

УДК 621.514

Методика определения динамики температурного поля двухслойного продукта сферической формы при замораживании*Д-р техн. наук А.Я. Эглит*, fil24725@yandex.ru*канд. техн. наук Н.Ф. Крупененков*, krupenenkov@mail.ru*А. С. Филатов*, filatov_alex037@mail.ru*К.В. Киссер*, kisser90@list.ru*Университет ИТМО**191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

В связи с ростом потребления замороженных продуктов и расширением производств актуальным становится вопрос подбора оптимального технологического режима для обработки продуктов, а так же проектирования морозильных аппаратов. В данной статье представлена методика определения продолжительности процесса замораживания двухслойного тела в скороморозильном аппарате при $t_{\text{вн}} = -30^{\circ}\text{C}$, на примере расчета времени замораживания пельменя. Методика основана на использовании численного метода расчета времени замораживания. При использовании численного метода дополнительно было учтено как время охлаждения, так и время доохлаждения продукта после кристаллизации в связи с этим время составило ≈ 800 сек. Использование численного метода позволяет получить представление о динамике температурного поля двухслойного продукта сферической формы при термической обработке, а также возможность анализа динамики теплоотвода при замораживании.

Ключевые слова: замораживание, двухслойные пищевые продукты, температурное поле, динамика распределения тепловой нагрузки.

Methods of determining the dynamics of the temperature field a two-layer product of spherical form during the freezing*D. Sc. A.Y. Eglit*, fil24725@yandex.ru*Ph. D. N.F. Krupenenkov*, krupenenkov@mail.ru*A.S. Filatov*, filatov_alex037@mail.ru*K.V. Kisser*, kisser90@list.ru*ITMO University**191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

Due to the growth of consumption of frozen products and the expansion of production becomes relevant the question of selection of the optimal technological mode for processing products, as well as the design of freezers. This article presents a methodology for determining the duration of the freezing process double-layer body, the example of the timing of freezing dumplings. The technique is based on the use of a numerical method for calculating the time of freezing. Using a numerical method allows to obtain an idea of the dynamics of the temperature field of a two-layer product of spherical shape during the heat treatment.

Keywords: freezing, double-layer food, temperature field, the dynamics of the distribution of the thermal load.

Пищевая промышленность является одним из наиболее динамично развивающихся секторов экономики. Ускорение ритма жизни населения, особенно в крупных городах, приводит к тому, что люди вынуждены экономить время на всем, в том числе и на приготовлении пищи. В связи с этим растет число потребителей замороженных полуфабрикатов. Сегодня производители работают над

новыми технологиями обработки продуктов, разрабатывают оригинальные рецептуры и упаковку, расширяют ассортимент, продумывают вопросы хранения и транспортировки товаров [1]. Холодильная обработка продуктов является одним из важнейших и энергоемких этапов производства. Зачастую продукты, подвергаемые холодильной обработке, неоднородны и представляют собой многослойную структуру с различающимися в широких пределах значениями теплофизических параметров. Примером таких продуктов могут являться блинчики с начинкой, чебуреки, пельмени, вареники, фаршированные овощи, хинкали, манты, пирожки с начинкой.

За период с 2001 по 2013 гг. объем выпуска полуфабрикатов увеличился в 9,2 раза. По данным проведенных исследований [1], в 2014 году потребление пельменей в среднем по стране выросло до 82%, а блинчиков с мясом до 74%. Для того чтобы сохранить органолептические показатели, качество, продлить срок хранения продукта, а также улучшить энергетические показатели производства, необходимо правильно подбирать и осуществлять режим охлаждения или замораживания продукта.

На сегодняшний день для определения времени замораживания продуктов шаровой формы используют формулу Планка, рекомендованную Международным институтом холода [8].

$$\tau_0 = \frac{\Delta i}{2\Delta t} \rho_3 \left(\frac{l_3}{A\alpha} + \frac{l_3^2}{B\lambda_3} \right), \quad (1)$$

где: Δi – разница энтальпий продукта при начальной t_0 и конечной t_e температуре, кДж/(кг·К), $\Delta i = i_0 - i_e$; Δt – разница температур между криоскопической температурой продукта $t_{кр}$ и температурой охлаждающей среды, °С, $\Delta t = t_{кр} - t_m$;

ρ_e – плотность замороженного продукта, кг/м³;

l_3 – толщина продукта в замороженном состоянии (измеренная в термическом центре тела), м;

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности продукта к охлаждающей среде, Вт/(м²·К);

λ_3 – коэффициент теплопроводности продукта в замороженном состоянии, Вт/(м·К).

A и B – коэффициенты зависящие от формы замораживаемого тела, для шара соответственно 3 и 12.

Для определения времени промораживания слоя определенной толщины можно воспользоваться модифицированной формулой Планка [10]:

$$\tau(\Delta) = \frac{\Phi \cdot q \cdot \rho \cdot R^2 \cdot w}{\lambda(t_{кр} - t_{xl})} \left[\left(\frac{1}{Bi} + \frac{\Phi}{2\Phi - 1} \right) \left(1 - \left(1 - \frac{\Delta}{R} \right)^{\frac{1}{\Phi}} \right) - \frac{1 - \left(1 - \frac{\Delta}{R} \right)^2}{2(2\Phi - 1)} \right], \quad (2)$$

где: Δ – толщина промораживаемого слоя, м; Φ – коэффициент формы тела; $q = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг – удельная теплота кристаллизации воды; R – характерный размер тела, м; λ_3 – теплопроводность замороженной части тела, Вт/(м·К); $t_{м}$ – температура окружающего тело хладонителя, °С; w – влажность тела, кг влаги/кг; ρ – плотность продукта; кг/м³;

Продолжительность замораживания двухслойного тела (пельмени, плоды с толстой кожурой и т.д.) определяют по формуле [10]:

$$\tau_0 = \frac{\Phi q_2 \rho_2 R_2 w_2}{(t_{кр_2} - t_{xl})} \left\{ \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\Phi R_2}{\lambda_2(2\Phi - 1)} \right) \left(1 - \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{\frac{1}{\Phi}} \right) - \frac{R_2^2 - R_1^2}{2(2\Phi - 1)\lambda_2 R_2} \right\} + \frac{\Phi q_1 \rho_1 R_1 w_1}{(t_{кр_1} - t_{xl})} \left\{ \frac{R_1}{2\lambda_1} + \frac{R_1^{\frac{1}{\Phi}-1}}{\alpha R_2^{\frac{1}{\Phi}-1}} + \frac{\Phi R_1^{\frac{1}{\Phi}-1} (R_2^{2-\frac{1}{\Phi}} - R_1^{2-\frac{1}{\Phi}})}{(2\Phi - 1)\lambda_2} \right\}, \quad (3)$$

где: q_1, ρ_1, w_1 – теплофизические свойства внутреннего слоя (фарш в пельменях); q_2, ρ_2, w_2 – теплофизические свойства внешнего слоя (тесто).

При использовании данного метода приходится принимать следующие допущения [5]:

1. в замороженной части теплоемкость продукта равна нулю;
2. льдообразование в продукте происходит при постоянной температуре (криоскопической);
3. теплофизические свойства замороженной части не зависят от температуры;
4. перед началом замораживания тело охлаждено до криоскопической температуры;
5. температура охлаждающей среды и коэффициент теплоотдачи постоянны на протяжении всего процесса, тепло однородно и плотность его в процессе замораживания не изменяется.

При таком методе для получения более точных значений вводятся дополнительные поправки [10]:

- поправка на ненулевую теплоемкость замороженной части;
- поправка на постепенное вымораживание влаги (отрицательная);
- поправка на изменяющуюся в ходе процесса теплопроводность замороженной части;
- поправка на начальную среднеобъемную температуру тела (температуру начала замораживания).

Формулы определения данных поправок представлены в [10, 8, 5].

Данный метод позволяет сделать быстрый оценочный расчет общей продолжительности процесса замораживания, но зачастую перед технологами и проектировщиками оборудования встает задача определения температурного поля продукта в любой момент времени. Данные значения могут позволить как технологам, так и инженерам сформировать ясную картину процесса, увидеть неблагоприятные зоны а так же повысить эффективность аппаратов и, конечно же, ускорить поиск причины неисправности при её возникновении. В связи с этим, предлагается использование численного метода расчета времени замораживания. Основные идеи метода описаны в [5], за исключением введения в расчет деления продукта на два слоя: слой оболочки и слой начинки. Также в отличие от [5], в используемой для расчета математической модели используется метод изотермических фазовых переходов, описанный в [10].

На рисунке 1 представлена схема деления двухслойного продукта на слои для проведения расчета времени замораживания.

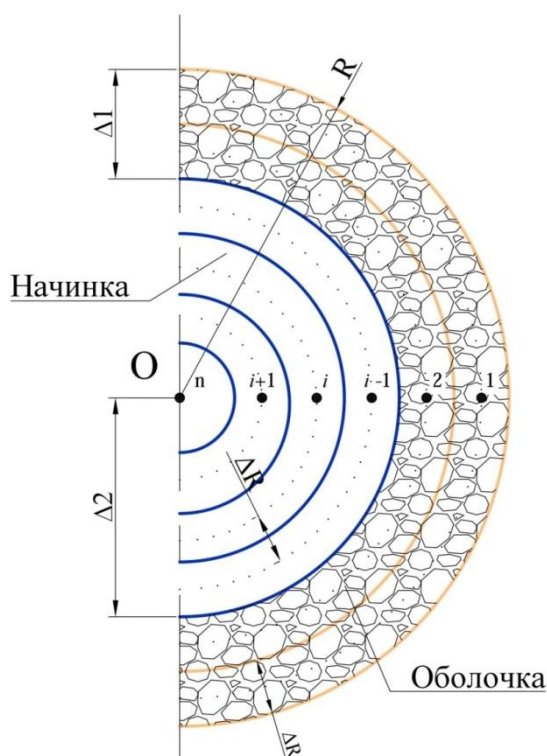


Рис. 1. Схема многослойного продукта

Расчеты были произведены для продукта со следующими геометрическими параметрами[4]:

- определяющий размер (радиус) – $R = 0,0075$ м;
- толщина слоя теста – $\Delta_1 = 0,003$ м.

Параметры процесса:

- температура воздуха внутри аппарата $t_{\text{вн}} = -30^\circ\text{C}$;
- скорость воздуха $v = 3$ м/с;
- коэффициент теплоотдачи с поверхности продукта $\alpha = 55$ Вт/(м $^\circ\text{C}$);

Теплофизические свойства продуктов [2]:

Тесто:

- удельная теплоемкость до заморозки $c_1 = 2971$ Дж/(кг \cdot К);
- удельная теплоемкость после заморозки $c_{13} = 2234$ Дж/(кг \cdot К);
- теплопроводность до заморозки $\lambda_1 = 0,36$ Вт/(м $^\circ\text{C}$);
- теплопроводность после заморозки $\lambda_{13} = 0,94$ Вт/(м $^\circ\text{C}$);
- плотность до заморозки $\rho_1 = 1100$ кг/м 3 ;
- плотность после заморозки $\rho_{13} = 1063$ кг/м 3 ;
- криоскопическая температура $t_{\text{кр1}} = -3,15^\circ\text{C}$;
- теплота фазового перехода $r_1 = 200$ кДж/кг.

Начинка:

- удельная теплоемкость до заморозки $c_2 = 3347$ Дж/(кг \cdot К);
- удельная теплоемкость после заморозки $c_{23} = 2134$ Дж/(кг \cdot К);
- теплопроводность до заморозки $\lambda_2 = 0,37$ Вт/(м $^\circ\text{C}$);
- теплопроводность после заморозки $\lambda_{23} = 1,28$ Вт/(м $^\circ\text{C}$);
- плотность до заморозки $\rho_2 = 1050$ кг/м 3 ;
- плотность после заморозки $\rho_{23} = 995$ кг/м 3 ;
- криоскопическая температура $t_{\text{кр2}} = -2,33^\circ\text{C}$;
- теплота фазового перехода $r_2 = 250$ кДж/кг.

На рисунке 2 представлен график распределения температуры по объему замораживаемого продукта в процессе замораживания. При расчете времени замораживания по формуле (3) было получено значение $\tau = 525$ сек $\approx 8,75$ мин. При использовании численного метода дополнительно было учтено как время охлаждения так и время до охлаждения продукта после кристаллизации в связи с этим время составило ≈ 800 сек.

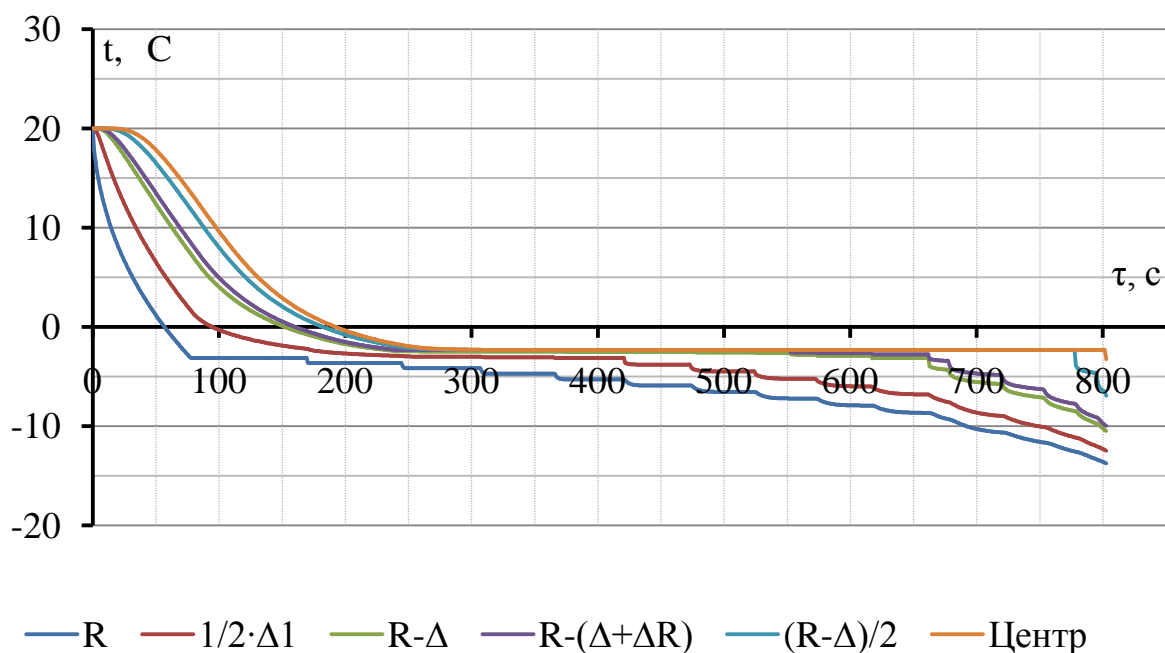


Рис. 2 Температурное поле продукта при замораживании

Преимуществами представленного метода является более точное определение продолжительности замораживания продуктов шаровой формы; учет динамики изменения теплофизических параметров продукта при его термической обработке; возможность анализа динамики теплоотвода при замораживании. Недостатками является необходимость использования вычислительной техники (на сегодняшний день данный недостаток незначителен), отсутствие на данный момент возможности выбора между различными геометрическими формами продукта.

Литература

1. Нагарокова Д.К., Нестеренко А.А. Анализ российского рынка полуфабрикатов // Молодой ученый. 2015. № 2. С. 175-178.
2. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. М.: Агропромиздат, 1990. 287 с.
3. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Шкотова Т.В., Казаков Д.С. Кинетика замораживания многослойных пищевых продуктов // Известия вузов. Пищевая технология. 2010. № 2-3.
4. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Кременевская М.И., Москвичева Е.В. О продолжительности замораживанияпельменей // Мясная индустрия. 2012. №5. С. 62-63.
5. Эглит А.Я., Филатов А.С. Численный метод расчета время замораживания продуктов шаровой формы // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2014. № 2(20). С. 259-272
6. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.
8. Постольский Я., Груда З. Замораживание пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1978. 606 с.
9. Fikiin K.A. Generalized numerical modelling of unsteady heat transfer during cooling and freezing using an improved enthalpy method and quasi-one-dimensional formulation. *Int J. Refrig.* 1996, V. 19, no. 2, pp. 132-140.
10. Бараненко А.В., Куцакова В.Е., Борзенко Е.И., Фролов С.В. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Ч.3. Теплофизические основы. М.: КолоС, 2004. 249 с.

11. Улитин В.В. Метод элементарных объемов в задаче с фазовыми переходами. Труды XIX международной конференции «Математическое моделирование в механике сплошных сред». Т. III. СПб.: НИИХ СПбГУ, 2001. С. 234-242.
12. Ишевский А.Л., Marin Iniesta F. Перспективы и риски агропромышленного комплекса Российской Федерации в условиях закона убывающей эффективности // Вестник Международной академии холода. 2014. №3.