

Разработка экструдированных продуктов с добавлением гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи (ВНИИПБТ – филиал ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии», г. Москва, Российская Федерация

КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Мария Валентиновна Амелякина
E-mail: foodbiotech@ya.ru

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шариков, А.Ю., Соколова, Е.Н., Ионов, В.В., Амелякина, М.В., & Серб, Е.М. (2024). Разработка экструдированных продуктов с добавлением гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 32(4), 133-148. <https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.610>

ПОСТУПИЛА: 10.04.2024

ДОРАБОТАНА: 22.12.2024

ПРИНЯТА: 16.12.2024

ОПУБЛИКОВАНА: 27.12.2024

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-16-00100. <https://rscf.ru/project/22-16-00100/>



АННОТАЦИЯ

Введение: Разработка экструдированных специализированных профилактических продуктов предполагает введение в экструдруемую смесь значительного количества функциональных ингредиентов. Современной тенденцией в пищевой промышленности является стремление эффективно использовать вторичные ресурсы переработки плодово-ягодного сырья, как источников пищевых волокон, фенольных соединений, красителей, а также применять в качестве функциональных ингредиентов продукты биоконверсии. Значимое изменение рецептур экструдированных продуктов может негативно отразиться на структурно-механических, гидратационных характеристиках готовых продуктов.

Цель: Разработка сбалансированных по пищевой ценности экструдированных продуктов с добавлением гидролизата жмыха брусники, как источника пищевых волокон и фенольных соединений, и гидролизата дрожжевой биомассы как источника белка, а также исследование влияния состава смеси на физико-химические и структурно-механические характеристики экструдатов.

Материалы и методы: С использованием метода D-оптимального планирования с ограничениями составлены рецептуры смесей на основе рисовой крупы с добавлением до 8 % гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы, обеспечивающие получение смесей с отличительными признаками «высокое содержание пищевых волокон» и «источник белка». Смесей экструдировали при влажностемержении 15% и температуре 155–160 °С, далее определяли их физико-химические и технологические характеристики.

Результаты: Получены адекватные математические модели, описывающие влияние состава смеси на удельную механическую энергию, коэффициент расширения и насыпную плотность экструдатов, твердость, количество микроразломов, цветовые характеристики, содержание фенольных соединений. С добавлением гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы в рецептуры смесей до 8 % снижался удельный расход механической энергии с 0,214 до 0,163 кВт·ч/кг. Ухудшения структурно-механических свойств не происходило: твердость экструдатов снижалась с 15,8 до 6,2 Н, количество микроразломов, косвенного показателя пористости или хрусткости, возрастало с 6,7 до 11,8. Динамическая вязкость водных суспензий помолов экструдатов с гидролизатами, заваренными как каши быстрого приготовления, составляла 2,3...3,2 Па·с. Внесение гидролизата жмыха брусники значимым образом увеличило в экструдатах содержание фенольных соединений с 57,2 до 1258...1261 мкг/г, при этом отмечено значимое смещение цветовой хроматической составляющей a^* в область красного с 7,7 до 44.

Выводы: Использование гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы в рецептурах экструдированных продуктов позволяет получать продукты, готовые к употреблению, с высокой пищевой ценностью без ухудшения потребительских характеристик, которые могут применяться для специализированного диетического питания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

экструдированные продукты; функциональные ингредиенты; гидролизат жмыха брусники; гидролизат дрожжевой биомассы; пищевые волокна; фенольные соединения; структурно-механические свойства; физико-химические характеристики; специализированное питание; вторичные ресурсы переработки; экструдаты; D-оптимальное планирование

The Development of Composite Extruded Products with Hydrolysates of Lingonberry Pomace and Yeast Biomass

VNIIPBT – branch of Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russian Federation

Anton Yu. Sharikov, Elena N. Sokolova, Vladislav V. Ionov,
Maria V. Amelyakina, Elena M. Serba

CORRESPONDENCE:

Maria V. Amelyakina,
E-mail: foodbiotech@ya.ru

FOR CITATIONS:

Sharikov, A.Yu., Sokolova, E.N., Ionov, V.V., Amelyakina, M.V., & Serba, E.M. (2024). The development of composite extruded products with hydrolysates of lingonberry pomace and yeast biomass. *Storage and Processing of Farm Products*, 32(4), 133-148.
<https://doi.org/10.36107/spfp.2024.4.610>

RECEIVED: 10.04.2024

REVISED: 22.12.2024

ACCEPTED: 16.12.2024

PUBLISHED: 27.12.2024

DECLARATION OF COMPETING

INTEREST: none declared.

FUNDING:

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



ABSTRACT

Introduction: The development of extruded functional products involves the introduction of a significant amount of functional ingredients into the extruded mixture. Modern trends in the food industry are the effective utilization of by-products from processing fruit and berry raw materials as sources of dietary fiber, phenolic compounds, and the usage of bioconversion products as functional ingredients. Significant changes in the recipes of extruded products can negatively affect the structural, mechanical, hydration products characteristics.

Purpose: To develop balanced in nutritional value extruded products with the addition of lingonberry pomace hydrolysate as a source of dietary fiber and phenolic compounds, and yeast biomass hydrolysate as a source of protein, as well as to study the effect of the mixture composition on the physicochemical and structural and mechanical characteristics of the extrudates.

Materials and Methods: Using the D-optimal planning method with constraints, the recipes of mixtures based on broken rice with the addition of up to 8% of hydrolysates lingonberry pomace and yeast biomass were compiled. The mixtures were extruded at a moisture content of 15% and a temperature of 155–160 °C. Then physical, chemical, and technological characteristics of extrudates were determined.

Results: Adequate mathematical models describing the effect of the mixture composition on the specific mechanical energy, expansion coefficient and bulk density of extrudates, hardness, number of microfractures, color characteristics, and content of phenolic compounds were obtained. With the addition of hydrolysates of lingonberry pomace and yeast biomass to the mixture recipes up to 8%, the specific mechanical energy decreased from 0.214 to 0.163 kW-h/kg. There was no deterioration in the structural and mechanical properties: the hardness of the extrudates decreased from 15.8 to 6.2 N, the number of microfractures as indirect indicator of porosity or crispness increased from 6.7 to 11.8. The dynamic viscosity of aqueous suspensions of extrudate grindings with hydrolysates brewed as instant porridges was 2.3...3.2 Pa s. The introduction of lingonberry pomace hydrolysate significantly increased the content of phenolic compounds in the extrudates from 57.2 to 1258...1261 µg/g, while a significant shift in the color chromatic component a^* to the red color from 7.7 to 44 was noted.

Conclusion: The use of hydrolysates of lingonberry pomace and yeast biomass in the formulations of extruded products allows to obtain ready-to-eat products with high nutritional value without deterioration of consumer characteristics, which can be used for specialized dietary nutrition.

KEYWORDS

extruded products; functional ingredients; lingonberry pomace hydrolysate; yeast biomass hydrolysate; dietary fiber; phenolic compounds; structural-mechanical properties; physicochemical characteristics; specialized nutrition; secondary processing resources; extrudates; D-optimal design

ВВЕДЕНИЕ

Одним из следствий урбанизации общества является переход от традиционных рациона и режима приемов пищи к увеличивающейся доле перекусов, и соответственно, потреблению пищевых продуктов, готовых к употреблению, снеков и полуфабрикатов. Основу рецептур снеков и продуктов, готовых к употреблению, составляет крахмалсодержащее сырье, претерпевающее значительные физико-химические и структурные изменения во время обработки. Технологическая модификация крахмала значимо сказывается на гликемическом индексе такой продукции и при регулярном потреблении в сочетании с малоподвижным образом жизни оказывает влияние на рост алиментарных заболеваний, ожирения, диабета (Brennan et al., 2013; Krawęcka et al., 2019).

Решение проблемы поиска баланса между удобством пищевого продукта для потребления в современном городском ритме жизни и его высокой пищевой ценностью являются инновационные пищевые технологии, включающие эффективные способы переработки сырья и подходы к составлению рецептур, направленные на снижение доли компонентов, оказывающих неблагоприятное действие на здоровье, и увеличение содержания ингредиентов — источников микронутриентов, биологически активных веществ (Тутельян, 2021; Gat & Ananthanarayan, 2015). Большое количество научных исследований в этом направлении проводится с использованием технологии экструзии, позволяющей с минимальными производственными затратами перерабатывать многокомпонентные смеси сельскохозяйственного сырья, варьируя в широких пределах различные режимные параметры экструзии, температуры, давления, сдвиговых деформаций (Brennan et al., 2013; Tas & Shah, 2021; Vishwakarma et al., 2022; Delić et al., 2023). В результате возможно получение экструдированных продуктов с различными физико-химическими, структурно-механическими, гидратационными и органолептическими характеристиками.

Важным аспектом в разработке инновационных экструдированных снеков и других продуктов, готовых к употреблению, является выбор источников биологически активных веществ. Одним из трендов, затрагивающих не только экструзионные технологии, является использование вто-

ричных ресурсов перерабатывающих отраслей в производстве продуктов с высокой добавленной стоимостью (Michalska-Ciechanowska, 2019; Grasso, 2020). В отношении экструдированных продуктов в качестве ингредиентной базы особый акцент делается на жмыхах плодово-ягодного сырья как недорогих источниках пищевых волокон, фенольных соединений, антоцианов, органических кислот и других биологически активных веществ (Волкова и соавт., 2023; Iqbal et al., 2021).

Предварительная ферментативная обработка жмыхов в сочетании со специальными гидротермомеханическими режимами экструзии позволяет значительно повысить в экструдатах содержание фенольных соединений даже без изменения рецептуры смеси (Шариков и соавт., 2024а). Не менее важным при разработке сбалансированного экструдированного продукта является повышение содержания белка, перспективным источником которого является дрожжевая биомасса и ее гидролизаты (Серба, 2022; Jach, 2022). Добавление 10% гидролизата дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* 985-T при экструдировании пшеничной муки не оказало значимого влияния на процесс экструзии, но повысило содержание связанных и свободных аминокислот на 14,2% и 412%, соответственно (Шариков, 2023).

Целью текущего исследования являлась разработка сбалансированных по пищевой ценности экструдированных продуктов с добавлением гидролизата жмыха брусники, как источника пищевых волокон и фенольных соединений, и гидролизата дрожжевой биомассы как источника белка, а также исследование влияния состава смеси на физико-химические и структурно-механические характеристики экструдатов.

Выбор брусники *Vaccinium vitis-idaea* L. как исходного сырья, вторичным продуктом переработки которого являлся гидролизуемый жмых, обусловлен химическим составом ягоды, включающим широкий ряд фенольных соединений, антоцианов, лейкоантоцианов, катехинов, флавонолов и фенолокислот. Общее содержание полифенольных соединений в ягодах брусники варьируется от 500 до 1910 мг%, что определяет ее высокий антиоксидантный, противовирусный, противомикробный, противовоспалительный и нейропротекторный потенциал. (Лютикова & Ботиров, 2015; Kitryté, 2020).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объекты исследования

Объектами исследования являлись смеси крупы рисовой дробленой, гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы и экструдаты, полученные из них.

Материалы

При производстве экструдированных продуктов использовали крупу рисовую дробленную (ГОСТ 6292–93¹), бруснику замороженную (ГОСТ 33823–2016²), биомассу промышленной расы дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* 985-T, ферментный препарат Брюзайм ВGX (Genincor), протеазу Протоферм FP (Novozymes), Пектиназу Г20Х (ООО «Гладера Рус») на основе микромицета *Aspergillus foetidus*, Целловиридин Г20Х (ООО «Сиббиофарм») на основе штамма *Trichoderma viride*; Нейтразу Г18Х (ООО «Пищепромпродукт») на основе штамма *Bacillus subtilis*, Липазу Г20Х (ООО «Фермент-Трейд») на основе штамма *Aspergillus niger*.

Оборудование

Анализатор влажности ML-50 (A&D, Япония), анализатор текстуры СТ3 (Brookfield, USA), анализатор цвета CS-10 (Hangzhou CHNSpec Technology, Китай), вискозиметр SV-10 (A&D, Япония), спектрофотометр Specord 50 Analytic Yena (Германия), экструдер Werner&Phleiderer Continua 37 (Германия).

Методы и процедура исследования

Гидролизат жмыха брусники получали после отжима сока путем ферментативной обработки жмыха комплексом гидролаз, включающим пектиназу в дозировке 0,25 ед. ПкС/г жмыха, целлюлазу — 0,75 ед. ЦС/г, протеазу — 0,05 ед. ПС/г и липазу — 0,05 ед. ЛС/г. Водно-ферментативную обработку проводили при соотношении субстрат: вода 1:2 при температу-

ре 50 °С, pH 4,8 в течении 6 часов. Далее гидролизат жмыха высушивали при температуре 65 °С.

Гидролизат дрожжевой биомассы получали путем ее ферментативного гидролиза при температуре 48–50 °С в течение 6 ч с использованием эндогенных ферментов β-глюканазного (Брюзайм ВGX) и протеолитического (Протоферм FP) действия. Подробное описание условий культивирования дрожжевой биомассы представлено ранее (Серба и соавт., 2022). Полученный гидролизат высушивали распылительной сушкой и использовали как ингредиент для обогащения экструдата белком.

В качестве рецептурной основы экструдированного продукта использовали дробленную рисовую крупу — отход крупяного производства. Рисовый крахмал в процессе комплексного гидротермомеханического воздействия и перепада давлений на выходе из фильер экструзии формировал пенообразную хрустящую структуру. Рецептуры смесей составлялись методом D-оптимального планирования с ограничениями (Carneiro et al., 2020) с использованием программы Design-Expert v.6 (Stat-Easy Inc., США). Ограничения были наложены на содержание гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы — не более 8%. Область факторного планирования была выбрана таким образом, чтобы максимальные уровни внесения гидролизатов жмыха и дрожжевой биомассы обеспечивали получение экструдатов с отличительными признаками «высокое содержание пищевых волокон» (более 6 г/100 г продукции) и «источник белка» (белок обеспечивает более 12% энергетической ценности продукта) в соответствии с требованиями ТР ТС 022/2011³. План эксперимента и расчетные характеристики пищевой ценности смесей представлены в Таблице 1.

Смеси экструдировались с использованием экструдера Werner&Phleiderer Continua 37 с диаметром шнека 37 мм и соотношением диаметра к длине шнека 1:27 и установленной фильерой с двумя отверстиями прямоугольного сечения шириной 12 и высотой 1,5 мм. Производительность экструдера

¹ ГОСТ 6292–93. (2010). Крупа рисовая. Технические условия. М.: Стандартинформ.

² ГОСТ 33823–2016. (2016). Фрукты быстрозамороженные. Общие технические условия. М.: Стандартинформ.

³ ТР ТС 022/2011 (2011). Пищевая продукция в части ее маркировки. Совет Евразийской экономической комиссии. <http://www.tsouz.ru/db/techreglam/Documents/TrTsPishevkaMarkirovka.pdf>

Таблица 1

Рецептуры экструдированных продуктов с гидролизатами жмыха брусники и дрожжевой биомассы

Table 1*Formulations of Extruded Products with Lingonberry Pomace Hydrolysates and Yeast Biomass*

№	Крупа рисовая дробленая, %	Гидролизат жмыха брусники, %	Гидролизат дрожжевой биомассы, %	Содержание белка, г/100 г	Вклад белка в энергетическую ценность, %	Содержание пищевых волокон, %
1	84,0	8,0	8,0	10,8	13,3	8,8
2	92,0	8,0	0	7,2	8,8	8,1
3	100,0	0	0	7,0	8,3	3,0
4	100,0	0	0	7,0	8,3	3,0
5	89,0	8,0	3,0	8,5	10,5	8,4
6	89,1	5,1	5,8	9,7	12,0	6,8
7	96,0	4,0	0	7,1	8,5	5,6
8	92,0	5,0	3,0	8,5	10,3	6,5
9	97,0	1,0	2,0	7,9	9,4	3,8
10	92,0	0	8,0	10,6	12,6	3,7
11	94,1	1,9	4,0	8,8	10,5	4,6
12	84,0	8,0	8,0	10,8	13,3	8,8
13	92,0	0	8,0	10,6	12,6	3,7
14	86,5	8,0	5,5	9,6	12,0	8,6

составляла 10 кг/час, влагосодержание доводилось до 15%, температура 155–160 °С.

В качестве показателя размеров экструдатов рассчитывали коэффициент расширения как соотношение произведений ширины и толщины экструдатов и соответствующей площади сечения формирующих отверстий фильеры. Насыпную плотность измеряли на помолках экструдатов в мерном цилиндре объемом 1 дм³ и диаметром 10 см.

Изменение структурно-механических свойств определяли с помощью анализатора Brookfield CT3 Texture Analyser, оснащенного металлическим цилиндрическим зондом диаметром 3 мм при глубине и скорости прокола 3 мм и 0,5 мм/с, соответственно. В качестве параметров текстуры регистрировали твердость образца и количество микроразломов как характеристику пористости.

Цветовые характеристики экструдата определяли колориметрическим методом с использованием анализатора CS-10 (Hangzhou CHNSpec Technology, Китай) в системе CIE Lab, где L — характеристика светлоты от 0 до 100, а — хроматическая со-

ставляющая в диапазоне от зеленого до красного, b — хроматическая составляющая в диапазоне от синего до желтого (Yu et al., 2021). Хроматические составляющие ограничены диапазоном значений –100/+100.

Измерение вязкости суспензий экструдатов проводили с целью характеристики реологических свойств при использовании экструдатов в качестве основы для инстант-продуктов, например, каш быстрого приготовления. Для имитации доведения инстант-продукта до готовности, помол экструдата смешивали с водой температурой 95–98 °С в соотношении 1:3 при постоянном перемешивании. После перемешивания температуру образца снижали до 24 °С и измеряли динамическую вязкость вискозиметром SV-10 (AND, Япония).

Содержание фенольных соединений в экструдатах осуществляли спектофотометрическим методом с использованием хлорида алюминия, 18-молибдодифосфата и реактива Фолина-Чокальтеу (Денисенко и соавт., 2015) на спектрофотометре Specord 50 Analytic Yena при длине волны 720 нм.

Анализ данных

Математические модели зависимости режимных параметров экструзии и физико-химических показателей экструдатов получали с использованием пакета программ Design-Expert v.6 (Stat-Easy Inc., США). С использованием данного программного обеспечения строились графические интерпретации моделей в виде линий равного уровня. Значимость полученных моделей оценивалась методом однофакторного дисперсионного анализа при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Получение экструдатов и расчет математических моделей удельной механической энергии экструзии и физико-химических показателей экструдатов

На предварительном этапе работы получали в виде высушенных ингредиентов гидролизаты жмыха

брусники и дрожжевой биомассы. Затем составляли смеси для экструдирования в соответствии с D-оптимальным планом с ограничениями, проводили экструдирование, оценивали структурно-механические, реологические, цветовые характеристики экструдатов, содержание фенольных соединений. Выбор ограничительных диапазонов содержания гидролизатов в смесях от 0 до 8% обусловлен возможностью получения экструдатов с различными отличительными признаками, например, высокое содержание пищевых волокон, источник белка. В соответствии с Таблицей 1 обоими признаками (содержание пищевых волокон выше 6 г/100 г, вклад белка в энергетическую ценность более 12%) обладают образцы № 1, 6, 12. Как источник белка и источник пищевых волокон идентифицируются образцы №10, 13, 14. Образцы только с высоким содержанием пищевых волокон — № 2, 5, 8.

На Рисунке 1 представлены фотографии экструдатов, совмещенные с планом эксперимента на смесях.

Рисунок 1

Экструдированные продукты с гидролизатами жмыха брусники и дрожжевой биомассы

Figure 1

Extruded Products with Lingonberry Pomace Hydrolysates and Yeast Biomass



Примечание. (А;В;С) – содержание компонентов в смеси в %, где А – крупа рисовая, В- гидролизат жмыха брусники, С – гидролизат дрожжевой биомассы.

Note. (A; B; C) – component content in the mixture in %, where A is broken rice, B is lingonberry pomace hydrolysate, and C is yeast biomass hydrolysate.

Таблица 2

Математические модели удельной механической энергии экструзии и физико-химические показатели экструдатов

Table 2

Mathematical Models of Extrusion Specific Mechanical Energy and Physicochemical Parameters of Extrudates

Показатель	Тип модели	Уравнение	p-значение
Удельная механическая энергия, кВт·час/кг	Линейная с взаимодействием	$0,214 \cdot A + 0,44 \cdot B + 3,4 \cdot C - 0,7 \cdot A \cdot B - 3,7 \cdot A \cdot C - 4,39 \cdot B \cdot C$	0,0049
Коэффициент расширения	Линейная	$10,3 \cdot A - 24 \cdot B + 18,3 \cdot C$	0,004
Насыпная плотность, г/дм ³	Линейная	$870 \cdot A + 40,6 \cdot B + 1194,9 \cdot C$	0,0011
Твердость, Н	Линейная	$15,8 \cdot A - 60,9 \cdot B - 27,5 \cdot C$	0,0354
Количество микроразломов	Линейная	$8,0 \cdot A + 48,4 \cdot B + 15,4 \cdot C$	0,0002
<i>L</i>	Линейная	$58 \cdot A - 157,9 \cdot B - 22,3 \cdot C$	0,0130
<i>a</i>	Линейная	$13,8 \cdot A + 260 \cdot B + 84,2 \cdot C$	0,0026
<i>b</i>	Линейная	$17,1 \cdot A + 142 \cdot B + 145,8 \cdot C$	0,0001<
Фенольные соединения, мкг/г	Линейная с взаимодействием	$156,6 \cdot A - 86707 \cdot B - 12481 \cdot C + 108346 \cdot A \cdot B + 12991,8 \cdot A \cdot C + 114018 \cdot B \cdot C$	0,0002
Вязкость, Па·с	Линейная с взаимодействием	$2,7 A + 272,1 \cdot B - 442,9 \cdot C - 307,2 \cdot A \cdot B + 485,4 \cdot A \cdot C + 308,9 \cdot B \cdot C$	0,0286

Все варианты смесей экструдировались при стабильных режимах при температуре 150–160 °С, давлении 2,4–3,0 МПа.

В Таблице 2 представлены полученные с использованием пакета программ адекватные математические модели ($p < 0,05$) параметров удельной механической энергии экструзии как комплексного показателя воздействия сдвиговых деформаций на сырье и физико-химических показателей экструдатов. Значения управляющих факторов — содержание компонентов смеси представлены в виде десятичных дробей и варьируются в диапазонах: крупа рисовая 0,84...1,0, гидролизат жмыха брусники 0...0,08, гидролизат дрожжевой биомассы 0...0,08.

Влияние состава смеси на изменение удельной механической энергии экструзии

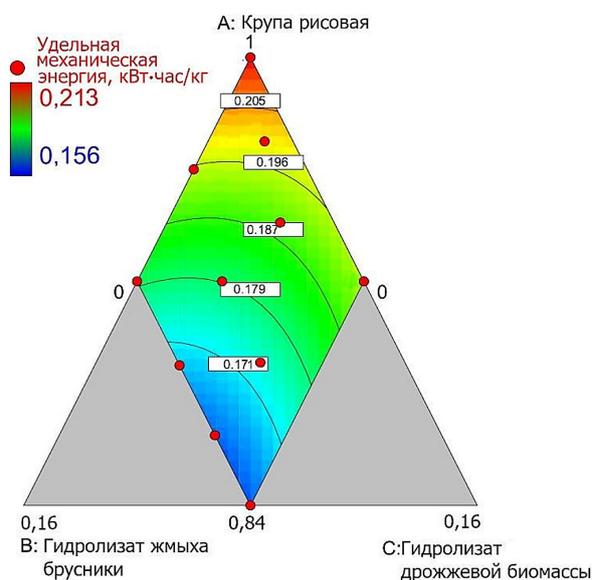
Показателем механического воздействия сил сдвиговых деформаций в процессе экструдирования является удельная механическая энергия. Графическая интерпретация математической модели удельной механической энергии, изменения которой были обусловлены варьированием содержания компонентов в смеси, представлена на Рисунке 2 в виде линий равного уровня.

Рисунок 2

Изменение удельной механической энергии экструзии

Figure 2

Changes in Specific Mechanical Energy of Extrusion



Примечание. (A;B;C) — содержание компонентов в смеси в размерности десятичных дробей, где А — крупа рисовая, В- гидролизат жмыха брусники, С — гидролизат дрожжевой биомассы

Note. (A; B; C) — content of components in a mixture in decimal fractions, where A is broken rice, B is lingonberry pomace hydrolysate, and C is yeast biomass hydrolysate.

Анализ модели и характер линий равного уровня показывают, что с введением в смесь гидролизатов удельная механическая энергия снижается и при их максимальном содержании изменяется с 0,214 до 0,163 кВт·час/кг. Интенсивность снижения смещена в сторону гидролизатов жмыха брусники. При максимальной дозировке жмыха брусники без добавления гидролизата дрожжевой биомассы удельная механическая энергия составляла 0,181 кВт·час/кг, в обратной ситуации — 0,197 кВт·час/кг.

Влияние состава смеси на структурно-механические показатели экструдатов

Варьирование дозировки гидролизатов значительно влияет на коэффициент расширения экструдатов и насыпную плотность их помолов, графики изменения которых представлены на Рисунке 3.

Максимальный коэффициент расширения соответствует максимальной дозировке гидролизата дрожжевой биомассы без внесения гидролизата жмыха и составил в опыте 11,5–11,7. При макси-

мальных дозировках гидролизатов коэффициент расширения снижается до значения 8,2. Насыпная плотность помолов также определяется изменением дозировки высушенных гидролизатов, внесение гидролизата жмыха брусники снижает насыпную плотность до 803 г/дм³, внесение гидролизата дрожжей увеличивает до 896 г/дм³, насыпная плотность экструдата из основного ингредиента, дробленой рисовой крупы, 870 г/дм³. Внесение обоих гидролизатов в экструдированную смесь частично компенсирует обе тенденции и при их максимальной дозировке насыпная плотность помола составила 830 г/дм³.

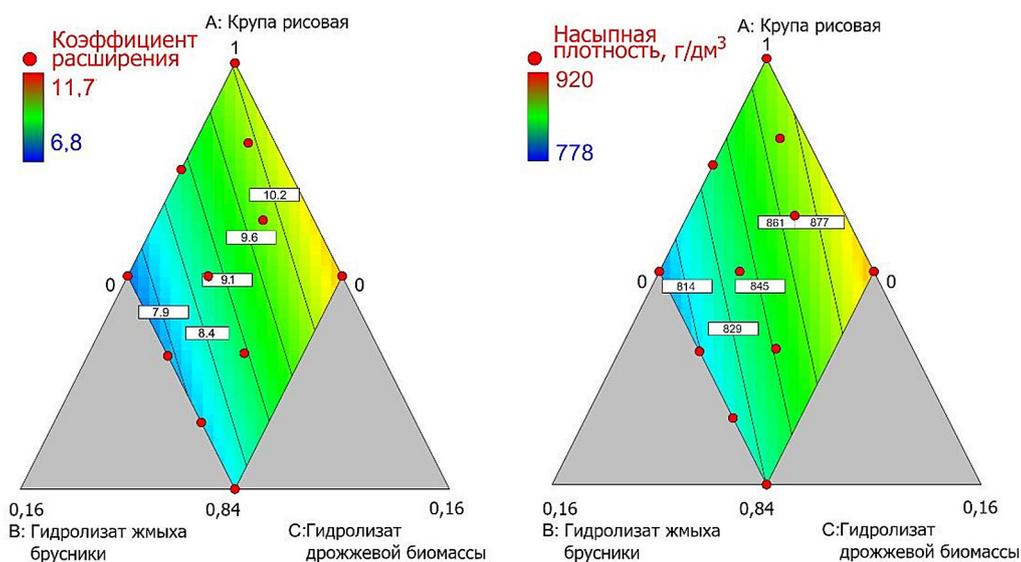
На Рисунке 4 представлены графики изменения показателей текстуры экструдатов. Твердость экструдата из смеси со 100% рисовой крупы составила 15,8 Н, добавление гидролизатов снижает этот параметр до 6,2 Н. Влияние содержания гидролизата жмыха брусники в экструдированной смеси для снижения твердости более значимо. При внесении только одного из гидролизатов в максимальной дозировке гидролизата жмыха брусники соответствует значение твердости 9,7 Н, гидролизата

Рисунок 3

Изменение коэффициента расширения и насыпной плотности помола экструдата

Figure 3

Changes in the Expansion index and Bulk Density of Ground Extrudates



Примечание. (А;В;С) — содержание компонентов в смеси в размерности десятичных дробей, где А — крупа рисовая, В- гидролизат жмыха брусники, С — гидролизат дрожжевой биомассы

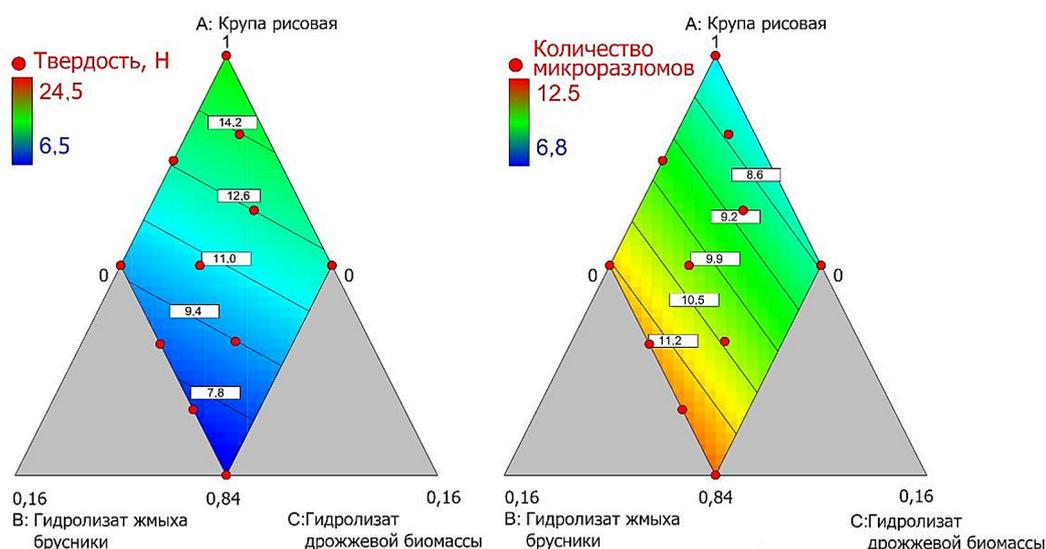
Note. (A; B; C) — content of components in a mixture in decimal fractions, where A is broken rice, B is lingonberry pomace hydrolysate, and C is yeast biomass hydrolysate.

Рисунок 4

Изменение показателей текстуры экструдатов

Figure 4

Changes in the Texture Parameters of Extrudates



Примечание. (А;В;С) – содержание компонентов в смеси в размерности десятичных дробей, где А – крупа рисовая, В- гидролизат жмыха брусники, С – гидролизат дрожжевой биомассы

Note. (A; B; C) – content of components in a mixture in decimal fractions, where A is broken rice, B is lingonberry pomace hydrolysate, and C is yeast biomass hydrolysate.

дрожжевой биомассы – 12,3 Н. Количество микро-разломов как комплексный показатель пористости и хрусткости экструдированных продуктов также зависит от состава смеси. Увеличение содержания гидролизата жмыха брусники наряду со снижением твердости значительно увеличивает количество микро-разломов с 6,7 до 10,6, с добавлением гидролизата дрожжевой биомассы происходит повышение до 11,8.

Влияние состава смеси на цветовые характеристики экструдатов

Тенденции изменения цветовых характеристик экструдатов представлены на Рисунке 5. Увеличение содержания гидролизатов снижает показатель светлоты с 58 до 34, при этом в большей степени оказывает влияние добавление гидролизата жмыха. Повышение содержания в рецептуре смеси этого ингредиента также значительно увеличивает значение хроматической составляющей a^* в область красного цвета, с 13,8 до 32,4, а с добавлением гидролизата дрожжевой биомассы отмечается рост до 39,1.

На изменение хроматической составляющей b^* оба гидролизата оказывают практически одинаковое влияние, что подтверждается близостью значений коэффициентов содержания гидролизатов в соответствующей линейной модели. Хроматическая составляющая b^* с добавлением гидролизатов увеличивается в сторону желтого цвета с 17,1 до 37,4. Изменение цвета в область красного с увеличением содержания гидролизата жмыха брусники обусловлено повышением концентрации антоцианов брусники. Зависимость содержания фенольных соединений в экструдатах от соотношения компонентов в смеси представлена на Рисунке 6.

Влияние состава смеси на содержание фенольных соединений в экструдатах

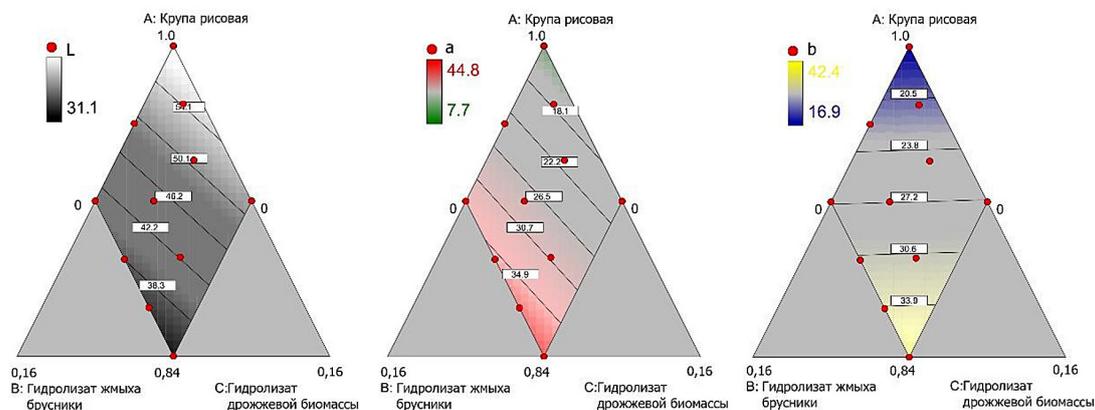
Рост содержания фенольных соединений с увеличением внесения гидролизата жмыха брусники до 8% в смеси происходит с 57,2 мкг/г экструдата до 1155,6...1264,2 мкг/г. Изменение содержания гидролизата дрожжевой биомассы на количество фенольных соединений в экструдате значимого влияния не оказывает.

Рисунок 5

Изменение цветных характеристик экстрактов

Figure 5

Changes in the Color Characteristics of Extrudates



Примечание. (A;B;C) – содержание компонентов в смеси в размерности десятичных дробей, где А – крупа рисовая, В- гидролизат жмыха брусники, С – гидролизат дрожжевой биомассы

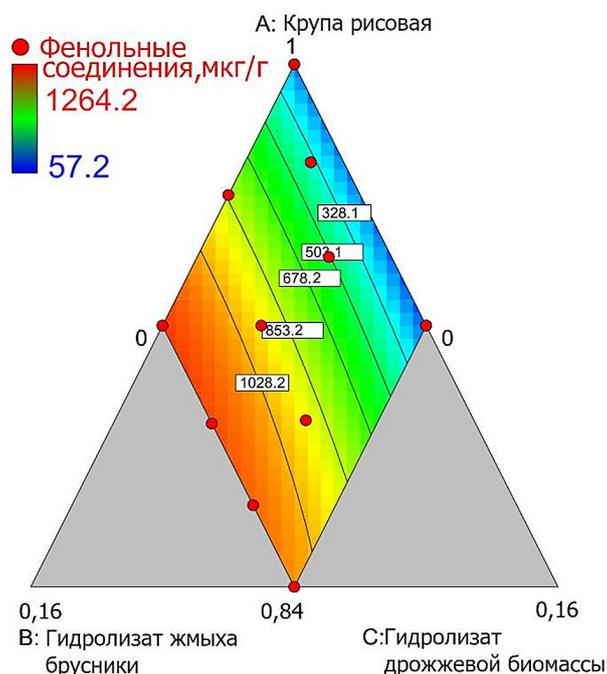
Note. (A; B; C) – content of components in a mixture in decimal fractions, where A is broken rice, B is lingonberry pomace hydrolysate, and C is yeast biomass hydrolysate.

Рисунок 6

Изменение содержания фенольных соединений

Figure 6

Changes in the Phenolic Compounds of Extrudates



Примечание. (A;B;C) – содержание компонентов в смеси в размерности десятичных дробей, где А – крупа рисовая, В- гидролизат жмыха брусники, С – гидролизат дрожжевой биомассы

Note. (A; B; C) – content of components in a mixture in decimal fractions, where A is broken rice, B is lingonberry pomace hydrolysate, and C is yeast biomass hydrolysate.

Влияние состава смеси на динамическую вязкость суспензий экструдатов

Важным показателем экструдатов, помолы, которые могут использоваться как ингредиент при составлении рецептов каш быстрого приготовления, является динамическая вязкость суспензий, моделирующих заваривание подобных продуктов. Характер влияния компонентов рецептуры на изменение динамической вязкости, представленный на Рисунке 7, имеет сложный характер и определяется, по-видимому, реологическими и гидратирующими характеристиками биополимеров, входящих в их состав. Минимальная область вязкости отмечена для экструдатов с добавлением гидролизата жмыха брусники с минимальным или без добавле-

ния гидролизата дрожжевой биомассы и составляет 1,6–2,1 Па·с. Области высокой вязкости характерны для увеличения содержания гидролизатов дрожжевой биомассы, в том числе и при наличии гидролизата жмыха в рецептуре. Максимальное значение вязкости составляло 3,22 Па·с.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В литературе данные по использованию гидролизатов в технологии экструзии практически не представлены, и комплексного знания о тенденциях изменения технологических, структурно-механических свойств экструдатов с такими компонентами не сформировано. Тем не менее, результаты нашего исследования с использованием гидролизатов ягодного жмыха и дрожжевой биомассы согласуются с выводами предыдущих исследований, в которых используются непрогидролизованые субстраты (Lai et al., 1985; Kumar et al., 2013), Kaisangsri et al., 2015; Høglund et al., 2018; Wang et al., 2019; Smid et al., 2021).

При подготовке эксперимента были проведены предварительные тесты, позволившие определить рабочие диапазоны внесения функциональных ингредиентов. И уже при практической реализации D-оптимального плана было установлено, что все смеси экструдировались стабильно, экструдаты имели высокопористую текстуру, хорошо растворялись в воде, то есть обладали ожидаемыми характеристиками.

Выбор ингредиентов в нашем исследовании был обусловлен поставленной целью — получением продуктов с высоким содержанием фенольных соединений, пищевых волокон и белка в легкоусвояемой форме. Содержание в экструдированной смеси более 5% гидролизата жмыха брусники обеспечивало содержание пищевых волокон в экструдате более 6 г/100 г, что является отличительным признаком продукта с высоким содержанием пищевых волокон. Дополнительное внесение гидролизата дрожжевой биомассы в смесь позволяет получить такое содержание белка, вклад которого в энергетическую ценность составляет 12%, что соответствует отличительному признаку «источник белка».

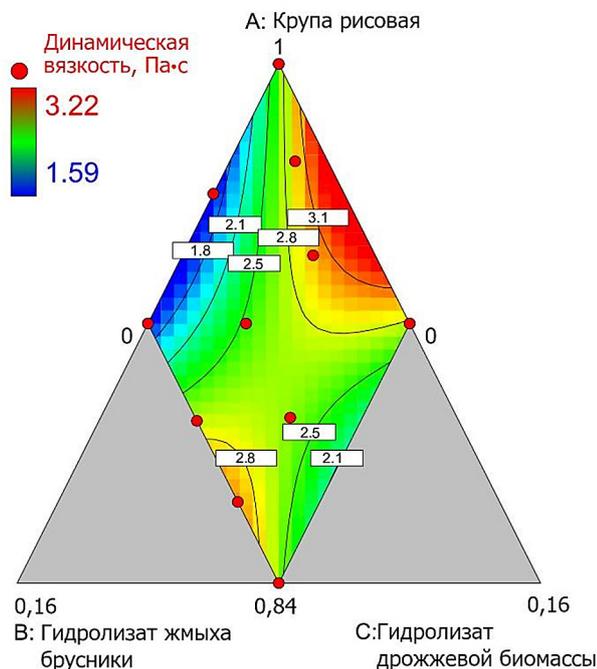
Верхние пределы внесения функциональных ингредиентов 8% являются достаточными для обе-

Рисунок 7

Изменение динамической вязкости суспензий с помолками экструдатов

Figure 7

Change in Dynamic Viscosity of Suspensions of Ground Extrudates



Примечание. (A;B;C) — содержание компонентов в смеси в размерности десятичных дробей, где А — крупа рисовая, В- гидролизат жмыха брусники, С — гидролизат дрожжевой биомассы

Note. (A; B; C) — content of components in a mixture in decimal fractions, where A is broken rice, B is lingonberry pomace hydrolysate, and C is yeast biomass hydrolysate.

спечения высокой пищевой ценности и функциональности экструдатов, но важно отметить естественное ограничение на дальнейшее увеличение их содержания в смеси для достижения отличительного признака «высокое содержание белка» (более 20% вклада в энергетическую ценность). Прежде всего это ограничение относится к гидролизату дрожжевой биомассы из-за отрицательного влияния на органолептические характеристики экструдатов при высокой норме закладки ингредиента более 10%.

В контексте физико-химических свойств вносимые в смесь функциональные ингредиенты являются наполнителями дисперсной фазы и в отличие от структуроформирующего крахмалсодержащего сырья могли нести риски нестабильного процесса экструзии и получения продуктов, не соответствующих признакам готовых к употреблению.

Результаты экспериментальной работы показали, что несмотря на различия химического состава гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы их внесение в смесь и увеличение содержания снижали значение удельной механической энергии, которая является комплексным системным показателем экструзии, определяющим степень механического воздействия на сырье. Повышение значений удельной механической энергии в процессе экструзии положительно коррелирует с повышением степени клейстеризации крахмала, денатурации белка (Pismag et al., 2024), а также затратами электрической энергии на переработку. В нашем опыте ее снижение как при раздельном добавлении ингредиентов, так и совместно - с 0,214 до 0,163 кВт·час/кг объясняется снижением сил трения в камере экструдера, т.е. высушенные гидролизаты обеспечивают эффект смазки между частицами смеси и шнековыми органами при экструдировании. Это согласуется с результатами аналогичных исследований: при добавлении гидролизата дрожжевой биомассы в обойную пшеничную муку (Шариков и соавт., 2023), при переработке смесей зернового сырья и высушенного жмыха черники (Hoglund et al., 2018).

Полученные экструдаты с функциональными ингредиентами в составе являются основой для специализированных продуктов питания различного типа: снеков, диетических хлебцев, каш быстрого приготовления. Каждому виду продукта

в аспекте потребительских свойств предъявляются специфические требования в отношении структурно-механических и реологических характеристик. Особенно это актуально для специальных целевых аудиторий потребителей. Например, для геродиетического питания продукты должны обладать меньшей твердостью

Выбранные уровни внесения функциональных ингредиентов в виде гидролизатов не оказали негативного влияния на структурно-механические свойства. С увеличением содержания обоих гидролизатов показатель твердости снизился с 15,8 до 6,2 Н. Аналогичные тенденции снижения твердости установлены в исследованиях по добавлению белкового концентрата дрожжей в смесь с пшеничным крахмалом (Lai et al., 1985), высушенного жмыха аронии черноплодной (Smid et al., 2021), жмыха моркови (Kaisangsri et al., 2015). При этом отмечено увеличение количества микроразломов при проколе, что является характеристикой пористости или хрусткости продукта. Характер полученных математических моделей и анализ их графического представления показывают, что более значимое влияние на структурно-механические свойства экструдатов оказывает содержание гидролизата жмыха брусники, основного источника пищевых волокон в смеси. В отношении роста количества микроразломов повышение пористости объясняется функцией нерастворимых частичек гидролизатов, в основном пищевых волокон, являющихся дисперсной фазой и центрами взрывного парообразования на выходе стренга экструдата из камеры экструдера под давлением (Robin et al., 2012; Wang et al., 2019). Соответственно, с увеличением количества таких центров поры распределяются в объеме экструдата более равномерно и в большем количестве, что и может быть причиной снижения твердости экструдата (Kumar et al., 2013). В эксперименте отмечено, что рост количества пищевых волокон через внесение гидролизата жмыха брусники снижает коэффициент расширения. Это согласуется с ранее полученными результатами (Wang et al., 2019; Smid et al., 2021). Установлено, что коэффициент расширения положительно коррелирует с увеличением содержания дрожжевого гидролизата. Максимальные значения коэффициента расширения 11,5–11,7 соответствуют максимальной дозировке гидролизата дрожжевой биомассы без внесения гидролизата жмыха брусники.

При использовании помолов экструдатов в качестве основы для смесей каш быстрого приготовления важным показателем является динамическая вязкость их суспензий, как показатель консистенции, определяющий восприятие текстуры каш, интенсивность их вкуса (Mburu et al., 2011). Ориентиром по динамической вязкости для полужидких продуктов, детских каш является диапазон 2,5...3,0 Па·с (Akande et al., 2017). Значения вязкости коммерческих образцов каш быстрого приготовления, приобретенных в торговых сетях, находятся в еще более широком диапазоне 0,49–6,9 Па·с (Шариков и др., 2024b). В результате заваривания горячей водой помолов экструдатов с гидролизатами жмыха брусники и дрожжевой биомассы в качестве имитации приготовления каш в бытовых условиях были получены суспензии с вязкостью 2,3...3,2 Па·с, что практически совпадает с рекомендациями к детским кашам, и близко к средним значениям вязкости коммерческих каш.

Сохранность фенольных соединений при экструдировании растительного сырья определяется множеством факторов: типом сырья, конструктивными особенностями экструдеров и режимами процесса переработки (Šárka et al., 2021). Гидротермомеханические режимы экструзии могут вызывать потери антиоксидантов (Mironeasa et al., 2023). Предварительный ферментативный гидролиз жмыхов перед их экструзией в составе смесей с крахмалсодержащим сырьем влияет на содержание фенольных соединений в экструдатах. Биокаталитическая обработка способствует разрушению матрикса клеточной стенки и высокомолекулярных сложных фенолов, этот эффект усиливается экструзией при высоких температурах, и в результате экстрагируемость фенольных соединений значимо повышается. Варьирование режимами экструзии показало увеличение содержания фенольных соединений с 241,1 до 631,5 мг/кг экструдата с 5% добавлением гидролизата жмыха аронии черноплодной (Шариков и др., 2024a). В условиях нашего эксперимента внесение гидролизата дрожжевой биомассы незначительно повышало содержание фенольных соединений с 57...61 мкг/г до 85...101 мкг/г экструдата. Внесение гидролизата жмыха брусники в количестве до 8% кратно увеличивало концентрацию фенольных соединений до 1258...1261 мкг/г. Сохранность и увеличение со-

держания фенольных соединений с повышением содержания гидролизата жмыха брусники коррелирует со смещением цветовой хроматической составляющей a^* в область красного цвета с 13,8 до 32,4, что объясняется повышением концентрации антоцианов брусники в экструдатах. Необходимо отметить, что в нашей работе приведена общая оценка содержания фенольных соединений без изучения изменения их качественного состава. Но поскольку состав экструдированной смеси влияет на режимы экструзии, которые в свою очередь определяют степень термомеханического воздействия на пищевые вещества, логичным продолжением исследования в будущем мог бы стать анализ влияния параметров процесса на качественный и количественный состав фенольных соединений в экструдатах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы использования в технологии экструзии функциональных пищевых ингредиентов в виде гидролизатов остаются мало изученными. Проведенные исследования подтвердили гипотезу о возможности разработки специализированных диетических продуктов экструзионной технологии с внесением в рецептуры в качестве функциональных ингредиентов гидролизатов ягодных жмыхов и дрожжевой биомассы до 8% без ухудшения их технологических и потребительских характеристик. При этом использование гидролизатов обеспечивает получение экструдатов, соответствующих требованиям к специализированным диетическим продуктам с высоким содержанием пищевых волокон, с высоким содержанием фенольных соединений⁴.

Полученные математические модели изменения физико-химических и технологических показателей экструдатов в зависимости от содержания в рецептуре гидролизатов жмыха брусники и дрожжевой биомассы позволяют моделировать экструдированные продукты с заданными пищевой ценностью и структурно-механическими, гидратационными характеристиками. Установленные закономерности могут послужить методологической основой для разработки специализированных продуктов, готовых к употреблению, с добавлением вкусо-ароматических компонентов.

⁴ Порядок проведения исследований эффективности специализированной диетической лечебной и диетической профилактической пищевой продукции (Методические указания). 2016. <https://mosgorzdrav.ru/ru-RU/document/default/download/304.html>

АВТОРСКИЙ ВКЛАД

Антон Юрьевич Шариков: концептуализация; разработка методологии исследования; формальный анализ; создание рукописи и её редактирование.

Елена Николаевна Соколова: проведение исследования; верификация данных.

Владислав Витальевич Ионов: проведение исследования.

Мария Валентиновна Амелякина: проведение исследования; редактирование рукописи.

Елена Михайловна Серба: руководство исследованием.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Anton Yu. Sharikov: conceptualization, methodology, formal analysis, writing — review & editing.

Elena N. Sokolova: investigation; validation.

Vladislav V. Ionov: investigation.

Maria V. Amelyakina: investigation; writing — editing.

Elena M. Serba: supervision.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Волкова, Г.С., Соколова, Е.Н., Ионов, В.В., Юраскина, Т.В., & Серба, Е.М. (2023). Перспективные направления переработки ягодного жмыха в пищевые ингредиенты. *Пищевая промышленность*, (11), 35–39. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.11.11.008>

Volkova, G. S., Sokolova, E. N., Ionov, V. V., Yuraskina, T.V., & Serba, E.M. (2023). Prospective directions of berry cake processing into food ingredients. *Food Industry*, (11), 35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.11.11.008>

Денисенко, Т.А., Вишник А.Б., & Цыганок, Л.П. (2015). Спектрофотометрическое определение суммы фенольных соединений в растительных объектах с использованием хлорида алюминия, 18-молибдодифосфата и реактива Фолина-Чокальтеу. *Аналитика и контроль*, 19(4), 373–380. <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.4.012>

Denisenko, T.A., Vishnikin, A.B., & Cyganok, L.P. (2015). Spectrophotometric determination of sum of phenolic compounds in plants using aluminum chloride, 18-molybdodiphosphate and Folin-Ciocalteu reagents. *Analitika i Kontrol'*, 19(4), 373–380. (In Russ.) <https://doi.org/10.15826/analitika.2015.19.4.012>

Лютикова, М. Н., & Ботиров, Э. Х. (2015). Химический состав и практическое применение ягод брусники и клюквы. *Химия растительного сырья*, (2), 5–27. <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502429>

Lyutikova, M.N., & Botirov, E.Kh. (2015). The chemical composition and the practical application of berries cranberries and cranberry. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, (2), 5–27. (In Russ.) <https://doi.org/10.14258/jcprm.201502429>

Серба, Е.М., Юраскина, Т.В., Римарева, Л.В., Ревякина, В.А., Медриш, М.Э., & Погоржельская, Н.С. (2022). Ферментолитат *Saccharomyces cerevisiae*: научно-

практическое обоснование использования в качестве биологически активной добавки. *Биотехнология*, 38(4), 107–113. <https://doi.org/10.56304/S0234275822040123>

Serba, E. M., Yuraskina, T.V., Rimareva, L.V., Revyakina, V.A, Medrish, M.E., & Pogorzhel'skaya N.S. (2022). *Saccharomyces cerevisiae* enzymatic hydrolysate: Scientific and practical substantiation of its use as a biologically active supplement. *Biotekhnologiya*, 38(4), 107–113. (In Russ.) <https://doi.org/10.56304/S0234275822040123>

Тутельян, В.А. (2021). Здоровое питание для общественного здоровья. *Общественное здоровье*, 1(1), 56–64. <https://doi.org/10.21045/2782-1676-2021-1-1-56-64>

Tutelyan, V.A. (2021). Healthy food for public health. *Public Health*, 1(1), 56–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.21045/2782-1676-2021-1-1-56-64>

Шариков, А.Ю., Поливановская, Д.В., Серба, Е.М., Амелякина, М.В., & Соколова, Е.Н. (2023) Использование гидролизата дрожжевой биомассы в технологии зерновых. *Вестник КрасГАУ*, 201(12), 267–275. <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-12-267-275>

Sharikov, A.Yu., Polivanovskaya, D.V., Serba, E.M., Amelyakina, M.V., & Sokolova, E.N. (2023) Using yeast biomass hydrolyzate in the grain extrudate technology. *The Bulletin of KrasGAU*, 12(201), 267–275. (In Russ.) <https://doi.org/10.36718/1819-4036-2023-12-267-275>

Шариков, А.Ю., Иванов, В.В., Амелякина, М.В., Соколова, Е.Н., Ионов, В.В., & Серба, Е.М. (2024а). Влияние влагосодержания на режимы экструзии и физико-химические показатели экструдатов с добавлением ферментолитата жмыха аронии черноплодной. *Российская сельскохозяйственная*

- наука, (3), 66–71. <https://doi.org/10.31857/S2500262724030135>
- Sharikov, A.Y., Ivanov, V.V., Amelyakina, M.V., Sokolova, E.N., Ionov, V.V., & Serba E.M. (2024a) The influence of moisture content on extrusion modes and physicochemical parameters of extrudates with the addition of chokeberry pomace hydrolysate. *Rossijskaâ sel-skohozâjstvennaâ nauka*, (3), 66–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2500262724030135>
- Шариков, А.Ю., Поливановская, Д.В., Амелякина, М.В., Туршатов, М.В., Соловьев, А.О. & Абрамова, И.М. (2024b). Разработка технологии каш быстрого приготовления на основе экструдатов дробленого риса и барды топинамбура. *Пищевая промышленность*, (10), 58–63. <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.10.10.011>
- Sharikov, A.Yu., Polivanovskaya, D.V., Amelyakina, M.V., Turshatov, M.V., Solovyev, A.O., & Abramova, I.M. (2024b). Development of technology for instant porridges based on extrudates of rice and distillery stillage of Jerusalem artichoke. *Food industry*, (10), 58–63. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/PPI.2024.10.10.011>
- Akande, O.A., Nakimbugwe, D., & Mukisa, I.M. (2017) Optimization of extrusion conditions for the production of instant grain amaranth-based porridge flour. *Food Science & Nutrition*, (5), 1205–1214. <https://doi.org/10.1002/fsn3.513>
- Alam, M. S., Kaur, J., Khaira, H., & Gupta, K. (2015). Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(3), 445–473. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568>
- Brennan, M.A., Derbyshire, E.J., Tiwari, B.K., & Brennan, C.S. (2013). Ready-to-eat snack products: The role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. *International Journal of Food Science and Technology*, 48(5), 893–902. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12055>
- Carneiro, A. F., Carneiro, C. N., de N Pires, L., Teixeira, L.S.G., Azcarate, S. M., & de S Dias, F. (2020). D-optimal mixture design for the optimization of extraction induced by emulsion breaking for multielemental determination in edible vegetable oils by microwave-induced plasma optical emission spectrometry. *Talanta*, 219, 121218. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121218>
- Delić, J., Ikončić, P., Jokanović, M., Peulić, T., Ikončić, B., Banjac, V., Vidosavljević, S., Stojkov, V. & Hadnađev, M. (2023). Sustainable snack products: Impact of protein- and fiber-rich ingredients addition on nutritive, textural, physical, pasting and color properties of extrudates. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 87, 103419. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2023.103419>
- Gat, Y., & Ananthanarayan, L. (2015). Physicochemical, phytochemical and nutritional impact of fortified cereal-based extrudate snacks: Effect of underutilized legume flour addition and extrusion cooking. *Nutrafoods*, 14, 141–149. <https://doi.org/10.1007/s13749-015-0036-7>
- Grasso, S. (2020). Extruded snacks from industrial by-products: A review. *Trends in Food Science & Technology*, (99), 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.012>
- Guy, R. (Ed.). (2001). *Extrusion cooking: technologies and applications* (vol. 61). Woodhead publishing.
- Höglund, E., Eliasson, L., Oliveira, G., Almlí, Vale, L., Sozer, N., & Alminger, M. (2018) Effect of drying and extrusion processing on physical and nutritional characteristics of bilberry press cake extrudates. *LWT – Food Science and Technology*, 92(5), 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.02.042>
- Iqbal, A.S., Shulz, P., & Rizvi, S. (2021) Valorization of bioactive compounds in fruit pomace from agro-fruit industries: Present Insights and future challenges. *Food Bioscience*, 44, 101384. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101384>
- Jach, M.E., Serefko, A., Ziaja, M., & Kieliszek, M. (2022) Yeast Protein as an Easily Accessible Food Source. *Metabolites*, 12(1), 63. <https://doi.org/10.3390/metabo12010063>
- Kaisangsri, N., Kowalski, R., Wijesekara, I., Kerdchoechuen, O., Laohakunjit, N. & Ganjyal, G. (2015). Carrot pomace enhances the expansion and nutritional quality of corn starch extrudates. *LWT – Food Science and Technology*, 68, 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.016>
- Kitrytė, V., Kavaliauskaitė, A., Tamkutė, L., Pukalskienė, M., Syrpa, M., & Venskutonis, P.R. (2020) 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*, 322, 126767. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126767>
- Krawęcka, A., Sobota, A., & Sykut-Domańska, E. (2019). Functional cereal products in the diet for type 2 diabetes patients. *International Journal of Food Science*, 2019, 4012450. <https://doi.org/10.1155/2019/4012450>
- Kumar, R., Sharma, H., & Kumar, N. (2013). Development and characterization of apple pomace and rice flour based extrudates. *International Journal of Postharvest Technology and Innovation*, 3(3), 285–303
- Lai, C.S., Davis, A.B., & Hosney, R.C. (1985). Effect of yeast protein concentrate and some of its components on starch extrusion. *Cereal Chemistry*, 62(4), 293–300.
- Mburu, M.W., Gikonyo, N.K., Kenji, G.M., & Mwasaru A.M. (2011). Properties of a complementary food based on amaranth grain (*Amaranthus cruentus*) grown in Kenya. *Journal of Agriculture and Food Technology*, 12(2), 5959–5977.
- Michalska-Ciechanowska, A. (2019). A review of new directions in managing fruit and vegetable processing by-products. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 207–219. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.03.021>
- Mironeasa, S., Coțovanu, I., Mironeasa, C., & Ungureanu-Iuga, M. (2023). A Review of the changes produced by extrusion cooking on the bioactive compounds from vegetal sources. *Antioxidants*, 12(7), 1453. <https://doi.org/10.3390/antiox12071453>
- Pismag, R.Y., Rivera, J.D., Hoyos, J.L., Bravo, J.E., & Roa, D.F. (2024) Effect of extrusion cooking on physical and thermal properties of instant flours: A review. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8, 1398908. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1398908>

- Robin, F., Karbstein, H. & Palzer, S. (2012). Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 28, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.008>.
- Šárka, E., Sluková, M., & Henke, S. (2021). Changes in Phenolics during Cooking Extrusion: A Review. *Foods*, 10(9), 2100. <https://doi.org/10.3390/foods10092100>
- Schmid, V., Mayer-Miebach, E., Behnlian, D., Briviba, K., Karbstein, H. & Emin, M.A. (2021). 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*, 154, 112610. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112610>
- Tas, A. A., & Shah, A. U. (2021). The replacement of cereals by legumes in extruded snack foods: Science, technology and challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 116, 701–711. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.016>
- Vishwakarma, S., Dalbhagat, C. G., Mandliya, S., & Mishra, H.N. (2022). Investigation of natural food fortificants for improving various properties of fortified foods: A review. *Food Research International*, 156, 111186. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111186>
- Wang, S., Gu, B.-J., & Ganjyal, G. (2019). Impacts of the inclusion of various fruit pomace types on the expansion of corn starch extrudates. *LWT – Food Science and Technology*, 110, 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.03.094>
- Yu, H., Liu, H., Erasmus, S.W., Zhao, S., Wang, Q., & van Ruth, S.M. (2021). An explorative study on the relationships between the quality traits of peanut varieties and their peanut butters. *LWT*, 151, 112068. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112068>