

УДК 637.52.001.8

О.Н. Буянов, И.В. Буянова**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПРОДУКТОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОЗОННОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ХОЛОДОСНАБЖЕНИЯ**

Рассмотрены методы моделирования процесса быстрого замораживания пищевых продуктов, основанные на модели регулируемого теплоотвода по принципу программного замораживания. В данном случае скороморозильный аппарат рассматривается как система модулей, в каждом из которых можно независимо обеспечивать необходимые для технологического процесса условия теплоотвода для осуществления процесса первой стадии замораживания. Основное внимание уделено анализу формирования фронта кристаллизации на первой стадии замораживания с учетом особенностей многозонной комбинированной системы холодоснабжения. Разработана математическая модель для определения продолжительности замораживания молочных продуктов в двухзонном скороморозильном аппарате комбинированного типа «азот + воздух» с регулируемым теплоотводом. Определены интегральные характеристики математической модели. Доказана ее адекватность реальному процессу замораживания.

Комбинированный способ, замораживание, молочные продукты, скороморозильный аппарат, азот, температура, зона, продолжительность.

Введение

Моделирование процессов замораживания различных пищевых продуктов и сырья с точной постановкой задачи и полученными результатами было проведено такими авторами, как И.Г. Алямовский, А.М. Бражников, К.П. Венгер, Д.Г. Рютов, Г.Б. Чижов, И.Г. Чумак, А.П. Шеффер и др. В основе этих исследований лежали теории Планка, Стефана, Ляме, Клапейрона, а решение задачи сводилось к определению продолжительности замораживания пищевого продукта до заданной среднеобъемной либо конечной температуры в центре тела в критериальном, безразмерном или классическом виде.

Наиболее простая зависимость для определения продолжительности процесса замораживания разработана Планком. Это решение считается классическим, отличается простотой и удобством использования. Она построена при следующих допущениях:

- однородное влагосодержащее тело перед замораживанием охлаждено до криоскопической температуры;
- льдообразование происходит без переохлаждения и совершается изотермично при криоскопической температуре, а теплофизические свойства замороженной части общего объема тела не зависят от температуры, теплоемкость замороженной части равна нулю;
- замораживание происходит путем отвода тепла от поверхности тела при постоянстве коэффициента теплоотдачи и температуры теплоотводящей среды.

Первое аналитическое решение задачи о продолжительности замораживания плоской пластины от начальной температуры выше криоскопической до конечной температуры центра ниже криоскопической, получившее широкое признание в холодильной технологии, было получено в 1936 г. Д.Г. Рютовым [1].

Чтобы учесть продолжительность понижения температуры пластины после схождения границ раздела фаз, допускается линейное изменение температуры по толщине замороженного слоя. Дальнейший

теплообмен в пластине анализируется на основании закономерностей простого охлаждения. Время, в течение которого температура центра пластины понижается от криоскопической до конечной заданной, суммируется с продолжительностью, вычисленной по формуле Планка.

Для учета влияния начальной температуры пластины на продолжительность замораживания к количеству тепла, отводимого от единицы массы при замораживании, введен биномиальный множитель, равный $(1 + 0,0053t_n)$.

И.Г.Алямовский уточнил формулу Д.Г. Рютова, приняв, что в начальный момент замерзания распределение температуры параболическое [2].

В.Е. Куцаковой предложена модель для расчета продолжительности замораживания бесконечной пластины, отличающаяся простой математической формой и приведенная к формуле Планка с учетом периода домораживания и процесса движения фронта кристаллизации. В модели принята линейная аппроксимация температурного поля материала по оси распределения температурного фронта на стадиях замораживания и периода релаксации температурного поля. Недостатком данной модели является упрощенное представление температурного профиля в виде прямой линии [3].

Обычно считается, что в процессе замораживания коэффициент теплоотдачи за время протекания процесса изменяется незначительно. В то же время известно, что линейная и объемная скорости замораживания резко возрастают с увеличением коэффициента теплоотдачи при малой толщине замороженного слоя, а при увеличении толщины этот эффект сглаживается. В условиях же регулируемого теплоотвода в двухзонном скороморозильном аппарате комбинированного типа «азот + воздух» происходит существенное изменение коэффициента теплоотдачи, что необходимо учитывать.

Новый подход к решению задачи по определению продолжительности замораживания биологических объектов предлагает В.М. Стефановский, считая, что при холодильной обработке важно знать не толщину замороженного слоя, а массу незамерзшей части к моменту времени τ [4].

Таким образом, рассмотренные аналитические зависимости для определения продолжительности замораживания имеют преимущество в относительной простоте уравнений, но имеют общие недостатки, присущие формуле Планка и ее модификациям: излишние упрощения в постановке задачи, представление температурного профиля в виде линейной функции.

При решении задач промерзания по Стефану граница раздела фаз представляется в виде линии, разделяющей замерзшую и незамерзшую зоны, которую принято называть фронтом кристаллизации, продвигающимся при замораживании от периферии к центру.

Постановка задачи Стефана для замораживания пластины продукта в интерпретации А.М. Бражникова рассматривает пластину толщиной $2l$ с начальной температурой t_n и криоскопической $t_{кр}$, помещенную в среду с температурой $t_{ср}$ ($t_{ср} \leq t_{кр} \leq t_n$). Теплофизические характеристики пластины считаются постоянными в пределах каждой зоны и меняются скачкообразно при фазовых превращениях. Процесс замораживания состоит из двух этапов. На первом происходит охлаждение продукта от начальной температуры до криоскопической на поверхности, на втором этапе – продвижение фронта кристаллизации от поверхности к центру. Предполагается, что вся влага по окончании второго этапа замораживает. Рассматриваемая задача нелинейная. Точного решения не имеет. Для решения пользуются различными приближенными методами. Одним из таких методов является подбор функции температуры по экспериментальным данным, отыскание коэффициента из крайних условий и решение дифференциального уравнения, вытекающего из условия Стефана [5].

Академик Л.С. Лейбензон разработал способ, позволяющий вместо производных на границе раздела фаз ввести величины, характеризующие граничные условия на поверхности [6].

Наилучшие результаты при определении продолжительности быстрого замораживания большой группы продуктов получены К.П. Венгер, где в основу решения рассматриваемой задачи теплопереноса в условиях непрерывного теплоотвода положен приближенный метод – метод интегральных соотношений Л.С. Лейбензона, развитый А.М. Пирведеяном, В.А. Карпычевым, А.М. Бражниковым [7].

Несмотря на обилие теорий и множество разработанных методик решения данной задачи, на практике сложно определить с единой моделью, позволяющей с большой точностью описать и учесть все факторы, входящие в постановку задачи. Поэтому при различных вариантах и способах замораживания любого биологического объекта необходимо учитывать геометрическую форму продукта, неоднородность структуры, особенности изменения теплофизических характеристик продукта при фазовом переходе влаги

в лед, наличие упаковки, качество продукта, поступающего на обработку и т.д.

Некоторые из этих факторов учесть легко, а некоторые находятся в сложной зависимости от стадии процесса. Поэтому при аналитическом описании процессов холодильной обработки рационально воспользоваться уже имеющимися готовыми решениями теории теплопроводности, которые позволяют свести решение задачи замораживания продукта сложной формы к замораживанию продуктов, представленных эквивалентными телами простой формы в виде пластины, цилиндра или шара.

Целью настоящего исследования является разработка математической модели для определения продолжительности замораживания биологических объектов в двухзонном скороморозильном аппарате комбинированного типа «азот + воздух» с регулируемым теплоотводом.

Объекты и методы исследований

При моделировании замораживания за основу принята математическая модель, разработанная К.П. Венгер [7]. Для проверки адекватности разработанной математической модели проводились экспериментальные исследования на специальном стенде (рис. 1).

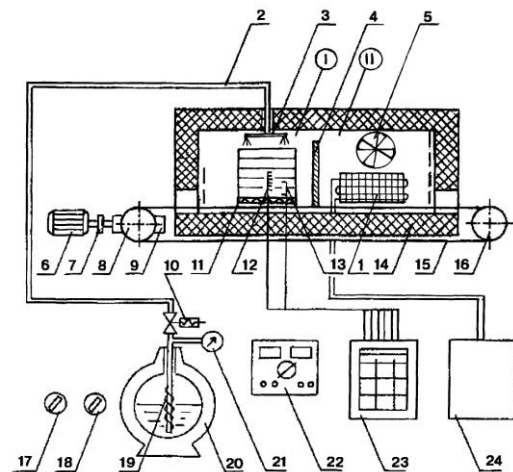


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда: 1 – испарители; 2 – трубопровод жидкого азота; 3 – жидкостный коллектор азота с форсунками; 4 – перегородка; 5 – вентилятор; 6 – двигатель постоянного тока; 7 – муфта; 8 – ведущий барабан; 9 – редуктор; 10 – соленоидный клапан; 11 – противни; 12 – блок термопар; 13 – датчики тепломеров; 14 – теплоизолированный туннель; 15 – трос; 16 – ведомый барабан; 17 – регулятор напряжения, подаваемого на нагревательный элемент; 18 – регулятор напряжения, подаваемого на вентилятор; 19 – нагревательный элемент; 20 – сосуд Дьюара АДС-15; 21 – электроконтактный манометр; 22 – выпрямитель напряжения; 23 – блок сопряжения; 24 – холодильная машина; I – зона орошения жидким азотом (активного воздействия); II – зона выравнивания температуры по объему продукта

Конструкция аппарата позволяет поддерживать температуру в зоне I до минус 120 °С, в зоне II до минус 42 °С и создавать скорость движения воздуха

до 8 м/с. В процессе проведения экспериментов измерялись и контролировались следующие параметры:

- температура паров азота и воздуха в зонах нахождения продукта;
- температурное поле исследуемого образца;
- плотность теплового потока от продукта к охлаждающей среде;
- скорость циркуляции потока воздуха в зоне II;
- толщина порций исследуемых продуктов.

В качестве чувствительного элемента для измерения температуры среды в модулях и исследуемом образце в процессе замораживания использовались хромель-копелевые термопары с диаметром спая 0,3 мм. Плотность теплового потока измеряли с помощью датчиков-тепломеров ДПТП.

Скорость потока азота и воздуха в туннеле измерялась термоанемометром Т-3 с диапазоном измерения $0,1 \div 15$ м/с.

Экспериментальные исследования проводились в научно-исследовательских лабораториях кафедр «Теплохладотехника», «Технология молока и молочных продуктов» и «Технология жиров, биохимия и микробиология» Кемеровского технологического института пищевой промышленности.

Объектами замораживания являлись молочные продукты, из которых рассматривались представители видовых групп: голландский сыр и творог различной жирности, выработанный кислотосычужным способом.

Толщина образцов составляла 0,025; 0,03; 0,05 м, массой от 0,1 до 0,5 кг.

Объекты исследования помещали на транспортирующий орган экспериментального стенда и замораживали от начальной температуры 15°C до заданной среднеобъемной температуры продукта минус 20°C .

Эксперименты по замораживанию проводились при следующих условиях: быстрое замораживание при температуре паров азота в первой зоне от минус 50 до минус 90°C ; во второй зоне при температуре воздуха от минус 20 до минус 40°C и скорости его циркуляции 5 м/с.

Экспериментальные исследования теплообменных процессов при замораживании проводились с применением математических методов планирования эксперимента.

Результаты и их обсуждение

Рассматриваемая ситуация для теплообмена при быстром замораживании представлена как система модулей, в каждом из которых можно независимо обеспечивать необходимые для технологического процесса условия теплообмена. При этом учитываются особенности многозонной комбинированной системы холодоснабжения:

- в первой зоне (модуле) за счет воздействия паров азота продукт замораживается до среднеобъемной температуры, равной криоскопической температуре продукта;

- во второй зоне (которая может состоять из нескольких модулей) – холодным воздухом, охлажденным выходящими парами азота из первого модуля (частично) и машинной системой охлаждения (основной) до заданной конечной температуры продукта.

В основу разрабатываемой модели положен метод интегральных соотношений Л.С. Лейбензона с учетом допущений:

- продукт имеет форму неограниченной пластины;
- условия теплообмена симметричны;
- температура охлаждающей среды постоянна в пределах каждой стадии;
- теплофизические характеристики продукта изменяются скачком при фазовом переходе и постоянны в пределах одной фазы.

Для аналитического описания процесса быстрого замораживания использованы условные упрощения, а задача решена с разделением всего процесса на три стадии, которые рассматриваются последовательно:

- первая стадия – охлаждение до криоскопической температуры на поверхности продукта;
- вторая стадия – замораживание до криоскопической температуры в термическом центре продукта;
- третья стадия – охлаждение замороженного продукта до заданной температуры в термическом центре.

Первая стадия. В основу известного решения положена гипотеза о наличии «температурного фронта», который распространяется от поверхности к центральным слоям объекта с конечной скоростью.

Точная постановка задачи заключается в решении уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

удовлетворяющего начальному

$$t(x, 0) = t_n = \text{const} \quad (2)$$

и граничным условиям

$$\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=r} = 0; \quad \left[\frac{\partial t}{\partial x} - \frac{a}{\lambda} \cdot (-t_{cp}) \right]_{x=0} = 0, \quad (3)$$

где $t_{cp} < t_{кр} < t_n$, t_{cp} – температура среды, $^\circ\text{C}$; t_n – начальная температура продукта, $^\circ\text{C}$; $t_{кр}$ – криоскопическая температура продукта, $^\circ\text{C}$; $\delta = 2r$ – толщина пластины продукта, м; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; λ – коэффициент теплопроводности продукта, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Расчетная схема продукта на стадии охлаждения показана на рис. 2.

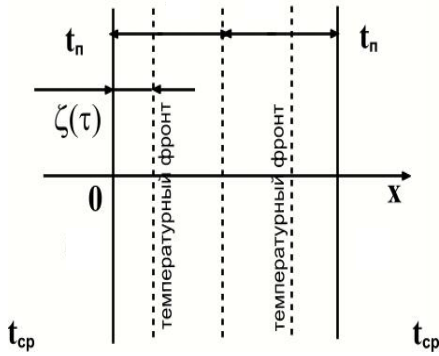


Рис. 2. Формирование температурного фронта на стадии охлаждения

Для решения рассматриваемой задачи вводятся безразмерные переменные:

$$\theta = \frac{t - t_n}{t_n - t_{cp}}; \quad \xi = \frac{x}{r}; \quad Fo = \frac{a \cdot \tau}{r^2}; \quad Bi_2 = \frac{\alpha}{\lambda_2} \cdot r \quad (4)$$

и, кроме того:

$$\theta_{кр} = \frac{t_n - t_{кр}}{t_n - t_{cp}} \quad (5)$$

Продолжительность первой фазы стадии охлаждения:

$$Fo_I^a = \frac{1}{12Bi_2} \cdot \left[Bi_2^2 + 4Bi_2 - 8 \ln \left(1 + 0,5Bi_2 \right) \right] \quad (6)$$

Продолжительность второй фазы стадии охлаждения:

$$Fo_I^b = \frac{Bi_2 + 3}{3Bi_2} \cdot \ln \left(\frac{2}{Bi_2 + 2} \cdot (1 - \theta_{кр}) \right) \quad (7)$$

Полная продолжительность первой стадии – охлаждение до криоскопической температуры на поверхности пластины определяется:

$$Fo_I = Fo_I^a + Fo_I^b \quad (8)$$

Вторая стадия. Пластина разбивается на две зоны: замороженную и незамороженную. Принято, что замороженной зоной является зона $0 \leq x \leq \tilde{x}(\tau)$, а незамороженной – $\tilde{x}(\tau) \leq x \leq r$, где $x = \tilde{x}(\tau)$ – граница фронта кристаллизации (рис. 3). Решение указанных уравнений должно подчиняться условиям:

$$t(x,0) = t_{кр} + \frac{\alpha}{2 \cdot r \cdot \lambda_2} \cdot (t_{cp} - t_{кр}) \cdot (x^2 - 2 \cdot r \cdot x); \quad (9)$$

$$\left[\frac{\partial t}{\partial t} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (t - t_{cp}) \right]_{x=0}; \quad \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=r} = 0; \quad (10)$$

$$\left(-t \right)_{x=\tilde{x}} = 0; \quad (t)_{x=\tilde{x}} = t_{кр} \quad (11)$$

Кроме того, функции t_1 и t_2 должны удовлетворять условию Стефана:

$$\left(\lambda_1 \cdot \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda_2 \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=\tilde{x}} = L \cdot W \cdot \omega \cdot \rho \cdot \frac{d\tilde{x}}{d\tau}, \quad (12)$$

где λ_1 – коэффициент теплопроводности замерзшей зоны, Вт/(м·К); L – теплота фазового перехода кристаллизации, Дж/кг; W – относительное влагосодержание продукта, %; ω – доля вымороженной влаги, ед.

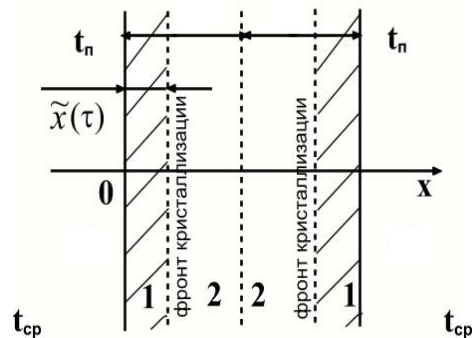


Рис. 3. Расчетная схема продукта на стадии замораживания

Далее решаемая задача приводится к безразмерному виду:

$$\theta_1 = \frac{t - t_n}{t_n - t_{cp}}; \quad \xi = \frac{x}{r}; \quad \xi(\tau) = \frac{\tilde{x}(\tau)}{r};$$

$$\theta_{кр} = \frac{t_n - t_{кр}}{t_n - t_{cp}}; \quad Fo = \frac{a \cdot \tau}{r^2}; \quad Bi_1 = \frac{\alpha}{\lambda_1} \cdot r. \quad (13)$$

Формула для определения продолжительности второй стадии имеет следующий вид:

$$Fo_{II} = \frac{\beta}{2\eta} \cdot \frac{Bi + 2}{Bi_1(1 - \theta_{кр})} + \frac{1}{3} \times \left[\left(\frac{Bi + 1}{Bi_1} \right)^2 \cdot \ln \left(\frac{Bi + 1}{Bi_1} \right) \cdot \frac{2Bi + 1}{Bi_1} \right] \quad (14)$$

где
$$\beta = \frac{L \cdot \omega \cdot \rho \cdot a \cdot W}{\lambda_2 \cdot (t_n - t_{cp})}; \quad \eta = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Общая продолжительность нахождения продукта в первой зоне (модуле) рассчитывается по сумме $Fo_I + Fo_{II}$.

Как отмечалось ранее, с точки зрения технологического процесса к моменту перехода продукта из первой зоны многозонного скороморозильного аппарата комбинированного типа во вторую среднеобъемная температура продукта должна быть равна криоскопической. Для определения момента перехода необходимо рассчитать среднеобъемную температуру продукта на этом этапе замораживания. Для этого воспользуемся методикой К.П. Венгер, согласно которой пластина продукта в этой ситуации разбивается на три зоны: замерзшая I толщиной ε_1 , незамерзшая II и замерзшая с другой стороны продукта зона III толщиной ε_2 [7]. Поскольку предполагается различная толщина замороженных слоев, то интенсивность теплообмена тоже различна. Поэтому вводится коэффициент асимметрии k .

В такой интерпретации постановки задачи формула для определения среднеобъемной безразмерной температуры:

$$\theta_v = \frac{Bi_2}{4} \left(\frac{\varepsilon_1^2}{Bi_2 \varepsilon_1 + 1} + \frac{\varepsilon_2^2}{Bi_2 \varepsilon_2 + k} \right) + \frac{\theta}{6} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2. \quad (15)$$

Если обеспечиваются симметричные условия теплоотвода, то $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ и $k = 1$. Тогда

$$\theta_v = \frac{Bi_2}{4} \left(\frac{\varepsilon^2}{Bi_2 + 1} \right). \quad (16)$$

После перехода во вторую зону (модуль) многозонного аппарата стадия замораживания еще продолжается, но уже при других условиях теплоотвода, т.е. при других значениях критерия Bi . Причем важно учесть, что если в первой зоне продукт охлаждается парами азота с температурой t_{cp1} (по данным эксперимента $t_{cp1} = -70$ °C), то во второй зоне – потоком воздуха с температурой t_{cp2} (по данным эксперимента $t_{cp2} = -30$ °C). При этом среднеобъемная температура продукта во второй зоне продолжает понижаться до встречи фронтов кристаллизации, что в итоге будет означать завершение стадии замораживания, после чего начнется стадия домораживания до заданной температуры: либо среднеобъемной, либо в термическом центре продукта в зависимости от условий технологического процесса.

Для определения промежутка времени завершения замораживания во второй зоне нужно определить температуру в термическом центре продукта θ_c в момент перехода, а также толщину замороженного слоя ε . Учитывая симметричность рассматриваемой

задачи, по всей видимости, $\theta_c = \theta/2$. Тогда искомым промежутком времени:

$$Fo = \frac{\Delta\varepsilon}{\beta \theta_{cp} \theta_u} - \frac{\eta}{2\beta \theta_{cp} \theta_u^2} \ln \left(\frac{2\theta_u Bi\varepsilon + 2\theta_u - \eta Bi}{2\theta_u Bi\Delta\varepsilon + 2\theta_u - \eta Bi} \right). \quad (17)$$

Третья стадия. Здесь рассмотрено охлаждение замороженного продукта до заданной конечной среднеобъемной температуры тела (рис. 4).

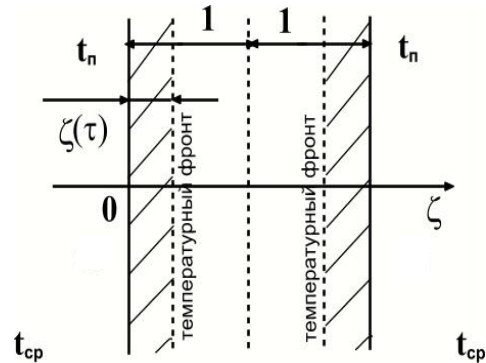


Рис. 4. Расчетная схема продукта на стадии домораживания

Решается уравнение

$$\frac{\partial T_1}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T_1}{\partial \xi^2}; \quad (18)$$

при граничных условиях

$$\left(\frac{\partial T_1}{\partial \xi} \right)_{\xi=1} = 0; \quad \left(\frac{\partial T_1}{\partial \xi} - Bi_1 \cdot T_1 \right)_{\xi=0} = -Bi_1. \quad (19)$$

Результатом решения является формула для определения продолжительности домораживания пластины до среднеобъемной температуры t_v :

$$Fo_{III} = \frac{Bi_1 + 3}{3Bi_1} \cdot \ln \left(\frac{2(1-\theta_{cp}) \cdot (Bi_1 + 3)}{3(Bi_1 + 2) \cdot (-\theta_{lv})} \right). \quad (20)$$

Общая продолжительность замораживания пластины продукта определяется как сумма продолжительности отдельных стадий:

$$Fo = Fo_I + Fo_{II} + Fo_{III}. \quad (21)$$

В формулу (14) входит значение доли вымороженной влаги, которое связано со среднеобъемной температурой пластины продукта в момент достижения криоскопической температуры в центре. Для определения доли вымороженной влаги реальных объектов исследования использована формула Д.Г. Рютова, в которой учитывается относительное количество незамерзающей связанной влаги (σ) как доля от количества сухих веществ:

$$\omega = \left(1 - \sigma \frac{1 - \omega_p}{W} \right) \left(1 - \frac{t}{t_{кр}} \right). \quad (22)$$

где W – массовая доля влаги, доля единиц; ω_p – массовая доля вымерзающей влаги, доля единиц.

В табл. 1 представлены результаты расчета доли вымороженной влаги в объектах исследования в широком диапазоне температур.

Таблица 1

Результаты расчета доли вымороженной влаги

Температура, °С	Творог, м.д.ж. 5 %, $W = 74,5$ %	Сыр голландский брусковый, $W = 40,5$ %
-10	0,699	0,600
-15	0,799	0,730
-20	0,849	0,800
-25	0,879	0,840
-30	0,899	0,870
-35	0,913	0,880
-40	0,924	0,882
-45	0,932	0,888
-50	0,939	0,890
-55	0,945	0,893
-60	0,949	0,900
-70	0,956	0,920

При изучении теплофизических процессов холодильной технологии среднеобъемная температура рассматривается как очень важная величина. При нестационарных процессах, характерных для быстрого замораживания, она меняется во времени, так как изменяется температурное поле тела и его теплофизические характеристики. В связи с этим усложняется задача по определению данной температуры.

Упростив задачу, приняв допущение о постоянстве теплофизических характеристик в пределах одной фазы, безразмерную среднеобъемную температуру продукта можно представить интегралом:

$$\theta_{v1} = \int_0^1 \theta_1(Fo_{II}) d\xi. \quad (23)$$

Из интегрального соотношения имеем:

$$\theta_1(Fo_{II}) = \chi_1 \xi + \chi_2. \quad (24)$$

где

$$\chi_1 = -\frac{Bi_1(-\theta_k)}{1 + Bi_1 \xi}; \quad \chi_2 = \frac{\theta + Bi_1 \xi}{1 + Bi_1 \xi}. \quad (25)$$

В момент времени Fo_{II} , рассматриваемый в задаче, $\xi = 1$, тогда

$$\chi_1 = -\frac{Bi_1(-\theta_k)}{1 + Bi_1}; \quad \chi_2 = \frac{\theta + Bi_1}{1 + Bi_1}. \quad (26)$$

Подставляя выражение (26) в (24), получаем

$$\theta_1(Fo_{II}) = -\frac{Bi_1(-\theta_k)}{1 + Bi_1} \xi + \frac{\theta + Bi_1}{1 + Bi_1}. \quad (27)$$

Вводим выражение (27) в интеграл (23) и находим

$$\theta_{v1} = \frac{\theta + Bi_1 + Bi_1}{2(1 + Bi_1)}. \quad (28)$$

Учитывая $\theta_k = \frac{t_{кр} - t}{t_{кр} - t_{сп}}$, получим

$$t_v = t_n - \frac{\theta + Bi_1 + Bi_1}{2(1 + Bi_1)} (t_n - t_{сп}). \quad (29)$$

Тогда конечная температура в центре продукта, соответствующая заданной среднеобъемной, будет равна:

$$t_k = \frac{2 \cdot t_v \cdot (1 + Bi_1) - Bi_1 \cdot t_{сп}}{2 + Bi_1}. \quad (30)$$

Анализ результатов исследований показал, что при быстром замораживании объектов исследования в парах азота в первой зоне скороморозильного аппарата комбинированного типа температура поверхности продукта очень быстро достигает криоскопического значения. В результате продолжительность первой стадии процесса стремится к нулю. В таком случае гипотеза «теплого фронта», положенная в основу модели, неприменима, так как поверхность продукта достигает криоскопической температуры значительно раньше, чем температурный фронт термического центра. Аналитически это приводит к тому, что второе слагаемое Fo_I^o (14) становится отрицательным, что противоречит критерию применимости формулы для расчета Fo . Следовательно, при условии невыполнения данного критерия математическая формула для расчета безразмерного времени всего процесса замораживания продукта будет иметь вид:

$$Fo = Fo_{II} + Fo_{III}. \quad (31)$$

В табл. 2 и 3 представлены теплофизические характеристики продуктов, использованные для проведения расчетов.

Результаты расчета продолжительности замораживания показывают, что максимальная величина предельной относительной ошибки не превышает 14 %, что свидетельствует об адекватности разработанной математической модели реальному процессу.

Таблица 2

Теплофизические характеристики свежих объектов исследования [8]

Наименование продукта	Массовая доля влаги, %	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температуропроводность, 10 ⁷ м/с ²
Сыр голландский	40,5±0,2	1070	2,5	0,35	1,31
Творог классический, м.д.ж. 5 %	74,5±0,2	962	3,27	0,43	1,37

Таблица 3

Теплофизические характеристики замороженных продуктов [8]

Наименование продукта	Криоскопическая температура, °С	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, кДж/(кг·К)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температуропроводность, 10 ⁷ м/с ²
Сыр голландский	-6,2	1025	1,28	1,10	8,38
Творог классический, м.д.ж. 5 %	-3,0	960	2,18	1,15	5,49

Список литературы

1. Рютов, Д.Г. Быстрое замораживание мяса / Д.Г. Рютов, Д.А. Христуло. – М.: Пищепромиздат, 1956. – 140 с.
2. Алямовский, И.Г. Аналитическое исследование технологических процессов обработки мяса холодом / И.Г. Алямовский, Р.Г. Гейнц, Н.А. Головкин и др. – М.: ЦНИИТЭИмясомолпром, 1970. – 183 с.
3. Куцакова, В.Е. О времени замораживания пищевых продуктов / В.Е. Куцакова, С.В. Фролов, М.И. Яковлева и др. // Холодильная техника. – 1999. – С. 16–17.
4. Стефановский, В.М. Новый метод расчета продолжительности замораживания мяса / В.М. Стефановский // Холодильная техника. – 1989. – № 11. – С. 15–19.
5. Бражников, А.М. Теория термической обработки мясopодуKтов / А.М. Бражников. – М.: Агропромиздат, 1987. – 270 с.
6. Лейбензон, Л.С. К вопросу о затвердевании земного шара из расплавленного состояния / Л.С. Лейбензон // Труды АН СССР. – 1965. – Т. 4.
7. Венгер, К.П. Азотные системы хладоснабжения для производства быстрозамороженных пищевых продуктов / К.П. Венгер, А.А. Антонов. – Рязань: Узоречье, 2002. – 207 с.
8. Латышев, В. Стандартизация свойств пищевых продуктов / В. Латышев, Н. Цирульникова // Холодильная техника. – 1990. – № 2. – С. 33–34.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

O.N. Buyanov, I.V. Buyanova

**MODELING OF FOOD PRODUCTS FREEZING IN THE MULTIZONED
COMBINED REFRIGERATION SUPPLY SYSTEM**

The methods of modeling of the fast freezing for foodstuff based on the model of adjustable heat removal according to the principle of program freezing are considered. In this case the quick-freezer is considered as a system of modules, in each of which it is possible to independently provide the heat removal for the realization of fast freezing which is necessary for the technological process. Much attention is paid to the analysis of freezing front formation at the first stage of freezing in view of the features of the multizoned combined system of refrigeration supply. The mathematical model for definition of freezing duration for dairy products in two-zoned quick-freezer of the combined "Nitrogen + Air" type with adjustable heat removal is developed. The integrate characteristics of the mathematical model are determined. It's adequacy to real process of freezing is proved.

The combined way, freezing, dairy products, quick-freezer, nitrogen, temperature, zone, duration.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

