

УДК: 664.8.037.051

Аспекты быстрого замораживания плодово-ягодной продукции

Канд. техн. наук **М.И. Кременевская**, Marianna.Kremenevskaya@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Использование замороженных дикорастущих и садовых плодов и ягод все шире применяется в пищевой промышленности. Быстрое замораживание, как наилучший способ консервирования, позволяет получить готовый продукт высшего качества не только по окончании процесса, но и дает возможность в течение длительного времени максимально сохранить биологически активные вещества растительной продукции. Отсутствие на рынке отечественных одноступенчатых скороморозильных аппаратов небольшой производительности представляет значительные трудности для расширения потенциального состава игроков в данном секторе производства. Наибольшие проблемы при организации процесса быстрого замораживания в аппаратах с направленным движением воздуха имеет формирование устойчивого флюидизационного слоя и достижение заданной производительности производства.

В данной статье приведены исследования теплофизических параметров дикорастущих ягод черники брусники и садовой аронии черноплодной, используемых для расчетов критериальных уравнений, порозности насыпного слоя, температуры воздуха на выходе из аппарата и продолжительности замораживания продукта. По массе и объему слоя рассчитывали его плотность и порозность. По фиксированной массе слоя и различной скорости загрузки ягод рассчитывали среднее время пребывания продукта в камере замораживания. Представленные результаты могут быть использованы для определения режимных параметров и кинетики процесса замораживания, а также разработки технологий замораживания в скороморозильных аппаратах с направленным движением хладагента.

Ключевые слова: скороморозильный аппарат; замораживание; технологические и теплофизические параметры; качество плодов и ягод.

Aspects of Rapid Freezing of Fruit and Berry Production

Ph.D. Marianna Kremenevskaya, Marianna.Kremenevskaya@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

Freezing wild and garden berries and fruits is becoming more widely used in farming. Fast freezing, as the best way of preserving, allows to obtain the finished product of the highest quality, not only at the end of the process, but also allows for a long time to preserve the biologically active substances of plant products. The absence in the market of domestic single-stage small capacity freezers presents considerable difficulties for the expansion of the potential composition of the players in this sector of production. The greatest difficulties in the organization of the process of rapid freezing in devices with the airflow direction is formation of a stable fluidising layer to achieve a given performance and production. Investigations of thermal parameters of wild blueberries and cranberries garden chokeberry Aronia used for the calculation of criteria equations bulk porosity layer, the air temperature at the outlet of the unit and the duration of freezing the product. By weight and volume of the layer was calculated density and porosity. In the fixed layer and the weight of different download speeds berries calculated the average residence time in the freezer. The presented results can be used to determine the regime parameters and kinetics of the freezing process, and technology development freeze in freezers with the direction of the refrigerant.

Keywords: the rapid freezing machine; freeze; technological and thermophysical parameters; fruit and berries quality.

Введение

При организации технологического процесса быстрого замораживания плодов и ягод необходимо учитывать, что начальная температура продукта практически всегда значительно выше криоскопической. В скороморозильном аппарате плоды и ягоды начинают замораживаться только после достижения их поверхностью температуры, равной криоскопической. Температура же внутри продукта будет оставаться выше температуры поверхности. Конечная температура замораживания плодов и ягод устанавливается в зависимости от цели их дальнейшего использования и должна соответствовать температуре камер, обеспечивающих холодильное хранение. При этом нежелательно проводить замораживание таким образом, чтобы конечная среднеобъемная температура оказалась ниже температуры хранения, так как это может привести к частичному размораживанию продукта и скажется впоследствии на быстром ухудшении качественных показателей. Мощности отечественных холодильных установок и камер обеспечивают конечную температуру продукта минус 18°C.

Объекты и методы исследования

Для организации процесса замораживания в скороморозильных аппаратах с направленным движением воздуха [1, 2] необходимо определить режимы процесса замораживания. Для чего был проведен ряд экспериментов по замораживанию дикорастущих ягод черники, брусники и садовой аронии черноплодной.

Из каждой партии свежесобранных ягод производился отбор продукции для проведения ситового анализа и определения насыпной плотности $\rho_{\text{нас}}$ по массе фиксированного объема ягод. По результатам ситового анализа рассчитывался средний эквивалентный диаметр ягоды d_s , физическая плотность ягоды $\rho_{\text{яг}}$ и порозность насыпного слоя ε_0 формулами (1, 2, 3).

$$d_s = \frac{1}{\sum \frac{m_i}{d_{i_s}}} = d_{10} \frac{m_{10}}{m} + d_7 \frac{m_7}{m} + d_5 \frac{m_5}{m} + d_3 \frac{m_3}{m} + d_{2.5} \frac{m_{2.5}}{m}, \quad (1)$$

где m_{10} , m_7 , m_5 , m_3 , $m_{2.5}$ – масса ягод, оставшаяся на сите с соответствующим диаметром $d = 10; 7; 5; 3; 2,5$ мм.; m_i – весовая доля частиц, прошедших через сито с диаметром $d_{i \min}$ и оставшихся на сите с диаметром $d_{i \max}$

$$d_{i_s} = \sqrt{d_{i \min} d_{i \max}}.$$

Плотность ягод можно определить по формуле (2):

$$\rho_{\text{яг}} = \frac{m_i}{n_i 4\pi / 3 (d_{i_s} / 2)^3}, \quad (2)$$

где n_i – число частиц, прошедшее через сито с диаметром $d_{i \min}$ и оставшихся на сите с диаметром $d_{i \max}$.

Далее ягоды с начальной температурой t_n от 19 до 22°C непрерывно подавали в камеру замораживания через загрузочное устройство питателем типа «беличье колесо», где они попадали в струи охлажденного воздуха с температурой t_e от минус 28 до минус 31°C и скорости его движения 3–10 м/с. Скорость воздуха регулировалась шиберными заслонками. Загрузка осуществлялась до образования устойчивого режима псевдооживленного слоя в камере [3].

По массе и объему слоя рассчитывалась насыпная плотность $\rho_{\text{нас}}$. Порозность рассчитывалась по формуле (3):

$$\varepsilon_0 = \frac{\rho_{\text{яг}} - \rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{яг}}} \quad (3)$$

По скорости движения воздуха над слоем V и эквивалентному диаметру ягоды d_3 рассчитывалось число Рейнольдса Re [4]:

$$Re = \frac{\rho V d_3}{\mu}$$

где $\rho = 1,365 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха, V – скорость воздуха, м/с и $\mu = 1,63 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$ – динамическая вязкость воздуха при температуре минус 20°C . Далее рассчитывалось число Архимеда Ar [4]:

$$Ar = \frac{g d_3^3 \rho_{\text{яг}} \rho}{\mu}$$

где $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Зная числа Re и Ar можно рассчитать порозность слоя ε' :

$$\varepsilon' = \left(\frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar} \right)^{0,21} \quad (4)$$

Производилось сравнение ε и ε' , которые должны совпадать в пределах погрешности.

По числу Рейнольдса и порозности слоя рассчитывалось число Нуссельта Nu по формуле [4]:

$$Nu = 0,4 (Re / \varepsilon)^{\frac{2}{3}} Pr^{\frac{1}{3}}$$

где $Pr = 0,724$ – число Прандтля для воздуха при температуре минус 20°C . Далее рассчитывался коэффициент теплоотдачи от поверхности ягоды к воздуху α [4]:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{\text{возд}}}{d_3}$$

где $\lambda = 0,0225 \text{ Вт/мК}$ – теплопроводность воздуха при температуре минус 20°C .

По известной массе слоя $m_{\text{сл}}$ и скорости загрузки G рассчитывалось среднее время пребывания:

$$\tau_{\text{српр}} = \frac{m_{\text{сл}}}{G} \quad (5)$$

Однако преимуществом аппарата с направленным движением воздуха является то, что разброс по времени пребывания продукта в аппарате не велик, а кроме того, невозможен выход плодово-ягодного сырья из аппарата на первых минутах обработки.

Минимального времени нахождения ягод в агрегате достаточно для прохождения в продукте фазового перехода.

Для расчета $\tau_{\text{ср}}$ при замораживании ягод [5] черники принимались следующие теплофизические параметры [6]: теплопроводность замороженной части $\lambda_3 = 1,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, не замороженной $\lambda_{\text{н}} = 0,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, теплоемкость замороженной части $c_3 = 1900 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, не замороженной $c_{\text{н}} = 3780 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, криоскопическая температура $t_{\text{кр}} = -1,7^\circ\text{C}$, доля вымороженной воды $\omega = 0,75$ [7, 8]. Для определения экспериментальной конечной среднеобъемной температуры ягода помещалась в сосуд Дьюара, который герметично закрывался пробкой с вмонтированным термометром, и после установления постоянного значения на шкале термометра определялась

среднеобъемная температура. Расчетная температура сравнивалась с экспериментальной.

Температура воздуха на выходе из аппарата рассчитывалась по формуле:

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{вх}} + \frac{Gq_{\text{воды}} \omega W}{VSc_{\text{возд}} \rho_{\text{возд}}}, \tag{6}$$

где $c_{\text{возд}} = 10^3$ Дж/кг·К – теплоемкость воздуха при температуре минус 20°C; $t_{\text{вх}}$ – температура воздуха на входе в аппарат, °C; S – площадь рабочей камеры аппарата, м²; $q_{\text{воды}} = 3,3 \cdot 10^5$ Дж/кг – теплота кристаллизации воды; W – влажность продукта, %.

Результаты сравнения расчетных и экспериментальных величин представлены в таблице.

Таблица – Технологические и теплофизические параметры замораживания лесных и садовых ягод в скороморозильном аппарате с направленным движением воздуха

Показатели, ед. изм.	Черника		Брусника		Арония	
$D_э$, мм	8,5		7,8		11	
$\rho_{\text{яг}}$, г/см ³	1,0		0,79		1,1	
$\rho_{\text{нас}}$, г/см ³	0,55		0,50		0,47	
ϵ_0	0,45		0,37		0,50	
μ_a	0,15		0,15		0,20	
$m_{\text{сл}}$, г	1600		1700		2250	
$\rho_{\text{сл}}$, г/см ³	0,33		0,35		0,47	
ϵ	0,67		0,56		0,58	
ν , в/с	3,0		3,3		5,0	
ϵ'	0,55		0,61		0,62	
Nu	80		88		143	
α , Вт/м ² ·К	210		254		292	
$t_{\text{вх}}$, °C	- 28		- 31		-28	
$t_{\text{нач}}$, °C	22		19		19	
G , г/мин	130	85	215	105	360	180
$\tau_{\text{ср пр}}$, мин	12,3	18,8	7,9	10,3	6,2	12,5
$\tau_{\text{ср}}$, мин	11,7	18,5	8,1	10,2	5,4	11,3
Re	4,0	15	2,5	1,5	4,0	3,5
$t_{\text{ср эксп}}$, °C	-18	-21	-19	-21	-11	-17
$t_{\text{ср теор}}$, °C	-17	-21	-18	-22	-13	-19
$t_{\text{вых эксп}}$, °C	-22	-23	-21	-23	-19	-21
$t_{\text{вых теор}}$, °C	-26	-27	-27	-28	-25	-26

Всего было проведено шесть экспериментов с дикорастущими ягодами черники, брусники и садовой аронией черноплодной. Для каждого вида ягод проводилось два эксперимента с различной скоростью загрузки ягод в аппарат G (остальные параметры были одинаковы). Расчетное время замораживания ягод $\tau_{\text{ср}}$ проводилось с учетом поправок на теплоемкость замороженной части, постепенное вымораживание влаги, изменяющуюся в ходе процесса теплопроводность замороженной части, начальную среднеобъемную температуру тела, которая складывается из поправки ко времени собственно замораживания и времени предварительного охлаждения.

Анализируя данные технологических и теплофизических параметров ягод в скороморозильном аппарате представленные в таблице, можно отметить следующее. Различие величин порозности слоя

ε и ε' находится в пределах 17%. Поскольку погрешность формулы (4) составляет 10–15%, то полученный результат является достаточно корректным. К тому же следует отметить, что масса слоя в ходе процесса замораживания подвержена небольшим колебаниям. Измерение массы слоя в определенный момент может дать отличающийся от средней массы слоя результат. Кроме того, принятый объем слоя 4800 см^3 может тоже незначительно изменяться во время процесса.

Непостоянство массы слоя является причиной расхождения $\tau_{\text{ср}}$ и $\tau_{\text{ср пр}}$ (в пределах 13%). Наибольшее отличие этих величин наблюдался в экспериментах с аронией.

Сравнение расчетных и экспериментальных температур ягод на выходе из аппарата $t_{\text{ср}}$ не превышает 2°C , что говорит о хорошем совпадении теории и эксперимента.

Превышение экспериментальной температуры воздуха над теоретической на выходе из аппарата на $4\text{--}6^\circ\text{C}$ объясняется тем, что в формуле (6) не учитывались тепловые потери через стенки камеры, которые и приводят к повышению температуры.

Сравнение опытных и расчетных величин продолжительности замораживания лесных и садовых ягод показало, что требуемая среднеобъемная температура замороженных ягод минус 18°C достигается в скороморозильном аппарате при следующей производительности: для черники – 130 г/мин , брусники – 215 г/мин , аронии – 180 г/мин . Следует обратить внимание, что заполнение агрегата продуктом ($m_{\text{ср}}$) было различным. При меньшей производительности наблюдается выход продукта из аппарата с температурой ниже требуемой. Так для черники при $G = 85 \text{ г/мин}$, температура достигает минус 21°C , для брусники при $G = 105 \text{ г/мин}$ минус 22°C . При увеличении производительности аппарата (для аронии) наблюдается повышение конечной среднеобъемной температуры до минус 11°C . Как известно, если конечная среднеобъемная температура продукта после замораживания выше температуры хранения, наблюдается ухудшение его показателей качества при дальнейшем холодильном хранении. В первом случае происходит слипание продукции, во втором – отепление, так как хранение осуществляется при более высокой температуре.

Выводы

Таким образом, зная теплофизические свойства замораживаемых объектов, методику расчета среднего времени пребывания продукта в аппарате, продолжительность процесса замораживания [9, 10, 11, 12], можно вычислить производительность скороморозильного аппарата. Использование представленных материалов целесообразно при определении режимов быстрого замораживания пищевых продуктов методом флюидизации и конструкционных особенностей скороморозильных аппаратов.

Кроме того, при организации процесса замораживания в скороморозильных аппаратах с направленным движением воздуха, необходимо решать и задачу массообмена между продуктом и охлаждающим воздухом [13, 14, 15].

Литература

1. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Яковлева М.И., Третьяков Н.А. О времени замораживания пищевых продуктов // Холодильная техника. 1997. № 2. С. 16–17.
2. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Кременевская М.И., Москвичева Е.В. О продолжительности замораживанияпельменей // Мясная индустрия. 2012. № 5. С. 62–63.
3. Куцакова В.Е., Кременевская М.И., Марченко В.И. Хранение и переработка косточковых плодов, выращенных с использованием белкового стимулятора роста типа БКА // Хранение и переработка сельхозсырья. 2002. № 5. С. 47–49.
4. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М.: Агропромиздат, 1979. 415 с.

5. Куцакова В.Е., Уткин Ю.В., Фролов С.В., Третьяков Н.А. Расчет времени замораживания бесконечного цилиндра и шара с учетом одновременного охлаждения замороженной части // Холодильная техника. 1996. № 2. С. 21.
6. Платунов Е.С., Баранов И.В., Прошкин С.С., Самолетов В.А. Определение теплофизических характеристик пищевых продуктов в области кристаллизации связанной влаги // Вестник Международной академии холода. 1999. № 1. 41–44 с.
7. Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: справочник. М.: Агропромиздат, 1990. 288 с.
8. Чубик И.А., Маслов А.М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 185 с.
9. Чижов Г.Б. Теплофизические процессы в холодильной технологии пищевых продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1979. 271 с.
10. Plank R. Tiber die Gefrierzeit von eis- und wasserhaltigen Lebensmlteln. *Zeitschrift fur die gessamte Kalte-Industrie*. Karlsruhe, 1913, V. 20, no. 6, P. 109.
11. Бараненко А.В., Куцакова В.Е., Борзенко Е.И., Фролов С.В. Примеры и задачи по холодильной технологии пищевых продуктов. Теплофизические основы: учеб. пособие. СПб.: ГИОРД, 2012. 272 с.
12. Куцакова В. Е., Кременевская М.И., Казаков Д.С., Шкотова Т.В. Кинетика замораживания тестовых полуфабрикатов с различными начинками // Пищевая промышленность. 2011. № 5. С. 42–43.
13. Куцакова В.Е., Фролов С.В., Кременевская М.И., Гадоев М. Усушка при замораживании // Международный научно-исследовательский журнал. 2013. Часть 2. Вып.14. С. 51–52.
14. Фролов С.В., Данин М.И., Кременевская М.И. Потери при замораживании и холодильном хранении дикорастущих ягод // Вестник Международной академии холода. 2008. № 1. С. 35–36.
15. Kutsakova V.E., Frolov S.V., Yakovleva M.I. Mass transfer during freezing. *Russian journal of applied chemistry*. 1997. V. 70, no. 12, pp. 2061–2063.

References

1. Kutsakova V.E., Frolov S.V., Yakovleva M.I., Tret'yakov N.A. O vremeni zamorazhivaniya pishchevykh produktov [About the time of freezing food]. *Kholodil'naya tekhnika*. 1997, no. 2, pp. 16–17.
2. Kutsakova V.E., Frolov S.V., Kremenevskaya M.I., Moskvicheva E.V. O prodolzhitel'nosti zamorazhivaniya pel'menei [On the duration of the freeze dumplings]. *Meat Industry*. 2012, no. 5, pp. 62–63.
3. Kutsakova V.E., Kremenevskaya M.I., Marchenko V.I. Khranenie i pererabotka kostochkovykh plodov, vyrashchennykh s ispol'zovaniem belkovogo stimulyatora rosta tipa BKA [Storage and processing of stone fruits grown using protein growth stimulant such as BCA]. *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2002, no. 5, pp. 47–49.
4. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the theory of heat transfer]. Moscow, Agropromizdat Publ., 1979, 415 p.
5. Kutsakova V.E., Utkin Yu.V., Frolov C.B. Tret'yakov H.A. Raschet vremeni zamorazhivaniya beskonechnogo tsilindra i shara s uchetom odnovremennogo okhlazhdeniya zamorozhennoi chasti [Timing of freezing an infinite cylinder and sphere, taking into account the simultaneous cooling of the frozen]. *Kholodil'naya tekhnika*. 1996, no. 2, p. 21.
6. Platonov E.S., Baranov I.V, Proshkin S.S., Samoletov V.A. Opredelenie teplofizicheskikh kharakteristik pishchevykh produktov v oblasti kristallizatsii svyazannoi vlagi [Determination of thermal properties of foods in the crystallization of water-related]. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 1999, no. 1, pp. 41–44.
7. Ginzburg A.S., Gromov M.A., Krasovskaya G.I. *Teplofizicheskie kharakteristiki pishchevykh produktov* [Thermal characteristics of foods]. Directory. Moscow, Agropromizdat Publ., 1990, 288 p.
8. Chubik I.A., Maslov A.M. *Spravochnik po teplofizicheskim kharakteristikam pishchevykh produktov i polufabrikatov* [Handbook of thermophysical characteristics of food products and semi-finished products]. Moscow, Food Industry Publ., 1970, 185 p.
9. Chizhov G.B. *Teplofizicheskie protsessy v kholodil'noi tekhnologii pishchevykh produktov* [Thermophysical processes refrigerating food technology]. Moscow, Food industry Publ., 1979, 271 p.

10. Plank R. Tiber die Gefrierzeit von eis- und wasserhaltigen Lebensmltteln. *Zeitschrift fur die gessamte Kalte-Industrie*. Karlsruhe, 1913, V. 20, no. 6, P. 109.
11. Baranenko A.V., Kutsakova V.E., Borzenko E.I., Frolov S.V. *Primery i zadachi po kholodil'noi tekhnologii pishchevykh produktov. Teplofizicheskie osnovy: ucheb. posobie* [The examples and problems of refrigeration food technology. Thermophysical foundations: studies]. St. Petersburg, GIORD Publ., 2012, 272 p.
12. Kutsakova V. E., Kremenevskaya M.I., Kazakov D.S., Shkotova T.V. *Kinetika zamorazhivaniya testovykh polufabrikatov s razlichnymi nachinkami* [Kinetics of freezing test semi-finished products with various fillings]. *Food industry*. 2011, no. 5, pp. 42–43.
13. Kutsakova V.E., Frolov S.V. , Kremenevskaya M.I., Gadoev M. Usushka pri zamorazhivanii [Shrinkage during the freezing]. *Research Journal of International stadies*. 2013, part 2, no.14. pp. 51–52.
14. Frolov S.V., Danin M.I., Kremenevskaya M.I. Poteri pri zamorazhivanii i kholodil'nom khranении dikorastushchikh yagod [Losses during freezing and refrigeration storage of wild berries]. *Bulletin of the International Academy of Refrigeration*. 2008, no. 1, pp. 35–36.
15. Kutsakova V.E., Frolov S.V., Yakovleva M.I. Mass transfer during freezing. *Russian journal of applied chemistry*. 1997. V. 70, no. 12, pp. 2061–2063.

Статья поступила в редакцию 07.11.15