

УДК 664.8(045)

Разработка параметров процесса замораживания пищевых продуктов заданной формы

Д-р техн. наук В. А. ВОСКОБОЙНИКОВ

Московский государственный университет пищевых производств
125080, г. Москва, Волоколамское шоссе, 11

The way of the analysis of experimental kinetic curves of change of temperature in the central zone of samples of the beef forcemeat of the spherical form, for the purpose of definition of the most expedient temperature of environment is considered at refrigeration to processing of samples in a working zone of the azotno-refrigerating chamber. The way can be useful by working out of step modes of change of temperature of environment for real objects at which realization reduction or a total disappearance of horizontal sites by kinetic curves of change of temperature in a certain zone of real object is reached.

Ключевые слова: кинетические кривые, низкотемпературная обработка, фазовый переход, относительная температура, аппроксимация кривых.

Экспериментальные исследования процесса замораживания пищевых продуктов с реальными определяющими размерами показали, что в продукте происходят необратимые изменения, вызванные образованием кристаллов льда, величина которых значительно превосходит характерные размеры клеток исследуемых материалов. С физической точки зрения эти изменения объясняются появлением горизонтального участка на кинетических кривых зависимости температуры от текущего времени (рис. 1, а) и относительной температуры от безразмерного времени (рис. 1, б). Появление горизонтальных участков на кривых объясняется тем, что скорость выделения теплоты фазового перехода «вода—лед» превышает скорость отвода теплоты от зоны фазового перехода к поверхности образца при помощи механизма теплопроводности. Изученные ранее способы воздействия на интенсивность процесса низкотемпературной обработки с помощью сил постоянного магнитного поля, повышенных давлений охлаждающей среды и других

не обеспечили плавного изменения температурных кривых [1–5].

При анализе экспериментальных данных, полученных в Московском государственном университете прикладной биотехнологии (МГУПБТ) под руководством Э. И. Каухчешвили и Н. К. Журавской, предполагалось, что в интервале температур от минус 15 °С до минус 120 °С имеется кривая, соответствующая режиму замораживания, при котором производная функции $\theta = f(\hat{\tau})$ не обращается в нуль (рис. 2) [6, 7]. Последовательное пошаговое приближение значений температуры охлаждающей среды к желаемому режиму является длительной и трудоемкой процедурой.

Если рассматривать графики производных функций $d\theta/d\hat{\tau} = f'(\hat{\tau})$, то уже по трем кривым (вариант «А» из анализа исключаем) можно видеть тенденцию нелинейности изменения их характера в зависимости от температуры охлаждающей среды при сохранении характера их общего вида.

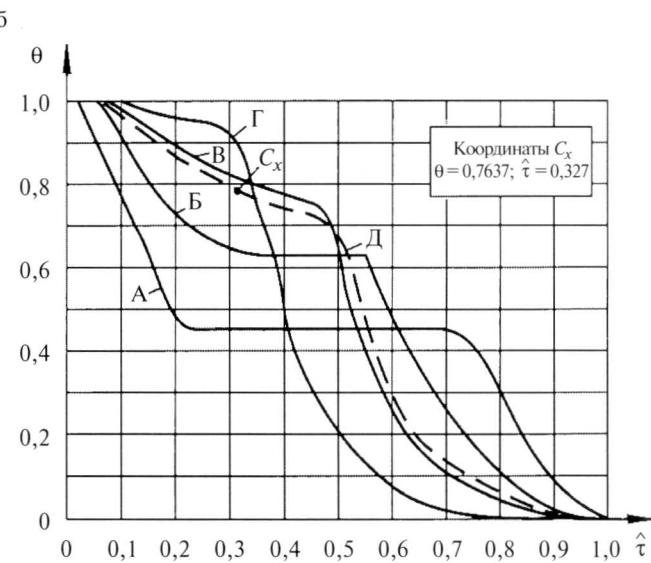
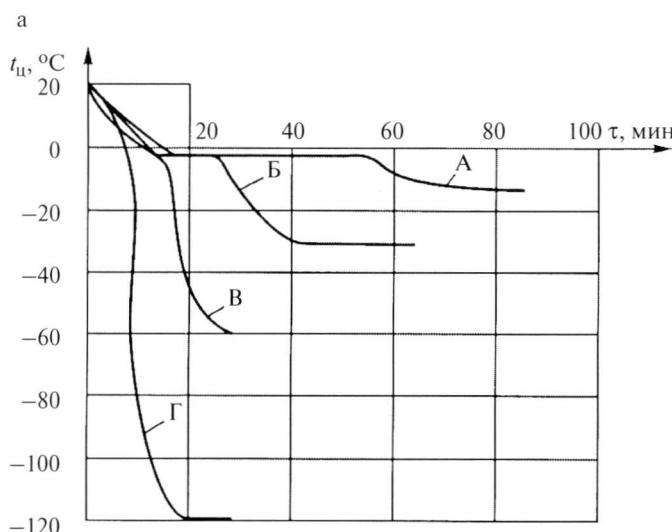


Рис. 1. Кинетические кривые замораживания говяжьего мяса центра образца сферической формы Ø 40 мм:
А — при температуре среды -15°C ; Б — при температуре среды -30°C ; В — при температуре среды -60°C ;
Г — при температуре среды -120°C ; Д — при температуре среды $-50,5^{\circ}\text{C}$

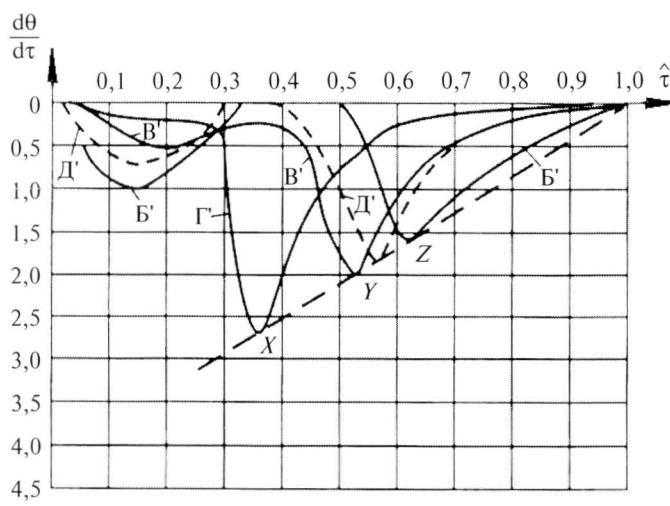


Рис. 2. Графики зависимости скорости изменения температуры центра образца сферической формы от обобщенного времени:

- B' — при температуре среды -30°C ;
- B'' — при температуре среды -60°C ;
- Γ' — при температуре среды -120°C ;
- D' — при температуре среды $-50,5^{\circ}\text{C}$

Задача нахождения наиболее целесообразного режима замораживания кусковых продуктов сферической формы сводится к определению параметров кривой функции $d\theta/d\hat{\tau} = f(\hat{\tau})$ в интервале обобщенного времени $0,2 < \hat{\tau} < 0,5$, т. е. в области температур охлаждающей среды от минус 30°C до минус 60°C .

В начале необходимо найти аналитическое выражение для кривых B' и Γ' в указанном интервале. Наиболее удобной формой аналитического описания является аппроксимация полученных данных полиномом следующего вида:

$$P_m(\hat{\tau}) = \sum_{n=0}^m K_n \hat{\tau}^n, \quad (1)$$

где K_n — постоянные коэффициенты разложения;

$\hat{\tau}$ — аргумент;

n — степень аппроксимации.

Кривые B' и Γ' , заданные табличными значениями абсцисс и ординат, были аппроксимированы полиномом четвертой степени с фиксацией одного из корней в точках $\hat{\tau} = 1$ и $d\theta/d\hat{\tau} = 0$.

Следующим этапом является нахождение координат точек, лежащих на всех промежуточных кривых (между линиями B' и Γ') с шагом температуры охлаждающей среды $0,5^{\circ}\text{C}$, по которым можно было бы восстановить кривую, максимально приближающуюся к оси абсцисс, но не пересекающую ее. Для этого выбирается интервал $\Delta\hat{\tau}$, где наиболее характерно нелинейное изменение тенденции смещения участков кривых без изменения их вида.

В интервале $0,2 < \Delta\hat{\tau} < 0,3$ взяты три сечения при $\theta = \text{const}$ и равные для первого, второго и третьего сечений $\Delta\hat{\tau}_1 = 0,227$; $\Delta\hat{\tau}_2 = 0,253$ и $\Delta\hat{\tau}_3 = 0,267$ соответственно. Если аналитически описать в этих сечениях изменение координат $d\theta/d\hat{\tau}$ в зависимости от температуры охлаждающей среды, а затем восстановить их значения

в интервале температур от минус 30°C до минус 60°C с шагом $0,5^{\circ}\text{C}$, то получим значения функции

$$\frac{d\theta}{d\hat{\tau}} = f(t_{cp})$$

при $\hat{\tau}_1 = 0,227$; $\hat{\tau}_2 = 0,253$; $\hat{\tau}_3 = 0,267$.

Далее проводим аналогичную процедуру в сечениях при $\theta = \text{const}$ и равных для первого, второго и третьего сечений соответственно $\theta_1 = 0,5$, $\theta_2 = 1,0$ и $\theta_3 = 1,5$ в интервале обобщенного времени $0,3 < \hat{\tau} < 0,6$ для точек X , Y и Z , указанных на рис. 2. Полученные данные позволяют аппроксимировать кривую и методом последовательных приближений найти температуру, при которой значения ординат аппроксимирующего полинома 4-й степени не заходят в область с положительными значениями $d\theta/d\hat{\tau}$.

$$\frac{d\theta}{d\hat{\tau}} = 3,33 - 56,5\hat{\tau} + 269\hat{\tau}^2 - 467\hat{\tau}^3 + 260\hat{\tau}^4. \quad (2)$$

В рассматриваемом случае эти условия соблюдаются при температуре охлаждающей среды, равной минус $50,5^{\circ}\text{C}$.

Максимум функции (2) в области $0,227 < \hat{\tau} < 0,556$ имеет координаты $\hat{\tau} = 0,377$ и $d\theta/d\hat{\tau} = -0,0306$.

Восстановление кривой зависимости относительной температуры центра шара от времени при температуре охлаждающей среды, равной минус $50,5^{\circ}\text{C}$, производится интегрированием уравнения (2):

$$\theta(\tau) = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \frac{d\theta}{d\tau} d\tau + c = 3,33\tau - 28,3\tau^2 + 89,7\tau^3 - 119\tau^4 + 52\tau^5 + 0,7637. \quad (3)$$

Для восстановления константы C необходимо определить положение точки C_x , соответствующей левой границе интервала определения функции при аппроксимации методом аналитического описания тенденции сдвига этой точки в зависимости от температуры охлаждающей среды, по нелинейному закону в сечении $\hat{\tau} = 0,227$ (см. рис. 1, б). В этом сечении получаем четыре ординаты на кривых B , B' , Γ и D , по которым аппроксимируем сдвиг C_x полиномом 2-й степени. В этом случае значение аргумента равно $t_{cp} = -50,5^{\circ}\text{C}$.

При восстановлении кривой D к полученным ординатам необходимо прибавлять разницу между значениями, равную $0,7637$ при $t_{cp} = -50,5^{\circ}\text{C}$.

Компьютерная обработка опытных данных позволяет сократить объем экспериментальных работ и затрат на их организацию, а также выбрать наиболее целесообразный режим замораживания, исключая образование горизонтального участка кинетических кривых.

Список литературы

- Воскобойников В. А., Каухчешвили Э. И., Озирная Д. И. Авт. свид. № 359877. Способ охлаждения пищевых продуктов и биологических материалов. 1972.
- Воскобойников В. А., Каухчешвили Э. И., Озирная Д. И. Интенсификация процесса замораживания пищевых продуктов и биологических материалов в поле

магнитных сил / Доклад на XIV Конгрессе Международного института холода // Холодильная техника. 1976. № 2.

3. *Kuzmin M. P., Araev G. S., Voskoboynikov V. A.* A study of the influence of the pressure of gases medium upon the. J. J. F. XV Congress international du Froid // Venise. 1979. N 4.

4. Кузмин М. П., Анаев Г. С., Воскобойников В. А. Экспериментальное исследование теплообмена при замораживании продуктов под избыточным давлением газа в условиях свободной конвекции // Холодильная техника. 1979. № 7.

5. *Воскобойников В. А., Мануйко А. И., Филиппенко С. А.* Исследование процесса замораживания под избыточным давлением газа в условиях вынужденной конвекции: Сб.

«Исследование процессов и совершенствование оборудования для плодоовощной и пищеконцентратной промышленности». — М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981.

6. Алексеев Е. Л., Воскобойников В. А. Выбор на ЭВМ оптимального режима быстрого замораживания продуктов с шаровой конфигурацией гранул. — М.: МГЦ НТИ, 1983.

7. Алексеев Е. Л., Воскобойников В. А. Моделирование и оптимизация по энергозатратам процесса быстрого замораживания пищевых продуктов с применением ЭВМ / Труды Всесоюзной конференции «Механизмы криоповреждения и криозащиты биологических объектов», Харьков, 1984.