4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$; $c_p = 2000 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$. Коэффициент теплоотдачи от жидкости к филе, рассчитанный по известным соотношениям [3], $\alpha = 1000 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$. В таблице приведены экспериментальные и рассчитанные по уравнению (3) значения толщины слоя льда Δ .

Наблюдается неплохое согласие теоретических и экспе-

риментальных данных – в пределах 25 % погрешности (такой же порядок имел разброс экспериментальных данных), что достаточно для практических расчетов. При этом максимальная толщина ледяной пленки и время ее образования равны $\tau_{\text{max}} = 1 \text{ с}$; $\Delta_{\text{max}} = 0,06 \text{ мм}$ при температуре воды $t_f = 18^\circ\text{C}$ и $\tau_{\text{max}} = 19 \text{ с}$; $\Delta_{\text{max}} = 0,26 \text{ мм}$ при $t_f = 4^\circ\text{C}$. Очевидно, что использование воды комнатной температуры не позволяет нарастить ледяную корку заметной толщины, а воды с температурой $1...4^\circ\text{C}$ (как это и делается на практике) – позволяет. Необходимо также отметить, что выдерживание продукта в воде все время τ_{max} нерационально, так как корка нарастает быстро в первые секунды, а далее ее рост замедляется (что хорошо видно из данных таблицы). Поэтому вполне разумно выбирать время погружения порядка $0,25\tau_{\text{max}} - 0,5\tau_{\text{max}}$ (за это время намораживается 75 – 90 % от максимальной толщины пленки). Если эта толщина оказывается недостаточной, необходимо провести повторное погружение продукта в воду после промежуточного охлаждения.

Список литературы

1. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. – М.: Пищевая пром-сть, 1980.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
3. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970.
4. Родин Е.М. Справочник по холодильной обработке рыбы. – М.: Пищевая пр-сть, 1977.