

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1059-1068>
УДК 664.782+634.738:664.696:613.292



Экструдирование смеси рисовой крупы и гидролизата жмыха брусники: влияние фактора влагосодержания на характеристики экструдата

© 2024. А. Ю. Шариков, В. В. Иванов, М. В. Амелякина[✉], Е. Н. Соколова, В. В. Ионов, Е. М. Серба

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», г. Москва, Российская Федерация

Жмыхи плодово-ягодного сырья являются перспективным источником биологически активных соединений: пищевых волокон, фенольных соединений пектинов, каротиноидов, природных антиоксидантов, обладающих профилактическим и лечебным эффектами при метаболических, сердечно-сосудистых, желудочно-кишечных и нейродегенеративных заболеваниях. Включение жмыхов в пищевые технологии способствует экологизации производств. Исследование проведено с целью изучения влияния влагосодержания смеси в процессе переработки рисовой крупы с гидролизатом жмыха брусники на режимные параметры экструзии, технологические и физико-химические показатели экструдатов. Гидролизаты жмыха брусники получали ферментативным способом с применением комплекса биокатализаторов, включающего пектиназу, целлюлазу, протеазу и липазу. Гидролизат высушивали, в количестве 5 % добавляли к рисовой крупе и экструдировали, варьируя влагосодержание смеси в диапазоне 15–21 %. Контроль – экструдаты дробленого риса, полученные при влагосодержании 15 и 21 %. Увеличение влагосодержания приводило к снижению температуры экструзии со 160 до 152 °С, момента сдвиговых деформаций с 80 до 52 %, давления с 4,0 до 2,4 МПа, удельного расхода механической энергии с 0,152 до 0,099 кВт·ч/кг. Повышение влажности при экструзии смесей с гидролизатом жмыха брусники ведет к снижению квадратичного коэффициента расширения с 7,3 до 3,5, насыпная масса увеличивается с 89,5 до 243,2 г/дм³, твердость экструдатов – с 7,5 до 39,0 Н. Частота микроразломов при проколе и деформации, как характеристика пористости, снижается с 3,5 до 2,0 мм⁻¹. Динамическая вязкость суспензий помолов экструдатов с гидролизатом жмыха брусники с увеличением влагосодержания значимо растет с 2,0 до 4,0 Па·с. Тенденции изменения термомеханических режимов переработки, определяемых количеством воды в системе, технологических и структурно-механических свойств для контроля и экспериментальных смесей были идентичны, без значимых различий. Установлено, что в экструдатах с гидролизатом жмыха брусники минимальной влажности 15 % соответствует максимальное содержание фенольных соединений – 679,6 мг/кг, при 21 % влагосодержании их количество составляет только 223,1 мг/кг.

Ключевые слова: *Vaccinium vitis-idaea* L., экструзия, биокатализ, вторичные сырьевые ресурсы, пищевые концентраты, фенольные соединения, структурно-механические свойства

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № №22-16-00100, <https://rscf.ru/project/22-16-00100/>

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Шариков А. Ю., Иванов В. В., Амелякина М. В., Соколова Е. Н., Ионов В. В., Серба Е. М. Экструдирование смеси рисовой крупы и гидролизата жмыха брусники: влияние фактора влагосодержания на характеристики экструдата. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2024;25(6):1059–1068.
DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1059-1068>

Поступила: 20.06.2024

Принята к публикации: 29.11.2024

Опубликована онлайн: 25.12.2024

Extrusion of rice grits with lingonberry pomace hydrolysate: moisture content and characteristics of the extrudate

© 2024. Anton Yu. Sharikov, Viktor V. Ivanov, Maria V. Amelyakina[✉], Elena N. Sokolova, Vladislav V. Ionov, Elena M. Serba

All-Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russian Federation

Fruit and berry pomaces are promising sources of biologically active compounds: dietary fibers, phenolic compounds, pectins, carotenoids, and natural antioxidants that have preventive and therapeutic effects in metabolic, cardiovascular, gastrointestinal and neurodegenerative diseases. The active inclusion of pomaces as by-products in the food technologies contributes to the transition to more sustainable industrial processes. The study was conducted to investigate the influence of the moisture content of the mixture during the processing of rice with hydrolysate of lingonberry pomace on the operating parameters of extrusion, technological and physicochemical characteristics of the extrudates. Lingonberry pomace hydrolysate was obtained by an enzymatic method using a complex of biocatalysts, including pectinase, cellulase, protease and lipase. The hydrolysate

was dried, added in an amount of 5 % to rice and extruded varying the moisture content in the range of 15–21 %. Control samples were rice extrudates obtained with a moisture content of 15 and 21%. An increase in the moisture of the extruded mixture led to a decrease the extrusion temperature from 160 to 152 °C, the torque from 80 to 52 %, the pressure from 4.0 to 2.4 MPa, and the specific mechanical energy from 0.152 to 0.099 kW h/kg. In terms of structural and mechanical properties, an increase in moisture of mixture with hydrolyzed lingonberry pomace leads to a decrease in the quadratic expansion coefficient from 7.3 to 3.5. The bulk density increases from 89.5 to 243.2 g/dm³, the hardness of the extrudates – from 7.5 to 39.0 N, the average crushing force – from 3.4 to 16.1 N. The frequency of microfractures during puncture and deformation as a characteristic of porosity decreases from 3.5 to 2.0 mm⁻¹. The dynamic viscosity of suspensions of extrudates with lingonberry pomace hydrolyzate increases significantly with increasing moisture content during extrusion from 2.0 to 4.0 Pa s. The trends in changes in thermomechanical processing modes determined by the amount of water in the system, technological and structural-mechanical properties for the control and experimental mixtures were identical without significant differences. It was established that the maximum content of phenolic compounds of 679.6 mg/kg corresponds to extrudates with hydrolyzed lingonberry pomace produced at minimum moisture of 15 %, by moisture of 21 % the content of phenolic compounds is only 223.1 mg/kg

Keywords: *Vaccinium vitis-idaea* L., extrusion, biocatalysis, food by-products materials, food concentrates, phenolic compounds, structural and mechanical properties

Acknowledgments: the study was funded by a grant from the Russian Science Foundation №22-16-00100, <https://rscf.ru/project/22-16-00100/>

The authors thank the reviewers for their contributions to the peer review of this work.

Conflict of interests: the authors stated that there was no conflict of interests

For citation: Sharikov A. Yu., Ivanov V. V., Amelyakina M. V., Sokolova E. N., Ionov V. V., Serba E. M. Extrusion of rice grits with lingonberry pomace hydrolysate: moisture content and characteristics of the extrudate. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2024;25(6):1059–1068. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2024.25.6.1059-1068>

Received: 20.06.2024

Accepted for publication: 29.11.2024

Published online: 25.12.2024

Актуальными тенденциями при разработке новых экструдированных продуктов, в номенклатуре которых представлены снеки, сухие завтраки, диетические продукты, пищевые концентраты, каши быстрого приготовления, являются повышение пищевой ценности за счет введения ингредиентов с высоким содержанием биологически активных веществ и использование натурального сырья [1, 2]. При этом целесообразно использовать не только нативное сырье, но и вторичные ресурсы его переработки, которые в зависимости от типа сырья, используемой технологии могут быть источниками различных биологически активных веществ, обладать технологическими свойствами пищевых добавок. К таким перспективным вторичным сырьевым ресурсам относятся и жмыхи плодово-ягодного сырья, образующиеся в процессе его переработки, в основном, на соки [3, 4]. Известны исследования по применению в технологии экструдированных продуктов жмыхов черной смородины [5], клюквы, черники, винограда, яблок [6, 7, 8]. Содержание высушенных жмыхов в рецептурах продуктов не превышало 30 %, а высокие дозировки провоцировали ухудшение структурно-механических, органолептических характеристик. При этом за счет использования жмыхов в химическом составе экструдатов отмечено повышение содержания пищевых волокон, различных фенольных соединений.

Комплексная переработка плодов и ягод с полноценным использованием их жмыхов позволяет предприятиям решать задачи по расширению линейки выпускаемой продукции, производить продукты с высокой добавленной стоимостью и нивелировать экологические риски для окружающей среды, возникающие при хранении отходов без полноценной утилизации [9]. Основными процессами, используемыми в переработке жмыхов плодово-ягодного сырья, являются сушка и экстракция, в том числе с использованием ферментных препаратов. Биокатализ с применением различных ферментных препаратов с целлюлолитической, пектолитической и гемицеллюлолитической субстратной специфичностью позволяет проводить направленный гидролиз биополимеров растительного сырья и отказаться от применения в цикле экстракции органических растворителей [10]. Перспективность такого технического решения показана при получении экстрактов из жмыхов аронии черноплодной [11], вишни [12], малины [13], черники [14]. Интерес к глубокой переработке ягод обусловлен вниманием к их антиоксидантному потенциалу, высокому содержанию фенольных веществ, участвующих в регуляции защитно-адаптационного потенциала организма, профилактическим и лечебным эффектами при широком спектре заболеваний человека, например, сердечно-сосудистых заболеваниях, раке, хроническом воспалении, дегенеративных заболеваниях, нарушениях обмена веществ, таких как диабет

II типа [15]. Выделенные биоактивные соединения жмыхов можно использовать в качестве противомикробных средств, экстрактов, способствующих укреплению здоровья, пребиотиков, ароматических соединений, красителей и биостимуляторов [16]. Отмечается важность не только водно-растворимых фенольных соединений, но и неэкстрагируемых полифенолов, связанных с матриксом клеточной стенки растений и способных проявлять свою биологическую активность дольше, чем экстрагируемые полифенолы [17].

По содержанию фенольных соединений одним из наиболее богатых источников является брусника (*Vaccinium vitis-idaea* L.) [18, 19]. В составе ягоды найдены антоцианы, лейкоантоцианы, катехины, флавонолы и фенолокислоты, общее содержание полифенольных соединений варьирует от 500 до 1910 мг%. На 100 г свежих ягод содержание антоцианов колеблется в пределах 180–530 мг, флавонолов 216–263 мг, лейкоантоцианов 150–1060 мг, кверцетина 2,5–11,3, количество фенольных веществ – 82 мг, антоцианинов – 6,85 мг [19]. Благодаря сильному антиоксидантному, противовирусному, противомикробному, противовоспалительному и нейропротекторному потенциалу профилактическое потребление брусники и продуктов на ее основе может снизить риск и развитие метаболических, сердечно-сосудистых, желудочно-кишечных и нейродегенеративных заболеваний [20]. Жмыхи брусники, образуемые после отделения сока, являются перспективным сырьем для комплексной переработки, предусматривающей на первом этапе водно-ферментативную обработку и сушку продукта гидролиза, а на втором – экструдирование зернового сырья с включением в его рецептуру ферментолизата жмыха.

Цель исследования – изучить влияние влагосодержания в процессе экструзии рисовой крупы в смеси с ферментоллизатом жмыха брусники на физико-химические показатели экструдатов.

Задачи исследования:

- оценить влияние влагосодержания на режимные параметры экструзии: температуру и давление в камере экструдера, момент сдвига;
- изучить соответствующие изменения технологических, структурно-механических, гидратационных и цветовых характеристик экструдатов;

- определить характер влияния варьируемого фактора на изменение содержания фенольных соединений в экструдатах.

Научная новизна – впервые установлено, что интеграция предварительной биокаталитической обработки жмыха брусники с последующей экструзией со снижением влагосодержания смеси позволяет значительно повысить содержание фенольных соединений в экструдатах. Показаны тенденции изменения структурно-механических, гидратационных и реологических характеристик экструдатов с ферментоллизатом жмыха брусники в зависимости от влагосодержания.

Материал и методы. Объекты исследования – процесс экструзии смеси дробленой рисовой крупы, как вторичного сырьевого ресурса крупяной промышленности, и гидролизата жмыха брусники, а также полученные экструдаты.

В качестве сырья использовали дробленый рис по ГОСТ 6292-93¹, гидролизат жмыха брусники. После отжима сока брусники жмых подвергали ферментативной обработке следующим комплексом гидролаз: пектиназа – 0,25 ед. ПкС/г, целлюлаза – 0,75 ед. ЦС/г, протеаза – 0,05 ед. ПС/г, липаза 0,05 ед. ЛС/г. Условия гидролиза: гидромодуль – 1:2; температура 50 °С, pH 4,8, время экспозиции 6 часов. Далее гидролизат жмыха высушивали при температуре 65 °С.

Высушенный гидролизат жмыха брусники добавляли к дробленному рису в количестве 5 %. Полученную смесь перерабатывали на двухшнековом экструдере Werner&Phleiderer Continua 37 при различных гидротермомеханических режимах, характеризующихся различной степенью воздействия на сырье температуры и сил сдвиговых деформаций, определяемых изменением влагосодержания в камере экструдера от 15 до 21 %, контрольными образцами служили экструдаты дробленного риса, полученные при влагосодержании 15 и 21 %. Скорость вращения шнеков – 200 об/мин, производительность по смеси – 20 кг/час. Стренг экструдата формовали через фильеру с двумя отверстиями круглого профиля Ø3,5 мм.

Удельный расход механической энергии рассчитывали по формуле [21]:

$$SME = \frac{n}{n_{max} \times Kg} \times N \times M,$$

где SME – удельный расход механической энергии на экструдирование, кВт·ч/кг сырья; n и

¹ГОСТ 6292-93. Крупа рисовая. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294823/4294823160.pdf>

n_{max} – установленная и максимально возможная скорости вращения шнеков, соответственно, об/мин; Kg – расход сырья, кг/ч; N – мощность двигателя экструдера, кВт; M – момент на валу редуктора.

Коэффициент квадратичного расширения экструдатов рассчитывали по соотношению площадей сечения экструдата и отверстия фильеры [22]. Измерение проводили в 10 повторностях.

Структурно-механические свойства определяли с использованием анализатора текстуры Brookfield CT3 и программного обеспечения TexturePro CT. Скорость прокола составляла 0,5 мм/с, диаметр индентора 3 мм, глубина прокола 3 мм. Результатом каждого теста являлась кривая зависимости силы от расстояния, что позволяло рассчитать следующие свойства текстуры: твердость – сила при самом максимальном пике нагрузки, имитирующая сжатие продукта зубами; частота микроразломов как отношение числа микроразломов к глубине прокалывания; средняя прочность на разламывание как отношение площади под кривой нагрузки к глубине прокола [23]. Измерения проводили в 10 повторностях.

Насыпную плотность определяли в мерном цилиндре диаметром 10 см в 3 повторностях. Растворимость и влагоудерживающую способность оценивали по разделению 10 % суспензии помола экструдатов в центробежном поле при центрифугировании на лабораторной центрифуге ОПН-8 при 3000×g. Растворимость образца рассчитывали как отношение концентрации растворимых сухих веществ в фугате к общей концентрации сухих веществ среды. Влагоудерживающую способность определяли как отношение массы осадка после фугования к массе сухих веществ. Тест проводили в 3 повторностях.

Для определения реологических свойств помолов экструдатов, имитирующих доведение инстант-продукта до готовности, помол смешивали с водой, имеющей температуру 95–98 °C в соотношении 1:3 при постоянном перемешивании. После перемешивания температуру образца снижали до 24 °C и измеряли динамическую вязкость вискозиметром SV-10 (AND, Япония). Измерение проводили в 3 повторностях.

Цветовые показатели экструдатов оценивали колориметрическим методом в системе CIE LAB с использованием анализатора CS-10 (Hangzhou CHNSpec Technology, Китай) [24]

в 10 повторностях, где L^* – характеристика светлоты от 0 до 100, хроматические составляющие a^* ($-a^*$ – зеленый, $+a^*$ – красный) и b^* ($-b^*$ – синий, $+b^*$ – желтый) [23, 24].

Суммарное содержание фенольных соединений в экструдатах осуществляли спектрофотометрическим методом с использованием хлорида алюминия, 18-молибдодифосфата и реактива Фолина-Чокальтеу с использованием спектрофотометра Specord 50 Analytic Yena при длине волны 720 нм в 3 повторностях [25].

Статистическую обработку проводили с использованием пакета программ Statistica 6.0. Значения представлены в виде средних $\pm$ стандартное отклонение. Достоверность различий средних определяли методами однофакторного дисперсионного анализа и тестом Тьюки при $p < 0,05$. В представленных в таблицах 1–4 данных различие значений в каждом столбце, обозначенных одинаковыми буквенными индексами, статистически незначимо при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Высушенные после ферментативной обработки жмыхи брусники смешивали с рисовой крупой в количестве 5 % по массе и экструдировали при влагосодержании смеси 15, 18 и 21 %.

В таблице 1 представлены режимы экструзии контрольной и экспериментальной смесей, для которых увеличение влагосодержания значительно снизило температуру, давление и момент сдвиговых деформаций. Это объясняется снижением трения в камере экструдера и соответственно уменьшением степени термомеханического воздействия на перерабатываемый материал. Для смесей с ферментализатом жмыха брусники температура экструзии снизилась с 160 до 152 °C, момент сдвиговых деформаций с 80 до 52 %, давление с 4,0 до 2,4 МПа. При этом не отмечено значимых различий в показателях режимных параметров для контроля и экспериментальной смеси.

Удельный расход механической энергии отражает меру вложенной в перерабатываемое сырье механической энергии, которая в результате диссипации сил трения в камере экструдера преобразуется в тепло. Увеличение влагосодержания снижает удельный расход механической энергии с 0,152 до 0,099 кВт·ч/кг.

На рисунке 1 представлены фотографии образцов экструдатов, полученных при различном влагосодержании с добавлением 5 % ферментализата жмыха брусники. Анализ внешнего вида

образцов показывает, что увеличение содержания влаги в камере экструдера приводит к снижению размеров экструдатов, ухудшению их формования.

Результаты анализа структурно-механических свойств, представленные в таблице 2, подтверждают эти наблюдения.

Таблица 1 – Режимные параметры экструзии / Table 1 – Extrusion operating parameters

Образец / Sample	Влаго- содержание смеси, % / Moisture, %	Темпера- тура, °C / Tempera- ture, °C	Момент сдвиговых деформаций, % / Torque, %	Давление, Мпа / Pressure, MPa	Удельный расход механической энергии, кВт·ч/кг / Specific mechanical energy, kW·h/kg
Рисовая крупа / Broken rice	15	164±2 ^a	90±2	5,0±0,2	0,171
	21	150±2 ^b	54±1 ^a	2,6±0,1 ^a	0,103
Рисовая крупа с добавлением 5 % гидролизата жмыха брусники / Broken rice with 5 % lingonberry pomace hydrolysate	15	160±2 ^a	80±1	4,0±0,2	0,152
	18	156±1	67±1	3,0±0,2	0,127
	21	152±2 ^b	52±2 ^a	2,4±0,2 ^a	0,099

Примечание: Различия между значениями, обозначенными одинаковыми буквенными индексами в каждом столбце, статистически незначимы при $p < 0,05$ /

Note: Means followed by the same letters within a column are not significantly different at $p < 0.05$



a / a

б / b

в / c

г / d

Рис. 1. Внешний вид образцов экструдатов: а – рисовая крупа, 15 % влагосодержание; б, в, г – с ферментализованным жмыхом брусники при 15, 18 и 21 % влагосодержании /

Fig. 1. Photos of extrudates: a – broken rice, 15 % moisture; b, c, d – with lingonberry pomace hydrolysate at 15, 18 and 21 % moisture content

Таблица 2 – Структурно-механические показатели экструдатов / Table 2 – Structural and mechanical characteristics of extrudates

Образец / Sample	Рисовая крупа / Broken rice		Рисовая крупа с добавлением 5 % фермен- толизата брусники / Broken rice with 5 % lingonberry pomace hydrolysate		
	15	21	15	18	21
Влагосодержание экструдированной смеси, % / Moisture during extrusion, %	15	21	15	18	21
Квадратичный коэффициент расширения / Quadratic expansion index	8,9±1,4 ^a	5,1±1,2 ^c	7,3±1,0 ^a	4,3±0,7 ^c	3,5±0,3 ^c
Насыпная масса, г/дм³ / Bulk density, g/dm³	94,7±3,2 ^a	250,4±4,5 ^b	89,5±3,0 ^a	148,9±4,2	243,2±3,9 ^b
Твердость, Н / Hardness, N	9,2±1,8 ^a	35,2±4,5 ^b	7,5±1,5 ^a	24,5±3,4 ^b	39,0±5,4 ^c
Частота структурных микроразломов, мм⁻¹ / Spatial frequency of ruptures, mm⁻¹	3,3±0,7 ^a	1,5±0,5 ^b	3,5±0,4 ^a	2,1±0,5 ^b	2,0±0,3 ^b
Средняя прочность на разламывание, Н / Average crushing force, N	3,5±0,9 ^a	7,2±2,5	3,4±0,8 ^a	12,1±0,8	16,1±2,9

Примечание: Различия между значениями, обозначенными одинаковыми буквенными индексами в каждой строке, статистически незначимы при $p < 0,05$ /

Note: Means followed by the same letters within a row are not significantly different at $p < 0.05$

Квадратичный коэффициент расширения экструдатов с ферментализатом жмыха брусники снижается с 7,3 до 3,5, насыпная масса увеличивается с 89,5 до 243,2 г/дм³, тенденции для контрольных образцов аналогичны. Значение показателя твердости, характеризующегося максимальной нагрузкой, имитирующей сжатие экструдата между зубами, при повышении влагосодержания с 15 до 21 % растет с 7,5 до 39,0 Н, увеличивается значение средней прочности на разлом с 3,4 до 16,1 Н. Частота микроразломов, инструментальный показатель, отражающий количество микропор в экструдатах с увеличением влагосодержания снижается с 3,5 до 2,0 мм⁻¹.

На цветовые характеристики экструдатов могут оказывать влияние не только используемые в рецептуре смеси ингредиенты и пищевые добавки, но и режимы экструзии, определяющие интенсивность протекания различных химических реакций, например, реакции Майяра.

Таблица 3 – Цветовые характеристики экструдатов /
Table 3 – Color characteristics of extrudates

Образец / Sample	Рисовая крупа / Broken rice		Рисовая крупа с добавлением 5 % ферментализата брусники / Broken rice with 5 % lingonberry pomace hydrolysate		
	15	21	15	18	21
Влагосодержание экструдированной смеси, % / Moisture during extrusion, %					
L*	74,6±2,1	81,4±0,8	59,6±1,0 ^a	58,6±2,4 ^a	54,5±1,2
a*	7,1±0,6	3,8±0,1	16,4±1,1 ^a	18,4±2,1 ^a	18,8±0,9 ^a
b*	17,5±2,1 ^a	12,2±1,0 ^a	18,7±0,6 ^a	16,4±0,9 ^b	16,5±0,9 ^b

Примечания: L* – светлота от 0 до 100; a* – хроматическая составляющая цвета (-a* – зеленый, +a* – красный), b* – хроматическая составляющая цвета (-b* – синий, +b* – желтый); различия между значениями, обозначенными одинаковыми буквенными индексами, в каждой строке статистически незначимы при p<0,05 /

Notes: L* – quantified the brightness/darkness, a* – referred to the redness/greenness, and b* – referred to the yellowness/blueness; Means followed by the same letters within a row are not significantly different at p<0.05

В случае использования экструдата, как компонента каш быстрого приготовления, важными характеристиками его свойств являются способность к влагоудерживанию, растворимость и динамическая вязкость суспензий. Гидратационные и реологические характеристики помола экструдата представлены в таблице 4. Увеличение влагосодержания и соответствующее смягчение режимов экструзии снижают растворимость экструдатов в контроле – с 89 до 78 %, для экспериментальных образцов с компонентом брусники – с 92,5 до 73,0 %, влагоудерживающая способность при этом увеличивается с 1,9 до 2,3 г/г.

В таблице 3 приведены значения хроматических показателей цветовой оценки экструдатов. Внесение 5 % ферментализата жмыха брусники значительно изменяет цветовые характеристики образцов. Значимо снижается показатель светлоты L* с 74,6–81,4 для рисовой крупы до 54,5–59,6 для экспериментальной смеси. Для экструдатов с компонентом брусники количество влаги снижает показатель светлоты с 59,6 до 54,5. Параметр a*, определяющий изменение в диапазоне от зеленого до красного, с добавлением ферментализата значительно смещается в сторону красного цвета с 3,8–7,1 до 16,4–18,8, но между экспериментальными образцами, полученными при разном влагосодержании значимых различий не установлено. Повышение влагосодержания снижает значение хроматической составляющей b*, определяющей изменение цвета от синего к желтому – с 18,7 до 16,5.

Консистенция каш, их реология является важным потребительским параметром для данной категории продуктов, так как влияет на потребляемое количество продукта, восприятие текстуры, интенсивность вкуса [26]. Значений вязкости каш для различных групп потребителей не установлено, но для детских каш оптимальным диапазоном для данного показателя является 2,5...3,0 Па·с [27]. Динамическая вязкость суспензий помолов экструдатов с добавлением ферментализата жмыха брусники, имитирующих заваривание каш мгновенного приготовления в бытовых условиях горячей водой, с увеличением влагосодержания при экструзии значимо растет с 2,0 до 4,0 Па·с.

Таблица 4 – Гидратационные и реологические характеристики экструдатов /
Table 4 – Hydration and rheological characteristics of extrudates

Образец / Sample	Рисовая крупа / Broken rice		Рисовая крупа с добавлением 5 % ферментализата брусники / Broken rice with 5 % lingonberry pomace hydrolysate		
	15	21	15	18	21
Влагосодержание экструдруемой смеси, % / Moisture during extrusion, %					
Растворимость, % / Water solubility, %	89,0±2,0 ^a	78,0±3,0 ^b	92,5±1,5 ^a	83,5±1,5 ^b	73,0±1,0
Влагоудерживающая способность, г/г / Water absorption index, g/g	2,1±0,1 ^a	3,6±0,2	1,90±0,08 ^{ab}	1,80±0,08 ^b	2,30±0,02
Динамическая вязкость суспензии, Па·с / Extrudate suspension dynamical viscosity, Pa·s	2,5±0,1	3,4±0,1 ^a	2,0±0,1	3,1±0,2 ^a	4,0±0,1

Примечание: Различия между значениями, обозначенными одинаковыми буквенными индексами, в каждой строке статистически незначимы при $p < 0,05$ /

Note: Means followed by the same letters within a row are not significantly different at $p < 0.05$

Установлено, что экструзия значительно повышает содержание фенольных веществ в экструдатах с ферментализатом жмыха брусники, максимальное увеличение соответствует режимам с низким влагосодержанием. На рисунке 2 представлена диаграмма изменения содержания фенольных веществ в исследуемых образцах. Минимальной влажности 15 % соответствует содержание 679,6 мг/кг, максимальной 21 % – 223,1 мг/кг, в смеси без экструдирования – 108,2 мг/кг. Экструдирование смесей с добавлением гидролизата жмыха брусники при влагосодержании 15 % обеспечило увеличение содержания фенольных соединений в 6,3 раза. Литературные данные по влиянию экструзии на фенольные соединения на примере жмыха и экстракта аронии черноплодной показывают отсутствие значимого изменения общего содер-

жания фенольных веществ после экструзии относительно смеси перед экструдированием [28, 29]. Режимные параметры экструзии не влияли на содержание процианидинов и гидроксикоричных кислот. При исследовании влияния дозировки ягод брусники на сохранность фенолов в процессе экструзии показано, что с повышением содержания ягод в рецептуре потери фенольных соединений в результате экструдирования увеличиваются с 9 до 55 % [30]. Эффект значимого роста количества фенольных веществ в экструдатах с гидролизатами жмыхов может быть объяснен синергизмом действия ферментных систем на клеточные стенки жмыха с последующей деструкцией клеточного матрикса в процессе комплексного гидротермомеханического воздействия в процессе экструзии.

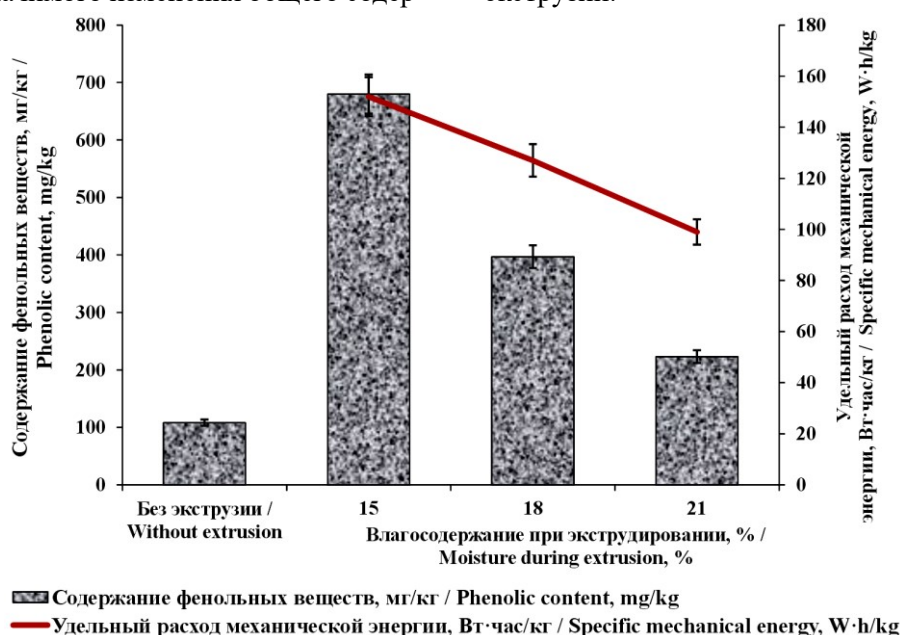


Рис. 2. Содержание фенольных веществ в экструдатах с ферментализатами жмыхов брусники в зависимости от влагосодержания смеси и уровня гидротермомеханического воздействия в процессе экструзии /

Fig. 2. The effect of moisture and specific mechanical energy on the content of phenolic substances in extrudates with lingonberry pomace hydrolysates

Заключение. Проведенные исследования показали, что влагосодержание в процессе экструзии является значимым фактором изменения физико-химических, структурно-механических и технологических показателей экструдатов смесей рисовой крупы с ферментолитами жмыхов брусники. Экструзия на низком уровне влагосодержания позволяет получать продукты с более развитой пористой структурой, меньшей твердостью, правильной формы с небольшой насыпной плотностью, что отвечает технологическим требованиям к снекам, сухим завтракам. Высокое влагосодержание при экструдировании обеспечивает повышение влагоудерживающих свойств экструдатов, большую динамическую вязкость их суспензий. Помолы таких экструдатов целесообразно

использовать в качестве ингредиентов в рецептурах инстант-продуктов, каш быстрого приготовления. Сниженному влагосодержанию и, как следствие, повышенному термомеханическому воздействию на перерабатываемую смесь соответствует значительное повышение содержания фенольных соединений в экструдатах. Полученные данные можно использовать при разработке специализированных пищевых продуктов, направленных на регуляцию защитно-адаптационного потенциала организма.

Таким образом, режимы экструзии, определяемые изменением влагосодержания, позволяют моделировать физико-химические, структурно-механические и реологические характеристики при разработке экструдированных продуктов и инстант-продуктов на их основе.

References

1. Brennan M. A., Derbyshire E., Brennan C. S., Tiwari B. K. Impact of dietary fibre-enriched ready to eat extruded snacks on the postprandial glycaemic response of non-diabetic patients. *Molecular Nutrition and Food Research*. 2012;56(5):834–837. DOI: <https://doi.org/10.1002/mnfr.201100760>
2. Brennan M. A., Derbyshire E. J., Tiwari B. K., Brennan C. S. Ready-to-eat snack products: The role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. *International Journal of Food Science and Technology*. 2013;48(5):893–902. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12055>
3. Santos D., Lopes S., Pintado J. Fruit and vegetable by-products' flours as ingredients A review on production process, health benefits and technological functionalities. *LWT – Food Science and Technology*. 2021;154:112707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112707>
4. Iqbal A. S., Shulz P., Rizvi S. Valorization of bioactive compounds in fruit pomace from agro-fruit industries: Present Insights and future challenges. *Food Bioscience*. 2021;44(Part A):101384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101384>
5. Mäkilä L., Laaksonen O., Ramos-Diaz J. M., Vahvaselkä M., Myllymäki O., et al. Exploiting blackcurrant juice press residue in extruded snacks. *LWT – Food Science and Technology*. 2014;57(2):618–627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.02.005>
6. White B. L., Howard L. R., Prior R. L. Polyphenolic composition and antioxidant capacity of extruded cranberry pomace. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2010;58(7):4037–4042. DOI: <https://doi.org/10.1021/jf902838b>
7. Höglund E., Eliasson L., Oliveira G., Almli V., Sozer N., Alminger M. Effect of drying and extrusion processing on physical and nutritional characteristics of bilberry press cake extrudates. *LWT – Food Science and Technology*. 2018;92:422–428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.042>
8. Wang S., Gu B. J., Ganjyal G. M. Impacts of the Inclusion of Various Fruit Pomace Types on the Expansion of Corn Starch Extrudates. *LWT – Food Science and Technology*. 2019;110:223–230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.094>
9. Majerska J., Michalska A., Figiel A. A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. *Trends in Food Science & Technology*. 2019;88:207–219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.021>
10. Волкова Г. С., Соколова Е. Н., Ионов В. В., Юраскина Т. В., Серба Е. М. Перспективные направления переработки ягодного жмыха в пищевые ингредиенты. *Пищевая промышленность*. 2023;(11):35–39. DOI: <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.11.11.008> EDN: QTHCOG
11. Volkova G. S., Sokolova E. N., Ionov V. V., Yuraskina T. V., Serba E. M. Prospective directions of berry cake processing into food ingredients. *Pishchevaya promyshlennost' = Food Industry*. 2023;(11):35–39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.11.11.008>
12. Kitryte V., Kraujalienė V., Šulniūtė V., Pukalskas A., Venskutonis R. Chokeberry pomace valorization into food ingredients by enzyme-assisted extraction: Process optimization and product characterization. *Food and Bioprocess Technology*. 2017;105:36–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2017.06.001>
13. Roda-Serrat M. C., Lundsfryd C., Rasmussen S., El-Houri R., Lund P. B., Christensen K. V. Enzyme-assisted extraction and ultrafiltration of value-added compounds from sour cherry wine pomace. *Chemical Engineering Transactions*. 2019;74:811–816. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1974136>
14. Saad N., Louvet F., Tarrade S., Meudec E., Grenier K., Landolt C., Ouk T. S., Bressollier P. Enzyme-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Raspberry (*Rubus idaeus* L.) Pomace. *Journal of Food Science*. 2019;84(6):1371–1381. DOI: <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14625>

14. Syrpas M., Valanciene E., Augustiniene E., Malys N. Valorization of Bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) Pomace by Enzyme-Assisted Extraction: Process Optimization and Comparison with Conventional Solid-Liquid Extraction. *Antioxidants*. 2021;10(5):773. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox10050773>
15. Fierascu R. C., Fierascu I., Avramescu S. M., Sieniawska E. Recovery of Natural Antioxidants from Agro-Industrial Side Streams through Advanced Extraction Techniques. *Molecules*. 2019;24(23):4212. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules24234212>
16. Koch W. Dietary Polyphenols-Important Non-Nutrients in the Prevention of Chronic Noncommunicable Diseases. A Systematic Review. *Nutrients*. 2019;11(5):1039. DOI: <https://doi.org/10.3390/nu11051039>
17. Fernandes A., Mateus N., De Freitas V. Polyphenol-Dietary Fiber Conjugates from Fruits and Vegetables: Nature and Biological Fate in a Food and Nutrition Perspective. *Foods*. 2023;12(5):1052. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12051052>
18. Kostka T., Ostberg-Potthoff J. J., Stärke J., Guigas C., Matsugo S., Mirčeski V., et al. Bioactive Phenolic Compounds from Lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.): Extraction, Chemical Characterization, Fractionation and Cellular Antioxidant Activity. *Antioxidants*. 2022;11(3):467. DOI: <https://doi.org/10.3390/antiox11030467>
19. Лютикова М., Ботиров Е. Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы (обзорная статья). *Химия растительного сырья*. 2015;(2):5–27. DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502429> EDN: VCLMXZ
- Lyutikova M., Botirov E. The chemical composition and the practical application of berries cranberries and cranberry. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* = Chemistry of plant raw material. 2015;(2):5–27. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502429>
20. 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;322:126767. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767>
21. Brito A. D. C., Jisaka J. S., Pereira A. C. R., Steel C. J. Thermoplastic extrusion technology as a tool for adding value to brewer's by-products. *LWT – Food Science and Technology*. 2023;189:115487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115487>
22. Carvalho C. W. P., Takeiti C. Y., Onwulata C. I., Pordesimo L. O. Relative effect of particle size on the physical properties of corn meal extrudates: Effect of particle size on the extrusion of corn meal. *Journal of Food Engineering*. 2010;98(1):103–109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.12.015>
23. Muñoz-Pabon K. S., Parra-Polanco A. S., Roa-Acosta D. F., Hoyos-Concha J. L., Bravo-Gomez J. E. Physical and paste properties comparison of four snacks produced by high protein quinoa flour extrusion cooking. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2022;(6):852224. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.852224>
24. Yu H., Liu H., Erasmus S. W., Zhao S., Wang Q., van Ruth S. M. An explorative study on the relationships between the quality traits of peanut varieties and their peanut butters. *LWT – Food Science and Technology*. 2021;151:112068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112068>
25. Денисенко Т. А., Вишник А. Б., Цыганок Л. П. Спектрофотометрическое определение суммы фенольных соединений в растительных объектах с использованием хлорида алюминия, 18-молибдодифосфата и реактива Фолина-Чокальтеу. *Аналитика и контроль*. 2015;19(4):373–380. DOI: <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.4.012> EDN: VCMINN
- Denisenko T. A., Vishnikin A. B., Tsyganok L. P. Spectrophotometric determination of phenolic compounds sum in plants using aluminum chloride, 18-molybdodiphosphate and Folin-Ciocalteu reagents. *Analitika i kontrol'*. 2015;19(4):373–380. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.4.012>
26. Mburu M. W., Gikonyo N. K., Kenji G. M., Mwasaru A. M. Properties of a complementary food based on amaranth grain (*Amaranthus cruentus*) grown in Kenya. *Journal of Agriculture and Food Technology*. 2011;1(9):153–178.
27. Akande O. A., Nakimbugwe D., Mukisa I. M. Optimization of extrusion conditions for the production of instant grain amaranth-based porridge flour. *Food Science & Nutrition*. 2017;(5):1205–1214. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.513>
28. Schmid V., Mayer-miebach E., Behnlian D., Briviba K., Karbstein H. P., Emin M. A. Enrichment of starch-based extruded cereals with chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace: Influence of processing conditions on techno-functional and sensory related properties, dietary fibre and polyphenol content as well as *in vitro* digestibility. *LWT – Food Science and Technology*. 2021;154(4):112610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112610>
29. Hirth M., Preiß R., Mayer-Miebach E., Schuchmann H. P. Influence of HTST extrusion cooking process parameters on the stability of anthocyanins, procyanidins and hydroxycinnamic acids as the main bioactive chokeberry polyphenols. *LWT – Food Science and Technology*. 2015;62(1-Part 2):511–516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.08.032>
30. Шариков А. Ю., Соколова Е. Н., Амелякина М. В., Поливановская Д. В., Серба Е. М. Использование брусники в экструдированных продуктах, готовых к употреблению. *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2022;(4):191–200. DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.379> EDN: MPFZHK
- Sharikov A. Yu., Sokolova E. N., Amelyakina M. V., Polivanovskaya D. V., Serba E. M. The use of cranberries in extruded products ready for consumption. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* = Storage and Processing of Farm Products. 2022;(4):191–200. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.36107/spfp.2022.379>

Сведения об авторах

Шариков Антон Юрьевич, кандидат техн. наук, заведующий отделом оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Самокатная ул., д. 4-б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

Иванов Виктор Витальевич, кандидат техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Самокатная ул., д. 4-б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

✉ **Амелякина Мария Валентиновна**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник отдела оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Самокатная ул., д. 4-б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5138-6746>, e-mail: foodbiotech@ya.ru

Соколова Елена Николаевна, кандидат биол. наук, ведущий научный сотрудник отдела биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и БАД, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Самокатная ул., д. 4-б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6084-7786>

Ионов Владислав Витальевич, аспирант, инженер-технолог отдела биотехнологии ферментов, дрожжей, органических кислот и БАД, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Самокатная ул., д. 4-б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-8707>

Серба Елена Михайловна, член-корреспондент РАН, зам. директора по науке, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», Самокатная ул., д. 4-б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1660-2634>

Information about the authors

Anton Yu. Sharikov, PhD in Engineering, Head of the Department of Food Production Equipment and Membrane Technologies, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology – branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4-B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-5209>

Viktor V. Ivanov, PhD in Engineering, Leading Researcher at the Department of Food Production Equipment and Membrane Technologies, The All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4-B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6492-7070>

✉ **Maria V. Amelyakina**, PhD in Engineering, Senior Researcher at the Department of Food Production Equipment and Membrane Technologies, The All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4-B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5138-6746>, e-mail: foodbiotech@ya.ru

Elena N. Sokolova, PhD in Biology, Leading Researcher of the Department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids and Dietary Supplements, The All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4-B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6084-7786>

Vladislav V. Ionov, postgraduate student, Process Engineer of the Department of Biotechnology of Enzymes, Yeast, Organic Acids and Dietary Supplements, The All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4-B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7383-8707>

Elena M. Serba, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Science, The All-Russian Research Institute of Food Biotechnology is a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Samokatnaya str., 4-B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: 4953624495@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1660-2634>

✉ – Для контактов / Corresponding author