

7. Rosaboev A.T. Sposoby tekhnologicheskogo protsessa sushki materialov / A.T. Rosaboev, D.Kh. Igamberdiev // Molodoi uchenyi. – 2016. – No. 8. – S. 289-291.

8. Maksimenko Iu.A. Analiz vliianiia osnovnykh faktorov na effektivnost protsessa sushki syria rastitelnogo proiskhozhdeniia / Iu.A. Maksimenko, Iu.S. Feklunova, E.R. Telichkina // Vestnik AGTU. Nauchnyi zhurnal. – 2014. – No. 2 (58). – S. 97-101.

9. Mamaly Sh. Influence of temperature on moisture change when drying vegetables in IR - vacuum installation. Science, Technology and Higher Education: Materials of the III International Research and Practice Conference. Vol. II. - Westwood (Canada), 2013. - pp. 456-459.

10. Mamatov Sh.M. Issledovanie optimizatsii protsessa teploobmena v tekhnologii sushki ovoshchei / Sh.M. Mamatov, K.O. Dodaev // Vestnik Tambovskogo universiteta. – 2013. – No. 5. – S. 2504-2506.

11. Korotkiy, I., Neverov, E., Lifentseva, L., Raschepkin, A. (2021). Analysis of energy consumption during convective drying of fruits and berries. *E3S Web of Conferences*. 273. 07027. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307027.

12. Dern S. Considerations when specifying ultimate freeze drying vacuum. The Information Source for the Pharmaceutical Manufacturing Industry Pharmaceutical Online. January 27, 2006. Available at: <http://www.pharmaceuticalonline.com> (accessed 17.11.2014).

13. Patent 2463538 Rossiiskaia Federatsiia, MPK F26B 3/30. Mnogoiarusnaia kamera infrakrasnoi sushki / Obodov D.A., Demidov S.F., Voronenko B.A., Pelenko V.V.; zaiavitel i patentoobladatel Obodov D.A. – No. 2010151818/06; zaiavl.17.10.2010; opubl.10.10.2012, Biul. No. 28.

14. Neverov E.N. Opredelenie protsessovykh kharakteristik bystrogo zamorazhivaniia produktov metodom nepreryvnogo i diskretnogo teplootvoda / E.N. Neverov, L.V. Lifentseva, A.V. Usov // Tekhnika i tekhnologiiia pishchevykh proizvodstv. – 2019. – T. 49. No. 1. – S. 104-112.

15. Neverov E.N. Issledovanie rezhimov zamorazhivaniia rastitelnoi produktsii dioksidom ugleroda / E.N. Neverov, I.A. Korotkii, L.V. Lifentseva, A.N. Rasshchepkin // Izvestiia Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. – 2021. – No. 1 (61). – S. 326-337.



УДК 664.8.037.522

DOI: 10.53083/1996-4277-2022-208-2-89-93

И.А. Короткий, Е.Н. Неверов, Е.В. Короткая, А.Н. Расщепкин, А.К. Горелкина
I.A. Korotkiy, E.N. Neverov, E.V. Korotkaya, A.N. Rasshchepkin, A.K. Gorelkina

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ЯГОД ОБЛЕПИХИ В АКУСТИЧЕСКОМ ПОЛЕ

STUDYING THE FREEZING PROCESS OF SEA-BUCKTHORN BERRIES IN ACOUSTIC FIELD

Ключевые слова: облепиха, быстрое замораживание, низкотемпературная обработка, скороморозильный аппарат, акустическое поле, интенсификация процесса замораживания, звуковые колебания.

Ягоды облепихи являются ценным источником витаминов, микроэлементов и других биологически активных веществ. Наилучшим способом консервирования ягод является замораживание и низкотемпературное хранение. Ягоды облепихи имеют короткий вегетационный период и малый срок хранения в свежем состоянии. Поэтому интенсификация оборудования для быстрого замораживания плодов и ягод является важной технической задачей. Замораживание ягод в звуко-

вом поле заметно интенсифицирует процесс низкотемпературной обработки. Были исследованы процессы замораживания ягод облепихи сорта Дар Катуни при различной частоте и интенсивности акустического поля. Установлено, что наибольшая эффективность замораживания ягоды облепихи сорта Дар Катуни имеет место при интенсивности звукового воздействия $4,4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м². Влияние частоты акустического воздействия на продолжительность замораживания имеет нелинейный характер. Наилучшие результаты показали процессы замораживания при частоте акустических колебаний 10 кГц. Таким образом, использование акустических колебаний позволило снизить продолжительность низкотемпературной обработки на $6 \div 7\%$.

Keywords: *sea-buckthorn (Hippophae rhamnoides L.), fast freezing, low-temperature processing, fast-freezing system, acoustic field, freezing process intensification, sound vibrations.*

Sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides L.*) berries are a valuable source of vitamins, trace elements and other biologically active substances. The best way to preserve berries is freezing and low-temperature storage. Sea-buckthorn berries have a short growing season and a short shelf life. Therefore, the intensification of equipment for fast freezing of fruits and berries is an important technical task. Freezing berries in

acoustic field significantly intensifies the process of low-temperature processing. The processes of freezing of sea buckthorn berries of the Dar Katuni variety at different frequencies and intensities of the acoustic field were studied. It was found that the greatest efficiency of freezing sea buckthorn berries of the variety Dar Katuni occurred at an intensity of sound exposure of $4.4 \cdot 10^{-4} \text{ W m}^2$. The effect of acoustic frequency on the duration of freezing was nonlinear. Freezing processes with an acoustic oscillation frequency of 10 kHz showed the best results. Thus, the use of acoustic oscillations allowed reducing the duration of low-temperature processing by 6÷7%.

Короткий Игорь Алексеевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: krot69@mail.ru.

Неверов Евгений Николаевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: neverov42@mail.ru.

Короткая Елена Валерьевна, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: korotkayael@mail.ru.

Расщепкин Александр Николаевич, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: technocholod@mail.ru.

Горелкина Алена Константиновна, д.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», г. Кемерово, Российская Федерация, e-mail: alengora@yandex.ru.

Korotkiy Igor Alekseevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: krot69@mail.ru.

Neverov Evgeniy Nikolaevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: neverov42@mail.ru.

Korotkaya Elena Valerevna, Dr. Tech. Sci., Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: korotkayael@mail.ru.

Rasshchepkin Aleksandr Nikolaevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: technocholod@mail.ru.

Gorelkina Alena Konstantinovna, Dr. Tech. Sci., Assoc. Prof., Kemerovo State University, Kemerovo, Russian Federation, e-mail: alengora@yandex.ru.

Введение

Рацион питания населения должен включать достаточно широкий ассортимент пищевых веществ. Важными компонентами рациона питания являются различные виды органических кислот, витамины, микроэлементы и другие элементы. Ценнейший источник таких элементов – ягодные культуры, которые имеют широкое распространение и популярность в Сибирском регионе [1].

Выращивание, сбор и заготовка ягодных культур – существенный производственный сегмент агропромышленного комплекса Сибири, имеющий значительные перспективы своего роста и качественного развития. Важную долю производственного сектора, связанного с производством, заготовкой и переработкой ягоды, занимает облепиха, ягоды которой являются природным поливитаминным концентратом. Они содержат значительное количество каротина и каротиноидов, доля этих веществ составляет до 350 мг%, витамина С, содержание которого до

450 мг%. Также облепиха содержит витамин Е, фолиевую кислоту, витамины группы В, F, P. В ягодах облепихи присутствует до 5,5% сахаров, органические кислоты, масла и другие биологически активные вещества, однако ягоды имеют короткий вегетационный период и малую продолжительность хранения их в свежем состоянии [2].

Наилучшим способом обеспечить сохранность ценного продукта и сырья является низкотемпературная обработка. В замороженных плодах наилучшим образом сохраняются основные компоненты, определяющие их пищевую ценность. Наиболее полно также сохраняются органолептические показатели ягод. При этом важное значение имеют способ и режимы низкотемпературной обработки, при котором реализуются процессы замораживания.

Результативным, если учитывать энергетические затраты, органолептические и качественные показатели замороженных продуктов, является быстрое замораживание воздушным

способом в скороморозильных аппаратах [3, 7, 8].

Низкие температуры и высокие скорости движения воздушной среды, которая является рабочим телом скороморозильного аппарата способны обеспечить высокие коэффициенты теплоотдачи и эффективный теплоотвод. В результате продолжительность низкотемпературной обработки ягод облепихи можно сократить до 10÷20 мин. При этом комбинирование традиционных технологических подходов с другими физическими методами воздействия на обрабатываемый продукт может еще значительно снизить продолжительность замораживания и повысить качество замороженного продукта.

Комбинация низкотемпературного воздействия от потока холодного воздуха с акустическим воздействием способна ускорять процессы диффузии, тепло- и массообмена и таким образом интенсифицировать низкотемпературную обработку [4].

Содержание влаги в ягодах облепихи составляет до 88%. При замораживании ягод происходит кристаллизация этой влаги. Продолжительность замораживания зависит от интенсивности теплообмена на поверхности ягод. Акустическое воздействие дает возможность увеличить скорость теплообмена на поверхности ягод и, соответственно, интенсифицировать теплоотдачу от продукта при низкотемпературной обработке [1].

Целью работы было исследование влияния акустических колебаний на процесс замораживания ягод облепихи. Для достижения поставленной цели необходимо было решить комплекс практических и научных задач. К практическим задачам был отнесен вопрос интегрирования излучателя звуковых волн в конструкцию скороморозильного аппарата, используемого для замораживания ягод. Эта задача была решена установкой излучателя в диффузорный канал, подводящий рабочий воздух к замораживаемому продукту. К научным задачам были отнесены исследования процесса замораживания ягод облепихи при различной частоте и амплитуде звуковых колебаний и при отсутствии звуковых воздействий, а также анализ и описание полученных данных.

Объекты и методы

Исследовали влияние акустических колебаний на интенсивность низкотемпературной обработки ягод облепихи сорта Дар Катуни. Замораживание производили в скороморозильном

аппарате при рабочей температуре хладоносителя (воздуха) -45°C и скорости движения воздуха 4 м/с при восходящем обтекании им замораживаемых ягод (рис. 1).

Установка генератора акустических колебаний в скороморозильном аппарате создает условия для интенсификации теплообмена между хладоносителем (воздухом) и объектом замораживания (ягодами облепихи) [5].

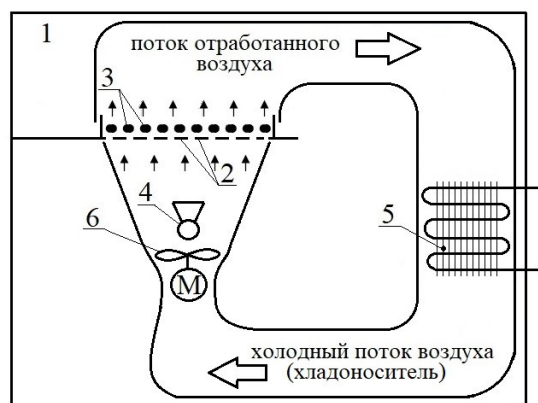


Рис. 1. Блок-схема замораживания ягод облепихи в скороморозильном аппарате под действием акустического поля:
 1 – рабочий объем скороморозильного аппарата; 2 – сетчатый поддон;
 3 – объект низкотемпературной обработки (ягоды облепихи); 4 – генератор звуковых волн;
 5 – испаритель системы хладоснабжения;
 6 – циркуляционный вентилятор рабочего воздуха

Результаты исследований и их обсуждение

Звуковое поле образует акустические течения у поверхности продукта, которые уменьшают толщину пограничного слоя, соответственно, уменьшается его термическое сопротивление и возрастает коэффициент теплоотдачи от поверхности продукта к рабочей среде [6]. Таким образом, скорость замораживания увеличивается, а продолжительность низкотемпературной обработки снижается.

Были проведены исследования продолжительности замораживания ягод облепихи сорта Дар Катуни в звуковом поле в зависимости от напряжения на звуковой катушке излучателя U_k , а также от частоты звукового сигнала. В диапазоне напряжений от 0 до 0,2 В продолжительность низкотемпературной обработки снижается на 5%. Дальнейшее увеличение напряжения на катушке излучателя сопровождается снижением

интенсивности теплообмена и, как следствие, увеличением продолжительности низкотемпературной обработки (рис. 2). Замораживание производили в унифицированных условиях для всех экспериментов. Начальная температура ягод для всех экспериментов была 16°C. Замораживание ягод производили до температуры -40°C и ниже, но контроль продолжительности замораживания для приведенного эксперимента устанавливали при температуре -20°C. Контроль хода процесса низкотемпературной обработки осуществляли с помощью измерительного комплекса, включающего в себя хромель-комплевые термоэлектрические преобразователи с размером чувствительного элемента 0,2÷0,4 мм, модуль ввода аналоговый МВА 8 «Овен», аналогово-цифровой преобразователь АС-4 «Овен» и компьютер с установленным специализированным программным обеспечением.

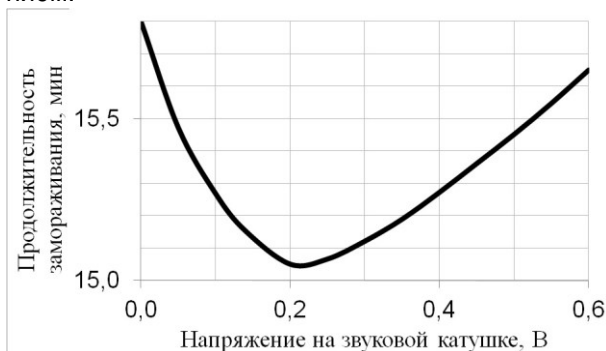


Рис. 2. График продолжительности замораживания ягод облепихи сорта Дар Катунь в скороморозильном аппарате в зависимости от напряжения на катушке акустического излучателя

Термопары в количестве 5 шт. устанавливались в центральную часть ягод облепихи, расположенных в различных местах сетчатого поддона. Для эксперимента использовали 1 кг ягод облепихи сорта Дар Катунь. После проведения эксперимента некорректные данные термопар отбраковывались, и при дальнейшем анализе результатов использовались корректные показания температур.

В результате анализа экспериментальных данных обнаружили явно выраженный экстремум зависимости продолжительности замораживания от напряжения на катушке излучателя. Этот экстремум соответствует оптимальному режиму замораживания. Рассчитали интенсивность звука I по площади звукового излучения S по формуле:

$$I = \frac{\eta \cdot U_k^2}{R_k \cdot S},$$

где U_k – напряжение, подаваемое на катушку излучателя, имеющую электрическое сопротивление R_k ;

η – КПД излучателя, зависит от конструктивных параметров звукового преобразователя.

В частотной зависимости установлено, что наибольшая эффективность теплообмена в диапазоне акустических колебаний 5÷15 кГц имеет место при частоте 10 кГц. На рисунке 3 приведены результаты, отражающие влияние частоты звуковых колебаний на продолжительность замораживания ягод облепихи сорта Дар Катунь при интенсивности звукового воздействия $4,4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м².

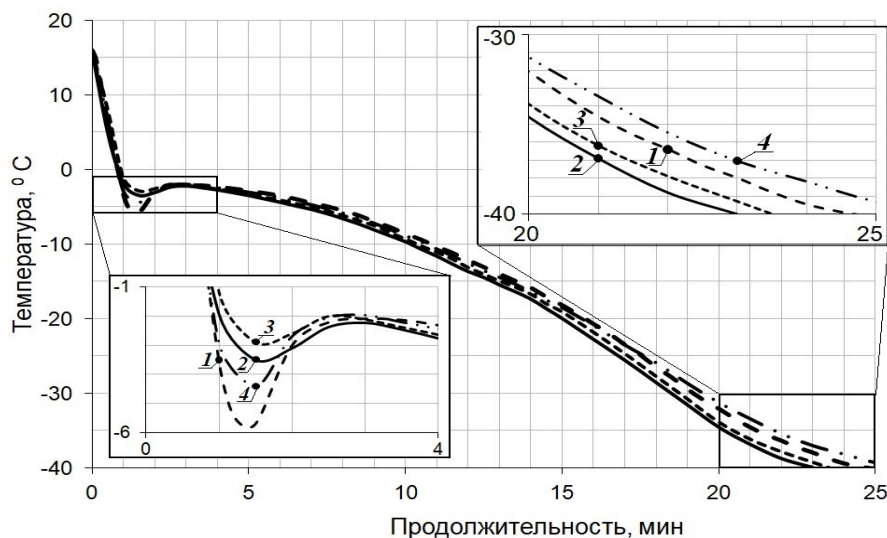


Рис. 3. Термограммы замораживания ягод облепихи сорта Дар Катунь в скороморозильном аппарате: 1 – замораживание в акустическом поле 10 кГц; 2 – замораживание в акустическом поле 5 кГц; 3 – замораживание в акустическом поле 15 кГц; 4 – замораживание без акустического поля

Заключение

В результате исследований установлено, что акустическое воздействие на замораживаемые в скороморозильном аппарате ягоды облепихи может интенсифицировать процесс низкотемпературной обработки – продолжительность замораживания ягод от начальной температуры 16°C до конечной температуры -20°C сокращается с 16 до 15 мин., то есть на 6÷7%. В условиях массового производства это существенная интенсификация технологического процесса. Установлено также, что есть оптимальная частота звуковых колебаний – 10 кГц. Уменьшение, как и увеличение частоты звуковых колебаний, сопровождается увеличением продолжительности низкотемпературной обработки.

Библиографический список

1. Короткий, И. А. Сибирская ягода. Физико-химические основы технологий низкотемпературного консервирования / И. А. Короткий. – Кемерово, 2007. – 146 с. – Текст: непосредственный.
2. Korotkiy, I.A., Korotkaya, E.V., Kireev, V.V. (2016). Energy efficiency analysis of the sea buckthorn (*Hippophae Rhamnoides*) fruits quick freezing. *Foods and Raw Materials*. 4. 110-120. DOI: 10.21179/2308-4057-2016-1-110-120.
3. Остроумов, Л. А. Исследование процессов замораживания плодов и ягод / Л. А. Остроумов, О. Н. Буянов, И. А. Короткий. – Текст: непосредственный // Техника и технология пищевых производств. – 2009. – № 1 (12). – С. 32-36.
4. Замораживание ягод клубники при воздействии акустических микровибраций / Г. В. Семенов, И. С. Краснова, С. И. Хвыля, Д. Н. Балаболин. – Текст: непосредственный // Холодильная техника. – 2019. – № 4. – С. 40-43.
5. Антипов, С. Т. Повышение эффективности замораживания растительных продуктов / С. Т. Антипов, А. В. Аммер. – Текст: непосредственный // Техника машиностроения. – 1999. – № 3. – С. 81-82.
6. Bredihin, S., Andreev, V., Martekha, A., Schenzle, M., Korotkiy, I. (2021). Erosion potential of ultrasonic food processing. *Foods and Raw Materials*. 9. 335-344. DOI: 10.21603/2308-4057-2021-2-335-344.
7. Korotkiy, I., Neverov, E., Lifentseva, L., Raschepkin, A. (2021). Analysis of energy consumption during convective drying of fruits and berries. *E3S Web of Conferences*. 273. 07027. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307027.
8. Neverov E.N. Issledovanie rezhimov zamorazhivaniia rastitelnoi produktsii dioksidom ugleroda / E.N. Neverov, I.A. Korotkii, L.V. Lifentseva, A.N. Raschepkin // Izvestiia Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. – 2021. – No. 1 (61). – С. 326-337.

References

1. Korotkii I.A. Sibirskaiia iagoda. Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii nizkotemperaturnogo konservirovaniia / I.A. Korotkii. – Kemerovo, 2007. – 146 s.
2. Korotkiy, I.A., Korotkaya E.V., Kireev V.V. (2016). Energy efficiency analysis of the sea buckthorn (*Hippophae Rhamnoides*) fruits quick freezing. *Foods and Raw Materials*. 4. 110-120. DOI: 10.21179/2308-4057-2016-1-110-120.
3. Ostroumov L.A. Issledovanie protsessov zamorazhivaniia plodov i iagod / L.A. Ostroumov, O.N. Buianov, I.A. Korotkii // Tekhnika i tekhnologiia pishchevykh proizvodstv. – 2009. – No. 1 (12). – S. 32-36.
4. Zamorazhivanie iagod klubniki pri vozdeistvii akusticheskikh mikrovibratsii / G.V. Semenov, I.S. Krasnova, S.I. Khvylia, D.N. Balabolin // Kholodilnaia tekhnika. – 2019. – No. 4. – S. 40-43.
5. Antipov S.T. Povyslenie effektivnosti zamorazhivaniia rastitelnykh produktov / S.T. Antipov, A.V. Ammer // Tekhnika mashinostroeniia. – 1999. – No. 3. – S. 81-82.
6. Bredihin, S., Andreev, V., Martekha, A., Schenzle, M., Korotkiy, I. (2021). Erosion potential of ultrasonic food processing. *Foods and Raw Materials*. 9. 335-344. DOI: 10.21603/2308-4057-2021-2-335-344.
7. Korotkiy, I., Neverov, E., Lifentseva, L., Raschepkin, A. (2021). Analysis of energy consumption during convective drying of fruits and berries. *E3S Web of Conferences*. 273. 07027. DOI: 10.1051/e3sconf/202127307027.
8. Neverov E.N. Issledovanie rezhimov zamorazhivaniia rastitelnoi produktsii dioksidom ugleroda / E.N. Neverov, I.A. Korotkii, L.V. Lifentseva, A.N. Raschepkin // Izvestiia Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. – 2021. – No. 1 (61). – С. 326-337.

