

Хранение и переработка

УДК 664.782+634.74:613.292+664.696

DOI 10.31857/S2500262724030135 EDN FUSMDX

ВЛИЯНИЕ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ НА РЕЖИМЫ ЭКСТРУЗИИ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭКСТРУДАТОВ С ДОБАВЛЕНИЕМ ФЕРМЕНТОЛИЗАТА ЖМЫХА АРОНИИ ЧЕРНОПЛОДНОЙ

© 2024 г. А. Ю. Шариков, кандидат технических наук, В. В. Иванов, кандидат технических наук, М. В. Амелякина, кандидат технических наук, Е. Н. Соколова, кандидат биологических наук, В. В. Ионов, Е. М. Серба, член-корреспондент РАН

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии –
филиал Федерального исследовательского центра
питания, биотехнологии и безопасности пищи,
111033, Москва Самокатная ул., 4б
E-mail: anton.sharikov@gmail.com

Исследование проводили с целью изучения влияния фактора влагосодержания при экструдировании смеси рисовой крупы с ферментоллизатом жмыха аронии черноплодной на режимные параметры процесса, физико-химические, структурно-механические и технологические показатели полученных образцов продукта. Актуальность исследования обусловлена необходимостью экологизации технологических процессов переработки плодово-ягодного сырья и повышения эффективности использования вторичных сырьевых ресурсов. Ферментоллизаты жмыха аронии черноплодной получали с использованием комплекса ферментов, включающего пектиназу, целлюлазу, протеазу и липазу. Гидролизат высушивали, добавляли к рисовой крупе в количестве 5 % и экструдировали, изменяя влагосодержание в диапазоне 15...24 %. Повышение влагосодержания при экструдировании снижало температуру со 165 до 148 °С, давление в предматричной зоне – с 5,0 до 2,0 МПа и момент сдвиговых деформаций – с 88 до 48 %, то есть уменьшало интенсивность воздействия на биополимеры перерабатываемых смесей. Одновременно удельный расход механической энергии снижался с 0,17 до 0,09 кВт·ч/кг. Тенденции изменения термомеханических режимов переработки, определяемых количеством воды в системе, как фактора, снижающего трение, для контроля и экспериментальных смесей были идентичны. С ростом влагосодержания при экструдировании твердость образцов, содержащих ферментоллизат ягодного жмыха, возрастала с 11,1 до 43,5 Н, насыпная масса – с 97,0 до 278,8 г/дм³, квадратичный коэффициент расширения снижался с 8,5 до 3,0. Динамическая вязкость суспензий помолов экстрактов в условиях гидратации, имитирующих их заваривание горячей водой, с повышением влагосодержания в процессе переработки смесей значительно увеличивалась с 2,0 до 3,4...4,4 Па·с. Экструдирование значительно повышало содержание фенольных веществ в образцах с ферментоллизатом жмыха аронии черноплодной, максимальная в опыте величина этого показателя 631,5 мг/дм³ соответствовала влагосодержанию 15 %.

THE INFLUENCE OF MOISTURE CONTENT ON EXTRUSION MODES AND PHYSICO-CHEMICAL PARAMETERS OF EXTRUDATES WITH THE ADDITION OF CHOKEBERRY POMACE HYDROLYSATE

A. Yu. Sharikov, V. V. Ivanov, M. V. Amelyakina, E. N. Sokolova, V. V. Ionov, E. M. Serba

The All-Russian Research Institute of Food Biotechnology –
a Branch of the Federal Research Center for Nutrition,
Biotechnology and Food Safety,
111033, Moskva, ul. Samokatnaya, 4b
E-mail: anton.sharikov@gmail.com

The influence of the moisture content during the extrusion of a mixture of rice with chokeberry pomace hydrolysate on the process parameters, physico-chemical, structural, textural and technological properties of the extrudates was studied. The relevance of the study is due to the need to increase the sustainability of technological processing of fruit and berry raw materials and increase the efficiency of using by-products of food industry. Hydrolysate of chokeberry pomace was obtained using a complex of enzymes, including pectinase, cellulase, protease and lipase. The hydrolysate was dried, added to rice in an amount of 5 % and extruded at various moisture content in the range of 15...24 %. An increase in moisture content during extrusion reduced the process temperature from 165 to 148 °C, the pressure from 5.0 to 2.0 MPa and the torque from 88 to 48 %. A decrease in moisture reduced the intensity of the impact of the treated mixtures on biopolymers. The specific mechanical energy decreased from 0.17 to 0.09 kW hour/kg. The trends in changes in thermomechanical treatment modes, determined by moisture as a factor reducing friction, were identical for the control and experimental mixtures without significant differences. With an increase in moisture content during extrusion, the hardness of samples containing berry pomace hydrolysate increased from 11.1 to 43.5 N, bulk density from 97.0 to 278.8 g/dm³, and the sectional expansion index decreased from 8.5 to 3.0. The dynamic viscosity of suspensions of ground extrudates under hydration conditions simulating instant steeping in domestic conditions increased significantly from 2.0 to 3.4...4.4 Pa s with an increase in moisture content during extrusion. Extrusion increased the content of phenolic substances in samples with chokeberry pomace hydrolysate. The maximum value of 631.5 mg/dm³ corresponded to 15 % moisture content.

Ключевые слова: экструзия, вторичные сырьевые ресурсы, пищевые концентраты, арония черноплодная (*Aronia melanocarpa*), фенольные соединения, структурно-механические свойства.

Keywords: extrusion, food by-products, food concentrates, chokeberry (*Aronia melanocarpa*), phenolic compounds, structural and mechanical properties.

Жмыхи или выжимки плодово-ягодного сырья, образующиеся в процессе его переработки, в основном, на соки – недостаточно используемый сырьевой ресурс пищевой промышленности, который при этом имеет значительный потенциал в аспекте химического состава по содержащимся биологически активным веществам [1, 2]. Отсутствие и несвоевременная утилизация и переработка отходов на предприятиях, работающих с плодово-ягодным сырьем, создают серьезные экологические риски для населения и окружающей среды [1]. Однако важность переработки вторичных сырьевых ресурсов не ограничивается решением задач по экологизации производства, актуальным аспектом выступает и повышение эффективности предприятий посредством комплексной, глубокой переработки отходов с получением продуктов и пищевых ингредиентов с высокой добавленной стоимостью [3]. Этому способствуют тенденции увеличения потребительского интереса к категориям продуктов с натуральными ингредиентами и функциональными пищевыми добавками [4]. В химическом составе плодово-ягодных жмыхов выделяют несколько категорий ценных биологически активных фитохимических соединений: пищевые волокна, фенольные соединения, пектины, каротиноиды, природные антиоксиданты, микроэлементы [1, 2]. Потенциал этих биоактивных соединений позволяет рассматривать их как источники антиоксидантной, противовоспалительной, антибактериальной и противовирусной активности. Отмечается возможность улучшения органолептических характеристик пищевых продуктов, а также замены пищевых аллергенов в их составе посредством использования в качестве ингредиентов жмыхов плодово-ягодного сырья [4].

Переработку жмыхов плодово-ягодного сырья, отличную от прямого скармливания сельскохозяйственным животным, можно вести по нескольким направлениям, к которым можно отнести использование в качестве ингредиентов, изготовление порошков или концентрирование и экстракция биологически активных веществ [1, 3]. Конкретное целевое использование и способ дальнейшей переработки жмыхов определяет их химический состав [4]. Помимо высушивания, наиболее простой способ утилизации жмыхов – переработка в качестве ингредиентов в смеси с другим сельскохозяйственным сырьем при производстве продуктов питания. При этом одна из оптимальных технологий – пищевое экструдирование, которое не наносит значимого ущерба органолептическим показателям, обеспечивает возможность инактивации антипитательных факторов и использования вторичных сырьевых ресурсов при производстве продуктов с высокой добавленной стоимостью, как сухие завтраки, снеки, крахмалосодержащие и белковые ингредиенты для различных отраслей пищевой промышленности [5]. Технология экструдирования востребована при переработке смесей продукции зерновых культур с различными жмыхами из плодово-ягодного сырья, например, ананаса [6], клюквы, черники, винограда, яблока [7, 8, 9], черной смородины [10]. Перед экструдированием жмыхи высушивают и вносят в смеси в основном в количестве до 30 %. Установлено значимое влияние дозировки жмыхов и режимов экструдирования на структурно-механические свойства полученных продуктов, их цвет, органолептические характеристики, содержание антоцианов, флавонолов и процианидинов. Высоким потенциалом в аспекте антиоксидантных свойств и содержания фенольных веществ обладают плоды аронии черноплодной (*Aronia melanocarpa*), используемой как лекарственное сырье и ингредиент в пищевой

промышленности [11]. Комплекс биологически активных соединений аронии представлен флавоноидами (1,5...2,2 %), антоцианами (1,0...3,7 %), катехинами, аскорбиновой кислотой (до 1,6 %), органическими кислотами (1,52...1,71 %), дубильными веществами (0,98...1,53 %), цианидином и его гликозидами. В зависимости от сорта в плодах отмечается высокое содержание железа, марганца, хрома, цинка, меди [12].

Известен ряд исследований по разработке экструдированных продуктов с пониженной гликемической нагрузкой, высоким содержанием пищевых волокон и полифенолов добавлением свежих, сушеных плодов аронии черноплодной [13, 14], ее жмыхов [15, 16], экстракта [17]. Содержание биологически активных веществ в экструдированных продуктах с *Aronia melanocarpa* прямо коррелирует с массовой долей ингредиента в рецептуре, при этом внесение ее в количестве более 9 % негативно отражается на органолептических характеристиках [14]. Для решения проблемы ухудшения потребительских свойств целесообразно использовать экстракты или другие продукты переработки жмыхов, что при незначительной дозировке позволит значимо повысить пищевую ценность экструдатов.

Различные технологии экстракции имеют как свои преимущества, так и недостатки, но развитие и разработка новых ферментных препаратов позволяют все шире использовать методы ферментативной экстракции на основе гидролитических процессов [18]. На примере переработки жмыхов черники [19], малины [20], винограда [21], аронии черноплодной [22] установлено, что использование целлюлолитических, пектолитических и гемицеллюлолитических ферментных препаратов позволяет повысить качество экстракции и отказаться от органических растворителей. При этом состав ферментативного комплекса и дозировка специфических ферментов служит определяющим фактором химического состава гидролизатов жмыхов и полученных экстрактов из них.

Анализ результатов научных исследований в области эффективной переработки аронии черноплодной с использованием процесса экструдирования [13, 15, 17] и биоконверсии жмыхов плодово-ягодного сырья [18, 20, 22] свидетельствует о перспективности совмещения указанных технических решений, то есть использования ферментализатов жмыхов в качестве ингредиента в технологии пищевого экструдирования. Работ по изучению влияния внесения гидролизатов жмыхов в экструдированные смеси, а также зависимостей физико-химических и органолептических показателей изготовленных продуктов от гидротермомеханических режимов ранее не проводили.

Цель исследования – изучить влияние влагосодержания как основного управляющего фактора на режимные параметры экструзии рисовой крупы с ферментализатом жмыха аронии черноплодной.

Методика. Объектом исследования служили экстракты с гидролизатом жмыха аронии черноплодной, полученные при различном влагосодержании. В качестве модельной основы для продуктов использовали рисовую крупу по ГОСТ 6292-93. Ферментализат жмыха аронии черноплодной получали путем многоэтапной переработки замороженных плодов. После отжима сока жмых подвергали биокаталитической обработке при гидромодуле 1:2 ферментной системой следующего состава: пектиназа 0,25 ед. ПкС/г; целлюлаза 0,75 ед. ЦС/г; протеаза 0,05 ед. ПС/г; липаза 0,05 ед. ЛС/г при pH 5,2, температура 52 °C, время экспозиции 6 ч. Использовали следующие ферментные препараты: Пектиназа Г20Х

на основе микромицета *Aspergillus foetidus*, Целлюлозы Г20Х на основе штамма *Trichoderma viride*, Нейтраза Г18Х на основе штамма *Bacillus subtilis*, Липаза Г20Х на основе штамма *Aspergillus niger*. Полученный гидролизат жмыха высушивали при температуре 65 °С и добавляли в количестве 5 % к рисовой крупе. Смесь экструдировали, изменяя влагосодержание в камере экструдера в диапазоне 15...24 %. В качестве контроля перерабатывали рисовую крупу при влагосодержании 15 и 21 %.

В экспериментальной работе использовали двухшнековый экструдер Werner&Phleiderer Continua 37 с соотношением диаметра к длине шнека 1:27. Формование стренга осуществляли через фильеру с двумя отверстиями круглого профиля Ø 3,5 мм. При экструдировании скорость вращения шнеков составляла 200 об/мин, производительность по смеси – 20 кг/ч.

Полученные образцы оценивали по комплексу структурно-механических и функциональных показателей, характеризующих снеки и продукты быстрого приготовления [9, 10, 14].

Удельный расход механической энергии рассчитывали по формуле:

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

где SME – удельный расход механической энергии на экструдирование, кВт·ч/кг сырья; n и n_{max} – скорость вращения шнеков установленная и максимальная соответственно, об/мин; N – мощность двигателя экструдера, кВт; M – момент на валу редуктора; Kg – расход сырья, кг/ч.

Содержание влаги измеряли термогравиметрическим методом с использованием анализатора ML-50 (A&D, Япония). Коэффициент квадратичного расширения рассчитывали по соотношению площадей сечения экструдата и отверстия фильеры. Насыпную плотность определяли в мерном цилиндре диаметром 10 см.

Структурно-механические свойства, твердость и количество микроразломов определяли с использованием анализатора текстуры Brookfield CT3 Texture Analyser с металлическим цилиндрическим зондом диаметром 3 мм при глубине прокола 3 мм. Инструментальный показатель твердости характеризует максимальную нагрузку, имитирующую сжатие образца между зубами, количество микроразломов – пористость и хрупкость экструдатов [23].

Гидратирующие свойства определяли методом приготовления суспензий измельченных образцов в избыточном количестве воды. Готовили суспензию с 10 %-ным содержанием сухих веществ, проводили интенсивное перемешивание в течение 15 минут и далее 15 минут центрифугировали суспензию 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 как характеристику способности связывания и удержания воды внутри микроскопических пор экструдатов, вычисляли как отношение массы осадка после фугования к массе сухих веществ в каждом центрифужном стакане. Набухаемость измеряли методом осаждения 10 %-ной суспензии в течение 24 ч в мерном цилиндре и рассчитывали как отношение объема продукта после отстаивания к массе навески.

Для определения реологических свойств суспензий, имитирующих доведение инстант-продукта до готовности, в сосуд заливали 90 г воды температурой 95...98 °С и при постоянном перемешивании добавляли 30 г экс-

трудата. После интенсивного перемешивания температуру смеси снижали до 24 °С и измеряли динамическую вязкость вискозиметром SV-10 (AND, Япония) при частоте 30 Гц.

Цветовые характеристики образцов оценивали колориметрическим методом в системе CIE LAB с использованием анализатора CS-10 (Hangzhou CHNSpec Technology, Китай) [24], где L^* – светлота от 0 до 100, a^* – хроматическая составляющая в диапазоне от зеленого до красного, b^* – хроматическая составляющая в диапазоне от синего до желтого. Хроматические составляющие ограничивали диапазоном значений -100/+100. Инструментальные измерения проводили в 10-и повторностях [24].

Суммарное содержание фенольных соединений в экструдатах определяли спектрофотометрическим методом с использованием хлорида алюминия, 18-молибдодифосфата и реактива Фолин-Чокальтеу на спектрофотометре Specord 50 Analytic Yena при длине волны 720 нм [25].

Статистическую обработку проводили с использованием пакета программ Statistica 6.0. Достоверность различий средних определяли методом однофакторного дисперсионного анализа и тестом Тьюки при $p < 0,05$. Значения экспериментальных данных представлены в виде средних ± стандартное отклонение.

Результаты и обсуждение. Рост влагосодержания при экструдировании значительно снижает температуру, давление и момент сдвиговых деформаций как для рисовой крупы, так и для ее смеси с ферментоллизатом аромии черноплодной, то есть уменьшает интенсивность гидротермомеханического воздействия на биополимеры перерабатываемого сырья (табл. 1). Температура снижается со 165 до 148...150 °С, момент сдвиговых деформаций – с 88...90 до 48 %, давление – с 5,0 до 2,0 МПа. При этом различия между величинами параметров, соответствующих одному уровню влагосодержания, для контроля и экспериментальной смеси не значимы.

Табл. 1. Режимные параметры экструзии смеси рисовой крупы с ферментоллизатом жмыха аромии черноплодной*

Образец	Влагосодержание, %	Температура, °С	Момент сдвиговых деформаций, %	Давление, МПа	Удельный расход механической энергии, кВт·ч/кг
Рисовая крупа	15	165±2 ^a	90±2 ^a	5,0±0,2 ^a	0,1710
Рисовая крупа с 5% ферментоллизата аромии черноплодной	21	150±2 ^b	54±1 ^b	2,6±0,1 ^b	0,1026
Рисовая крупа с 5% ферментоллизата аромии черноплодной	15	165±2 ^a	88±1 ^a	5,0±0,2 ^a	0,1672
Рисовая крупа с 5% ферментоллизата аромии черноплодной	18	156±1	66±1	2,7±0,2 ^b	0,1254
Рисовая крупа с 5% ферментоллизата аромии черноплодной	21	150±2 ^b	52±2 ^b	2,4±0,2 ^{bc}	0,0988
Рисовая крупа с 5% ферментоллизата аромии черноплодной	24	148±1 ^b	48±1	2,0±0,1 ^c	0,0912

*различия между значениями в каждом столбце, обозначенными одинаковыми буквенными индексами, статистически незначимы при $p < 0,05$.

Расчетный показатель удельного расхода механической энергии отражает количество поступающей в экструзионную систему в результате диссипации механической энергии работы двигателя на единицу массы сырья. Она в основном преобразуется в тепло в экструдере. Оценивая изменение величины этого показателя с варьированием уровня влагосодержания, для экспериментальной смеси можно отметить существенное снижение с 0,1672 до 0,0912 кВт·ч/кг, аналогичная тенденция сохраняется и в контроле.

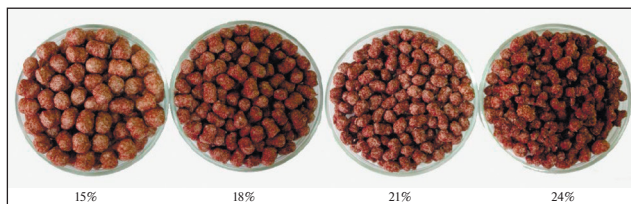


Рис. 1. Внешний вид экструдатов с ферментолитами жмыхов аронии черноплодной в зависимости от влагосодержания.

При экструдировании сырья с влагосодержанием 24 % резка стренгов усложнялась, происходило слипание экструдата, отмечено ухудшение формования (рис. 1).

С ростом влагосодержания с 15 до 24 % квадратичный коэффициент расширения значительно снижался с 8,5 до 3,0 (табл. 2). Причем для контрольных экструдатов из рисовой крупы величина этого показателя была значимо выше, чем для экспериментальных, только при низком влагосодержании. Насыпная масса контрольного и экспериментального экструдатов при влагосодержании 15 % значимо не различалась и составляла 94,7 и 97,5 г/дм³. С ростом влагосодержания экструдаты становились плотнее, при влажности 24 % насыпная масса увеличивалась практически в 3 раза, до 278,8 г/дм³. Изменение показателя твердости, характеризующегося максимальной нагрузкой, имитирующей сжатие экструдата между зубами, повторяло тенденции, отмеченные для насыпной плотности. При влагосодержании 15 % величина этого показателя была минимальной и составляла для экспериментального образца 11,1 Н, с увеличением влагосодержания до 21...24 % она росла до 43,2...43,5 Н. Количество микроразломов с увеличением влагосодержания снижалось, за исключением образца с ферментолитом аронии, полученного при 24 % влажности. В этом случае на рост количества микропор может влиять большее содержание воды в экструдированном сырье.

Табл. 2. Структурно-механические характеристики экструдатов в зависимости от влагосодержания в процессе экструзии*

Показатель, единица измерения	Влагосодержание экструзии, %					
	рисовая крупа			рисовая крупа с 5 % ферментолита аронии черноплодной		
	15	21	15	18	21	24
Квадратичный коэффициент расширения	8,9±1,4	5,1±1,2 ^a	8,5±0,6	4,2±0,6 ^a	4,1±0,5 ^a	3,0±0,7
Насыпная масса, г/дм ³	94,7±3,2 ^a	250,4±4,5	97±5,0 ^a	171,6±3,8	232,3±4,3	278,8±5,2
Твердость, Н	9,2±1,8 ^a	35,2±4,5 ^b	11,1±2,2 ^a	30,1±4,2 ^b	43,2±5,3 ^c	43,5±4,6 ^c
Количество микроразломов	9,8±2,2 ^a	4,6±1,5 ^b	7,8±0,9 ^{bc}	5,2±1,0 ^b	4,1±1,5 ^b	6,2±0,7 ^{bc}

*здесь и в таблицах 3 и 4 различия между значениями, обозначенными одинаковыми буквенными индексами, статистически незначимы при $p < 0,05$.

Цвет экструдатов – важная характеристика для маркетинга, которую в основном определяет сырье, входящее в состав рецептуры. Добавление 5 % ферментолита жмыха аронии черноплодной значимо изменяло цветовые характеристики образцов (табл. 3). Величина пока-

зателя светлоты L снижалась с 74,6...81,4 для рисовой крупы до 29,3...36,0 для экспериментальной смеси. Количество влаги не оказывало значимого влияния на величину этого показателя. Индекс а с добавлением ферментолита значимо смещался в сторону красного цвета с 3,8...7,1 до 26,9...32,6, рост влагосодержания также повышал его величину. Для образцов, полученных при влагосодержании 15 %, оно было значимо меньше, чем для образцов, проэкструдированных при 18...24 %. Хроматическая составляющая b с ростом влагосодержания и добавления ферментолита имела тенденцию к снижению.

Табл. 3. Цветовые характеристики экструдатов в зависимости от влагосодержания в процессе экструзии

Показатель	Влагосодержание экструзии, %					
	рисовая крупа			рисовая крупа с 5% ферментолита аронии черноплодной		
	15	21	15	18	21	24
L	74,6±2,1	81,4±0,8	36±3,4 ^a	30,5±3,3 ^a	29,3±4,7 ^a	31,4±2,0 ^a
a	7,1±0,6 ^a	3,8±0,1 ^a	26,9±2,8 ^b	31,2±3,2 ^{bc}	32,6±4,3 ^c	31,7±1,9 ^c
b	17,5±2,1	12,2±1,0 ^a	10,3±0,7 ^a	8,2±0,2 ^b	6,3±0,4 ^b	7,5±0,8 ^b

Исследование гидратационных и реологических характеристик помола экструдата показало (табл. 4), что увеличение влагосодержания и соответствующее смягчение режимов экструзии снижало растворимость экструдатов с 88 до 66 % и набухаемость – с 7,6 до 6,6...7,0 см³/г. Одновременно их влагоудерживающая способность возрастала с 2,3 до 3,8 г/г.

Табл. 4. Гидратационные и реологические характеристики экструдатов в зависимости от влагосодержания в процессе экструдирования

Показатель, единица измерения	Влагосодержание, %					
	рисовая крупа			рисовая крупа с 5 % ферментолита аронии черноплодной		
	15	21	15	18	21	24
Растворимость, %	89±2 ^a	78±3 ^{bc}	88±2 ^a	82±1 ^b	74±3 ^c	66±2
Влагоудерживающая способность, г/г	2,1±0,1 ^a	3,6±0,2 ^b	2,3±0,2 ^a	2,1±0,1 ^a	3,2±0,1	3,8±0,2 ^b
Набухаемость, см ³ /г	7,6±0,3 ^a	7,0±0,2 ^b	7,6±0,1 ^a	6,8±0,2 ^b	6,6±0,1 ^b	7,0±0,3 ^b
Динамическая вязкость суспензии, Па·с	2,5±0,1 ^a	3,4±0,1 ^b	2,0±0,1	2,7±0,2 ^a	3,4±0,2 ^b	4,4±0,2

Необходимо отметить, что для этих трех показателей значимые различия между контрольным и экспериментальными образцами, полученными на соответствующих уровнях влажности, отсутствуют. Существенные различия отмечены в изменении динамической вязкости гидратированных помолов экструдатов, имитирующих их заваривание в бытовых условиях горячей водой. При влагосодержании 15 % вязкость экструдата рисовой крупы составила 2,5 Па·с, экструдата с ферментолитом жмыха – 2,0 Па·с. Рост влагосодержания значимо повышал вязкость суспензии до 3,4...4,4 Па·с.

Экструдирование существенно увеличивало содержание фенольных веществ в экструдатах с ферментолитом жмыха аронии черноплодной, максимальное в опыте повышение отмечали при режимах с низким влагосодержанием (рис. 2). При наименьшей влажности оно составляло 631,5 мг/дм³, при наибольшей – 241,1 мг/дм³, в смеси без экструдирования – 108,2 мг/дм³.

В экструдатах с гидролизатом жмыхов аронии концентрация фенольных веществ в результате экструдирования выросла в 6,4 раза. При этом ранее в исследованиях, проведенных с добавлением экстракта аронии черноплодной [17], было показано отсутствие значимого изменения общего содержания фенольных веществ

после экструдирования относительно исходной смеси. Изменение режимов экструдирования не повлияло на концентрацию процианидинов и гидроксикоричных кислот, более высокая скорость вращения шнеков увеличивала удельный расход механической энергии и приводила к потере антоцианов. Аналогичные результаты получены другими исследователями [16], однако в этой работе отмечено снижение количества антоцианов, а содержание фенольных кислот и флавонолов не изменялось. Эффект значимого роста количества фенольных веществ в экструдатах с гидролизатами жмыхов, наблюдаемый в нашем исследовании, может быть объяснен синергизмом действия ферментных систем на клеточные стенки жмыха и последующей их деструкцией в процессе комплексного гидротермомеханического воздействия при экструдировании.

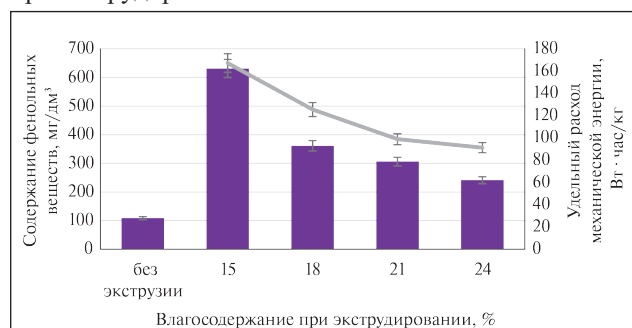


Рис. 2. Содержание фенольных веществ в экструдатах с ферментализатами жмыхов аронии черноплодной: ■ — содержание фенольных веществ, мг/дм³, — — удельный расход механической энергии, Вт·ч/кг.

Степень такого воздействия определяется уровнем удельных затрат механической энергии, которая в свою очередь изменяется варьированием влажностного содержания при переработке смесей. Коэффициент корреляции между содержанием фенольных веществ и значением удельной механической энергии составил 0,98, что указывает на сильную положительную связь. То есть, уровень влажностного содержания выступает не только фактором управления структурно-механическими и гидратационными свойствами экструдатов, но и позволяет изменять содержание фенольных веществ.

Выводы. Влажностное содержание в процессе экструдирования смеси рисовой крупы с 5 % ферментализата аронии черноплодной выступает ключевым фактором управления структурно-механическими и технологическими свойствами, а также содержанием фенольных веществ. Его снижение позволяет получить продукты правильной формы с более развитой пористой структурой и меньшей твердостью. Насыпная масса, квадратичный коэффициент расширения и твердость образцов, полученных при влажностном содержании 15 %, составили соответственно 97 г/дм³, 8,5 и 11,1 Н, при влажностном содержании 24 % – 278,8 г/дм³, 3,0 и 43,5 Н. Режимы переработки смесей с низкой влажностью можно рекомендовать для производства хлебцев и снековой продукции, для которых важны структурно-механические характеристики. При разработке и производстве инстант-продуктов, ингредиентов для каш быстрого приготовления более предпочтительны режимы с высоким влажностным содержанием при экструдировании. Это обеспечивает повышение влагоудерживающей способности с 2,3 до 3,8 г/г и динамической вязкости суспензий, имитирующих заваривание каш в бытовых условиях с 2,0 до 4,4 Па·с.

Ферментализаты жмыха аронии черноплодной служат источником фенольных соединений, их включение в состав рецептур экструдированных продуктов позволяет повысить пищевую ценность. Содержание фенольных соединений в экструдатах также зависит от гидротермомеханических условий переработки, максимальное увеличение отмечено для режима с низким влажностным содержанием 15 % – 631,5 мг/дм³. Максимальное содержание смеси 24 % соответствует содержанию фенольных соединений 241,1 мг/дм³.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств гранта РНФ № 22-16-00100, <https://rscf.ru/project/22-16-00100/>. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. 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. Vol. 44. P. 101384. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212429221005095> (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.1016/j.fbio.2021.101384.
2. Saini A., Panesar P. S., Bera M. B. Valorization of fruits and vegetables waste through green extraction of bioactive compounds and their nanoemulsions-based delivery system // *Bioresour. Bioprocess*. 2019. Vol. 6. P. 26. URL: <https://bioresourcesbioprocessing.springeropen.com/articles/10.1186/s40643-019-0261-9>. (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.1186/s40643-019-0261-9.
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*. 2021. Vol. 154. P. 112707. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821018600> (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.1016/j.lwt.2021.112707.
4. Michalska-Ciechanowska A. A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products // *Trends in Food Science & Technology*. 2019. Vol. 88. P. 207–219. doi: 10.1016/j.tifs.2019.03.021.
5. Extrusion Processing of Biomass By-Products for Sustainable Food Production / J. Pennells, I. Bless, P. Juliano, et al. // *From Biomass to Biobased Products* / Eds E. Jacob-Lopes, L. Q. Zepka, R. R. Dias. 2023. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.111943> (дата обращения: 01.03.2024).
6. Kothakota A., Jindal N. A study on evaluation and characterization of extruded product by using various by-products // *African Journal of Food Science*. 2013. Vol. 7. P. 485–497. doi: 10.5897/AJFS2013.1065.
7. 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. Vol. 58. No. 7. P. 4037–4042. doi: 10.1021/jf902838b.
8. Effect of drying and extrusion processing on physical and nutritional characteristics of bilberry press cake extrudates / E. Höglund, L. Eliasson, G. Oliveira, et al. // *LWT- Food Science and Technology*. 2018. Vol. 92. P. 422–428. doi: 10.1016/j.lwt.2018.02.042.

9. Wang S., Gu B. J., Ganjyal G. M. Impacts of the Inclusion of Various Fruit Pomace Types on the Expansion of Corn Starch Extrudates // *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 2019. Vol. 110. P. 223–230. doi: 10.1016/j.lwt.2019.03.094.
10. Exploiting blackcurrant juice press residue in extruded snacks / L. Mäkilä, O. Laaksonen, J. M. Ramos-Diaz, et al. // *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 2014. Vol. 57. P. 1–10. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643814000668> (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.1016/j.lwt.2014.02.005.
11. Разработка средства на основе плодов аронии черноплодной, повышающего эффективность химиотерапии опухолей / В. Ю. Андреева, В. В. Шейкин, Г. И. Каликина и др. // *Химия растительного сырья*. 2020. № 4. С. 219–226. doi: 10.14258/jcprm.2020046339.
12. Химический состав плодов аронии различных сортов / Е. Е. Логвинова, Т. А. Брежнева, И. А. Самылина и др. // *Фармация*. 2015. Т. 64. № 6. С. 22–26.
13. Fresh Chokeberry (*Aronia melanocarpa*) Fruits as Valuable Additive in Extruded Snack Pellets Selected Nutritional and Physiochemical Properties / A. Wójtowicz, M. Combrzyński, B. Biernacka, et al. // *Plants* (Basel, Switzerland). 2023. Vol. 12 (18). P. 3276. URL: <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/18/3276> (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.3390/plants12183276.
14. Hwang E. S. Quality characteristics and antioxidant activity of rice porridge supplemented with aronia (*Aronia melanocarpa*) powder // *Korean Journal of Food Preserv.* 2021. Vol. 28 (1). P. 63–71. doi: 10.11002/kjfp.2021.28.1.63.
15. Extrusion processing of pure chokeberry (*Aronia melanocarpa*) pomace: Impact on dietary fibre profile and bioactive compounds / V. Schmid, J. Steck, E. Mayer-Miebach, et al. // *Foods*. 2021. Vol. 10 (3). P. 518. URL: <https://www.mdpi.com/2304-8158/10/3/518> (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.3390/foods10030518.
16. 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 / V. Schmid, E. Mayer-miebach, D. Behnsnlian, et al. // *LWT-Food Science and Technology*. 2021. Vol. 154 (4). P. 112610. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0023643821017631> (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.1016/j.lwt.2021.112610.
17. Influence of HTST extrusion cooking process parameters on the stability of anthocyanins, procyanidins and hydroxycinnamic acids as the main bioactive chokeberry polyphenols / M. Hirth, R. Preiß, E. Mayer-Miebach, et al. // *LWT-Food Science and Technology*. 2015. Vol. 62 (1). P. 511–516. doi: 10.1016/j.lwt.2014.08.032.
18. Перспективные направления переработки ягодного жмыха в пищевые ингредиенты / Г. С. Волкова, Е. Н. Соколова, В. В. Ионов и др. // *Пищевая промышленность*. 2023. № 11. С. 35–39. doi: 10.52653/PPI.2023.11.11.008.
19. Valorization of Bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) Pomace by Enzyme-Assisted Extraction: Process Optimization and Comparison with Conventional Solid-Liquid Extraction / M. Syrpas, E. Valanciene, E. Augustiniene, et al. // *Antioxidants*. 2021. Vol. 10 (5). P. 773. doi: 10.3390/antiox10050773.
20. Enzyme-Assisted Extraction of Bioactive Compounds from Raspberry (*Rubus idaeus* L.) Pomace / N. Saad, F. Louvet, S. Tarrade, et al. // *Journal of Food Science*. 2019. V.84. P. 1371–1381. doi: 10.1111/1750-3841.14625.
21. Enzyme-assisted extraction and ultrafiltration of value-added compounds from sour cherry wine pomace / M. C. Roda-Serrat, C. Lundsfrýd, S. Rasmussen, et al. // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 74. P. 811–816. doi: 10.3303/CET1974136.
22. Chokeberry pomace valorization into food ingredients by enzyme-assisted extraction: Process optimization and product characterization / V. Kitryte, V. Kraujalienė, V. Šulniūtė, et al. // *Food and Bioprocess Technology*. 2017. Vol. 105. P. 36–50. doi: 10.1016/j.fbp.2017.06.001.
23. Шариков А. Ю., Степанов, В. И. Инструментальные методы исследования текстуры экструдированных продуктов // *Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов*. 2015. Т. 5. №. 34. С. 3–9.
24. An explorative study on the relationships between the quality traits of peanut varieties and their peanut butters / H. Yu, H. Liu, S. W. Erasmus, et al. // *LWT*. 2021. Vol. 151. P. 112068. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0023643821012214> (дата обращения: 01.03.2024). doi: 10.1016/j.lwt.2021.112068.
25. Денисенко Т. А., Вишникин 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. Т. 19. № 4. С. 373–380. doi: 10.15826/analitika.2015.19.4.012.

Поступила в редакцию 31.03.2024
После доработки 20.04.2024
Принята к публикации 07.05.2024