

УДК 621.56/.59; 664.8.036.2

Аналитические исследования процесса быстрого охлаждения бланшированной растительной продукции газообразным азотом

Д-р техн. наук К. П. ВЕНГЕР¹, В. И. ПОПКОВ²,

канд. техн. наук О. А. ФЕСЬКОВ³

¹vengerkp@gmail.com, ²dorf88@yandex.ru, ³Feskov76@mail.ru

Московский государственный университет пищевых производств

Предложена универсальная математическая модель расчета продолжительности быстрого охлаждения бланшированной растительной продукции газообразным азотом. Модель рассматривает два этапа перемещения температурных фронтов в продукте и позволяет учесть симметричные или несимметричные условия теплообмена. Получены новые конечные уравнения для расчета продолжительности охлаждения, а также конечной температуры в термическом центре продукта. Получено уравнение для определения начальной температуры продукта в случае, когда после бланширования и перед началом охлаждения продукт пребывает некоторое время на открытом воздухе и охлаждается в условиях естественной конвекции. Предложена методика расчета коэффициента теплоотдачи и получены результаты его определения, в виде табличных значений и графических зависимостей, а также результаты оценки степени влияния на его величину толщины продукта, температуры и скорости циркуляции газообразного азота. Получены результаты расчетов продолжительности охлаждения, с учетом двух вариантов условий теплообмена, представленные графическими ее зависимостями от основных процессных параметров в широком их интервале: толщины продукта, температуры и скорости циркуляции газообразного азота, температуры отработанных паров криоагента. Представлены результаты оценки степени влияния этих параметров на величину продолжительности охлаждения.

Ключевые слова: математическая модель, быстрое охлаждение, газообразный азот, растительная продукция, бланширование.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 25.01.2017, принята к печати 28.07.2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-53-61

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Венгер К. П., Попков В. И., Феськов О. А. Аналитические исследования процесса быстрого охлаждения бланшированной растительной продукции газообразным азотом // Вестник Международной академии холода. 2017. № 3. С. 53–61.

Analytical studies of the rapid cooling process blanched vegetable products nitrogen gas

D. Sc. K. P. VENGER¹, V. I. POPKOV², Ph. D. O. A. FESKOV³

¹vengerkp@gmail.com, ²dorf88@yandex.ru, ³Feskov76@mail.ru

Moscow National University of Food Production

The article deals with a universal mathematical model for calculating the length of blanched vegetable products' rapid cooling with nitrogen gas. The model takes into account two stages of movement of temperature fronts in the product and allows to consider symmetric or asymmetric heat transfer conditions. Novel final equations for calculating the duration of the cooling and final temperature in the thermal center of the product are obtained. An equation for determining the initial temperature of the product in the case when, after blanching and before cooling, the product remains outdoors for some time and is cooled under natural convection. A method of calculating heat transfer coefficient is proposed and its results are obtained in the form of table values and graphic dependences. The influence degree of the product thickness, temperature, and nitrogen circulation rate on the coefficient is shown. Cooling duration, taking into account the two variants of heat transfer conditions presented by their graphic dependences on the wide range of key process parameters (product thickness, the temperature and circulation rate of nitrogen gas, the exhaust temperature of cooling agent vapor) is calculated. The results of the these parameters' effect on the cooling duration are assessed.

Keywords: mathematical model, snap-chilling, gaseous nitrogen, vegetable products, blanched.

Article info:

Received 25/01/2017, accepted 28/07/2017

DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-53-61

Article in Russian

For citation:Venger K. P., Popkov V. I., Feskov O. A. Analytical studies of the rapid cooling process blanched vegetable products nitrogen gas. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2017. No 3. p. 53–61.**Введение**

Важную роль для здоровья человека играет регулярное потребление растительной продукции, в частности фруктов, овощей, ягод, т. к. они обладают высокой пищевой ценностью и не содержат консервантов и стабилизирующих добавок, используемых при переработке.

Одним из способов сохранения качества растительной продукции является ее охлаждение [1, 2]. При этом в мировой и отечественной практике для такого вида продукции используется первичное и вторичное охлаждение [3, 4]. Первичному охлаждению подвергают растительную продукцию сразу после уборки урожая, что является неизменным этапом в реализации овощей и фруктов.

Вторичному охлаждению подвергается растительная продукция после тепловой ее обработки — бланширования. Бланшированию подвергаются такие виды растительной продукции, как картофель, морковь, капуста цветная, грибы, зеленый горошек и т.п. После бланширования температура продукта составляет 93–95 °С.

Такая продукция после бланширования направляется на замораживание. Современное производство быстрозамороженной растительной продукции [5] связано с организацией поточно-механизированной линии, где на завершающем этапе установлен скороморозильный аппарат.

При организации поточно-механизированной линии производства быстрозамороженной растительной продукции, подвергнутой бланшированию, необходимо, чтобы скорость замораживания соответствовала скорости предварительного ее охлаждения. Используемые в отечественной практике методы и режимы охлаждения не отвечают данному требованию.

Цели и задачи исследования

Проведение аналитического исследования является целью многовариантного определения основных процессных параметров быстрого охлаждения бланшированной растительной продукции газообразным азотом, которые необходимы в дальнейшем для разработки конструкций холодильного оборудования.

В задачу исследований входили: разработка аналитических моделей расчета основных процессных параметров охлаждения растительной продукции, после бланширования; определение, с использованием разработанных методик, продолжительности охлаждения бланшированной растительной продукции в широком интервале условий теплообмена газообразным азотом [3, 4, 5].

Следует отметить, что использование в качестве хладагента газообразного азота отличается такими преимуществами, как доступность, не токсичность, пожа-

ровзрывобезопасность. Азот имеет нулевой потенциал разрушения озонового слоя и глобального потепления, и полностью отвечает всем требованиям Монреальского и Киотского протоколов по экологической безопасности.

Перспективность использования азотных систем хладоснабжения подтверждается тем фактом, что в нашей стране производством криоагентов, в том числе и жидкого азота, занимается более 1200 предприятий, расположенных от Дальнего Востока до Калининграда, т.е. практически, криопродукты доступны любому потребителю [6–10].

На сегодняшний день в мировой и отечественной практике такая система быстрого вторичного охлаждения растительной продукции практически не используется, что требует проведения широких исследований.

Методы исследования и математическая модель

Первый этап данных исследований связан с разработкой аналитических моделей расчета основных процессных параметров охлаждения растительной продукции, после бланширования, с использованием газообразного азота.

Одним из важных параметров, обеспечивающим рациональные условия организации процесса охлаждения данных пищевых продуктов, является продолжительность процесса.

Для такой организации процесса предложена универсальная математическая модель расчета продолжительности охлаждения, учитывающая симметричные и несимметричные условия теплообмена. При этом, для учета неравномерности распределения температуры на различных поверхностях продукта, введено понятие коэффициента несимметрии (k):

$$k = Bi_1 / Bi_2, \quad (1)$$

где Bi_1 , Bi_2 — значения числа Био на верхней (индекс 1) и нижней (индекс 2) поверхностях продукта.

Модель позволяет представить процесс (стадию) охлаждения в виде двух последовательных этапов:

— момент перемещения и встречи температурных фронтов в толще пластины, при этом температура поверхности $t_{пов}$ не равна криоскопической $t_{кр}$;

— дальнейшее понижение температуры пластины до момента достижения криоскопической температуры на поверхности продукта.

На рис. 1 показаны расчетные схемы для первого этапа охлаждения, при равномерном (а) и неравномерном (б) перемещении температурных фронтов на противоположных поверхностях.

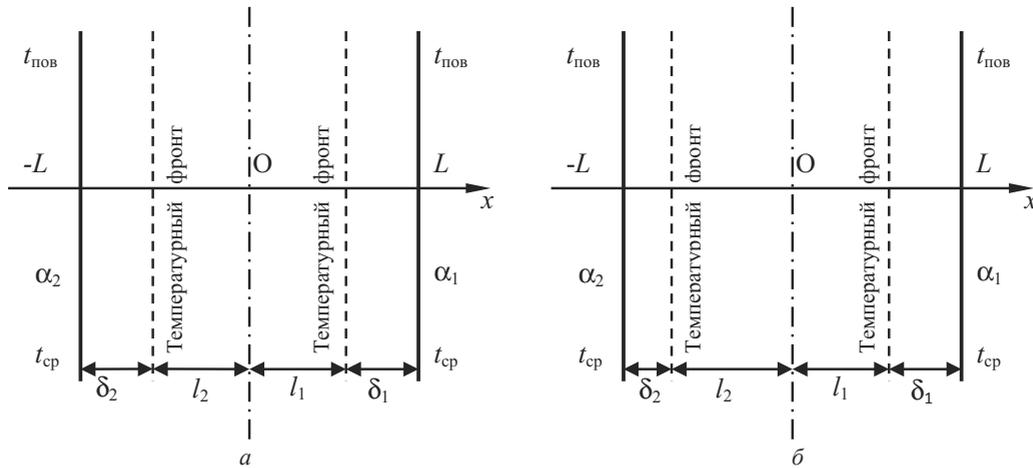


Рис. 1. Расчетные схемы первого этапа охлаждения: а — в симметричных условиях;

б — в несимметричных условиях; $t_{пов}$ — температура на поверхности продукта, °C; $t_{ср}$ — температура охлаждающей среды, °C; x — ось координат; L — определяющий размер продукта, м; δ_1, δ_2 — координаты температурных фронтов; l_1, l_2 — толщины невозмущенных слоев, м; α_1, α_2 — коэффициенты теплоотдачи на поверхностях продукта, Вт/(м²·K)

Fig. 1. Calculation schemes for the first stage of cooling: а — under symmetrical conditions; б — under unsymmetrical conditions; $t_{пов}$ — the temperature on the product surface, °C; $t_{ср}$ — the temperature of the cooling medium, °C; x — coordinate axis; L — product characteristic dimension определяющий размер продукта, м; δ_1, δ_2 — temperature front coordinates координаты температурных фронтов; l_1, l_2 — толщины невозмущенных слоев, м; α_1, α_2 — heat-transfer coefficient on the product surface, W/(m²·K)

Симметричные условия процесса подразумевают одинаково равномерное перемещение температурных фронтов $\sigma_1 = \sigma_2$, и равные толщины невозмущенных, относительно геометрического центра O, зон: $l_1 = l_2$. При наличии несимметрии перемещающихся температурных фронтов равномерность не соблюдается, т.е. $\sigma_1 \neq \sigma_2$ и $l_1 \neq l_2$.

В обоих случаях, показанных на рис. 1 (а, б), модель первого этапа охлаждения описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \text{ при } l_1 < x < L; \quad -L < x < -l_2; \quad (2)$$

и начальными условиями:

$$t(x, 0) = t_{пов} = t_{н}, \text{ при } -l_2 < x < l_1, \quad (3)$$

где t — температура продукта в процессе охлаждения, °C; $t(x, 0)$ — распределение температуры в продукте в начальный момент времени, °C; $t_{н}$ — начальная температура продукта, °C; a — коэффициент теплопроводности продукта, м²/с.

Граничные условия на поверхностях продукта и температурных фронтах:

$$\begin{aligned} -\lambda \frac{\partial t(L, \tau)}{\partial x} &= \alpha_1 (t(L, \tau) - t_{ср}); \\ \lambda \frac{\partial t(-L, \tau)}{\partial x} &= \alpha_2 (t(-L, \tau) - t_{ср}); \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial t(-l_1, \tau)}{\partial x} &= 0; \quad \frac{\partial t(-l_2, \tau)}{\partial x} = 0; \\ t(-l_1, \tau) &= t(-l_2, \tau) = t_{н}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $t(L, \tau), t(-L, \tau), t(-l_1, \tau), t(-l_2, \tau)$ — распределение температуры на поверхностях и температурных фронтах

в процессе охлаждения, °C; λ — коэффициент теплопроводности продукта, Вт/(м·K).

В ходе решения использованы безразмерные переменные:

— ось координат: $\chi = x/L;$ (6)

— температура: $T = (t_{н} - t) / (t_{н} - t_{ср});$ (7)

— продолжительность процесса: $Fo = a \cdot \tau / L^2;$ (8)

— интенсивность теплоотдачи: $Bi = \alpha \cdot L / \lambda;$ (9)

— координаты температурных фронтов: $\rho_1 = l_1/L; \rho_2 = l_2/L;$ (10)

— толщины «возмущенных» слоев: $\Delta_1 = \delta_1/L = 1 - \rho_1; \Delta_2 = \delta_2/L = 1 - \rho_2.$ (11)

Основу решения поставленной задачи в безразмерном виде составляют: метод среднеинтегральных соотношений Л. С. Лейбензона и гипотеза А. Пирвердяна о наличии распространяющегося температурного фронта, при этом в качестве основной функции, описывающей характер изменения температуры в возмущенной зоне, принят полином второй степени [11, 12]:

$$T(Fo, \chi) = A(Fo) \cdot \chi^2 + B(Fo) \cdot \chi + C(Fo). \quad (17)$$

Определение постоянных коэффициентов A, B, C и подробное решение представленных уравнений с использованием методов математического дифференцирования показано в работах [13, 14]. Результатом решения является полученное для первого этапа охлаждения уравнение зависимости $Fo^I = f(Bi)$.

Для симметричных условий:

$$Fo^I = [Bi^2 + 4Bi - 8 \ln(1 + 0,5Bi)] / (12Bi^2). \quad (18)$$

В условиях несимметричного теплообмена, первый этап заканчивается тогда, когда температурные фронты встретятся в некоторой точке O' (или плоско-

сти), не совпадающей с геометрическим центром O (или плоскостью) продукта, при этом еще возможен вариант, когда на одной из поверхностей криоскопическая температура $t_{кр}$ может быть достигнута раньше, чем на другой.

Для определения момента достижения криоскопической температуры на поверхности ($\chi = 0$) необходимо учитывать, соответственно в безразмерном виде, координату $\Delta_{кр}$ и криоскопическую температуру $T_{кр}$:

$$\Delta_{кр} = \frac{2T_{кр}}{Bi(1-T_{кр})}; \quad T_{кр} = \frac{t_n - t_{кр}}{t_n - t_{ср}}. \quad (19)$$

После соответствующих преобразований получено выражение для определения $Fo_{кр}$:

$$Fo_{кр} = \frac{1}{3Bi^2} \left[\frac{T_{кр}^2}{(1-T_{кр})^2} + \frac{2T_{кр}}{1-T_{кр}} + 2 \ln(1-T_{кр}) \right]. \quad (20)$$

В ситуации, когда температурные фронты встречаются до того, как температура на какой-либо поверхности продукта понизится до криоскопической, процесс охлаждения продолжается и после встречи температурных фронтов, т.е. начинается второй этап.

На рис. 2 (а, б) показаны расчетные схемы продукта для второго этапа охлаждения. Решение второго этапа выполнялось по аналогичной методике, при этом изменение температуры в продукте описано полиномом вида:

$$\partial(\chi, Fo) = \varphi(Fo) \cdot \chi^2 + 2A \cdot \varphi(Fo) \cdot \chi + 1 - B \cdot \varphi(Fo), \quad (21)$$

где $\varphi(Fo)$ — искомая функция; A , B — коэффициенты полинома.

Второй этап охлаждения заканчивается, когда температура поверхности пластины становится равной криоскопической температуре, т.е. $T(1, Fo) = T_{кр}$.

С учетом проведенных математических действий получены окончательные выражения, описывающие продолжительность второго этапа:

— для симметричных условий:

$$Fo^{II} = \frac{Bi+3}{3Bi} \ln \frac{2}{(Bi+2)(1-T_{кр})}; \quad (22)$$

— для несимметричных условий:

$$Fo^{II} = \frac{2}{3Bi} \cdot \frac{Bi^2 + 2Bi \cdot k + 2Bi + 3k}{k + 2Bi + 1} \times \ln \frac{k + 2Bi + 1}{(Bi+1)(k+Bi+1)(1-T_{кр})}. \quad (23)$$

Для уравнения (23) существует предельное значение $Bi_{пр}$, при котором в момент времени $Fo = 0$ безразмерная температура на первой поверхности пластины ($\chi = 1$), тогда необходимо учитывать следующее:

$$T_{кр} = \frac{Bi(Bi+k)}{(Bi+1)(k+Bi+1)}. \quad (24)$$

Зависимость $Bi_{пр}$ от k для второго этапа охлаждения исследована в работе [13]. Значения $Bi_{пр}$ для первого и второго этапов охлаждения совпадают только при $k = 1$, т.е. в симметричных условиях. При $k > 1$ значения $Bi_{пр}$ второго этапа меньше первого, что объясняется различным характером зависимости T (χ) на противоположных температурных фронтах на первом этапе охлаждения.

Таким образом, для продуктов с $Bi < Bi_{пр}$ продолжительность стадии охлаждения составляет

$$Fo = Fo^I + Fo^{II}. \quad (25)$$

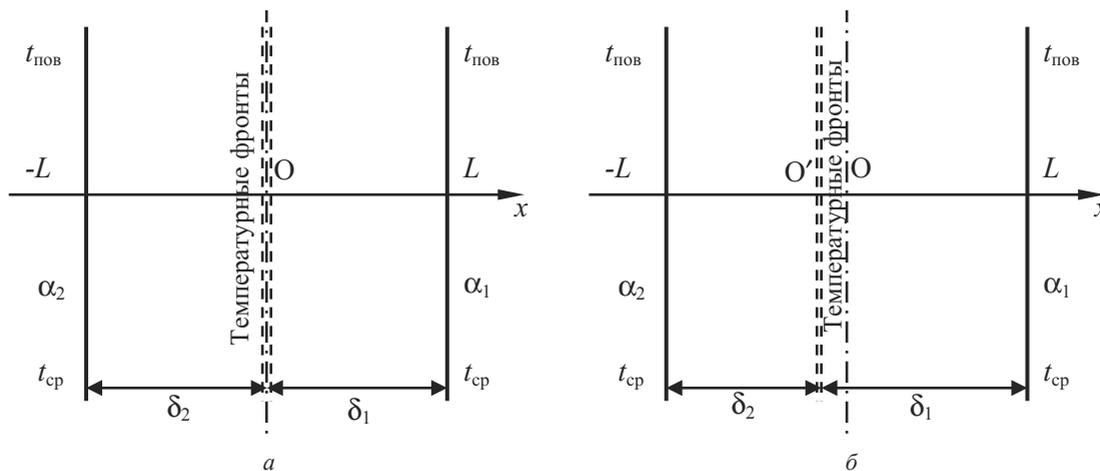


Рис. 2. Расчетные схемы второго этапа охлаждения:

а — в симметричных условиях; б — в несимметричных условиях; O' — точка (или плоскость) встречи температурных фронтов в несимметричных условиях

Fig. 2. Calculation schemes for the second stage of cooling: а — in symmetrical conditions; б — in unsymmetrical conditions; O' — the point (or surface) of temperature fronts' встречи температурных interception in unsymmetrical conditions

Для симметричных условий итоговое выражение для определения общей продолжительности процесса примет вид

$$Fo = \frac{a_1}{12a_2 \cdot Bi^2} \left[\frac{(4Bi^2 + 6Bi + 8) \ln \frac{2}{Bi + 2} + (Bi^2 + 3Bi) \cdot \left(1 + 4 \ln \frac{t_n - t_{cp}}{t_{кр} - t_{cp}} \right) + 1}{\right], \quad (26)$$

где a_1, a_2 — коэффициенты температуропроводности продукта, соответственно при начальной (индекс 2) и криоскопической (индекс 1) температурах, m^2/c .

В ряде работ [14, 15] обосновано использование среднелогарифмической разности температур $(t_{кр} - t_{cp})$ системы «продукт — среда», поскольку температура охлаждающей среды в проточных системах хладоснабжения может изменяться в несколько раз от места подачи ($t_{под}$) до места отвода ($t_{вых}$):

$$t_{кр} - t_{cp} = (t_{вых} - t_{под}) / \left(\ln \frac{t_{кр} - t_{под}}{t_{кр} - t_{вых}} \right). \quad (27)$$

Для несимметричных условий первый охлаждения заканчивается в момент начала воздействия температурного фронта на поверхность продукта, причем в равной степени для обеих поверхностей, поэтому для определения продолжительности первой фазы коэффициент несимметрии k можно не учитывать.

Тогда, окончательно $Fo = Fo_{кр} + Fo^{II}$ и в размерном виде итоговое выражение примет вид:

$$Fo = \frac{2}{3Bi^2} \left[\frac{(t_n + t_{кр} - 2t_{cp})(t_n - t_{кр})}{2(t_{кр} - t_{cp})^2} + \ln \frac{(t_{кр} - t_{cp})}{(t_n - t_{cp})} + Bi \left(\frac{Bi^2 + 2Bi \cdot k + 2Bi + 3k}{k + 2Bi + 1} \right) \times \ln \frac{(k + 2Bi + 1)(t_{кр} - t_{cp})}{(Bi + 1)(k + Bi + 1)(t_n - t_{cp})} \right]. \quad (28)$$

Для случая, когда $Bi > Bi_{кр}$ при определении продолжительности процесса необходимо дополнительно рассчитывать температуру в термическом центре продукта (t_n) к моменту окончания процесса:

$$t_n = t_n - \frac{(t_n - t_{cp})}{(k + 2Bi + 1)} \times \left[\frac{(Bi + 1)(k + Bi + 1)(t_n - t_{кр})}{(t_n - t_{cp})} + Bi(k + Bi) \right]. \quad (29)$$

Необходимо отметить, что в технологии производства растительной продукции, предварительно подвергаемой бланшированию, возможно кратковременное пребывание продукта на открытом воздухе. В связи с этим процесс охлаждения начнется в условиях естественной конвекции (рис. 3).

Поскольку продукция пребывает на открытом воздухе незначительный промежуток времени, т.е. $\tau \rightarrow 0$, то перемещение температурных фронтов, причем в одинаковой степени с обеих сторон, будет также незначи-

тельным $\delta_1 = \delta_2 \rightarrow 0$, и, соответственно, толщины невозмущенных зон также $l_1 \rightarrow L, l_2 \rightarrow -L$.

Однако, возможно определить истинное значение температуры продукта, которая впоследствии будет выполнять функцию начальной температуры t_n для основных этапов процесса охлаждения:

$$\frac{a}{0,4L^2} = \alpha \frac{S(t_{бл} - t_b)}{C(t_n - t_b)}, \quad (30)$$

где $0,4L^2$ — коэффициент формы для тел в форме пластины, $t_{бл}$ — температура продукта в бланшированном состоянии, $^{\circ}C$; t_b — температура окружающего воздуха, $^{\circ}C$.

Окончательно после преобразований уравнение примет вид

$$t_n = t_b + \frac{0,4L^2 \cdot \alpha \cdot S}{a \cdot C} (t_{бл} - t_b). \quad (31)$$

Следует отметить, что на практике этап естественного охлаждения фактически исключен, а в инженерных расчетах продолжительностью этого процесса можно пренебречь.

Необходимым параметром для расчета продолжительности охлаждения является коэффициент теплоотдачи (α), для аналитического определения которого применяется методика, адаптированная к условиям работы проточной азотной системы хладоснабжения [15, 16]:

$$\alpha = (Nu \cdot \lambda_{cp}) / \delta, \quad (32)$$

$$Nu = 0,0296 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \text{ при } 200 < Re < 10^5, \quad (33)$$

$$Re = (\omega_{cp} \cdot \delta) / \nu_{cp}, \quad (34)$$

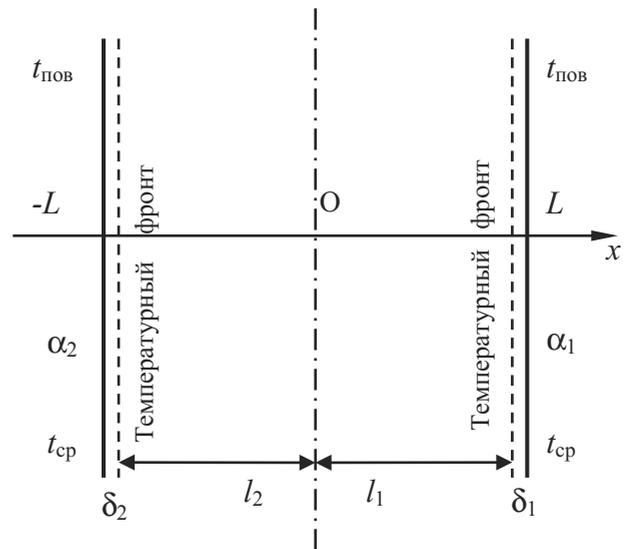


Рис. 3. Расчетная схема начального момента охлаждения продукции в условиях естественной конвекции
Fig. 3. Calculation scheme for the initial moment of cooling under natural convection conditions

где Nu — число Нуссельта; λ_{cp} — коэффициент теплопроводности охлаждающей среды, Вт/(м·К); δ — толщина продукта, м; Pg — число Прандтля; w_{cp} — скорость циркуляции охлаждающей среды, м/с; ν_{cp} — кинематическая вязкость охлаждающей среды, м²/с.

Результаты расчета

С использованием уравнений (32)–(34) выполнены расчеты коэффициента теплоотдачи (таблица) при следующих значениях:

Расчетные значения коэффициента теплоотдачи Calculated values of a heat-transfer coefficient

Скорость циркуляции азота ω_{cp} , м/с	Толщина продукта δ , м	Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К) при температуре азота t_{cp} , °С			
		-60	-50	-40	-30
1	0,01	14,0	13,7	13,3	12,4
	0,02	12,2	11,9	11,5	10,8
	0,03	11,2	11,0	10,6	10,0
	0,04	10,6	10,3	10,0	9,4
3	0,01	33,7	32,9	31,9	29,9
	0,02	29,4	28,6	27,8	26,1
	0,03	27,1	26,4	25,6	24,0
	0,04	25,6	24,9	24,2	22,7
5	0,01	50,7	49,5	48,1	45,1
	0,02	44,2	43,1	41,8	39,2
	0,03	40,7	39,7	38,6	36,2
	0,04	38,5	37,5	36,4	34,2

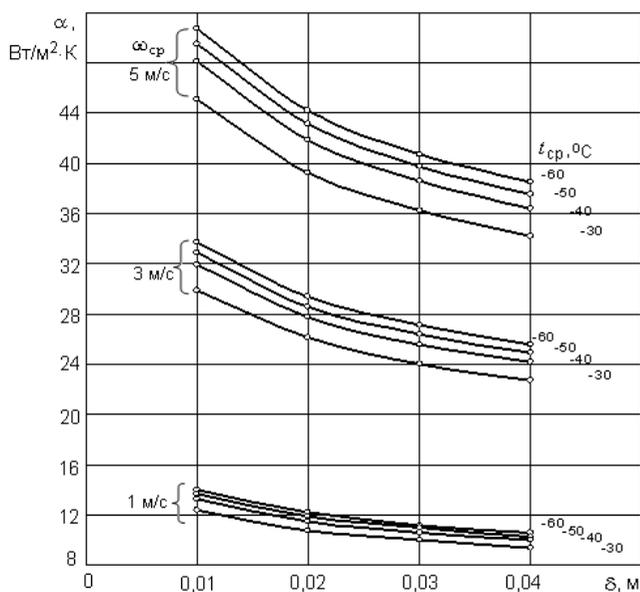


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплоотдачи (α) от толщины охлаждаемого продукта (δ), температуры газообразного азота (t_{cp}) и скорости его циркуляции (w_{cp})
Рис. 4. Dependences between heat-transfer coefficient (α) and the thickness of product being cooled (δ), nitrogen gas temperature (t_{cp}), and its circulation speed (w_{cp})

— скорости циркуляции газообразного азота: ω_{cp} = 1, 3, 5 м/с;

— толщины продукта (насыпного слоя): δ = 0,01; 0,02; 0,03; 0,04 м;

— температуры газообразного азота: t_{cp} = -60, -50, -40, -30 °С.

Построены графические зависимости (рис. 4) коэффициента теплоотдачи (α) от толщины охлаждаемого продукта (δ), температуры газообразного азота (t_{cp}) и скорости его циркуляции (ω_{cp}).

Анализ полученных данных показал, что наибольшее влияние на изменение величины коэффициента теплоотдачи (α) оказывает скорость циркуляции среды (ω_{cp}), поскольку ее изменение 1 м/с до 3 м/с приводит в увеличению коэффициента теплоотдачи (α), в среднем, в 2,5 раза, а с 1 м/с до 5 м/с — в 3,5 раза при различных значениях толщины продукта (δ) и температуры газообразного азота (t_{cp}).

Заметное влияние на величину коэффициента теплоотдачи (α) оказывает изменение толщины охлаждаемого продукта (δ). При ее увеличении с 0,01 м до 0,02 м, коэффициент теплоотдачи (α) снижается, в среднем, на 13% при различных значениях температуры (t_{cp}) и скорости (ω_{cp}) газообразного азота, при увеличении с 0,01 до 0,03 — на 18%, с 0,01 до 0,04 — на 24% соответственно.

Меньшей степенью влияния на коэффициент теплоотдачи (α) характеризуется изменение температуры охлаждающей среды (t_{cp}) в исследуемом интервале. Так ее понижение с -30 до -40 °С позволяет, при различных значениях толщины продукта (δ) и скорости (ω_{cp}) газообразного азота, увеличить (α), в среднем, на 6–6,2%, с -40 до -50 °С — на 2,7–2,9%, с -50 до -60 °С — на 2,0–2,2%.

Полученные значения коэффициентов теплоотдачи (α) были использованы в расчетах продолжительности охлаждения растительной продукции (τ), при этом дополнительно учитывались следующие параметры:

— температура бланшированной продукции:

$t_{bl} = t_n = 90$ °С;

— температура продукции в конце охлаждения:

$t_k = t_{kp} = -1$ °С;

— температура отработанных паров азота: $t_{вых} = -20, -10$ °С;

— теплофизические характеристики растительной продукции, согласно данным условно-расчетного продукта по классу П₅ — овощи классификации объектов быстрого замораживания [13, 17].

Следует также отметить, что в представленной выше математической модели на начальном этапе приняты идентичные параметры на обеих поверхностях продукта, однако возможная несимметричность теплообмена в расчетах учитывалась коэффициентом несимметрии: $k = 1,5$ и 2.

Для оценки условий применимости полученных при математическом моделировании уравнений предварительно исследовали степень влияния условий теплообмена (Bi) на величину продолжительности (Fo).

Согласно предварительным расчетам установлено, что для несимметричных условий уравнение (28) для выбранных интервалов исходных величин (t_{cp} , ω_{cp} , $t_{вых}$, δ), в большинстве случаев, не обеспечивает приемлемых результатов, т.е. имеет место достижение криоскопической температуры $t_{кр}$ на первой поверхности к моменту начала

второго этапа охлаждения. В этой ситуации для определения значений Fo использовали следующее уравнение:

$$Fo = \frac{2}{3Bi^2} + Bi \left(\frac{Bi^2 + 2Bi \cdot k + 2Bi + 3k}{k + 2Bi + 1} \right) \times \left[\frac{(t_n + t_{кр} - 2t_{ср})(t_n - t_{кр})}{2(t_{кр} - t_{ср})^2} + \ln \frac{(t_{кр} - t_{ср})}{(t_n - t_{ср})} \right] + \ln \frac{(k + 2Bi + 1)(Bi^2 + Bi \cdot k)(t_n - t_{ср})^2}{(t_n - t_{кр})(t_{кр} - t_{ср})} \quad (35)$$

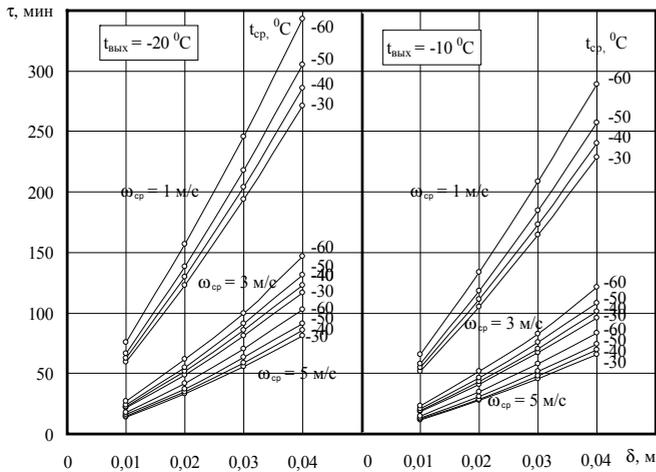
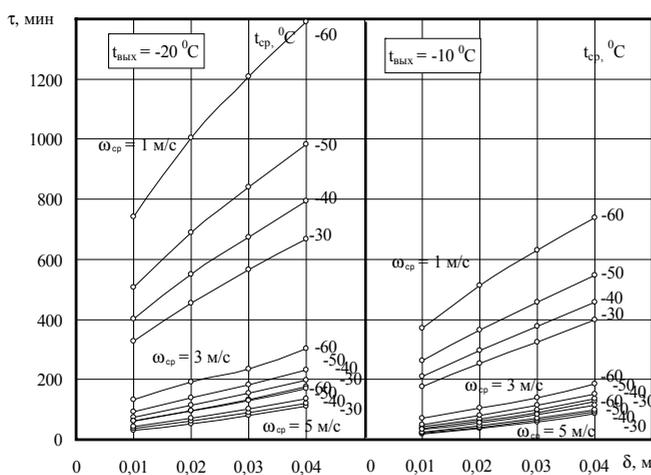
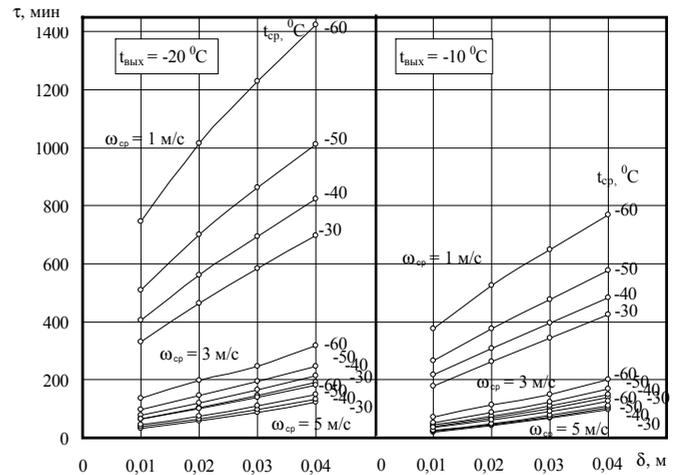


Рис. 5. Зависимость продолжительности охлаждения (τ) от толщины продукта (δ) при температуре (t_{ср}) и скорости циркуляции (ω_{ср}) газообразного азота для двух значений температуры отработанных паров (t_{вых}) в симметричных условиях теплообмена

Fig. 5. Dependence of cooling time on (τ) product thickness (δ) at the temperature (t_{ср}) and circulation speed (ω_{ср}) of nitrogen gas for two values of exhaust vapor temperature (t_{вых}) under symmetrical conditions of heat-exchange



а



б

Рис. 6. Зависимость продолжительности охлаждения (τ) от толщины продукта (δ) при температуре (t_{ср}) и скорости циркуляции (ω_{ср}) газообразного азота для двух значений температуры отработанных паров (t_{вых}) в несимметричных условиях теплообмена при k = 1,5 (а) и k = 2 (б)

Fig. 6. Dependence of cooling time on (τ) the product thickness (δ) at the temperature (t_{ср}) and circulation speed (ω_{ср}) of nitrogen gas for two values temperature of exhaust vapor temperatures (t_{вых}) under unsymmetrical condition of heat-exchange at k = 1.5 (а) и k = 2 (б)

Результаты расчетов представлены табличными данными, на базе которых построены графические зависимости продолжительности охлаждения (τ) от толщины продукта (δ = 0,01, 0,04 м) при температуре газообразного азота (t_{ср} = -60, -30 °C), скорости его циркуляции (ω_{ср} = 1,5 м/с) и двух значений температуры отработанных паров t_{вых} = -20 °C и -10 °C в симметричных условиях теплообмена (рис. 5) и несимметричных — при k = 1,5 (рис. 6, а), при k = 2 (рис. 6, б).

Выводы

1. Полученные при моделировании, новые для отечественной практики, математические уравнения позволили определить продолжительность охлаждения (t) бланшированной продукции, а также коэффициенты теплоотдачи (α) в широком интервале условий организации процесса охлаждения с использованием газообразного азота.

2. Отмечено существенное влияние на продолжительность охлаждения (t) температуры отработанных паров азота (t_{вых}). Изменение температуры (t_{вых}) от -20 °C до -10 °C, т.е. более полное использование температурного потенциала криоагента, позволяет достичь сокращения продолжительности: в симметричных условиях, в среднем, на 14% с учетом варьируемых величин (d, w_{ср}, t_{ср}) и в несимметричных (независимо от k), в среднем, в 1,8 раза.

3. На базе выполненного информационного анализа доказана перспективность использования для быстрого вторичного охлаждения растительной продукции с последующим замораживанием проточной системы хладоснабжения на базе газообразного азота.

4. Результаты расчета процессных параметров, по предложенной в работе методике расчета, коррелируются с данными, полученными экспериментальным путем. Результаты выполненных исследований представляют практический интерес при проектировании аппаратов для охлаждения растительной продукции.

Продолжение экспериментального исследования процесса и технологии быстрого охлаждения раститель-

ной продукции с использованием газообразного азота будет представлено в следующей публикации.

Литература

1. Воробьева Н. Н. Теплофизические процессы в холодильной технологии. — Кемерово, 2007. 150 с.
2. Алямовский И. Г. Регулярный режим охлаждения. — Л.: ЛТИХП. 1983. 10 с.
3. Завражнов А. И., Хайрутдинов З. Н., Митрохин М. А., Дьячков С. В. Системный подход к изучению процесса предварительного охлаждения ягод при хранении. // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК — продукты здорового питания. 2016. № 6 (14). С. 54–60.
4. Джеймс С. Дж. Быстрое охлаждение. // Холодильный бизнес. 2002. № 1, 2. с. 22–24, 26–27.
5. Кременевская М. И. Аспекты быстрого замораживания плодово-ягодной продукции. // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2015. № 4. С. 116–122.
6. Берестова А. В., Зинюхин Г. Б., Манеева Э. Ш. Особенности криообработки растительного сырья. // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 9 (184). С. 130–136.
7. Колодязная В. С., Диденко Р. А., Дивнов С. В. Криогенное замораживание растительных продуктов. // Холодильная техника. 1999. № 9,10. с. 23–25.
8. Венгер К. П., Феськов О. А. Перспективные направления совершенствования технологии и оборудования быстрого замораживания пищевых продуктов. // Мясной ряд. 2009. № 1. с. 48–51.
9. Венгер К. П., Выгодин В. А. Машинная и безмашинная система хладоснабжения для быстрого замораживания пищевых продуктов. — Рязань: Узорежье, 1999. 143 с.
10. Антонов А. А. и др. Проточная азотная система хладоснабжения для холодильной обработки растительной продукции, максимально использующая температурный потенциал криоагента. // Холодильный бизнес. 2002. № 6. с. 14–17.
11. Басниев К. С., Власов А. М., Кочина И. Н., Максимов В. М. Подземная гидравлика. — М., 1986. 303 с.
12. Consumption of quick-frozen foods in Europe in 1998 // Bull. IIR. 2000. No 5. p. 59.
13. Антонов А. А. и др. Азотные системы хладоснабжения для производства быстрозамороженных продуктов. — Рязань: Узорежье, 2002. 205 с.
14. Карпычев В. А., Колтыпин Ю. А. Приближенное решение задачи о замораживании биологических материалов // Известия вузов. 1989. № 6. с. 64–65.
15. Антонов А. А. Аналитический расчет коэффициента теплоотдачи и продолжительности замораживания пищевых продуктов в туннельном аппарате с низкотемпературным воздухом от турборефрижераторной установки // Сборник научных трудов «Повышение энергоэффективности техники и технологий в перерабатывающих отраслях АПК» / А. А. Антонов, К. П. Венгер, В. А. Стефанова, О. А. Феськов. — М.: Печатник, 2004. с. 15–18.
16. Головкин Н. А., Степанова Л. А. Определение времени промерзания пластины при несимметричных условиях отвода тепла // Холодильная обработка и хранение пищевых продуктов. — Л.: 1974. с. 132–136.

References

1. Vorobeva N. N. Thermal processes in refrigerating technology. Kemerovo, 2007. 150 p. (in Russian)
2. Alyamovskii I. G. The regular mode of cooling. Leningrad: LTIKhP, 1983. 10 p. (in Russian)
3. Zavrazhnov A. I., Khairutdinov Z. N., Mitrokhin M. A., D'yachkov S. V. Systems approach to studying of process of precooling of berries at storage. *Tekhnologii pishchevoi i pererabatyvayushchei promyshlennosti APK — produkty zdorovogo pitaniya*. 2016. No 6 (14). P. 54–60. (in Russian)
4. James S. Dzh. Fast cooling. *Kholodil'nyi biznes*. 2002. No 1, 2. p. 22–24, 26–27. (in Russian)
5. Kremenevskaya M. I. Aspects of fast freezing of fruit and berry production. *Nauchnyi zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*. 2015. No 4. p. 116–122. (in Russian)
6. Berestova A. V., Zinyukhin G. B., Maneeva E. Sh. Features of cryoprocessing of vegetable raw materials. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2015. No 9 (184). p. 130–136. (in Russian)
7. Kolodyaznaya V. S., Didenko R. A., Divnov S. V. Cryogenic freezing of vegetable products. *Kholodil'naya tekhnika*. 1999. No 9,10. p. 23–25. (in Russian)
8. Venger K. P., Feskov O. A. Perspective directions of perfecting of technology and inventory of fast freezing of foodstuff. *Myasnoi ryad*. 2009. No 1. p. 48–51. (in Russian)
9. Venger K. P., Vygodin V. A. Machine and without the machine system of cold supply for fast freezing of foodstuff. Ryazan: Uzoreche, 1999. 143 p. (in Russian)
10. Antonov A. A., etc. The flowing nitric system of cold supply for cooling treatment of vegetable production which is most using the temperature potential of the cryoagent. *Kholodilnyi biznes*. 2002. No 6. p. 14–17. (in Russian)
11. Basniev K. S., Vlasov A. M., Kochina I. N., Maksimov V. M. Underground hydraulics. Moscow, 1986. 303 p. (in Russian)
12. Consumption of quick-frozen foods in Europe in 1998. *Bull. IIR*. 2000. No 5. p. 59.
13. Antonov A. A., etc. The nitric systems of cold supply for production of the fast-frozen products. Ryazan: Uzoreche, 2002. 205 p. (in Russian)
14. Karpychev V. A., Koltypin Yu. A. Approximate solution of a task about freezing of biological materials. *Izvestiya vuzov*. 1989. No 6. p. 64–65. (in Russian)
15. Antonov A. A. Analytical calculation of a heat-transfer coefficient and duration of freezing of foodstuff in the tunnel device with the low-temperature air from turborefrigeratory installation//the Collection of scientific works «Increase in energy efficiency of technique and technologies in processing industries of agrarian and industrial complex» / A. A. Antonov, K. P. Venger, V. A. Stefanova, O. A. Fes'kov. Moscow: Pechatnik, 2004. p. 15–18. (in Russian)
16. Golovkin N. A., Stepanova L. A. Definition of time of a freezing of a plate under the asymmetrical conditions of heat removal. *Kholodil'naya obrabotka i khranenie pishchevykh produktov*. Leningrad, 1974. p. 132–136. (in Russian)

17. Охлажденные и замороженные продукты / под общ. ред. Майка Стрингера и Колин Деннис; под науч. ред. Н. А. Уваровой; [пер. с англ. В. Е. Ашкинази, И. В. Рыбина. Охлажденные и замороженные продукты]. — СПб.: Профессия, 2004.

17. The cooled and frozen products. Under Mike Stringer and Coline Dennis's common edition; under scientific edition of N. A. Uvarova; [translation from English V. E. Ashkinazi, I. V. Rybina. The cooled and frozen products.]. — SPb.: Professiya, 2004. (in Russian)

Сведения об авторах

Венгер Клара Петровна

д. т. н., профессор кафедры ресурсосберегающих процессов и технологий пищевых производств Московского государственного университета пищевых производств, 125080, г. Москва, Волоколамское ш., 11, vengerkp@gmail.com

Попков Вячеслав Иванович

аспирант кафедры ресурсосберегающих процессов и технологий пищевых производств Московского государственного университета пищевых производств, 125080, г. Москва, Волоколамское ш., 11, dorf88@yandex.ru

Фесков Олег Алексеевич

к.т. н., доцент кафедры ресурсосберегающих процессов и технологий пищевых производств Московского государственного университета пищевых производств, 125080, г. Москва, Волоколамское ш., 11, Feskov76@mail.ru

Information about authors

Venger Klara Petrovna

D. Sc., professor of Department of Resource-saving Processes and Technologies of Food Productions of Moscow National University of Food Production, 125080, Russia, Moscow, Volokolamskoe highway 11, vengerkp@gmail.com

Popkov Vyacheslav Ivanovich

graduate student of Department of Resource-saving Processes and Technologies of Food Productions of Moscow National University of Food Production, 125080, Russia, Moscow, Volokolamskoe highway 11, dorf88@yandex.ru

Feskov Oleg Alekseyevich

Ph.D., associate professor of Department of Resource-saving Processes and Technologies of Food Productions of Moscow National University of Food Production, 125080, Russia, Moscow, Volokolamskoe highway 11, Feskov76@mail.ru

**25-я юбилейная
международная выставка
продуктов питания, напитков
и сырья для их производства**

**ПРОВЕРЕННЫЕ РЕЦЕПТЫ
ДЛЯ УСПЕШНОГО БИЗНЕСА**





**5–9
февраля
2018**

**ПРОД
ЭКСПО**

ТЕМАТИКИ ВЫСТАВКИ:

<ul style="list-style-type: none"> ✓ Мясо и мясопродукты. Колбасные изделия. Птица, яйцо. ✓ Молочная продукция. Сыры. ✓ Салон мороженого. ✓ Бакалея. Зернопродукты. ✓ Макароны изделия. Приправы, специи. ✓ Растительные жиры. ✓ Соки, воды. Безалкогольные напитки. ✓ Замороженные продукты. Полуфабрикаты. ✓ Кондитерская продукция. Снэки. ✓ Орехи, сухофрукты. ✓ Хлебопекарная продукция. ✓ Чай. Кофе. ✓ Рыба и морепродукты. ✓ Консервы. Соусы, кетчупы. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Гастрономия. Продукты для ресторанов, деликатесы. ✓ Оптово-распределительные центры. ✓ Спиртные напитки. Вино. ✓ Укупорка. Дизайн. Производство напитков. ✓ Упаковочные решения «ПРОДЭКСПОПАК». ✓ Салон оборудования и услуг. ✓ Экспозиции регионов России. ✓ Иностраные национальные экспозиции. ✓ Экобиосалон. ✓ Здоровое питание. Фермерские продукты. ✓ Детское питание. ✓ Овощи, фрукты, грибы. ✓ Мед и продукты пчеловодства.
---	---

Место проведения:
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»,
123100, г. Москва, Краснопресненская наб., 14

Контакты:
Дирекция выставок пищевой промышленности:
Тел.: (499) 795–37–35, e-mail: mezvist@expocentr.ru

www.prod-expo.ru