ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-849-858

Оригинальная статья
http://fptt.ru

Исследование способа интенсификации экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой

Л. В. Плотникова, И. Б. Плотников*, П. П. Иванов, А. Г. Семенов, И. О. Плотникова, К. Б. Плотников

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 05.09.2021

Принята после рецензирования: 29.11.2021
Принята в печать: 01.12.2021

**e-mail: plotnikov-ib@mail.ru*
© Л. В. Плотникова, И. Б. Плотников, П. П. Иванов, А. Г. Семенов, И. О. Плотникова, К. Б. Плотников, 2021

Аннотация.
Введение. Продукты, содержащие в своем составе натуральные экстракты, пользуются большим спросом. Целью работы является разработка способа интенсификации процесса экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой путем повышения температуры системы взаимодействующих фаз, а также изучение нового способа и нахождение оптимальных значений параметров его проведения.
Объекты и методы исследования. В качестве сырья были выбраны замороженные ягоды клюквы и голубики, широко распространенные на территории РФ. Сырье предварительно подвергалось медленному замораживанию до температуры –18 °С. Исследование проводились в аппарате с вибрационной тарелкой.
Результаты и их обсуждение. С целью интенсификации процесса экстрагирования аппарат был снабжен рубашкой, в которую подавался теплоноситель. Его подача в момент включения аппарата приводит к размораживанию поверхностного слоя ягод и снижает эффективность измельчения, а после протекания процесса разрушения приводит к увеличению его продолжительности. Для устранения данных недостатков разработан новый способ, заключающийся в подаче теплоносителя по окончании процесса измельчения сырья. С целью нахождения оптимальных значений параметров, влияющих на процесс, была проведена серия экспериментов. Полученные данные после математической обработки позволили получить регрессионные уравнения. Установленные оптимальные параметры процесса позволили определить минимальное значение продолжительности процесса разрушения: для ягод клюквы – 2,5 мин, для ягод голубики – 1,5 мин при минимальных затратах мощности: для ягод клюквы – 17,8 Вт, для ягод голубики – 11,7 Вт.
Выводы. Полученные результаты позволяют повысить экономическую эффективность технологического процесса производства натуральных экстрактов, что позволит снизить стоимость готового продукта и увеличить доступность данного продукта для потребителя. Значения параметров процесса могут быть положены в основу проектирования аппаратов данного типа и служить практическими рекомендациями для проведения процесса экстрагирования в аппарате с вибрационной тарелкой замороженного плодово-ягодного сырья.

Ключевые слова. Экстрагирование, клюква, голубика, вибрация, теплоноситель, оптимизация, экстрагент, замораживание

Для цитирования: Исследование способа интенсификации экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой / Л. В. Плотникова [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 4. С. 849–858. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-849-858.

Original article

Available online at http://fptt.ru/eng

Extraction of Frozen Berry Raw Materials with a Vibration Tray Device

Liubov V. Plotnikova, Igor B. Plotnikov*, Pavel P. Ivanov, Andrey G. Semenov, Irina O. Plotnikova, Konstantin B. Plotnikov

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

Received: September 05, 2021

Accepted in revised form: November 29, 2021
Accepted for publication: December 01, 2021

*e-mail: plotnikov-ib@mail.ru
© L.V. Plotnikova, I.B. Plotnikov, P.P. Ivanov, A.G. Semenov, I.O. Plotnikova, K.B. Plotnikov, 2021

Abstract.
Introduction. Products containing natural extracts are in great demand. However, poor production technologies make them too expensive to satisfy consumer demand. As a result, a variety of intensification methods have been developed to increase the economic efficiency of extraction, e.g. low-frequency mechanical vibrations. However, frozen raw materials have to be processed at low temperatures, which makes the method less efficient. The research objective was to intensify the extraction process from frozen berries in a vibration tray device by increasing the temperature of the system of interacting phases.
Study objects and methods. The research involved frozen cranberries and blueberries. They grow everywhere in Western Siberia and are rich vitamins and minerals. The berries were subjected to slow freezing at –18°C, which destroyed the cell structure and increased the processing efficiency. The study was carried out in a lab device with a vibrating tray. All parameters were measured by standard methods.
Results and discussion. The extraction device was equipped with a jacket into which a coolant was fed, i.e. water with a temperature of 55°C. A preliminary series of experiments revealed two negative aspects associated with the supply of coolant into the jacket. First, the surface layer started to thaw, which reduced the efficiency of grinding. Second, the processing time increased. A new method was developed to solve these problems: the coolant was supplied at the end of the grinding. The time of the coolant supply depended on the type of raw materials. The processes that occurred within the device depended on two factors: the frequency of vibrations of the tray and the diameter of the holes in the tray. These factors could be adjusted to intensify the process, but they increased the power costs and energy consumption. A series of experiments determined the optimal values of these parameters. A mathematical analysis revealed regression equations, i.e. how the destruction time and power costs affected the main parameters. The established optimal process parameters made it possible to determine the minimal time of the destruction process: for cranberries – 2.5 min, for blueberries – 1.5 min. The minimal power consumption was 17.8 watts for cranberries and 11.7 watts for blueberries.
Conclusion. The research increased the economic efficiency of the technological process of natural extraction, which can reduce the cost of the finished product and increase its availability. The values of the process parameters can be used to design new similar devices and serve as practical recommendations for berry extraction in vibration tray devices.

Keywords. Extraction, cranberry, blueberry, vibration, heat carrier, optimization, extractant, freezing

For citation: Plotnikova LV, Plotnikov IB, Ivanov PP, Semenov AG, Plotnikova IO, Plotnikov KB. Extraction of Frozen Berry Raw Materials with a Vibration Tray Device. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(4):849–858. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-4-849-858.

Введение

Экстракты, полученные из плодово-ягодного сырья, нашли широкое применение в пищевой промышленности, а также в пивобезалкогольной и молочной. Применение данных экстрактов в качестве вкусо-ароматических и красящих добавок позволяет получить продукты с приятным и естественным вкусом, которые находят отклик у потребителей. Кроме того, экстракты из плодово-ягодного сырья имеют богатый витаминный состав, что позволит увеличить пищевую ценность конечного продукта и сформировать свойства, характерные для профилактических продуктов питания [1–7].

Сдерживающим фактором широкого распространения продуктов, имеющих в своем составе натуральные экстракты, является их высокая стоимость. Это связано с высокой себестоимостью самих экстрактов из-за несовершенства технологии их производства и высокой ценой исходного сырья. Классическими способами получения экстрактов являются перколяция и мацерация. Сущность перколяции заключается в многократном пропускании экстрагента через слой сырья, неподвижно расположенного на сите. Продолжительность процесса достигает 2–4 суток. Кроме высокой продолжительности производства готового продукта, данный способ не позволяет получить высокое содержание целевых компонентов в готовом экстракте, а также требует использования дорогостоящего экстрагента, исключающего микробиологическую порчу в ходе технологического процесса. Например, водно-спиртовой раствор различной концентрации. Применение каскада перколяционных аппаратов также не позволит решить данную проблему. Низкую эффективность процесса экстрагирования данным способом можно объяснить малоэффективными гидродинамическими условиями массопереноса. Это является одним из основных факторов, влияющих на четвертую стадию процесса экстрагирования в системе твердое тело – жидкость, – перенос растворенного целевого компонента с поверхности твердой фазы в ядро потока экстрагента. Мацерация, предполагающая периодическое перемешивание реакционной смеси (плодово-ягодное сырье – экстрагент), не относится к высокоэффективным способам экстрагирования и имеет те же недостатки, что и перколяция [8–12].

С целью интенсификации процесса применяются различные способы, которые можно разделить на две

группы. К первой относятся химические способы, для которых характерно использование различных экстрагентов и их комбинаций. Например, экстракция сверхкритическими газами. Вторая группа содержит физические способы, заключающиеся в улучшении гидродинамической обстановки внутри аппарата и создании рационального температурного режима проведения процесса. В качестве распространенных способов интенсификации экстрагирования плодово-ягодного сырья можно выделить ультразвуковую экстракцию, экстракцию в поле центробежных сил и экстрагирование в поле низкочастотных механических колебаний. Также применяется комбинация этих способов [13–16]. С точки зрения применимости интересен физический способ интенсификации, заключающийся в наложение на систему взаимодействующих фаз поля низкочастотных механических колебаний.

Данный способ используется в аппарате с вибрационной тарелкой. Конструкция аппарата представляет собой цилиндрический корпус с крышкой и днищем, внутри которого установлен перфорированный диск с отбортовкой – тарелка. Тарелка приводится в движение от электродвигателя через кривошипно-шатунный механизм и совершает возвратно поступательные движения с частотой, составляющей 10–20 Гц, и амплитудой, изменяемой в пределах 3–8 мм. Помимо простоты конструкции, способ, осуществляемый в данном аппарате, позволяет сократить продолжительность процесса до 15–20 мин и получить высокий выход целевых компонентов. Также в данном аппарате возможна обработка замороженного плодово-ягодного сырья.

Сбор плодово-ягодного сырья ограничен по времени сезонностью созревания, поэтому важным является вопрос его сохранности с целью дальнейшей переработки. В настоящее время используется два способа консервирования свежего плодово-ягодного сырья – сушка и замораживание. Сушка предполагает удаление большей части влаги, что позволяет без дополнительных расходов хранить плодово-ягодное сырье в течение длительных сроков. Для данного вида консервирования характерен ряд особенностей: высокая энергоемкость и вероятность повреждения термолабильных нутриентов экстрагированного сырья. Последний фактор приводит к возникновению дополнительных стадий – набухания и растворения целевого компонента, – которые характеризуются высокой продолжительностью и значительным диффузионным сопротивлением. Все это делает сушку не рациональной при переработке плодово-ягодного сырья в концентрированные экстракты [17].

Замораживание как способ консервирования проводится медленно, что позволяет не использовать дорогостоящее скороморозильное оборудование и подготовить сырье для дальнейшего экстрагирования. При медленном замораживании до температуры –18 °С происходит рост крупных кристаллов льда, который приводит к повреждению клеточной стенки, а при дальнейшем экстрагировании облегчает проникновение экстрагента внутрь клетки. Температурный режим хранения не является строгим, т. е. колебания температур относительно установленной могут составлять до 8 °С. Колебания температуры более 2 °С приводят к перекристаллизации, т. е. к повреждению стенки клеток. Замораживание позволяет сохранить максимальное количество полезных компонентов полученного экстракта, а при применении щадящих способов экстрагирования и криоконцентрирования получить продукт с составом, который не уступает исходному [18].

Аппарат с вибрационной тарелкой позволяет не только перерабатывать сырье без предварительной дефростации, но и проводить несколько стадий производства в нем. Такие стадии, как дефростация сырья и измельчение, требуют производственные площади и наличие специального оборудования, а также дополнительные транспортные манипуляции. Это ведет к росту потерь и себестоимости готового продукта. В аппарате с вибрационной тарелкой происходит измельчение, размораживание и экстрагирование, что положительно влияет на экономическую составляющую процесса производства экстрактов. Следует отметить возможность легкой перенастройки аппарата с одного вида сырья на другой. Это позволяет создавать универсальные технологические линии с гибкой поточной структурой.

Несмотря на все достоинства данного аппарата, выход целевых компонентов недостаточно велик. Для его увеличения в качестве экстрагента применялся водно-спиртовой раствор [19]. Однако применение данного экстрагента накладывает дополнительные требования к герметичности технологического оборудования, пожаро- и взрывобезопасности. Данный вид экстрагента характеризуется высокой стоимостью, необходимостью лицензирования и разработкой схем улавливания паров спирта при концентрировании экстракта выпариванием и т. д. В связи с этим существует необходимость интенсификации процесса другими методами.

Особенностью переработки замороженного сырья в рассматриваемом аппарате является пониженная температура, составляющая 10 °С. Это негативно сказывается на скорости экстрагирования, т. к. температура является одним из ведущих факторов, влияющих на процессы массобмена и массопереноса.

Целью работы является разработка способа интенсификации процесса экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья в аппарате с вибрационной тарелкой путем повышения температуры системы взаимодействующих фаз, а также изучение нового способа и нахождение оптимальных значений его параметров.

Объекты и методы исследования

В качестве сырья были выбраны ягоды клюквы и голубики, широко распространенные в нашей стране, в том числе Западной Сибири. Ягоды клюквы имеют богатый витаминный состав, преобладающим компонентом которого является витамин С. Кроме того, они содержат дубильные и красящие, воскообразные и другие вещества, а также жиры. Минеральные вещества представлены калием, кальцием, фосфором, железом и марганцем.

Ягоды голубики имеют богатый витаминный и минеральный состав. Из органических веществ в них преобладают углеводы (свыше 70 % сухого веса). Сахара представлены глюкозой и фруктозой, сахарозы содержится небольшое количество или отсутствует полностью. Из органических кислот в состав ягод входят лимонная, яблочная и щавелевая, но по количеству преобладает лимонная. Помимо указанных веществ, в состав ягод голубики входят клетчатка, пектиновые, дубильные и красящие вещества. Семена голубики богаты жиром (28,56–32,17 %) [20].

Схема экстрактора с вибрационной тарелкой представлена на рисунке 1. Аппарат состоит из цилиндрического корпуса *1*, снабженного теплообменной рубашкой, в которой имеются патрубки для ввода и вывода теплоносителя. Корпус сверху имеет крышку *7* с патрубком для загрузки экстрагента, а снизу – днище *4* с патрубком *3* для вывода готового продукта. Внутри на вертикальном штоке *5* закреплен рабочий орган – вибрационная тарелка *2* – с зазором относительно стенки аппарата не более 2 мм. Плоскость тарелки перфорирована отверстиями цилиндрической формы, обеспечивая живое сечение 16,5 %. По периферии тарелка имеет отбортовку высотой 12 мм, направленную вниз. С заданными амплитудой и частотой рабочий орган совершает возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости за счет кривошипно-шатунного механизма *6*.

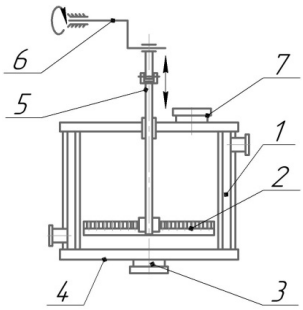

Рисунок 1. Экстрактор с вибрационной тарелкой: *1* – корпус; *2* – перфорированная тарелка; *3* – устройство вывода фаз; *4* – днище; *5* – шток; *6* – кривошипно-шатунный механизм; *7* – крышка

Figure 1. Extractor with a vibrating tray: *1* – jacket; *2* – perforated tray; *3* – phase output device; *4* – bottom; *5* – stock; *6* – crank mechanism; *7* – lead

Экстрактор работает следующим образом. Плодово-ягодное сырье температурой –18 °С загружают в корпус под вибрационную тарелку, после чего закрывается крышка. Высота от днища до тарелки составляет 45 мм. Через патрубок в крышке заливается экстрагент (вода температурой 18 ± 2 °С) и включается электродвигатель, приводящий в движение вибрационную тарелку через кривошипно-шатунный механизм. Амплитуда колебаний тарелки составляет 8 мм.

Для повышения температуры системы взаимодействующих фаз, находящихся внутри аппарата, в рубашку подается теплоноситель – вода температурой 55 °С. В процессе работы сырье подвергается разрушению, размораживанию и экстрагированию. После окончания процесса аппарат разгружается через патрубок *3* [21].

В процессе работы измерялся показатель содержания сухих водорастворимых веществ в экстракте. Для этого отбирались пробы в объеме 5 мл. Далее они подвергались фильтрованию и термостатированию при температуре 20 °С с последующим измерением содержания сухих водорастворимых веществ рефрактометрическим методом. Частота колебаний тарелки устанавливалась и контролировалась по частоте вращения вала электродвигателя при помощи тахометра HT-522.

Для определения дисперсного состава твердой фазы применялся набор сит с номерами 1,7, 1,25, 1, 0,63, 045, 0,4, 0,315 и 0,2. Анализ проводился следующим образом. Систему твердое тело – жидкость процеживали последовательно через сита. Сход с каждого сита подвергался сушке при температуре 23 °С с продолжительностью не менее 24 ч. Затем полученную твердую фазу взвешивали на аналитических весах 2 класса ВЛР-200г, погрешность которых не превышает ± 0,15 мг, с применением набора образцовых гирь, погрешность которых не превышает 0,01 мг.

С целью получения более точных значений измеряемых параметров проводилась серия повторных опытов. Результаты, значительно отличающиеся от средних, исключались. Кроме того, качественный анализ каждой пробы полученного экстракта проводился в трех повторах, что позволяет говорить о достоверности результатов.

Для нахождения оптимальных значений параметров работы аппарата варьировались два фактора: диаметр отверстий перфорации вибрационной тарелки и частота ее колебаний. В таблице 1 представлены регулируемые параметры проведения процесса.

Условия проведения эксперимента были выбраны, исходя из литературных источников, а

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Table 1. Experimental conditions

Фактор	Обозначение факторов	Уровни		Центр эксперимента	Шаг варьирования
		Нижний	Верхний		
Диаметр отверстий перфорации тарелки (d), мм	C_1	2,5	3,5	3	0,5
Частота колебаний тарелки (T), Гц	C_2	8,3	13,3	10,8	1,7

также основывались на предварительной серии экспериментов.

Результаты и их обсуждение

Серия экспериментов с нагревом системы взаимодействующих фаз показала два негативных момента. Подача теплоносителя в рубашку одновременно с запуском привода колебаний тарелки приводит к быстрому нагреву системы. Это вызывает быстрое размораживание верхних слоев плодово-ягодного сырья и приобретение ими упругих свойств. В результате эффективность разрушения снижается. Однако в некоторых случаях разрушение не происходило вовсе, что характерно при использовании ягод клюквы. В итоге менее эффективное разрушение приводит к увеличению продолжительности процесса и снижению концентрации целевых компонентов в готовом экстракте. На рисунке 2 приведена зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата для ягод голубики и клюквы.

Подача теплоносителя по истечении времени, достаточного для полного разрушения, приводит к увеличению продолжительности процесса в целом. На рисунке 3 приведена зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при поздней подаче теплоносителя ягод голубики и клюквы.

Из графиков видно, что подача теплоносителя после окончания процесса разрушения сырья приводит к ступенчатости выхода целевых компонентов. То есть процесс, происходящий в аппарате, делится на две стадии. На первой стадии происходит разрушение ягод и их размораживание, после чего начинается процесс экстрагирования. На второй стадии происходит доизмельчение сырья и процесс экстрагирования, продолжающийся до предельного насыщения экстрагента целевыми компонентами.

Одной из задач исследования нового способа является нахождение рационального времени подачи теплоносителя и нагрева системы взаимодействующих фаз с целью интенсификации экстрагирования. При этом процессы измельчения сырья и его размораживания должны быть уже закончены. Это позволит сгладить ступенчатость выхода целевых компонентов в экстрагент.

Размеры частиц шрота не должны превышать 1 мм в 80 % его массы, что является рациональным для проведения процесса экстрагирования. Была

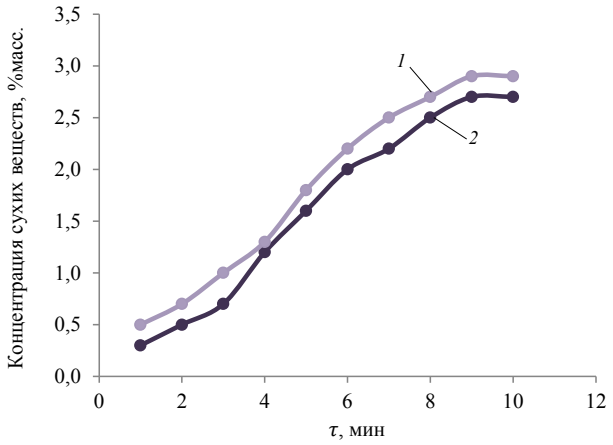

Рисунок 2. Зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата для ягод голубики (*1*) и клюквы (*2*)

Figure 2. Effect of extraction time on the yield when the coolant was fed at the onset: *1* – blueberries, *2* – cranberries

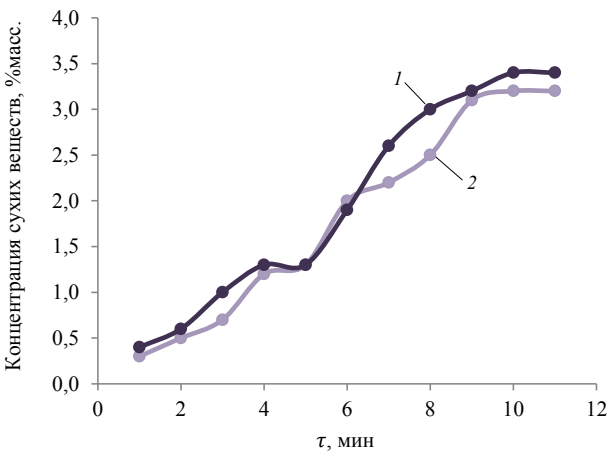

Рисунок 3. Зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя после протекания процесса разрушения для ягод голубики (*1*) и клюквы (*2*)

Figure 3. Effect of extraction time on the yield when the coolant was fed after grinding: *1* – blueberries, *2* – cranberries

проведена серия экспериментов, в которой для определения скорости разрушения и размеров частиц твердой фазы через каждую минуту процесс останавливался и при помощи ситового анализа определялся гранулометрический состав. Результаты показали, что рациональным временем подачи теплоносителя после начала протекания процесса в исследуемых условиях проведения эксперимента для ягод клюквы было 3 мин, а для ягод голубики 2 мин. Разные показатели времени измельчения можно объяснить различными физико-механическими свойствами ягод. Ягоды голубики, в отличие от ягод клюквы, имеют меньшую упругость и разрывную прочность кожицы и мякоти, которые легко разрываются при оттаивании поверхностных слоев.

Результаты проведенных исследований с подачей теплоносителя в рубашку после окончания процесса измельчения сырья позволили выявить новизну данного способа, что легло в основу патентной заявки.

Ведущими факторами, влияющими на разрушение сырья, являются частота колебаний вибрационной тарелки и диаметр отверстий ее перфорации. Данные факторы влияют как на продолжительность процесса, так и на затраты мощности. Поэтому необходимо определить их оптимальные значения, позволяющие добиться минимальной продолжительности процесса разрушения сырья при минимальных затратах мощности.

Серия экспериментов со значениями варьируемых параметров, указанных в таблице 1, позволила получить экспериментальные данные. Их обработка в программе STATISTICA дала регрессионные уравнения зависимости продолжительности процесса разрушения сырья от частоты колебаний вибрационной тарелки и диаметра отверстий перфорации, а также затрат мощности от этих же параметров. Для ягод клюквы уравнения приобретают следующий вид:

$$\tau = 210{,}87 + 60{,}01 \times C_1 - 18{,}07 \times C_2 \quad R = 98{,}2 \qquad (1)$$

$$N = -51{,}31 + 11{,}21 \times C_1 + 6{,}9 \times C_2 - 1{,}41 \times C_1 \times C_2 \quad R = 95{,}6 \qquad (2)$$

где коэффициент C_1 – безразмерное значение фактора – диаметр отверстий; C_2 – безразмерное значение фактора – частота колебания вибрационной тарелки.

Оценка адекватности полученного уравнения экспериментальным данным проводилась по параметру R (коэффициент множественной регрессии), который показывает насколько точно уравнения описывают экспериментальные данные. Уравнения для ягод голубики выглядят следующим образом:

$$\tau = 149{,}4 + 59{,}55 \times C_1 - 17{,}85 \times C_2 \quad R = 98{,}7 \qquad (3)$$

$$N = 12{,}1 + 0{,}74 \times C_1 + 0{,}25 \times C_2 - 0{,}17 \times C_1 \times C_2 \quad R = 97{,}2 \qquad (4)$$

Полученные регрессионные уравнения (1)–(4), описывающие зависимость продолжительности первой стадии – разрушение сырья, размораживание с переходом сока в объем экстрагента, носят линейный характер и учитывают совместное влияние исследуемых факторов. Характер кривой для первой стадии процесса – прямая. Однако на графиках, представленных на рисунках 2–4, этот характер не явно выражен, что можно объяснить погрешностями при определении содержания сухих веществ в экстракте. При этом линия тренда имеет корректный вид. Анализ коэффициентов при факторах позволяет утверждать, что увеличение диаметра отверстий в вибрационной тарелке приводит к росту продолжительности процесса, а увеличение частоты колебаний вибрационной тарелки, напротив, снижает продолжительность первой стадии. Необходимо отметить, что значимое межфакторное взаимодействие отсутствует. Сопоставимые по величине коэффициенты факторов говорят об одинаковой природе и силе их влияния на продолжительность процесса, т. е. вид сырья и его свойства в этом вопросе не играют основную роль. Анализ регрессионных уравнений, описывающих зависимость затрат мощности от факторов диаметра отверстий и частоты колебаний вибрационной тарелки, позволяет утверждать следующее. Увеличение диаметра отверстий и частоты колебаний ведет к росту затрачиваемой мощности, но появляется межфакторное взаимодействие, которое снижает эти затраты. Величина коэффициента при межфакторном взаимодействии указывает на его весомость.

Для нахождения оптимальных значений параметров, при которых продолжительность процесса и затраты мощности будут минимальны, была проведена оптимизация, осуществленная с использованием метода Ньютона в системе Microsoft Excel.

В результате были определены значения частоты колебаний вибрационной тарелки и диаметра отверстий перфорации для ягод клюквы: T = 13,3 Гц, d = 3 мм и ягод голубики: T = 11,7 Гц, d = 2,5мм. Полученные значения факторов были проверены опытным путем. Результаты показали, что расхождение между теоретическими и практическими значениями продолжительности процесса и затрат мощности не превышает 5 %. Различная величина факторов для каждого вида ягод может быть объяснена разницей в структуре и свойствах замороженных ягод. Ягоды голубики в замороженном состоянии имеют меньшее значение предела прочности, чем ягоды клюквы, и разрушаются при меньших значениях нагрузки. Значение конечной концентрации сухих веществ в экстракте составило 3,2 и 3,4 %масс. для ягод клюквы и голубики соответственно. Рациональное время подачи теплоносителя в рубашку для ягод клюквы составляет 2,5 мин, а для ягоды голубики 1,5 мин.

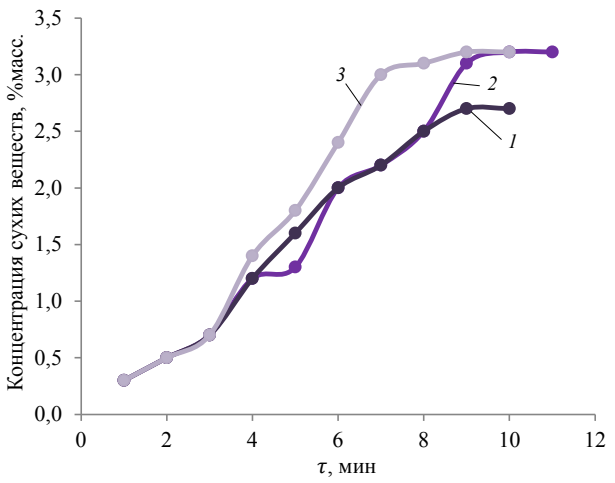

Рисунок 4. Зависимость выхода целевых компонентов от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата (*1*), после протекания процесса разрушения (*2*) и после 2,5 мин работы аппарата (*3*) для ягод клюквы

Figure 4. Effect of extraction time on the yield when the coolant was fed at the onset (*1*), after grinding (*2*), and at 2.5 min (*3*): cranberries

На рисунке 4 приведены зависимости выхода сухих водорастворимых веществ от продолжительности процесса экстрагирования при подаче теплоносителя в момент включения аппарата, после протекания разрушения и после 2,5 мин работы аппарата для ягод клюквы.

График, представленный на рисунке 4, позволяет утверждать, что недостатки, выявленные предварительной серией экспериментов, исключаются новым способом подачи теплоносителя. Кривая *3* при прочих равных условиях имеет большее конечное значение концентрации сухих водорастворимых веществ, чем кривая *1*: 3,2 против 2,7 %масс. Данный результат объясняется усложнением процесса разрушения ягод в аппарате при их быстром размораживании. Это замедляет процесс экстрагирования и за исследуемый промежуток времени система не успевает выйти на равновесную концентрацию, соответствующую выбранному соотношению обрабатываемых фаз. Несмотря на то, что в опытах (2) и (3) конечное содержание целевого компонента совпадает и система достигает значения равновесной концентрации, продолжительность процесса кривой *3* меньше. Следовательно, меньше затраты энергии на его проведение. Кроме того, кривая *3* не имеет ступенчатого участка, который явно выражен на кривой *2* в промежутке между четвертой и пятой минутами, и характеризуется минимальным приростом концентрации сухих водорастворимых веществ. Это ведет к увеличению продолжительности процесса в целом. Кривая *3* имеет больший угол наклона, чем кривые *1* и *2*, что говорит о высокой скорости протекающего при этих параметрах процесса. До подачи теплоносителя резкий рост концентрации экстракта объясняется интенсивным измельчением сырья, размораживанием сока и его переходом в экстрагент. Подача теплоносителя после 2,5 мин от начала процесса способствует созданию в аппарате гидродинамических условий, близких к аппарату «идеального смешения». Они характеризуются гидромеханическим воздействием на частицы обрабатываемой твердой фазы, практически мгновенным выравниванием температурных и концентрационных полей, что ведет к повышению скорости протекающего процесса экстрагирования. Это обстоятельство подтверждается еще и тем, что к моменту окончания процесса, соответствующего 9 мин, температура в аппарате совпадает с температурой подаваемого теплоносителя – 55 °С.

Таким образом, исследованный режим работы аппарата с вибрационной тарелкой, реализующий определенные по уравнениям (1) и (2) оптимальные значения основных параметров, позволяет добиться максимальной скорости извлечения сухих водорастворимых веществ и достижения их равновесной концентрации. Этот результат достигается в результате организованного прохождения всех этапов переработки замороженного плодово-ягодного сырья, а именно первичное дробление замороженных ягод, сопровождающееся размораживанием кристаллов льда и выходом не связанного сока, и последующее доизмельчение при повышенных температурах, также сопровождающееся выходом из клеточной ткани сока и экстрагированием капиллярно-пористой структуры мякоти ягод.

Кроме перечисленных положительных эффектов с точки зрения технологии получения концентрированных плодово-ягодных экстрактов, способ имеет ряд достоинств. Полученный экстракт имеет температуру 52–54 °С, что позволит упростить транспортировку и фильтрование, а также дальнейшее концентрирование с применением вакуум-выпарных установок.

Расчет экономической эффективности реализации рассматриваемого способа показал, что дополнительные затраты, связанные с капитальными вложениями на оборудование теплообменного аппарата для нагрева теплоносителя, а также эксплуатационные затраты, связанные с нагревом и подачей теплоносителя, нивелируются повышением выхода сухих водорастворимых веществ и сокращением продолжительности проведения процесса.

При переходе от периодического способа организации технологического потока к непрерывному за счет использования каскада из аппаратов с

вибрационной тарелкой используемый аппарат может сохранять высокую температуру между циклами разгрузки готового продукта и загрузки сырья. Это приведет к размораживанию ягод на начальной стадии процесса и нарушит благоприятные условия для их разрушения. Для исключения данного недостатка предлагается удалять теплоноситель из рубашки аппарата. Это позволит металлоконструкции аппарата остыть до температуры окружающей среды за время разгрузки экстракта и загрузки сырья.

Выводы

К результатам работы можно отнести следующее:
– проведено экспериментальное исследование способа интенсификации процесса получения плодово-ягодных экстрактов из замороженного сырья;
– определены факторы, влияющие на процессы, протекающие в аппарате;
– с помощью серии экспериментов и применения математической обработки полученных данных определены оптимальные значений параметров процесса для рассматриваемого способа, результаты которых были подтверждены контрольной серией экспериментов.

Данные результаты позволяют сделать следующие выводы:
– новый разработанный способ экстрагирования замороженного плодово-ягодного сырья позволит повысить экономическую эффективность технологического процесса производства натуральных экстрактов. Следовательно, снизится стоимость готового продукта и увеличится доступность данного продукта для потребителя;
– полученные оптимальные значения параметров проведения процесса в аппарате с вибрационной тарелкой могут быть положены в основу проектирования аппаратов данного типа и служить практическими рекомендациями для проведения процесса экстрагирования в аппарате с вибрационной тарелкой замороженного плодово-ягодного сырья.

С целью снижения степени измельчения шрота после подачи теплоносителя, а также сокращения расхода мощности частота колебаний вибрационной тарелки на второй стадии процесса может быть снижена. Однако ее величина будет зависеть от скорости процесса экстрагирования и типа сырья. Данный аспект подлежит дальнейшему исследованию.

Критерии авторства

П. П. Иванов – руководство работой в целом (20 %). Л. В. Плотникова – планирование эксперимента, разработка методики проведения эксперимента и обработка результатов, написание рукописи (30 %). И. Б. Плотников – проведение исследований (20 %). А. Г. Семенов – консультация по математической обработке экспериментальных данных (10 %). И. О. Плотникова – консультация в ходе исследований (10 %). К. Б. Плотников – консультация в ходе написания рукописи (10 %).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

P.P. Ivanov supervised the project (20%). L.V. Plotnikova designed the experiment, developed the method, processed the results, and wrote the manuscript (30%). I.B. Plotnikov performed the research (20%). A.G. Semenov consulted on the mathematical processing (10%). I.O. Plotnikova consulted on the experiment (10%). K.B. Plotnikov proofread the manuscript (10%).

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) extract impairs nairovirus infection by inhibiting the attachment to target cells / M. Mirandola [et al.] // Pathogens. 2021. Vol. 10. № 8. https://doi.org/10.3390/pathogens10081025.

2. Optimization of canthaxanthin extraction from fermented biomass of *Paracoccus carotinifacuens* VTP20181 bacteria strain isolated in Vietnam / L. X. Duy [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 117–125. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-117-125.

3. α-amylase from white pitaya (*Hylocereus undatus* L.) peel: optimization of extraction using full factorial design / Z. Shad [et al.] // Foods and Raw Materials. 2021. Vol. 9. № 1. P. 79–86. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-79-86.

4. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties / N. B. Eremeeva [et al.] // Foods and Raw Materials. 2019. Vol. 7. № 2. P. 264–273. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-264-273.

5. Valorization of european cranberry bush (*Viburnum opulus* L.) berry pomace extracts isolated with pressurized ethanol and water by assessing their phytochemical composition, antioxidant, and antiproliferative activities / L. Dienaite [et al.] // Foods. 2020. Vol. 9. № 10. https://doi.org/10.3390/foods9101413.

6. Fractionation of cranberry pomace lipids by supercritical carbon dioxide extraction and on-line separation of extracts at low temperatures / L. Tamkutė [et al.] // Journal of Supercritical Fluids. 2020. Vol. 163. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104884.

7. The effect of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato / L. Dyshlyuk [et al.] // Heliyon. 2020. Vol. 6. № 1. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03288.

8. Zero waste biorefining of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace into functional ingredients by consecutive high pressure and enzyme assisted extractions with green solvents / V. Kitrytė [et al.] // Food Chemistry. 2020. Vol. 322. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767.

9. Phytochemical analysis, antioxidant activities and optimized extraction of embelin from different genotypes of *Embelia ribes* Burm f.: a woody medicinal climber from Western Ghats of India / V. Kamble [et al.] // Physiology and Molecular Biology of Plants. 2020. Vol. 26. № 9. P. 1855–1865. https://doi.org/10.1007/s12298-020-00859-2.

10. Optimization of microwave and ultrasound extraction methods of açai berries in terms of highest content of phenolic compounds and antioxidant activity / M. Hanula [et al.] // Applied Sciences. 2020. Vol. 10. № 23. https://doi.org/10.3390/app10238325.

11. Agnieszka M., Michał S., Robert K. Selection of conditions of ultrasound-assisted, three-step extraction of ellagitannins from selected berry fruit of the *Rosaceae* family using the response surface methodology // Food Analytical Methods. 2020. Vol. 13. № 8. P. 1650–1665. https://doi.org/10.1007/s12161-020-01762-y.

12. Utilization of strawberry and raspberry waste for the extraction of bioactive compounds by deep eutectic solvents / M. Vázquez-González [et al.] // LWT. 2020. Vol. 130. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109645.

13. Evaluation of green extraction processes, lipid composition and antioxidant activity of pomegranate seed oil / E. Rojo-Gutiérrez [et al.] // Journal of Food Measurement and Characterization. 2021. Vol. 15. № 2. P. 2098–2107. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00804-7.

14. Berry fruits as source of pectin: Conventional and non-conventional extraction techniques / N. Muñoz-Almagro [et al.] // International Journal of Biological Macromolecules. 2021. Vol. 186. P. 962–974. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.016.

15. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review / L. R. Adetunji [et al.] // Food Hydrocolloids. 2017. Vol. 62. P. 239–250. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015.

16. Enzymatic extraction of pectin from artichoke (*Cynara scolymus L.*) by-products using Celluclast®1.5L / C. Sabater [et al.] // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 190. P. 43–49. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.055.

17. Popov A. M., Plotnikov K. B., Donya D. V. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials // Foods and Raw Materials. 2017. Vol. 5. № 1. P. 137–143. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143.

18. Cryoconcentration of flavonoid extract for enhanced biophotovoltaics and pH sensitive thin films / A. Demirbas [et al.] // Biotechnology Progress. 2018. Vol. 34. № 1. P. 206–217. https://doi.org/10.1002/btpr.2557.

19. The determination of antioxidant activity of ethanol extracts of gynostemma pentaphyllum / A. A. Nizamova [et al.] // Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences. 2021. Vol. 17. № 1. P. 91–98.

20. Prevention and treatment effects of edible berries for three deadly diseases: Cardiovascular disease, cancer and diabetes / H. Yang [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017. Vol. 59. № 12. P. 1903–1912. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1432562.

21. Способ получения плодово-ягодных экстрактов: пат. 2547176C1 Рос. Федерация. № 2014101853/13 / Сорокопуд А. Ф. [и др.]; заявл. 21.01.2014; опубл. 10.04.2015, Бюл. № 10. 6 с.

References

1. Mirandola M, Salvati MV, Rodigari C, Appelberg KS, Mirazimi A, Maffei ME, et al. Cranberry (*Vaccinium macrocarpon*) extract impairs nairovirus infection by inhibiting the attachment to target cells. Pathogens. 2021;10(8). https://doi.org/10.3390/pathogens10081025.

2. Duy LX, Toan TQ, Anh DV, Hung NP, Huong TTT, Long PQ, et al. Optimization of canthaxanthin extraction from fermented biomass of *Paracoccus carotinifacuens* 20181 VTP bacteria strain isolated in Vietnam. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):117–125. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-117-125.

3. Shad Z, Mirhosseini H, Motshakeri M, Sanjabi MR, Meor Hussin AS. α-amylase from white pitaya (*Hylocereus undatus* L.) peel: optimization of extraction using full factorial design. Foods and Raw Materials. 2021;9(1):79–86. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2021-1-79-86.

4. Eremeeva NB, Makarova NV, Zhidkova EM, Maximova VP, Lesova EA. Ultrasonic and microwave activation of raspberry extract: antioxidant and anti-carcinogenic properties. Foods and Raw Materials. 2019;7(2):264–273. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-264-273.

5. Dienaite L, Pukalskiene M, Pereira CV, Matias AA, Venskutonis PR. Valorization of european cranberry bush (*Viburnum opulus* L.) berry pomace extracts isolated with pressurized ethanol and water by assessing their phytochemical composition, antioxidant, and antiproliferative activities. Foods. 2020;9(10). https://doi.org/10.3390/foods9101413.

6. Tamkutė L, Pukalskas A, Syrpas M, Urbonavičienė D, Viškelis P, Venskutonis PR. Fractionation of cranberry pomace lipids by supercritical carbon dioxide extraction and on-line separation of extracts at low temperatures. Journal of Supercritical Fluids. 2020;163. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2020.104884.

7. Dyshlyuk L, Babich O, Prosekov A, Ivanova S, Pavsky V, Chaplygina T. The effect of postharvest ultraviolet irradiation on the content of antioxidant compounds and the activity of antioxidant enzymes in tomato. Heliyon. 2020;6(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03288.

8. Kitrytė V, Kavaliauskaitė A, Tamkutė L, Pukalskienė M, Syrpas M, Rimantas Venskutonis P. Zero waste biorefining of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) pomace into functional ingredients by consecutive high pressure and enzyme assisted extractions with green solvents. Food Chemistry. 2020;322. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767.

9. Kamble V, Attar U, Umdale S, Nimbalkar M, Ghane S, Gaikwad N. Phytochemical analysis, antioxidant activities and optimized extraction of embelin from different genotypes of *Embelia ribes* Burm f.: a woody medicinal climber from Western Ghats of India. Physiology and Molecular Biology of Plants. 2020;26(9):1855–1865. https://doi.org/10.1007/s12298-020-00859-2.

10. Hanula M, Wyrwisz J, Moczkowska M, Horbańczuk OK, Pogorzelska-Nowicka E, Wierzbicka A. Optimization of microwave and ultrasound extraction methods of açai berries in terms of highest content of phenolic compounds and antioxidant activity. Applied Sciences. 2020;10(23). https://doi.org/10.3390/app10238325.

11. Agnieszka M, Michał S, Robert K. Selection of conditions of ultrasound-assisted, three-step extraction of ellagitannins from selected berry fruit of the *Rosaceae* family using the response surface methodology. Food Analytical Methods. 2020;13(8):1650–1665. https://doi.org/10.1007/s12161-020-01762-y.

12. Vázquez-González M, Fernández-Prior Á, Bermúdez Oria A, Rodríguez-Juan EM, Pérez-Rubio AG, Fernández-Bolaños J, et al. Utilization of strawberry and raspberry waste for the extraction of bioactive compounds by deep eutectic solvents. LWT. 2020;130. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109645.

13. Rojo-Gutiérrez E, Carrasco-Molinar O, Tirado-Gallegos JM, Levario-Gómez A, Chávez-González ML, Baeza-Jiménez R, et al. Evaluation of green extraction processes, lipid composition and antioxidant activity of pomegranate seed oil. Journal of Food Measurement and Characterization. 2021;15(2):2098–2107. https://doi.org/10.1007/s11694-020-00804-7.

14. Muñoz-Almagro N, Ruiz-Torralba A, Méndez-Albiñana P, Guerra-Hernández E, García-Villanova B, Moreno R, et al. Berry fruits as source of pectin: Conventional and non-conventional extraction techniques. International Journal of Biological Macromolecules. 2021;186:962–974. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.016.

15. Adetunji LR, Adekunle A, Orsat V, Raghavan V. Advances in the pectin production process using novel extraction techniques: A review. Food Hydrocolloids. 2017;62:239–250. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.08.015.

16. Sabater C, Corzo N, Olano A, Montilla A. Enzymatic extraction of pectin from artichoke (*Cynara scolymus L.*) by-products using Celluclast®1.5L. Carbohydrate Polymers. 2018;190:43–49. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.02.055.

17. Popov AM, Plotnikov KB, Donya DV. Determination of dependence between thermophysical properties and structural-and-phase characteristics of moist materials. Foods and Raw Materials. 2017;5(1):137–143. https://doi.org/10.21179/2308-4057-2017-1-137-143.

18. Demirbas A, Groszman K, Pazmiño-Hernandez M, Vanegas DC, Welt B, Hondred JA, et al. Cryoconcentration of flavonoid extract for enhanced biophotovoltaics and pH sensitive thin films. Biotechnology Progress. 2018;34(1):206–217. https://doi.org/10.1002/btpr.2557.

19. Nizamova AA, Galiakhmetova EK, Mochalov KS, Bokov DO, Farnam G, Kudashkina NV. The determination of antioxidant activity of ethanol extracts of gynostemma pentaphyllum. Iranian Journal of Pharmaceutical Sciences. 2021;17(1):91–98.

20. Yang H, Tian T, Wu D, Guo D, Lu J. Prevention and treatment effects of edible berries for three deadly diseases: Cardiovascular disease, cancer and diabetes. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2017;59(12):1903–1912. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1432562.

21. Sorokopud AF, Sorokopud VV, Plotnikov IB, Plotnikova LV. Fruit-and-berry extracts production method. Russia patent RU 2547176C1. 2015.