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

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-690-706
УДК 615.322:675.92.027.3

Обзорная статья
http://fptt.ru

Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор)

О. Н. Бахчевников*, С. В. Брагинец

Дата поступления в редакцию: 02.11.2020
Дата принятия в печать: 25.12.2020

Аграрный научный центр «Донской», Зерноград, Россия

**e-mail: oleg-b@list.ru*

© О. Н. Бахчевников, С. В. Брагинец, 2020

Аннотация.
Введение. В обзоре рассмотрены вопросы экструдирования растительного сырья для производства пищевых продуктов. Целью исследования является обобщение и анализ англоязычных научных публикаций, посвященных технологиям экструдирования растительного сырья, извлечение информации о рациональных параметрах их осуществления и влиянии на свойства готовых экструдатов.
Объекты и методы исследования. Процесс экструдирования растительного сырья в ходе производства пищевых продуктов. Выполнен систематический обзор научной литературы на английском языке по тематике технологических параметров экструдирования растительного сырья за период 2000–2020 гг.
Результаты и их обсуждение. Анализ научных публикаций по исследуемой теме показал, что экструдирование является одним из самых эффективных способов переработки растительного сырья в пищевые продукты. Выявлены закономерности влияния параметров экструдирования на составляющие растительного сырья. Экструдирование позволяет повысить усвояемость компонентов растительного сырья, в частности протеина и крахмала, а также снизить содержание антипитательных факторов. Процесс экструзии наиболее эффективно протекает при высоких температурах, скорости вращения шнека экструдера и влажности сырья. Выявлено противоречие между необходимостью поддержания высокой температуры и частоты вращения шнека экструдера для эффективного выполнения процесса экструзии и негативным воздействием этих параметров на сохранность питательных веществ.
Выводы. Научные исследования должны быть направлены на выявление оптимальных параметров экструзии каждого вида сырья и их смесей с целью соблюдения баланса между требуемыми свойствами экструдата и сохранностью питательных веществ. Недостаточно исследована тема формирования в процессе экструзии сложных комплексов питательных веществ и влияние на их образование параметров экструдирования. Тематика экструдирования растительного сырья для производства пищевых продуктов является перспективной, но требует проведения дополнительных исследований.

Ключевые слова. Растительное сырье, экструдирование, экструдат, технологические параметры, свойства экструдата, питательная ценность

Финансирование. Работа выполнена на базе ФГБНУ «АНЦ «Донской» в рамках Государственного задания (тема № 0706-2019-0006).

Для цитирования: Бахчевников, О. Н. Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор) / О. Н. Бахчевников, С. В. Брагинец // Техника и технология пищевых производств. – 2020. – Т. 50, № 4. – С. 690–706. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-690-706.

Review article

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

Extrusion of Plant Raw Materials in Food Production: A Review

Oleg N. Bakhchevnikov*, Sergey V. Braginets

Received: November 02, 2020
Accepted: December 25, 2020

Agricultural Research Centre "Donskoy", Zernograd, Russia

**e-mail: oleg-b@list.ru*

© O.N. Bakhchevnikov, S.V. Braginets, 2020

Abstract.
Introduction. The present review covers the issues of extrusion of plant raw materials in food industry. The authors analyzed foreign publications about various extrusion technologies, their rational parameters, and their effect on the properties of final products.

Study objects and methods. The research featured extrusion methods of plant raw materials in food production. The review included scientific articles published in English in 2000–2020.
Results and discussion. Extrusion is an effective processing method for plant raw materials in food industry. The analysis made it possible to define the effect of extrusion parameters on the components of plant raw materials. Extrusion increases digestibility of such plant components as protein and starch. High temperature, speed, and moisture are the optimal parameters for extrusion. High barrel temperature has a negative effect on vitamin and carotene content, while feed rate and screw speed are not important. Extrusion leads to complete mycotoxins reduction at critical temperatures. While high temperature and screw speed are important for process efficiency, they have a negative effect on the nutritional value of the final product.
Conclusion. Optimal parameters of various raw materials and their compounds remain largely understudied, in spite of the fact that they are responsible for the balance between the required extrudate properties and nutritional value. Formation of nutrient complexes and their effect on the process parameters also require further research, especially in regard with protein-carbohydrate and amylase-lipid complexes. In general, extrusion of plant raw materials remains a promising but largely neglected research topic in food science.

Keywords. Vegetable raw materials, extrusion, extrudate, processing parameters, extrudate properties, nutritive value

Funding. The research was performed on the premises of the Agricultural Research Center “Donskoy” as part of state assignment No. 0706-2019-0006.

For citation: Bakhchevnikov ON, Braginets SV. Extrusion of Plant Raw Materials in Food Production: A Review. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(4):690–706. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-690-706.

Введение

В настоящее время значительная часть растительного сырья, используемого при производстве продуктов питания, подвергается экструдированию [1]. Достоинством этой технологии является радикальное изменение структуры сырья, его физических свойств и питательной ценности, а также химического состава в процессе обработки [2]. Кроме того, экструдирование создает возможность изменения в широких пределах свойств готового продукта при варьировании параметров процесса [3, 4].

Экструдированию подвергают широкий спектр видов растительного сырья: зерно, бобы, фрукты, овощи, клубни, листья и стебли растений, а также их смеси [5]. Важным преимуществом технологии экструдирования является возможность обработки отходов пищевой промышленности, таких как выжимки плодов, кожура фруктов и др., с целью их последующего включения в состав пищевых продуктов [1, 2, 6].

Для осуществления процесса экструдирования используют одношнековые и двухшнековые экструдеры [3]. Несмотря на большое разнообразие моделей, их конструкция сходна и включает бункер для загрузки сырья, шнек с винтовой навивкой, вращающийся в неподвижном цилиндрическом корпусе, в конце которого имеется отверстие (фильера) для выхода экструдата [3, 7]. Дополнительно в конструкцию экструдера могут включать электрические нагреватели корпуса для повышения температуры процесса и устройства для подачи в корпус воды или пара для увлажнения сырья [8]. Одношнековые экструдеры обычно используют для обработки однокомпонентных или малокомпонентных продуктов, а двухшнековые – для получения сложных многокомпонентных продуктов [9].

Обычно в экструдер загружают предварительно подготовленное методами измельчения, увлажнения и кондиционирования растительное сырье или смесь сырьевых компонентов [10]. Сырье, перемещаемое шнеком по корпусу, под действием высокого давления и температуры, а также резкого перепада давления при выходе из фильеры изменяет свою структуру и свойства [4, 11]. В качестве переменных входных параметров, изменяющих течение процесса экструдирования и свойства готового экструдата, обычно выступают скорость подачи сырья в экструдер, частота вращения шнека, соотношение диаметра и длины шнека, температура экструдирования, давление и диаметр фильеры [4, 12]. Также значение имеют исходные свойства сырья, такие как влажность, степень измельчения, химический состав, жирность и др. [4, 13].

В процессе экструдирования растительное сырье претерпевает целый ряд физико-химических изменений и изменений питательной ценности [13]. Они включают окисление жиров, денатурацию белка, формирование перекрестных связей белков с другими веществами, желатинизацию и декстринизацию крахмала, разрушение витаминов и каротина, денатурацию энзимов, изменение структуры (консистенции), цвета и запаха продукта [13, 14]. Эти изменения являются результатом комплексного воздействия на сырье перечисленных выше переменных входных параметров процесса экструдирования [4, 5, 12].

Параметры процесса экструдирования растительного сырья изменяют, чтобы добиться получения продукта с требуемыми свойствами и обеспечить минимальное снижение питательной ценности продукта вследствие разрушения полезных веществ [15]. Помимо этого, подбором рациональных параметров процесса экструдирования возможно

решить еще две важные задачи: разрушение антипитательных веществ (ингибиторы протеазы и др.), содержащихся в некоторых видах растительного сырья, и уничтожение патогенных микроорганизмов [1, 2, 16].

Так как воздействие входных параметров на сырье в процессе экструзии является комплексным, то бывает сложно определить изменение каких параметров привело к конкретному изменению свойств экструдата. Правильное определение взаимосвязи входных параметров процесса и выходных свойств продукта осложнено большим разнообразием видов и смесей растительного сырья. Также составляющие растительного сырья химические вещества при экструдировании под действием высокой температуры и давления могут вступать в химические реакции друг с другом, образуя сложные комплексы [17]. Это приводит к тому, что экспериментальные результаты, полученные разными исследователями, противоречат друг другу.

Все это потребовало проведения обзора и критического анализа научных публикаций, посвященных теме экструдирования растительного сырья при производстве продуктов питания. Ввиду значительного количества таких публикаций в данной работе выполнен обзор статей на английском языке. Обзор русскоязычных публикаций будет представлен позднее.

Целью исследования является обобщение и сравнительный анализ англоязычных научных публикаций, посвященных технологиям экструдирования растительного сырья, используемого для производства пищевых продуктов, извлечению информации о рациональных параметрах их осуществления и влиянию на свойства готовых экструдатов.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является процесс экструдирования растительного сырья в ходе производства пищевых продуктов.

Отбор и систематический обзор научной литературы по теме исполнен по методике R. J. Torraco и C. Okoli [18, 19].

Для отбора научных статей на английском языке провели поиск по ключевым словам в библиографических базах «Google Scholar» и «Scopus». Дополнительно был выполнен обзор научных журналов по теме исследования. При выборе статей для обзора приоритет отдавали высокоцитируемым источникам (более 15 цитирований в «Scopus»). Списки литературы отобранных статей были просмотрены для выявления дополнительных релевантных источников.

Поиск публикаций осуществляли по следующим ключевым словам (на английском языке) и их комбинациям: vegetable raw materials (растительное сырье), extrusion (экструдирование), extrudate (экструдат), processing parameters (парметры процесса), extrudate properties (свойства экструдата), food (пища).

В качестве временных рамок для выбора научных публикаций нами был принят интервал 2000–2020 гг. Более ранние научные статьи изучали только при отсутствии новых публикаций по конкретному аспекту исследуемой тематики.

Результаты и их обсуждение

Влияние параметров экструдирования на составляющие растительного сырья. Протеин. Параметры экструдирования оказывают значительное влияние на свойства и структуру растительного протеина, а также на его взаимодействие с другими веществами [20]. При высокой температуре экструзии такое влияние может быть негативным, приводя к денатурации белка и образованию меланоидинов в результате реакции Майяра аминокислот с сахарами [21]. В результате происходит снижение усвояемости белка [22]. Правильно подобранные параметры экструдирования приводят к повышению усвояемости протеина в результате происходящего при денатурации увеличения площади поверхности белковых молекул, доступной для взаимодействия с ферментами [23]. B. Zhang с соавторами установил, что при экструдировании семян рапса высокая усвояемость белка наблюдалась лишь при исходной влажности сырья более 30 % [24].

Анализ аминокислотного профиля исходного растительного сырья и экструдатов позволяет оценить влияние экструдирования на качество и сохранность протеина [5]. Лизин, цистеин и аргинин являются самыми нестабильными из аминокислот при экструзии [2, 5]. Температура процесса и влажность сырья оказывают наибольшее влияние на сохранность аминокислот [5, 25]. S. Singh и др. установили, что минимальные потери лизина в ходе экструзии наблюдаются при влажности сырья более 15 % и температуре менее 180 °C [5]. Авторы сделали вывод, что причиной снижения содержания лизина является протекание при высокой температуре и низкой влажности реакции Майяра, происходящей между сахарами и аминогруппой молекул аминокислот, в том числе ε-аминогруппой лизина [5].

M. O. Iwe и его соавторы выяснили, что увеличение частоты вращения шнека экструдера до 80–140 мин$^{-1}$ и уменьшение диаметра фильеры до 6–10 мм повышает сохранность лизина [26]. Они объясняют это сокращением продолжительности термической обработки сырья. Помимо этого, высокая частота вращения шнека и высокая скорость подачи увеличивают переваримость белка за счет усиления его денатурации под действием высокого напряжения сдвига в экструдируемом сырье [2, 5].

Экструзия приводит к взаимодействию протеина с различными питательными веществами растительного сырья с образованием перекрестных связей, что влияет на свойства экструдатов. Так, R. Alonso и A. A. F. Marzo установили, что экструдирование приводит к образованию дисульфидных связей и нековалентных взаимодействий, уменьшая растворимость белка в экструдате из гороха и фасоли [23].

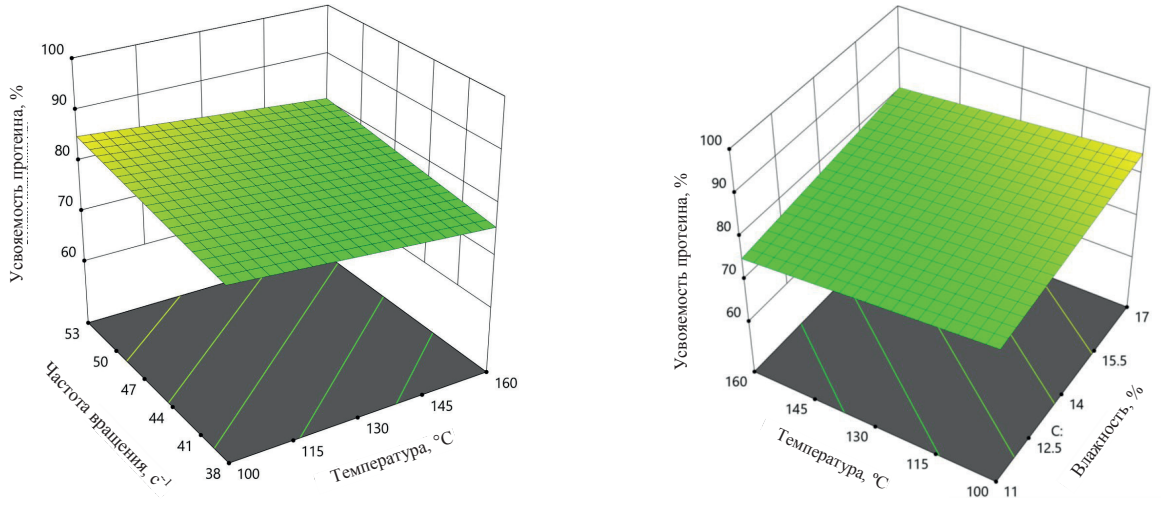
S. Beck с соавторами определил, что низкая влажность сырья приводила к снижению растворимости протеина в гороховом экструдате [27]. Они установили, что температура и напряжение сдвига оказывают большее влияние на растворимость белка, чем влажность. Во время денатурации белка изменения в поверхностной гидрофобности позволяют его молекуле формировать трехмерную структуру с высокой водопоглотительной способностью и низкой растворимостью. D. Panyam и A. Kilara установили, что растворимость белка играет важную роль в его эмульгирующих свойствах, ускоряя диффузию протеина на поверхность продукта. Это снижает поверхностное натяжение [28]. По мнению A. Silva и др., экструдирование положительно влияет на эмульгирующую способность растительного протеина, что важно при производстве пищевых продуктов [29].

Таким образом, процесс экструдирования при невысокой температуре, высокой частоте вращения шнека экструдера и повышенной влажности сырья повышает усвояемость содержащегося в растительных продуктах протеина (рис. 1) [30].

Жиры. При приготовлении пищевых продуктов из растительного сырья методом экструдирования жиры (липиды) обычно присутствуют в них в небольшом количестве [2, 31]. При этом они оказывают положительное влияние на процесс экструзии, способствуя снижению трения, пластифицируя продукт и склеивая его составные части [13]. Но содержание жиров более 5–6 % нежелательно, т. к. это замедляет работу экструдера и ухудшает протекание процесса экструзии [32]. Вращающий момент шнека экструдера уменьшается из-за увеличения трения продукта, также снижается индекс расширения экструдата [5, 32].

Известно, что окисление жиров в процессе обработки ухудшает свойства продукции. Результаты исследований показывают, что в ходе экструдирования это явление не наблюдается ввиду кратковременности процесса [5]. Кроме того, при экструзии разрушаются ферменты, ускоряющие окисление, а образующиеся в ходе реакции Майяра протеин-углеводные комплексы являются антиокислителями [5, 32].

Процесс экструдирования растительного сырья приводит к уменьшению содержания жиров в готовом продукте [2]. J. S. Tumuluru и др. связывают снижение содержания жира с низкой влажностью сырья и высокой температурой экструзии [33]. В тоже время T. de Pilli и его соавторы установили, что сжигание жиров увеличивалось при влажности сырья (смесь пшеничной и миндальной муки) от 26 до 30 %, но уменьшалось при влажности от 30 до 36 % [34]. Причина этого противоречия не установлена. Вероятно, влияние оказали другие параметры процесса, в том числе вязкость сырья [2]. По мнению R. Sandrin и др., при экструзии риса и



(a) (b)

Рисунок 1. Влияние технологических параметров на усвояемость протеина при экструдировании измельченных зерен амаранта: a – влияние температуры и частоты вращения шнека; b – влияние температуры и влажности [30]

Figure 1. Effect of technological parameters on protein digestibility during extrusion of ground amaranth grains: a – temperature and screw speed; b – temperature and moisture [30]

овса скорость вращения шнека была более значимым фактором для снижения содержания жира, чем температура [35]. T. de Pilli с соавторами считает, что высокие температура и давление приводят к переходу жиров из твердой в жидкую форму, которая удаляется из экструдата [34]. Кроме того, происходит формирование липидно-амилозных и липидно-протеиновых комплексов. В результате чего химический анализ показывает низкое содержание жира в экструдате [2]. S. Bhatnagar и M. A. Hanna говорят об образовании липидно-амилозного комплекса при температуре экструзии кукурузного крахмала 110–140 °C [36]. J. A. G. Areas и др. также сообщают об образовании липидно-амилозного комплекса при низкой влажности растительного сырья [37].

Таким образом, результаты проанализированных экспериментальных исследований подтверждают, что небольшое содержание жиров в сырье способствует эффективному осуществлению процесса экструдирования и предотвращает окисление готового продукта, а высокое ухудшает протекание процесса экструзии и качество продукта.

Углеводы. Многие виды растительного сырья, в частности фрукты, имеют высокое содержание сахаров. Известно, что при экструдировании сахара активно вступают в химические реакции с другими веществами [5]. Многие исследователи сообщают о значительном снижении содержания сахарозы в экструдатах [5, 25]. Так, M. E. Camire с соавторами сообщает о снижении содержания сахара на 20 % в ходе экструдирования сырья для бисквитов при температуре 170–210 °C и влажности 13 % [38]. Это может быть объяснено превращением сахарозы в глюкозу и фруктозу, а также ее соединением с лизином в результате реакции Майяра [5, 25].

Многие виды растительного сырья, в частности зерновые культуры, имеют высокое содержание крахмала (амилоза и амилопектин). В процессе экструдирования крахмал способствует хорошему расширению экструдата [1, 2]. Во время экструзии крахмал значительно изменяет свою структуру. В нем происходят три процесса: желатинизация, деполимеризация и декстринизация [2]. Желатинизация важна, т. к. люди плохо усваивают нежелатинизированный крахмал [5]. Действие высокой температуры разрушает структуру молекул крахмала и межмолекулярные водородные связи [2]. В результате этого крахмал получает возможность усиленно поглощать влагу [39]. Из-за резкого падения давления при выходе продукта из фильеры экструдера происходит испарении этой влаги, что способствует формированию требуемой структуры экструдата [4].

Наибольшее влияние на преобразование крахмала при экструзии оказывают температура процесса и влажность сырья [1, 13]. J. de la Rosa-Millan и др. заявляют о пропорциональном увеличении доли трансформированного крахмала при повышении температуры [40].

Установлено, что декстринизация крахмала наиболее активно происходит при низкой влажности и высоком напряжении сдвига [2]. При экструзии разрушаются ковалентные водородные связи в молекулах крахмала, что приводит к изменению структуры, делающему их более доступными для воздействия пищеварительных ферментов [2, 41].

Исследователи пришли к выводу, что обработка растительного сырья экструдированием обеспечивает самую высокую переваримость крахмала среди всех известных методов обработки [41]. A. Rafiq с соавторами сообщает, что при экструдировании риса переваримость крахмала повышалась при увеличении влажности и температуры [42]. Высокие значения давления также повышают переваримость крахмала, т. к. увеличивают площадь поверхности молекул, доступной для гидролиза [2].

Но при экструдировании растительного сырья, содержащего жиры, следует учитывать, что в результате может произойти снижение переваримости крахмала из-за формирования липидно-амилозных комплексов [36, 43]. Также имеются сведения о том, что высокое содержание сахаров в сырье препятствует процессу желатинизации крахмала [5].

Пищевые волокна важны для правильного пищеварения людей. Они состоят из полисахаридов, олигосахаридов и лигнина [5]. Результаты экспериментов L. E. Garcia-Amezquita с соавторами показывают, что содержание пищевых волокон в результате экструдирования при температуре 100–125 °C не снижается ввиду их устойчивости к ее действию [44]. S. Rashid и др. сообщают, что в результате экструзии при высокой температуре (более 160 ºC) содержание пищевых волокон в пшеничных отрубях увеличилось. Это может быть объяснено их формированием из устойчивого к действию ферментов крахмала (амилозы) [45].

Таким образом, при экструзии с умеренной температурой 100–125 °C содержание пищевых волокон не снижается, а при высокой температуре (более 160 °C) может происходить увеличение их содержания по причине формирования из устойчивого к ферментам крахмала.

Такие виды углеводов, как сахара и крахмал, в ходе экструзии активно взаимодействую с другими веществами и меняют свою структуру. Это требует регулирования параметров процесса обработки, в то время как пищевые волокна остаются стабильными.

Витамины. Степень сохранности разных витаминов при экструзии различна. Витамины E и A (токоферолы и каротиноиды) менее стабильны по сравнению с витаминами D и K [46]. Результаты многих исследований показывают, что высокая температура и низкая влажность

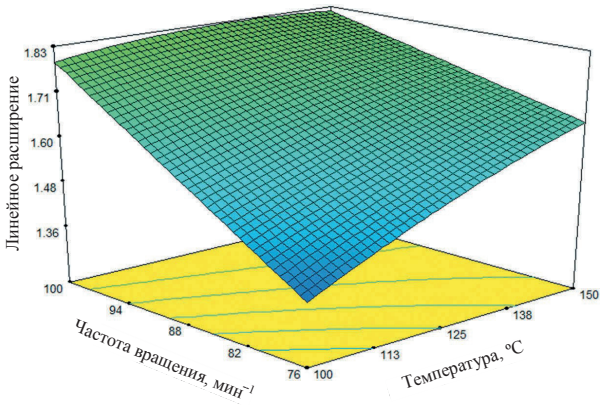


Рисунок 2. Влияние температуры и частоты вращения шнека экструдера на линейное расширение экструдата из зерна кукурузы и кожуры манго [57]

Figure 2. Effect of barrel temperature and screw speed on the linear expansion of corn-mango peel extrudates [57]

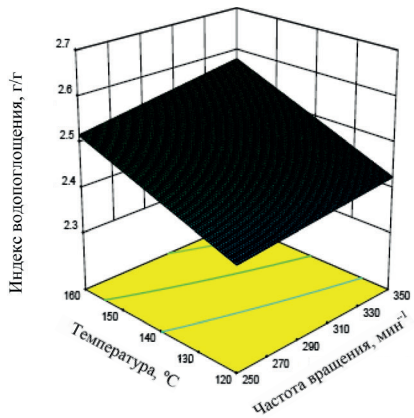


Рисунок 3. Влияние температуры экструзии и частоты вращения шнека на индекс водопоглощения экструдата [62]

Figure 3. Effect of extrusion temperature and screw speed on the water absorption index of the extrudate [62]

увеличивают разрушение витамина C (аскорбиновая кислота) при экструзии. A. H. Dar и его соавторы установили, что при экструзии выжимок моркови увеличение температуры с 110 до 140 °C привело к значительному разрушению витамина C и β-каротина [47]. Основное влияние на сохранность каротиноидов оказывает температура процесса [5]. R. Guzman-Tello и J. S. Cheftel установили, что при экструзии смеси растительного сырья повышение температуры с 125 до 200 °C привело к полному разрушению содержавшегося в нем β-каротина [48].

H. Zieliński и др. сообщают, что при экструдировании гречневой крупы содержание витамина E снизилось на 63 % из-за разрушения γ-токоферола [49]. Витамины группы B лучше сохраняются при низкой температуре и высокой влажности сырья [50]. S. R. Bajaj и R. S. Singhal исследовали влияние экструзии на сохранность витамина B_{12} в снеках и установили, что его разрушение усиливалось при повышении температуры, а при температуре 194 °C произошло полное разрушение этого витамина [51]. В то же время значимого влияния скорости подачи и частоты вращения шнека на содержание витамина B_{12} выявлено не было.

Таким образом, результаты экспериментов подтверждают, что высокая температура является ограничивающим фактором при экструзии богатого витаминами растительного сырья.

Антипитательные факторы. В некоторых видах растительного сырья присутствуют антипитательные вещества, такие как фитат, сапонин, оксалат, танин, ингибиторы трипсина/протеазы и др. [13].

Экструдирование позволяет максимально сократить их содержание в готовых продуктах питания. R. P. Rathod и U. S. Annapure установили, что при экструзии чечевицы максимальное разрушение ингибиторов трипсина, фитиновой кислоты и танина наблюдалось при температуре 180 °C и влажности 22 % [52]. S. Kaur с соавторами выяснил, что при экструзии зерновых отрубей с температурой 140 °C разрушение антипитательных веществ усиливалось при увеличении влажности сырья [53]. По мнению S. Yagci и T. Evci, значительное влияние на разрушение фитатов оказывает повышение давления [54]. N. Mukhopadhyay и др. выяснили, что при экструзии семян льна разрушение танина усиливалось при увеличении частоты вращения шнека экструдера, достигая максимума при значении 96,8 мин$^{-1}$ [55]. T. U. Nwabueze определил, что наибольшее влияние на разрушение антипитательных факторов при экструзии смеси сои и плодов хлебного дерева оказывала частота вращения шнека (линейная зависимость). Ее увеличение с 90 до 190 мин$^{-1}$ уменьшило содержание вредных веществ: содержание ингибиторов трипсина снизилось на 91 %, а танина – на 92 % [56].

Таким образом, при экструзии растительного сырья влияние на разрушение антипитательных факторов оказывают влажность сырья, температура и частота вращения шнека экструдера.

Влияние параметров процесса экструдирования на свойства готовых экструдатов. Объемная плотность и индекс расширения экструдата. В результате экструзии готовый продукт расширяется и приобретает пористую структуру, что является положительным эффектом [2]. Оценить этот эффект помогают такие параметры экструдата, как объемная плотность и индекс расширения. Объемная плотность экструдата обратно пропорциональна индексу его расширения.

Индекс расширения экструдата зависит от влажности, температуры и частоты вращения шнека экструдера [1, 2]. M. M. Mazlan с соавторами

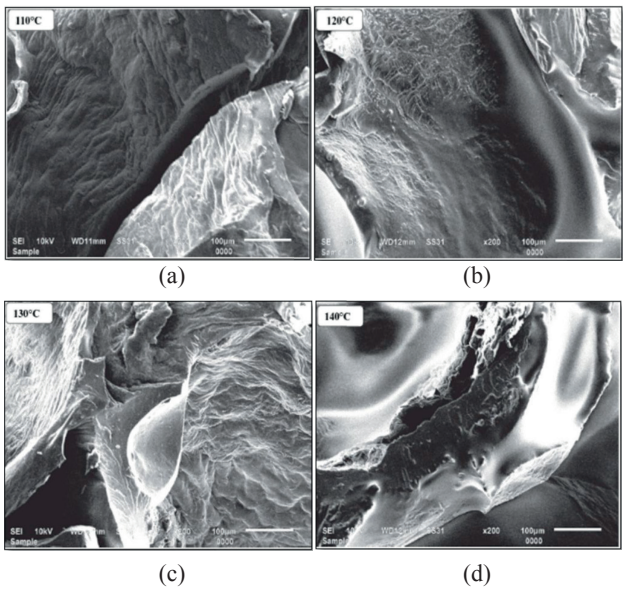


Рисунок 4. Влияние температуры экструзии на микроструктуру рисового экструдата: a – 110 °C; b – 120 °C; c – 130 °C; d – 140 °C [47]

Figure 4. Effect of extrusion temperature on the microstructure of rice extrudate: a – 110 °C; b – 120 °C; c – 130 °C; d – 140 °C [47]

установил, что при экструзии зерен кукурузы и кожуры манго максимальное линейное расширение экструдата наблюдалось при низкой влажности 15,5 % и высокой частоте вращения шнека 100 мин$^{-1}$, а также при высокой частоте вращения шнека и высокой температуре [57] (рис. 2).

Z. Rzedzicki и др. выявили соответствие между высокой влажностью и низкой температурой и малым расширением горохового экструдата [58]. Это объясняется тем, что высокая влажность снижает вязкость сырья, что негативно влияет на трение материала и желатинизацию крахмала [2, 58]. Этот эффект усиливается при малой частоте вращения шнека и низкой температуре, что сопровождается низким давлением в корпусе экструдера. Следствием этого является малый перепад давления на выходе из фильеры экструдера и слабое расширение экструдата [2].

C. Liu с соавторами сообщает о положительном влиянии на расширение экструдата высокой частоты вращения шнека и температуры за счет повышения давления и усиления желатинизации крахмала [59]. Но C. O'Shea и др. предупреждают, что слишком высокая частота вращения шнека может привести к повреждению крахмальных ядер, что препятствует желатинизации, а слишком высокая температура приводит к спеканию сырья и полному исчезновению пористости продукта [60].

Индексы водопоглощения и водной растворимости экструдата. Индекс водопоглощения (Water Absorption Index – WAI) и индекс водной растворимости (Water Solubility Index – WSI) характеризуют способность компонентов экструдированного продукта взаимодействовать с водой. Зарубежом они используются как показатели его качества [61]. Индекс водопоглощения характеризует способность компонентов экструдата, в частности крахмала и пищевых волокон, связываться с водой. Индекс водной растворимости выступает индикатором количества растворимых компонентов экструдата (полисахаридов), выделяющихся из него при добавлении избытка воды [51, 62].

Влажность сырья и температура процесса оказывают основное влияние на величину WAI для растительных экструдатов [2]. S. Yagci и F. Gogus наблюдали тенденцию увеличения WAI и уменьшения WSI при повышении влажности с 12 до 18 % при экструзии риса [63]. Избыток воды в сырье увеличивает водопоглощение в процессе экструзии и снижает вязкость крахмала, что усиливает его желатинизацию и обеспечивает однородное смешивание и распределение тепла в экструдируемом продукте [2, 63]. Температура процесса значительно влияет на величину водных индексов. S. Yagci и F. Gogus установили, что при повышении температуры увеличивается и WAI, в то время как увеличение частоты вращения шнека повышает его в меньшей степени (рис. 3) [63]. Но по достижении температурой определенного критического значения WAI снижается из-за декстринизации крахмала и деполимеризации амилозы.

Содержание в сырье пищевых волокон оказывает влияние на величину WAI и WSI экструдата. Многие исследователи сообщают об увеличении WAI экструдата при повышении содержания пищевых волокон [64, 65]. Добавление в сырье пищевых волокон влияет на WSI экструдата [64]. Причиной повышения значений этого параметра является разрушение крахмальных зерен в продукте, в то время как его снижение связано с уменьшением содержания крахмала и формированием крахмально-волоконных комплексов [64, 65].

Структура экструдата. Структура экструдата является одним из важных показателей качества экструдированных продуктов [1, 2]. Структуру экструдата характеризуют твердость поверхности, хрусткость и плотность [2].

Экспериментальные исследования выявили обратную связь между твердостью и индексом расширения экструдата [64]. Твердость экструдата зависит от влажности сырья, температуры и частоты вращения шнека (рис. 4) [47, 66]. При высокой температуре и частоте вращения шнека получают мягкие экструдаты, т. к. уменьшение вязкости сырья под действием высокой температуры способствует его расширению и формированию газовых пузырей и снижению плотности [67].

V. Stojceska с соавторами зафиксировал увеличение твердости экструдата при повышении влажности сырья с 12 до 17 % [68]. По их мнению, которое разделяет Q. Ding, увеличение влажности растительного сырья приводит к уменьшению

вязкости крахмала, что ограничивает рост газовых пузырей и повышает плотность экструдата из-за ослабления структуры крахмала [69]. R. Geetha и др. выяснили, что при одновременном повышении температуры и частоты вращения шнека усиливается образование газовых пузырей в экструдате, а структура крахмала трансформируется из слитной в пенистую. При этом действие высокой температуры уменьшает толщину стенок пенистой структуры и увеличивает диаметр пузырей [70]. Именно такие экструдаты имеют наибольшие хрустящие свойства, что важно при производстве снеков [71].

Увеличение содержания в растительном сырье протеина и пищевых волокон повышает твердость и плотность экструдата, а уменьшение их содержания приводит к получению более хрустящего и мягкого экструдата [2].

Цвет экструдата. Цвет экструдированного продукта питания является важным показателем его качества в глазах потребителей. Он зависит от вида сырья и параметров экструзионной обработки, а также от температуры [5]. Действие высокой температуры и низкой влажности при экструзии приводит к протеканию реакции Майяра, карамелизации и деградации пигментов, что вызывает потемнение готового продукта [1].

Влияние экструзии на биологическую безопасность экструдатов. Влияние параметров экструзии на содержание патогенных микроорганизмов. Содержание бактерий и других микроорганизмов в готовых растительных экструдатах является важнейшим показателем их качества. Экструзия, как процесс тепловой обработки, снижает их содержание. Наименьшее содержание бактерий и микромицетов наблюдается при высокой температуре обработки и низкой влажности сырья [2, 72]. В то же время увеличение скорости вращения шнека экструдера приводит к повышению содержания жизнеспособных микробов из-за уменьшения продолжительности термической обработки [2, 9].

Добавление в экструдируемое растительное сырье определенных компонентов сокращает количество микроорганизмов в экструдате. V. S. Eim и др. выяснили, что добавление в состав сырья богатой пищевыми волокнами моркови снизило количество липолитических микроорганизмов в экструдате [73]. M. M. Selani с соавторами установил, что добавление в состав сырья веществ, повышающих его кислотность, снижает уровень микрофлоры в экструдате [74].

Влияние параметров экструзии на содержание микотоксинов. Для обеспечения биологической безопасности экструдированных пищевых продуктов значение имеет разрушение в процессе обработки микотоксинов – ядовитых веществ, выделяемых плесневыми грибами, такими как фумонизин, афлатоксин, дезоксиниваленол и зеараленон [75].

Исследования U. Meister и M. M. Castelo показали, что под действием высокой температуры в ходе экструзии разрушается фумонизин [76, 77]. По данным U. Meister фумонизин активно (на 50–70 %) разрушается при температуре более 140 °C, а полное его разрушение наблюдалось при температуре более 180 °C [76]. M. M. Castelo и др. установили, что при увеличении частоты вращения шнека минимальная температура для начала распада микотоксинов уменьшается до 120 °C [77]. Авторы исследований делают вывод, что наиболее эффективным для деактивации фумонизина при экструзии является комбинирование высокой температуры и скорости вращения шнека экструдера и низкой влажности сырья [13].

Экструдирование является эффективным способом деактивации афлотоксина, который начинает разрушаться уже при температуре 105 °C [13, 75]. M. Castells с соавторами установила, что влажность сырья и температура процесса оказывают наибольшее влияние на содержание афлотоксина. Наилучший эффект дает сочетание высокой температуры (более 160 °C) и низкой влажности (менее 15 %) [13, 75].

Дезоксиниваленол и зеараленон также подвергаются разрушению при экструдировании. Наиболее эффективная деактивация дезоксиниваленола происходит при температуре от 150 до 180 ºC и влажности от 15 до 30 % [78]. Экструдирование является эффективным методом деактивации зеараленона, оптимальный диапазон температуры для этого 120–140 °C [13].

Кроме температуры, влияние на снижение содержания микотоксинов оказывают влажность сырья и частота вращения шнека экструдера. Влияние этих параметров экструзии на разрушение микотоксина охратоксина А изучила M. Castells с соавторами [79]. Она установила, что в ходе экструзии измельченного ячменя при постоянной температуре значительное снижение содержания микотоксина имело место при меньшей частоте вращения шнека. Это объясняется продолжительной тепловой обработкой сырья. При температуре 160 °C снижение частоты вращения шнека со 100 до 50 мин$^{-1}$ привело к увеличению разрушения микотоксина с 66,5 до 80,5 %. Влияние влажности сырья на изменение содержания охратоксина А оказалось не столь значимым. Снижение влажности сырья привело к небольшому увеличению разрушения микотоксина. При температуре экструзии 160 °C снижение влажности с 30 до 24 % привело к увеличению разрушения микотоксина лишь на 5 % [79].

Кроме того, по мнению K. M. Schaich, образующиеся в растительном сырье при экструдировании свободные радикалы способствуют разрушению микотоксинов, усиливая действие высокой температуры [80].

На основе изучения научных статей сделан вывод, что экструдирование приводит к почти полному разрушению микотоксинов при условии достижения в ходе процесса критической для них температуры [81–83].

Выводы

Анализ научных публикаций по исследуемой теме показал, что экструдирование является одним из самых важных способов переработки растительного сырья в пищевые продукты. Этот процесс позволяет повысить усвояемость многих компонентов растительного сырья, в частности протеина и крахмала, а также снизить содержание антипитательных факторов.

Наиболее эффективно, с точки зрения получения качественного по структуре продукта, процесс экструзии протекает при высоких температурах, скорости вращения шнека экструдера и влажности сырья. Но высокие значения этих параметров вызывают снижение содержания ценных питательных веществ – протеина и витаминов. Поэтому научные исследования должны быть направлены на выявление оптимальных параметров экструзии каждого вида растительного сырья и их смесей с целью соблюдения баланса между требуемыми свойствами экструдата (структура, расширение, цвет и др.) и сохранностью питательных веществ. Для многих видов растительного сырья эта работа уже выполнена, но для некоторых видов сырья требуется проведение дополнительных исследований.

В результате экспериментальных исследований были выявлены закономерности влияния параметров экструдирования на составляющие растительного сырья. Установлено, что процесс экструдирования при невысокой температуре, высокой частоте вращения шнека экструдера и повышенной влажности сырья повышает усвояемость протеина. Процесс экструдирования растительного сырья приводит к уменьшению содержания жиров в готовом продукте. Причем в наибольшей степени влияние на него оказывает скорость вращения шнека.

В ходе экструдирования наибольшая трансформация крахмала наблюдается при высокой влажности сырья и температуре процесса. Такие виды углеводов, как сахара и крахмал, в ходе экструзии активно взаимодействую с другими веществами и меняют свою структуру. Это требует регулирования параметров обработки, в то время как пищевые волокна остаются стабильными.

Установлено, что лимитирующим фактором для обеспечения сохранности витаминов и каротина в ходе экструзии является высокая температура, в то время как скорость подачи и частота вращения шнека не оказывают значимого влияния.

При экструдировании растительного сырья происходит разрушение антипитательных факторов, наибольшее влияние на которое оказывает увеличение частоты вращения шнека экструдера. Кроме того, экструдирование приводит к полному разрушению микотоксинов при условии достижения в ходе процесса критической для них температуры.

Однако, как показал проведенный анализ, еще недостаточно исследована тема формирования в ходе экструдирования сложных комплексов питательных веществ – белков, липидов и углеводов, в частности протеин-углеводных и липидно-амилозных комплексов, и влияние на их образование параметров процесса.

Тематика экструдирования растительного сырья для производства пищевых продуктов является перспективной, но требует проведения дополнительных исследований.

Критерии авторства

О. Н. Бахчевников – анализ литературных данных, подготовка первоначального варианта текста и доработка текста статьи. С. В. Брагинец – формулирование основной концепции исследования, общее руководство исследованием, критический анализ первоначального варианта текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

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

Contribution

O.N. Bakhchevnikov analyzed the data, prepared the draft of the manuscript, and proofread its final version. S.V. Braginets coined the basic concept of the study, supervised the research, and corrected the first version of the manuscript.

Conflict of interest

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

Acknowledgements

The authors would like to thank the reviewers for the peer review of this manuscript.

Список литературы

1. Offiah, V. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review / V. Offiah, V. Kontogiorgos, K. O. Falade // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 59, № 18. – P. 2979–2998. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007.

2. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview / W. Leonard, P. Zhang, D. Ying [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. – 2020. – Vol. 19, № 1. – P. 218–246. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514.

3. Adekola, K. A. Engineering review food extrusion technology and its applications / K. A. Adekola // Journal of Food Science and Engineering. – 2016. – Vol. 6, № 3. – P. 149–168. https://doi.org/10.17265/2159-5828/2016.03.005.

4. Bordoloi, R. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters / R. Bordoloi, S. Ganguly // Indian Journal of Scientific Research and Technology. – 2014. – Vol. 2, № 1. – P. 1–3.

5. Singh, S. Nutritional aspects of food extrusion: A review / S. Singh, S. Gamlath, L. Wakeling // International Journal of Food Science and Technology. – 2007. – Vol. 42, № 8. – P. 916–929. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x.

6. The application of some food industry by-products in the production of extruded products / A. Jozinović, Đ. Ačkar, J. Babić [et al.] // Enineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering. – 2017. – Vol. 12, № 1. – P. 2–6.

7. Park, S. H. Principles of food processing / S. H. Park, B. P. Lamsal, V. M. Balasubramaniam // Food processing: principles and applications. Second Edition / S. Clark, S. Jung, B. Lamsal. – John Wiley and Sons, 2014. – P. 1–15. https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch1.

8. Extrusion technology and its application in food processing: A review / S. Choton, N. Gupta, J. D. Bandral [et al.] // The Pharma Innovation Journal. – 2020. – Vol. 9, № 2. – P. 162–168.

9. Ramachandra, H. G. Extrusion technology: a novel method of food processing / H. G. Ramachandra, M. L. Thejaswini // International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology. – 2015. – Vol. 2, № 4. – P. 358–369.

10. Shelar, G. A. Extrusion in food processing: An overview / G. A. Shelar, S. T. Gaikwad // The Pharma Innovation Journal. – 2019. – Vol. 8, № 2. – P. 562–568.

11. Navale, A. S. Extrusion cooking technology for foods: A Review / A. S. Navale, B. S. Swami, N. J. Thakor // Journal of Ready to Eat Food. – 2015. – Vol. 2, № 3. – P. 66–80.

12. Singh, B. Fundamentals of extrusion processing / B. Singh, C. Sharma, S. Sharma // Novel Food Processing Technologies / V. Nanda, S. Sharma. – New Delhi : New India Publishing Agency, 2017. – P. 1–45. https://doi.org/10.31219/osf.io/xqa5n.

13. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review / M. S. Alam, J. Kaur, H. Khaira [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2016. – Vol. 56, № 3. – P. 445–473. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568.

14. Extrusion-cooking modifies physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran / C. Roye, M. Henrion, H. Chanvrier [et al.] // Foods. – 2020. – Vol. 9, № 6. https://doi.org/10.3390/foods9060738.

15. Ajita, T. Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview / T. Ajita, S. K. Jha // International Journal of Food Studies. – 2017. – Vol. 6, № 1. – P. 113–128. https://doi.org/10.7455/ijfs/6.1.2017.a10.

16. Kelley, T. R. Bacterial concentration reduction of food waste amended animal feed using a single-screw dry-extrusion process / T. R. Kelley, P. M. Walker // Bioresource Technology. – 1999. – Vol. 67, № 3. – P. 247–253. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00118-7.

17. Study of starch-lipid complexes in model system and real food produced using extrusion-cooking technology / T. De Pilli, A. Derossi, R. A. Talja [et al.] // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2011. – Vol. 12, № 4. – P. 610–616. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.07.011.

18. Torraco, R. J. Writing integrative literature reviews: Using the past and present to explore the future / R. J. Torraco // Human Resource Development Review. – 2016. – Vol. 15, № 4. – P. 404–428. https://doi.org/10.1177/1534484316671606.

19. Okoli, C. A guide to conducting a standalone systematic literature review / C. Okoli // Communications of the Association for Information Systems. – 2015. – Vol. 37, № 1. – P. 879–910. https://doi.org/10.17705/1cais.03743.

20. Lin, S. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog / S. Lin, H. E. Huff, F. Hsieh // Journal of Food Science. – 2002. – Vol. 67, № 3. – P. 1066–1072.

21. Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the maillard reaction: A review / F. C. de Oliveira, J. S. D. R. Coimbra, E. B. de Oliveira [et al.] // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 2016. – Vol. 56, № 7. – P. 1108–1125. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.755669.

22. Functionality of extrusion – Texturized whey proteins / C. I. Onwulata, R. P. Konstance, P. H. Cooke [et al.] // Journal of Dairy Science. – 2003. – Vol. 86, № 11. – P. 3775–3782. https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73984-8.

23. Alonso, R. Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans / R. Alonso, A. Aguirre, F. Marzo // Food Chemistry. – 2000. – Vol. 68, № 2. – P. 159–165. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00169-7.

24. Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and *in vitro* protein digestibility of canola meal / B. Zhang, G. Liu, D. Ying [et al.] // Food Research International. – 2017. – Vol. 100. – P. 658–664. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.060.

25. Singh, S. Retention of essential amino acids during extrusion of protein and reducing sugars / S. Singh, L. Wakeling, S. Gamlath // Journal of Agricultural and Food Chemistry. – 2007. – Vol. 55, № 21. – P. 8779–8786. https://doi.org/10.1021/jf071769z.

26. Effect of extrusion cooking of soy-sweet potato mixtures on available lysine content and browning index of extrudates / M. O. Iwe, D. J. Van Zuilichem, W. Stolp [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2004. – Vol. 62, № 2. – P. 143–150. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00212-7.

27. Beck, S. M. Effect of low moisture extrusion on a pea protein isolate's expansion, solubility, molecular weight distribution and secondary structure as determined by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) / S. M. Beck, K. Knoerzer, J. Arcot // Journal of Food Engineering. – 2017. – Vol. 214. – P. 166–174. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.037.

28. Panyam, D. Enhancing the functionality of food proteins by enzymatic modification / D. Panyam, A. Kilara // Trends in Food Science and Technology. – 1996. – Vol. 7, № 4. – P. 120–125. https://doi.org/10.1016/0924-2244(96)10012-1.

29. Effects of extrusion on the emulsifying properties of rumen and soy protein / A. C. C. Silva, E. P. G. Arêas, M. A. Silva [et al.] // Food Biophysics. – 2010. – Vol. 5, № 2. – P. 94–102. https://doi.org/10.1007/s11483-010-9149-0.

30. Atukuri, J. Multi-response optimization of extrusion conditions of grain amaranth flour by response surface methodology / J. Atukuri, B. B. Odong, J. H. Muyonga // Food Science and Nutrition. – 2019. – Vol. 7, № 12. – P. 4147–4162. https://doi.org/10.1002/fsn3.1284.

31. Extrusion of feed/feed ingredients and its effect on digestibility and performance of poultry: A review / M. A. U. Rahman, A. Rehman, X. Chuanqi [et al.] // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 4, № 4. – P. 48–61.

32. Camire, M. E. Chemical and nutritional changes in food during extrusion / M. E. Camire // Extruders in food applications / M. N. Riaz. – Boca Raton : CRC Press, 2000. – P. 127–148.

33. Changes in moisture, protein, and fat content of fish and rice flour coextrudates during single-screw extrusion cooking / J. S. Tumuluru, S. Sokhansanj, S. Bandyopadhyay [et al.] // Food and Bioprocess Technology. – 2013. – Vol. 6, № 2. – P. 403–415. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0764-7.

34. Study on different emulsifiers to retain fatty fraction during extrusion of fatty flours / T. De Pilli, R. Giuliani, B. F. Carbone [et al.] // Cereal Chemistry. – 2005. – Vol. 82, № 5. – P. 494–498. https://doi.org/10.1094/CC-82-0494.

35. Effect of extrusion temperature and screw speed on properties of oat and rice flour extrudates / R. Sandrin, T. Caon, A. W. Zibetti [et al.] // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2018. – Vol. 98, № 9. – P. 3427–3436. https://doi.org/10.1002/jsfa.8855.

36. Bhatnagar, S. Extrusion processing conditions for amylose lipid complexing / S. Bhatnagar, M. A. Hanna // Cereal Chemistry. – 1994. – Vol. 71, № 6. – P. 587–593.

37. Arêas, J. A. G. Extrusion cooking: Chemical and nutritional changes / J. A. G. Arêas, C. M. Rocha-Olivieri, M. R. Marques // Encyclopedia of food and health / B. Caballero, P. M. Finglas, F. Toldrá. – Academic Press, 2016. – P. 569–575. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00266-X.

38. Camire, M. E. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion / M. E. Camire, A. Camire, K. Krumhar // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. – 1990. – Vol. 29, № 1. – P. 35–57. https://doi.org/10.1080/10408399009527513.

39. Effect of enrichment with stabilized rice bran and extrusion process on gelatinization and retrogradation properties of rice starch / P. Wang, Y. Fu, L. Wang [et al.] // Starch/Staerke. – 2017. – Vol. 69, № 7–8. https://doi.org/10.1002/star.201600201.

40. Effect of decortication, germination and extrusion on physicochemical and *in vitro* protein and starch digestion characteristics of black beans (*Phaseolus vulgaris* L.) / J. de la Rosa-Millán, E. Heredia-Olea, E. Perez-Carrillo [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 102. – P. 330–337. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.039.

41. Singh, J. Starch digestibility in food matrix: a review / J. Singh, A. Dartois, L. Kaur // Trends in Food Science and Technology. – 2010. – Vol. 21, № 4. – P. 168–180. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.12.001.

42. Rafiq, A. Regression analysis of gluten-free pasta from brown rice for characterization and in vitro digestibility / A. Rafiq, S. Sharma, B. Singh // Journal of Food Processing and Preservation. – 2017. – Vol. 41, № 2. https://doi.org/10.1111/jfpp.12830.

43. Guha, M. Twin-screw extrusion of rice flour without a die: Effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics / M. Guha, S. Z. Ali, S. Bhattacharya // Journal of Food Engineering. – 1997. – Vol. 32, № 3. – P. 251–267. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00028-9.

44. Dietary fiber concentrates from fruit and vegetable by-products: Processing, modification, and application as functional ingredients / L. E. Garcia-Amezquita, V. Tejada-Ortigoza, S. O. Serna-Saldivar [et al.] // Food and Bioprocess Technology. – 2018. – Vol. 11, № 8. – P. 1439–1463. https://doi.org/10.1007/s11947-018-2117-2.

45. Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and Water Solubility Index of wheat bran extrudates / S. Rashid, A. Rakha, F. M. Anjum [et al.] // International Journal of Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 50, № 7. – P. 1533–1537. https://doi.org/10.1111/ijfs.12798.

46. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods / C. Brennan, M. Brennan, E. Derbyshire [et al.] // Trends in Food Science and Technology. – 2011. – Vol. 22, № 10. – P. 570–575. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.007.

47. Dar, A. H. Effect of extrusion temperature on the microstructure, textural and functional attributes of carrot pomace-based extrudates / A. H. Dar, H. K. Sharma, N. Kumar // Journal of Food Processing and Preservation. – 2014. – Vol. 38, № 1. – P. 212–222. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00767.x.

48. Guzman-Tello, R. Colour loss during extrusion cooking of β-carotene-wheat flour mixes as an indicator of the intensity of thermal and oxidative processing / R. Guzman-Tello, J. C. Cheftel // International Journal of Food Science and Technology. – 1990. – Vol. 25, № 4. – P. 420–434. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01099.x.

49. Antioxidants in thermally treated buckwheat groats / H. Zieliński, A. Michalska, M. K. Piskuła [et al.] // Molecular Nutrition and Food Research. – 2006. – Vol. 50, № 9. – P. 824–832. https://doi.org/10.1002/mnfr.200500258.

50. Effects of cold extrusion process on thiamine and riboflavin contents of fortified corn extrudates / B. Bilgi Boyaci, J.-Y. Han, M. T. Masatcioglu [et al.] // Food Chemistry. – 2012. – Vol. 132, № 4. – P. 2165–2170. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.013.

51. Bajaj, S. R. Effect of extrusion processing and hydrocolloids on the stability of added vitamin B_{12} and physico-functional properties of the fortified puffed extrudates / S. R. Bajaj, R. S. Singhal // LWT – Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 101. – P. 32–39. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.011.

52. Rathod, R. P. Physicochemical properties, protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing / R. P. Rathod, U. S. Annapure // LWT – Food Science and Technology. – 2017. – Vol. 80. – P. 121–130. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.001.

53. Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans / S. Kaur, S. Sharma, B. Singh [et al.] // Journal of Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 52, № 3. – P. 1670–1676. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1118-4.

54. Yağci, S. Effect of instant controlled pressure drop process on some physicochemical and nutritional properties of snacks produced from chickpea and wheat / S. Yağci, T. Evci // International Journal of Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 50, № 8. – P. 1901–1910. https://doi.org/10.1111/ijfs.12843.

55. Mukhopadhyay, N. Effect of extrusion cooking on anti-nutritional factor tannin in linseed (*Linum usitatissimum*) meal / N. Mukhopadhyay, S. Sarkar, S. Bandyopadhyay // International Journal of Food Sciences and Nutrition. – 2007. – Vol. 58, № 8. – P. 588–594. https://doi.org/10.1080/09637480701343952.

56. Nwabueze, T. U. Effect of process variables on trypsin inhibitor activity (TIA), phytic acid and tannin content of extruded African breadfruit-corn-soy mixtures: A response surface analysis / T. U. Nwabueze // LWT – Food Science and Technology. – 2007. – Vol. 40, № 1. – P. 21–29. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.10.004.

57. Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss / M. M. Mazlan, R. A. Talib, N. F. Mail [et al.] // International Journal of Food Properties. – 2019. – Vol. 22, № 1. – P. 54–70. https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1568458.

58. Rzedzicki, Z. Influence of pea hulls on the twin screw extrusion-cooking process of cereal mixtures and the physical properties of the extrudate / Z. Rzedzicki, A. Sobota, P. Zarzycki [et al.] // International Agrophysics. – 2004. – Vol. 18, № 1. – P. 73–81.

59. Preparation, physicochemical and texture properties of texturized rice produce by Improved Extrusion Cooking Technology / C. Liu, Y. Zhang, W. Liu [et al.] // Journal of Cereal Science. – 2011. – Vol. 54, № 3. – P. 473–480. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.09.001.

60. O'Shea, N. Enhancing an extruded puffed snack by optimising die head temperature, screw speed and apple pomace inclusion / N. O'Shea, E. Arendt, E. Gallagher // Food and Bioprocess Technology. – 2014. – Vol. 7, № 6. – P. 1767–1782. https://doi.org/10.1007/s11947-013-1181-x.

61. Factors affecting structural properties and *in vitro* starch digestibility of extruded starchy foams containing bran / S. A. Alam, J. Järvinen, H. Kokkonen [et al.] // Journal of Cereal Science. – 2016. – Vol. 71. – P. 190–197. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.08.018.

62. Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend / N. Yousf, F. Nazir, R. Salim // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. – 2017. – Vol. 6, № 6. – P. 2165–2168.

63. Yagci, S. Development of extruded snack from food by-products: A response surface analysis / S. Yagci, F. Gögüs // Journal of Food Process Engineering. – 2009. – Vol. 32, № 4. – P. 565–586. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00232.x.

64. Resolving the problem of poor expansion in corn extrudates enriched with food industry by-products / Đ. Ačkar, A. Jozinović, J. Babić [et al.] // Innovative Food Science and Emerging Technologies. – 2018. – Vol. 47. – P. 517–524. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.004.

65. Effect of extrusion conditions on iron stability and physical and textural properties of corn snacks enriched with soybean ferritin / A. Makowska, M. Zielińska-Dawidziak, P. Niedzielski [et al.] // International Journal of Food Science and Technology. – 2018. – Vol. 53, № 2. – P. 296–303. https://doi.org/10.1111/ijfs.13585.

66. Altan, A. Twin-screw extrusion of barley-grape pomace blends: Extrudate characteristics and determination of optimum processing conditions / A. Altan, K. L. McCarthy, M. Maskan // Journal of Food Engineering. – 2008. – Vol. 89, № 1. – P. 24–32. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.025.

67. Dehghan-Shoar, Z. The physico-chemical characteristics of extruded snacks enriched with tomato lycopene / Z. Dehghan-Shoar, A. K. Hardacre, C. S. Brennan // Food Chemistry. – 2010. – Vol. 123, № 4. – P. 1117–1122. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.071.

68. The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products / V. Stojceska, P. Ainsworth, A. Plunkett [et al.] // Food Chemistry. – 2009. – Vol. 114, № 1. – P. 226–232. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.043.

69. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks / Q.-B. Ding, P. Ainsworth, G. Tucker [et al.] // Journal of Food Engineering. – 2005. – Vol. 66, № 3. – P. 283–289. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.019.

70. Geetha, R. Twin screw extrusion of kodo millet-chickpea blend: process parameter optimization, physico-chemical and functional properties / R. Geetha, H. N. Mishra, P. P. Srivastav // Journal of Food Science and Technology. – 2014. – Vol. 51, № 11. – P. 3144–3153. https://doi.org/10.1007/s13197-012-0850-5.

71. Grasso, S. Extruded snacks from industrial by-products: A review / S. Grasso // Trends in Food Science and Technology. – 2020. – Vol. 99. – P. 284–294. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.012.

72. Optimization of the extrusion process for the production of ready-to-eat snack from rice, cassava and kersting's groundnut composite flours / O. O. Awolu, P. M. Oluwaferanmi, O. I. Fafowora [et al.] // LWT – Food Science and Technology. – 2015. – Vol. 64, № 1. – P. 18–24. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.025.

73. Effects of addition of carrot dietary fibre on the ripening process of a dry fermented sausage (sobrassada) / V. S. Eim, S. Simal, C. Rosselló [et al.] // Meat Science. – 2008. – Vol. 80, № 2. – P. 173–182. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.11.017.

74. Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement / M. M. Selani, S. G. C. Brazaca, C. T. dos Santos Dias [et al.] // Food Chemistry. – 2014. – Vol. 163. – P. 23–30. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.076.

75. Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: A review / M. Castells, S. Marín, V. Sanchis [et al.] // Food Additives and Contaminants. – 2005. – Vol. 22, № 2. – P. 150–157. https://doi.org/10.1080/02652030500037969.

76. Meister, U. Investigations on the change of fumonisin content of maize during hydrothermal treatment of maize. Analysis by means of HPLC methods and ELISA / U. Meister // European Food Research and Technology. – 2001. – Vol. 213, № 3. – P. 187–193. https://doi.org/10.1007/s002170100352.

77. Loss of fuminosin B_1 in extruded and baked corn-based foods with sugars / M. M. Castelo, L. S. Jackson, M. A. Hanna [et al.] // Journal of Food Science. – 2001. – Vol. 66, № 3. – P. 416–421. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb16120.x.

78. Mycotoxins inactivation by extrusion cooking of corn flour / D. Cazzaniga, J. C. Basílico, R. J. González [et al.] // Letters in Applied Microbiology. – 2001. – Vol. 33, № 2. – P. 144–147. https://doi.org/10.1046/j.1472-765X.2001.00968.x.

79. Reduction of ochratoxin A in extruded barley meal / M. Castells, E. Pardo, A. J. Ramos [et al.] // Journal of Food Protection. – 2006. – Vol. 69, № 5. – P. 1139–1143. https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.5.1139.

80. Schaich, K. M. Free radical generation during extrusion: A critical contributor to texturization / K. M. Schaich // ACS Symposium Series. – 2002. – Vol. 807. – P. 35–48. https://doi.org/10.1021/bk-2002-0807.ch003.

81. Kabak, B. The fate of mycotoxins during thermal food processing / B. Kabak // Journal of the Science of Food and Agriculture. – 2009. – Vol. 89, № 4. – P. 549–554. https://doi.org/10.1002/jsfa.3491.

82. The effect of thermal processing on the reduction of deoxynivalenol and zearalenone cereal content / J. Pleadin, J. Babić, A. Vulić [et al.] // Croatian Journal of Food Science and Technology. – 2019. – Vol. 11, № 1. – P. 44–51. https://doi.org/10.17508/cjfst.2019.11.1.06.

83. Decontamination of mycotoxin-contaminated feedstuffs and compound feed / R. Colović, N. Puvača, F. Cheli [et al.] // Toxins. – 2019. – Vol. 11, № 11. https://doi.org/10.3390/toxins11110617.

References

1. Offiah V, Kontogiorgos V, Falade KO. Extrusion processing of raw food materials and by-products: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2018;59(18):2979–2998. https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1480007.

2. Leonard W, Zhang P, Ying D, Fang Z. Application of extrusion technology in plant food processing byproducts: An overview. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2020;19(1):218–246. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12514.

3. Adekola KA. Engineering review food extrusion technology and its applications. Journal of Food Science and Engineering. 2016:6(3):149–168. https://doi.org/10.17265/2159-5828/2016.03.005.

4. Bordoloi R, Ganguly S. Extrusion technique in food processing and a review on its various technological parameters. Indian Journal of Scientific Research and Technology. 2014;2(1):1–3.

5. Singh S, Gamlath S, Wakeling L. Nutritional aspects of food extrusion: a review. International Journal of Food Science and Technology. 2007;42(8):916–929. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x.

6. Jozinović A, Ačkar Đ, Babić J, Miličević B, Jokić S, Šubarić D. The application of some food industry by-products in the production of extruded products. Engineering Power: Bulletin of the Croatian Academy of Engineering. 2017;12(1):2–6.

7. Park SH, Lamsal BP, Balasubramaniam VM. Principles of food processing. In: Clark S, Jung S, Lamsal B, editors. Food processing: prin-ciples and applications. Second Edition. John Wiley and Sons; 2014. pp. 1–15. https://doi.org/10.1002/9781118846315.ch1.

8. Choton S, Gupta N, Bandral JD, Anjum N, Choudary A. Extrusion technology and its application in food processing: A review. The Pharma Innovation Journal. 2020;9(2):162–168.

9. Ramachandra HG, Thejaswini ML. Extrusion technology: a novel method of food processing. International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology. 2015;2(4):358–369.

10. Shelar GA, Gaikwad ST. Extrusion in food processing: An overview. The Pharma Innovation Journal. 2019;8(2):562–568.

11. Navale AS, Swami BS, Thakor NJ. Extrusion cooking technology for foods: A Review. Journal of Ready to Eat Food. 2015;2(3):66–80.

12. Singh B, Sharma C, Sharma S. Fundamentals of extrusion processing. In: Nanda V, Sharma S, editors. Novel food processing technologies. New Delhi: New India Publishing Agency; 2017. pp. 1–45. https://doi.org/10.31219/osf.io/xqa5n.

13. Alam MS, Kaur J, Khaira H, Gupta K. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2015;56(3):445–473. https://doi.org/10.1080/10408398.2013.779568.14.

14. Roye C, Henrion M, Chanvrier H, De Roeck K, De Bondt Y, Liberloo I, et al. Extrusion-cooking modifies physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran. Foods. 2020;9(6). https://doi.org/10.3390/foods9060738.

15. Ajita T, Jha SK. Extrusion cooking technology: Principal mechanism and effect on direct expanded snacks – An overview. International Journal of Food Studies. 2017;6(1):113–128. https://doi.org/10.7455/ijfs/6.1.2017.a10.

16. Kelley TR, Walker PM. Bacterial concentration reduction of food waste amended animal feed using a single-screw dry-extrusion process. Bioresource technology. 1999;67(3):247–253. https://doi.org/10.1016/S0960-8524(98)00118-7.

17. De Pilli T, Derossi A, Talja RA, Jouppila K, Severini C. Study of starch-lipid complexes in model system and real food produced using extrusion-cooking technology. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2011;12(4):610–616. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.07.011.

18. Torraco RJ. Writing integrative literature reviews: Using the past and present to explore the future. Human Resource Development Review. 2016;15(4):404–428. https://doi.org/10.1177/1534484316671606.

19. Okoli C. A guide to conducting a standalone systematic literature review. Communications of the Association for Information Systems. 2015;37(1):879–910. https://doi.org/10.17705/1cais.03743.

20. Lin S, Huff HE, Hsieh F. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog. Journal of Food Science. 2002;67(3):1066–1072.

21. de Oliveira FC, Coimbra JSDR, de Oliveira EB, Zuniga ADG, Rojas EEG. Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the maillard reaction: A review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2014;56(7):1108–1125. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.755669.

22. Onwulata CI, Konstance RP, Cooke PH, Farrell HM. Functionality of extrusion – Texturized whey proteins. Journal of Dairy Science. 2003;86(11):3775–3782. https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(03)73984-8.

23. Alonso R, Aguirre A, Marzo F. Effects of extrusion and traditional processing methods on antinutrients and in vitro digestibility of protein and starch in faba and kidney beans. Food Chemistry. 2000;68(2):159–165. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00169-7.

24. Zhang B, Liu G, Ying D, Sanguansri L, Augustin MA. Effect of extrusion conditions on the physico-chemical properties and *in vitro* protein digestibility of canola meal. Food Research International. 2007;100:658–664. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.060.

25. Singh S, Wakeling L, Gamlath S. Retention of essential amino acids during extrusion of protein and reducing sugars. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2007;55(21):8779–8786. https://doi.org/10.1021/jf071769z.

26. Iwe MO, Van Zuilichem DJ, Stolp W, Ngoddy PO. Effect of extrusion cooking of soy-sweet potato mixtures on available lysine content and browning index of extrudates. Journal of Food Engineering. 2004;62(2):143–150. https://doi.org/10.1016/s0260-8774(03)00212-7.

27. Beck SM, Knoerzer K, Arcot J. Effect of low moisture extrusion on a pea protein isolate's expansion, solubility, molecular weight distribution and secondary structure as determined by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Journal of Food Engineering. 2017;214:166–174. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.037.

28. Panyam D, Kilara A. Enhancing the functionality of food proteins by enzymatic modification. Trends in Food Science and Technology. 1996;7(4):120–125. https://doi.org/10.1016/0924-2244(96)10012-1.

29. Silva ACC, Arêas EPG, Silva MA, Arêas JAG. Effects of extrusion on the emulsifying properties of rumen and soy protein. Food Biophysics. 2010;5(2):94–102. https://doi.org/10.1007/s11483-010-9149-0.

30. Atukuri J, Odong BB, Muyonga JH. Multi-response optimization of extrusion conditions of grain amaranth flour by response surface methodology. Food Science and Nutrition. 2019;7(12):4147–4162. https://doi.org/10.1002/fsn3.1284.

31. Rahman MAU, Rehman A, Chuanqi X, Long ZX, Binghai C, Linbao J, et al. Extrusion of feed/feed ingredients and its effect on digestibility and performance of poultry: A review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2015;4(4):48–61.

32. Camire ME. Chemical and nutritional changes in food during extrusion. In: Riaz MN, editor. Extruders in food applications. Boca Raton: CRC Press; 2000. pp. 127–148.

33. Tumuluru JS, Sokhansanj S, Bandyopadhyay S, Bawa AS. Changes in moisture, protein, and fat content of fish and rice flour coextrudates during single-screw extrusion cooking. Food and Bioprocess Technology. 2013;6(2):403–415. https://doi.org/10.1007/s11947-011-0764-7.

34. De Pilli T, Giuliani R, Carbone BF, Derossi A, Severini C. Study on different emulsifiers to retain fatty fraction during extrusion of fatty flours. Cereal Chemistry. 2005;82(5):494–498. https://doi.org/10.1094/CC-82-0494.

35. Sandrin R, Caon T, Zibetti AW, de Francisco A. Effect of extrusion temperature and screw speed on properties of oat and rice flour extrudates. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2018;98(9):3427–3436. https://doi.org/10.1002/jsfa.8855.

36. Bhatnagar S, Hanna MA. Extrusion processing conditions for amylose-lipid complexing. Cereal Chemistry. 1994;71(6):587–593.

37. Arêas JAG, Rocha-Olivieri CM, Marques MR. Extrusion cooking: Chemical and nutritional changes. In: Caballero B, Finglas PM, Toldrá F, editors. Encyclopedia of food and health. Academic Press; 2016. pp. 569–575. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00266-X.

38. Camire ME, Camire A, Krumhar K. Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 1990;29(1):35–57. https://doi.org/10.1080/10408399009527513.

39. Wang P, Fu Y, Wang L, Saleh ASM, Cao H, Xiao Z. Effect of enrichment with stabilized rice bran and extrusion process on gelatinization and retrogradation properties of rice starch. Starch/Staerke. 2017;69(7–8). https://doi.org/10.1002/star.201600201.

40. de la Rosa-Millán J, Heredia-Olea E, Perez-Carrillo E, Guajardo-Flores D, Serna-Saldívar SRO. Effect of decortication, germination and extrusion on physicochemical and *in vitro* protein and starch digestion characteristics of black beans (*Phaseolus vulgaris* L.). LWT – Food Science and Technology. 2019;102:330–337. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.12.039.

41. Singh J, Dartois A, Kaur L. Starch digestibility in food matrix: a review. Trends in Food Science and Technology. 2010;21(4):168–180. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.12.001.

42. Rafiq A, Sharma S, Singh B. Regression analysis of gluten free pasta from brown rice for characterization and in vitro digestibility. Journal of Food Processing and Preservation. 2017;41(2). https://doi.org/10.1111/jfpp.12830.

43. Guha M, Ali SZ, Bhattacharya S. Twin-screw extrusion of rice flour without a die: Effect of barrel temperature and screw speed on extrusion and extrudate characteristics. Journal of Food Engineering. 1997;32(3):251–267. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00028-9.

44. Garcia-Amezquita LE, Tejada-Ortigoza V, Serna-Saldívar SO, Welti-Chanes J. Dietary fiber concentrates from fruit and vegetable by-products: Processing, modification, and application as functional ingredients. Food and Bioprocess Technology. 2018;11(8):1439–1463. https://doi.org/10.1007/s11947-018-2117-2.

45. Rashid S, Rakha A, Anjum FM, Ahmed W, Sohail M. Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and Water Solubility Index of wheat bran extrudates. International Journal of Food Science and Technology. 2015;50(7):1533–1537. https://doi.org/10.1111/ijfs.12798.

46. Brennan C, Brennan M, Derbyshire E, Tiwari BK. Effects of extrusion on the polyphenols, vitamins and antioxidant activity of foods. Trends in Food Science and Technology. 2011;22(10):570–575. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2011.05.007.

47. Dar AH, Sharma HK, Kumar N. Effect of extrusion temperature on the microstructure, textural and functional attributes of carrot pomace-based extrudates. Journal of Food Processing and Preservation. 2014;38(1):212–222. https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2012.00767.x.

48. Guzman-Tello R, Cheftel JC. Colour loss during extrusion cooking of beta carotene-wheat flour mixes as an indicator of the intensity of thermal and oxidative processing. International Journal of Food Science and Technology. 1990;25(4):420–434. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1990.tb01099.x.

49. Zieliński H, Michalska A, Piskuła MK, Kozłowska H. Antioxidants in thermally treated buckwheat groats. Molecular Nutrition and Food Research. 2006;50(9):824–832. https://doi.org/10.1002/mnfr.200500258.

50. Bilgi Boyaci B, Han J-Y, Masatcioglu MT, Yacin E, Celik S, Ryu G-H, et al. Effects of cold extrusion process on thiamine and riboflavin contents of fortified corn extrudates. Food Chemistry. 2012;132(4):2165–2170. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.013.

51. Bajaj SR, Singhal RS. Effect of extrusion processing and hydrocolloids on the stability of added vitamin B_{12} and physico-functional properties of the fortified puffed extrudates. LWT – Food Science and Technology. 2019;101:32–39. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.011.

52. Rathod RP, Annapure US. Physicochemical properties, protein and starch digestibility of lentil based noodle prepared by using extrusion processing. LWT – Food Science and Technology. 2017;80:121–130. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.02.001.

53. Kaur S, Sharma S, Singh B, Dar BN. Effect of extrusion variables (temperature, moisture) on the antinutrient components of cereal brans. Journal of Food Science and Technology. 2015;52(3):1670–1676. https://doi.org/10.1007/s13197-013-1118-4.

54. Yağci S, Evci T. Effect of instant controlled pressure drop process on some physicochemical and nutritional properties of snacks produced from chickpea and wheat. International Journal of Food Science and Technology. 2015;50(8):1901–1910. https://doi.org/10.1111/ijfs.12843.

55. Mukhopadhyay N, Sarkar S, Bandyopadhyay S. Effect of extrusion cooking on anti-nutritional factor tannin in linseed (*Linum usitatissimum*) meal. International Journal of Food Sciences and Nutrition. 2007;58(8):588–594. https://doi.org/10.1080/09637480701343952.

56. Nwabueze TU. Effect of process variables on trypsin inhibitor activity (TIA), phytic acid and tannin content of extruded African breadfruit-corn-soy mixtures: A response surface analysis. LWT – Food Science and Technology. 2007;40(1):21–29. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.10.004.

57. Mazlan MM, Talib RA, Mail NF, Taip FS, Chin NL, Sulaiman R, et al. Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss. International Journal of Food Properties. 2019;22(1):54–70. https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1568458.

58. Rzedzicki Z, Sobota A, Zarzycki P. Influence of pea hulls on the twin screw extrusion-cooking process of cereal mixtures and the physical properties of the extrudate. International Agrophysics. 2004;18(1):73–81.

59. Liu C, Zhang Y, Liu W, Wan J, Wang W, Wu L, et al. Preparation, physicochemical and texture properties of texturized rice produce by improved extrusion cooking technology. Journal of Cereal Science. 2011;54(3):473–480. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2011.09.001.

60. O'Shea N, Arendt E, Gallagher E. Enhancing an extruded puffed snack by optimising die head temperature, screw speed and apple pomace inclusion. Food and Bioprocess Technology. 2014;7(6):1767–1782. https://doi.org/10.1007/s11947-013-1181-x.

61. Alam SA, Järvinen J, Kokkonen H, Jurvelin J, Poutanen K, Sozer N. Factors affecting structural properties and *in vitro* starch digestibility of extruded starchy foams containing bran. Journal of Cereal Science. 2016;71:190–197. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2016.08.018.

62. Yousf N, Nazir F, Salim R, Ahsan H, Sirwal A. Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 2017;6(6):2165–2168.

63. Yagci S, Gögüs F. Development of extruded snack from food by-products: A response surface analysis. Journal of Food Process Engineering. 2008;32(4):565–586. https://doi.org/10.1111/j.1745-4530.2007.00232.x.

64. Ačkar D, Jozinović A, Babić J, Miličević B, Balentić JP, Šubarić D. Resolving the problem of poor expansion in corn extrudates enriched with food industry by-products. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2018;47:517–524. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.004.

65. Makowska A, Zielinska-Dawidziak M, Niedzielski P, Michalak M. Effect of extrusion conditions on iron stability and physical and textural properties of corn snacks enriched with soybean ferritin. International Journal of Food Science and Technology. 2018;53(2):296–303. https://doi.org/10.1111/ijfs.13585.

66. Altan A, McCarthy KL, Maskan M. Twin-screw extrusion of barley-grape pomace blends: Extrudate characteristics and determination of optimum processing conditions. Journal of Food Engineering. 2008;89(1):24–32. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.03.025

67. Dehghan-Shoar Z, Hardacre AK, Brennan CS. The physico-chemical characteristics of extruded snacks enriched with tomato lycopene. Food Chemistry. 2010;123(4):1117–1122. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.05.071.

68. Stojceska V, Ainsworth P, Plunkett A, Ibanoğlu S. The effect of extrusion cooking using different water feed rates on the quality of ready-to-eat snacks made from food by-products. Food Chemistry. 2009;114(1):226–232. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.09.043.

69. Ding Q, Ainsworth P, Tucker G, Marson H. The effect of extrusion conditions on the physicochemical properties and sensory characteristics of rice-based expanded snacks. Journal of Food Engineering. 2005;66(3):283–289. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.03.019.

70. Geetha R, Mishra HN, Srivastav PP. Twin screw extrusion of kodo millet-chickpea blend: Process parameter optimization, physico-chemical and functional properties. Journal of Food Science and Technology. 2014;51(11):3144–3153. https://doi.org/10.1007/s13197-012-0850-5.

71. Grasso S. Extruded snacks from industrial by-products: A review. Trends in Food Science and Technology. 2020;99:284–294. DOI: https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.012.

72. Awolu OO, Oluwaferanmi PM, Fafowora OI, Oseyemi GF. Optimization of the extrusion process for the production of ready-to-eat snack from rice, cassava and kersting's groundnut composite flours. LWT – Food Science and Technology. 2015;64(1):18–24. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.05.025.

73. Eim VS, Simal S, Rosselló C, Fermenia A. Effects of addition of carrot dietary fibre on the ripening process of a dry fermented sausage (sobrassada). Meat Science. 2008;80(2):173–182. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.11.017.

74. Selani MM, Brazaca SGC, dos Santos Dias CT, Ratnayake WS, Flores RA, Bianchini A. Characterisation and potential application of pineapple pomace in an extruded product for fibre enhancement. Food Chemistry. 2014;163:23–30. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.04.076.

75. Castells M, Marin S, Sanchis V, Ramos AJ. Fate of mycotoxins in cereals during extrusion cooking: A review. Food Additives and Contaminants. 2005;22(2):150–157. https://doi.org/10.1080/02652030500037969.

76. Meister U. Investigations on the change of fumonisin content of maize during hydrothermal treatment of maize. Analysis by means of HPLC methods and ELISA. European Food Research and Technology. 2001;213(3):187–193. https://doi.org/10.1007/s002170100352.

77. Castelo MM, Jackson LS, Hanna MA, Reynolds BH, Bullerman LB. Loss of fuminosin B_1 in extruded and baked corn-based foods with sugars. Journal of Food Science. 2001;66(3):416–427. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb16120.x.

78. Cazzaniga D, Basilico JC, Gonzalez RJ, Torres RL, De Greef DM. Mycotoxins inactivation by extrusion cooking of corn flour. Letters in Applied Microbiology. 2001;33(2):144–147. https://doi.org/10.1046/j.1472-765x.2001.00968.x.

79. Castells M, Pardo E, Ramos AJ, Sanchis V, Marin S. Reduction of ochratoxin A in extruded barley meal. Journal of Food Protection. 2006;69(5):1139–1143. https://doi.org/10.4315/0362-028X-69.5.1139.

80. Schaich KM. Free radical generation during extrusion: a critical contributor to texturization. ACS Symposium Series. 2002;807:35–48. https://doi.org/10.1021/bk-2002-0807.ch003.

81. Kabak B. The fate of mycotoxins during thermal food processing. Journal of the Science of Food and Agriculture. 2009;89(4):549–554. https://doi.org/10.1002/jsfa.3491.

82. Pleadin J, Babić J, Vulić A, Kudumija N, Aladić K, Kiš M, et al. The effect of thermal processing on the reduction of deoxynivalenol and zearalenone cereal content. Croatian Journal of Food Science and Technology. 2019;11(1):44–51. https://doi.org/10.17508/cjfst.2019.11.1.06.

83. Čolović R, Puvača N, Cheli F, Avantaggiato G, Greco D, Duragić O, et al. Decontamination of mycotoxin-contaminated feedstuffs and compound feed. Toxins. 2019;11(11). http://doi.org/10.3390/toxins11110617.

Сведения об авторах

Бахчевников Олег Николаевич
канд. техн. наук, научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», 347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, 14, e-mail: oleg-b@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-3362-5627

Брагинец Сергей Валерьевич
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела переработки продукции растениеводства, ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской», 347740, Россия, г. Зерноград, ул. Ленина, 14, e-mail: sbraginets@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-7137-5692

Information about the authors

Oleg N. Bakhchevnikov
Cand.Sci.(Eng.), Researcher of the Department of Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Centre “Donskoy”, 14, Lenina Str., Zernograd, 347740, Russia, e-mail: oleg-b@list.ru
https://orcid.org/0000-0002-3362-5627

Sergey V. Braginets
Cand.Sci.(Eng.), Leading Researcher of the Department of Vegetable Feedstock Processing, Agricultural Research Centre “Donskoy”, 14, Lenina Str., Zernograd, 347740, Russia, e-mail: sbraginets@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-7137-5692