

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.795-803>

УДК 66-96+664.2



## Модификация углеводов сельскохозяйственного сырья в процессе термопластической экструзии (обзор)

© 2021. А. Ю. Шариков , М. В. Амелякина

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

*Экструзия все чаще рассматривается не просто как эффективная технология переработки сельскохозяйственного сырья в корма и продукты питания ограниченной номенклатуры, но и как гидротермомеханический способ глубокой модификации свойств биополимеров. Углеводы являются самым представленным классом органических соединений в перерабатываемом агропромышленном комплексе сырья. Поэтому оценка влияния фактора переработки на конечные физико-химические и технологические свойства различных видов углеводов, входящих в химический состав сырья, либо используемых в качестве моноингредиентов, является актуальной задачей для пищевой промышленности. В обзоре рассмотрены вопросы экструзионной модификации крахмала в аспекте различия свойств его основных биополимеров амилозы и амилопектина, а также наличия в реакционной системе липидов и органических кислот. Показано, что в зависимости от условий экструзии и состава смесей происходят процессы деградации макромолекул крахмала, клейстеризации, этерификации и образования новых химических связей. Представлены результаты исследований по воздействию экструзии на изменение физико-химических свойств некрахмальных полисахаридов, целлюлозы, арабосиланов, инулина, пектина, хитозана, камедей различного происхождения. Показано, что экструзия и варьирование ее режимов способны значимо влиять на пищевую ценность экструдатов, в том числе изменять гликемический индекс, инактивировать антипитательные факторы или повышать их содержание в готовой продукции.*

**Ключевые слова:** экструзия, модификация, углеводы, крахмал, пищевые волокна, липиды, пектин, инулин, хитозан, камедь, галактоолигосахариды

**Благодарности:** работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи» (тема № 0529-2019-0066).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад экспертную оценку этой работы.

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Шариков А. Ю., Амелякина М. В. Модификация углеводов сельскохозяйственного сырья в процессе термопластической экструзии (обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2021;22(6):795-803. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.795-803>

Поступила: 04.08.2021

Принята к публикации: 04.11.2021

Опубликована онлайн: 15.12.2021

## Modification of carbohydrates of food raw materials in the process of thermoplastic extrusion (review)

© 2021. Anton Yu. Sharikov , Maria V. Amelyakina

All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – a branch of Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russian Federation

*Extrusion can be considered not only as an effective technology for processing agricultural raw materials into feed and food products, but also as a thermo-mechanical method for modification of the chemical properties of biopolymers. Carbohydrates are the most represented class of organic compounds in raw materials processed by the agro-industrial complex. The assessment of the influence of the processing factor on the final physicochemical and technological properties of various types of carbohydrates included in the chemical composition of raw materials or used as mono-ingredients is an actual task for the food industry. The review considers the issues of extrusion modification of starch in terms of the difference in the properties of amylose and amylopectin as well as the presence of lipids and organic acids in the reaction system. Processes of macromolecular degradation, gelatinization, esterification and the formation of new chemical bonds in dependence on the conditions of extrusion and the composition of mixtures are discussed. The results of studies of the influence of extrusion cooking on the changes in the physicochemical properties of non-starchy polysaccharides, cellulose, araboxylans, inulin, pectin, chitosan, and gums of various origins are presented. It has been shown that extrusion and varying of its operating regimes can significantly affect the nutritional value of extrudates including changing the glycemic index, inactivating anti-nutritional factors, or increasing their content in extrudates.*

**Keywords:** extrusion, modification, carbohydrates, starch, dietary fibers, lipids, pectin, inulin, chitosan, gums, galactooligosaccharides

**Acknowledgement:** the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of the Federal Research Center of Nutrition, Biotechnology and Food Safety (theme No. 0529-2019-0066).

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

**Conflict of interest:** the authors stated no conflict of interest.

**For citations:** Sharikov A. Yu., Amelyakina M. V. Modification of carbohydrates of food raw materials in the process of thermoplastic extrusion (review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2021;22(6):795-803. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2021.22.6.795-803>

Received: 04.08.2021

Accepted for publication: 04.11.2021

Published online: 15.12.2021

Термопластическая (варочная) экструзия в аспекте изменения технологических свойств биополимеров растительного сырья является перспективной альтернативой различным способам химической, биокаталитической и другим способам модификации ингредиентов, создания новых видов пищевых добавок и придания определенных свойств готовым экструзионным пищевым продуктам. Комплексное воздействие таких факторов экструзионной обработки, как высокие температура и давление, сдвиговые деформации и возможность варьирования содержанием влаги в реакционной системе позволяет значительно изменять физико-химические и структурные свойства перерабатываемого сырья. Наиболее представленным классом органических соединений в сельскохозяйственном сырье являются углеводы, в большей части это крахмалы и некрахмальные полисахариды, выполняющие важнейшие функции в питании. Кроме того, пищевая промышленность широко использует различные виды углеводов как добавки с разнообразными технологическими целями, в качестве загустителей, стабилизаторов, эмульгаторов, наполнителей, желеобразующих и влагоудерживающих агентов. В результате гидротермомеханического экструзионного воздействия получаемые экструдаты могут обладать новыми, улучшенными технологическими свойствами, что может расширить спектр их использования в пищевой промышленности. Важными аспектами модификации являются изменение пищевой ценности перерабатываемого сырья, образование комплексов органических соединений в реакторной системе экструдера.

**Цель обзора** – на основании данных научных публикаций проанализировать механизмы и характер изменений физико-химических свойств углеводов сельскохозяйственного сырья различного происхождения в результате переработки методом термопластической экструзии.

**Материал и методы.** Изучены материалы научных исследований в области экструзии крахмала, пищевых волокон, пектинсодержащего сырья и других полисахаридов. Поиск источников осуществлялся в научных электронных библиотеках и поисковых системах Science Direct, Google Scholar, медицинской базе данных PubMed, портале ResearchGate, научной электронной библиотеке eLibrary.Ru. Первоначальная глубина поиска составила период 2010-2021 гг., более ранние публикации изучались в случае высокой цитируемости по рассматриваемому направлению исследования. Поисковые запросы выполняли по следующим ключевым словам на русском и английском языках: экструзия, модификация, углеводы, крахмал, амилозо-липидный комплекс, пищевые волокна, целлюлоза, хитозан, полисахариды, пектин, камедь, инулин, галактоолигосахариды/ extrusion, modification, carbohydrates, starch, amylose-lipid complex, dietary fiber, cellulose, chitosan, polysaccharides, pectin, gum, inulin, galactooligosaccharides.

**Основная часть.** Экструзия крахмала. Крахмал, как значимый источник пищевых углеводов и энергии, является основным биополимером, подвергающимся экструзионной переработке в процессе производства продуктов экструзионных круп, ингредиентов для детского питания, сухих завтраков, хлебцев, пеллет и другой крахмалсодержащей продукции. Одна из первых предложенных моделей трансформации крахмала в процессе экструдирования предполагала [1], что с уменьшением содержания влаги от 33 до 14 % происходит постепенный переход от желатинизированных свойств к декстринизированным. Максимальная клейстеризация крахмала отмечена при влажности около 28-29 %, а в экструдированном при влагосодержании менее 20 % крахмале преобладающими становятся декстринизированные свойства. Частично подтвердило данную концепцию исследование

[2], в котором хроматографический анализ экстрадированных смесей картофельной, пшеничной, овсяной муки, мальтодекстрина показал увеличение содержания декстринов степенью полимеризации 7-10 глюкозных остатков с 5,7-6,8 до 10,6-11,2 %, степенью полимеризации 3-6 глюкозных остатков с 0,9-1,1 до 1,3-1,4 %. При этом содержание моно- и дисахаров не изменялось. Согласно альтернативной концепции [3] при экструдировании изменений молекулярной структуры крахмала не происходит, нет образования моно- и дисахаров, олигосахаридов и декстринов более высокой степени полимеризации, что также было отмечено при изучении проэкструдированных крахмалов кукурузы и сорго [4]. Авторы считают, что в результате экструзии происходит разрушение надмолекулярной гранулярной структуры крахмала и его клейстеризация, следствием чего являются высокая степень растворимости и ферментативной атакваемости. В результате исследования влияния высокотемпературной экструзии на крахмалы различного ботанического происхождения на примере картофельного, кукурузного и тапиокового [5] установлено изменение морфологической структуры нативного сырья – разрушение аморфно-кристаллической структуры и переход крахмалов в аморфное состояние.

Как известно, клейстеризация это сложное явление, которое определяется рядом факторов: ботаническим происхождением, условием роста растений, методами выделения и экстракции, содержанием воды, наличием добавок, скоростью нагрева и температурным режимом обработки. Классическая модель клейстеризации, когда гранулы крахмала медленно нагреваются с большим количеством воды, способствующей впитыванию, набуханию и высвобождению биополимеров, неприменима для экструзии с большим усилием сдвига. Полная клейстеризация крахмала при экструдировании происходит при 120 °C и влажности 20-30 %, а при более высоких температурах при влажности 10-20 % [6, 7]. Более современное исследование [8] подводит итог работам [4, 5, 6, 7, 8, 9], рассматривающим влияние экструзии на крахмал через трансформацию его двух основных биополимеров: относительно линейной амилозы с молекулярной массой порядка  $10^6$  Да и амилопектина с высокой степенью полимеризации, содержащего высокую плотность разветвлений, около 5 % гликозидных связей составляют  $\alpha$ -1,6.

Результаты исследования показали, что при сдвиговых деформациях экструзионной обработки значительной деградации подвергаются гранулы амилопектина, а значимых изменений макромолекулярной структуры амилозы не наблюдается. Авторы объясняют данный эффект тем, что амилопектин не только крупнее амилозы, но и имеет гораздо более короткие ответвления. Высокая степень разветвленности делают структуру амилопектина негибкой, уменьшая максимальную деформацию, которую он может выдержать без разрушения. Результаты исследования показали, что фактический разрыв гликозидных связей внутри цепи не является избирательным процессом, и они имеют такую же вероятность разрыва в длинных разветвлениях, как и в коротких. При этом, во время экструзии с большей вероятностью деполимеризация по гликозидным связям происходит в точках разветвления полимерных цепей. В случае более высокого содержания амилозы вязкость получаемого расплава повышается, и процесс экструзии становится более затруднительным [10, 11]. Такое явление объясняется высокими температурами плавления амилозы при низком содержании влаги и тем, что амилозная фракция сложнее взаимодействует с водой и менее склонна к набуханию. Для устранения или уменьшения таких проблем рекомендуется при экструзии крахмалов увеличивать содержание влаги в камере экструдера, повышать степень сжатия шнека и скорость вращения шнека [8, 10].

Структурные изменения при экструдировании крахмала происходят в присутствии липидов. Амилозо-липидные комплексы образуются при нагревании крахмала и последующем медленном охлаждении, вызывая изменения в его кристаллической структуре. Нагревание расширяет диаметр двойной спирали, позволяя липиду вписаться в двойную спираль амилозы. Амилозо-липидные комплексы проявляют термический переход примерно при 100 °C в избытке воды, что интерпретируется как диссоциация комплекса. Однако этот переход является тепло-обратимым, поэтому комплекс может быть преобразован, как только температура системы снизится. Температура перехода и, следовательно, термическая стабильность комплекса определяются свойствами липида (длина цепи, степень ненасыщенности) и другими факторами [12]. После включения липида в амилозную цепь он уменьшает взаимодействие амилозы с молеку-

лами воды, что непосредственно влияет и на ее вязкостные характеристики. Это может быть дополнительным фактором, препятствующим процессу желатинизации в крахмале с высоким содержанием амилозы. Экструдирование картофельного и кукурузного крахмала с 5 и 10 % олеиновой кислоты при 100 °C показало возможность получения резистентного крахмала за счет формирования амилозо-липидных комплексов [13], образование которых является частным случаем возможности амилозы взаимодействовать с амфифильными или гидрофобными молекулами с образованием резистентных крахмалов.

Исследования показали, что процесс желатинизации крахмала тормозит присутствие сахара за счет частичного поглощения воды [14, 15].

О возможности возникновения ковалентных химических связей амилозы с белками в процессе термопластической экструзии с образованием нерастворимых комплексов, элиминирующих деградацию крахмала, свидетельствует ряд исследований с использованием белков молочной сыворотки [16, 17]. Добавление белка другого типа – соевого изолята подтверждает данные выводы: с увеличением содержания белка помимо изменений структурных и физических свойств экструдатов наблюдалось снижение степени клейстеризации крахмала, происходило образование новых ковалентных и водородных химических связей [18].

Результатом экструдирования крахмала совместно с органическими кислотами и их производными является его этерификация [19] с образованием ингредиентов, клейстеры которых обладают повышенной вязкостью, стабильностью и устойчивостью при хранении [20]. Термопластическая экструзия кукурузного крахмала совместно с добавлением 5%-ной лимонной кислоты на 71 % повысила содержание резистентного крахмала [21], не перевариваемых в тонком кишечнике фракций крахмала, идентичным по своим диетическим свойствам пищевым волокнам.

Клейстеризация крахмала в процессе экструзии способствует интенсивности и высокой степени его гидролиза при обработке промышленными амилалитическими ферментными препаратами [22] и в процессе пищеварения [23], результатом чего является нежелательное повышение гликемического индекса экструдатов крахмала [24].

*Модификация свойств пищевых волокон в процессе экструзии.* Все более важную роль в обогащении продуктов питания, в том числе экструзионных, отводят пищевым волокнам. Методические рекомендации МР 2.3.1.2432-08 [25] определяют пищевые волокна как высокомолекулярные углеводы (целлюлоза, пектины и другое, в т.ч. некоторые резистентные к амилазе виды крахмалов) главным образом растительной природы, устойчивые к перевариванию и усвоению в желудочно-кишечном тракте. Растворимые пищевые волокна включают пектин, гуаровую камедь и гемицеллюлозу, в то время как нерастворимые состоят из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина [26]. Экструдирование пищевого сырья ведет к модификации свойств пищевых волокон, некрахмальных полисахаридов, пентозанов и β-глюканов, особенно в части их растворимости. С увеличением удельного расхода электроэнергии на термомеханическую переработку растворимость пищевых волокон значительно повышается [27]. Согласно одному из ранних исследований [28] после экструзии пшеничной муки содержание растворимых арабоксианов увеличилось с 13 до 26 % общего содержания клетчатки, галактозы с 3 до 6 %, ксилозы с 16 до 34 %. Отмечается [29], что максимальное увеличение растворимой клетчатки обеспечивает увеличение скорости вращения шнеков при экструдировании: содержание растворимых пищевых волокон в цельнозерновой муке увеличивалось с 1,25 до 2,19 %, в отрубях с 1,72 до 4,25 %.

Целлюлоза широко используется в композиционных материалах, капсулировании, гранулировании. Экструзия не подвергает сильной деполимеризации целлюлозу, хорошо сохраняет ее свойства, улучшает растворимость и повышает реакционную способность [30]. При термической обработке целлюлозы внутримолекулярные и межмолекулярные водородные связи изменяются и перегруппировываются [31]. Расщепление целлюлозной цепи начинается при температуре выше 150 °C. В диапазоне температур от 170 до 210 °C кристалличность целлюлозы увеличивается, но снижается при температуре выше 210 °C. Использование экструзии позволяет переработать целлюлозу и без использования катализатора получить продукт с химической структурой, аналогичной полученным с использованием агрессивных растворителей. Исследовано влияние внесения нановолокон

целлюлозы в концентрации до 10 % на свойства термопластичного крахмала [32]. Установлено, что в процессе экструзии нанокристаллы целлюлозы образуют новые водородные связи с молекулами крахмала, что способствует увеличению жесткости полученного материала. Результаты исследования показали, что при минимальных дозировках нанокристаллов целлюлозы (1,5 и 2,5 %) снижаются скорость ферментативного гидролиза нанокомпозитов и их набухающая способность. Увеличение дозировки приводит к формированию аморфной и неоднородной структуры нанокомпозитов, эффективно гидролизующихся ферментами.

*Экструзия пектин- и инулинсодержащего сырья.* Тепловое и механическое воздействие экструзии на пектинсодержащее сырье повышает растворимость компонентов клеточной стенки. Механическая экструзионная дезинтеграция вторичных сырьевых ресурсов переработки фруктов и овощей увеличивает растворимость, набухаемость, влагоудерживающую способность [33]. В результате экстремальных условий экструзионной переработки снижается молекулярная масса пектина. В работе по повышению степени экстракции горячей водой пектина из яблочного жмыха с использованием двухшнекового экструдера [34] установлено, что молекулярная масса пектина с ростом удельного расхода энергии от 100 до 180 кВт·ч /т значительно снижалась от  $2,41 \cdot 10^5$  до  $4,97 \cdot 10^4$  в сравнении с  $1,81 \cdot 10^5$  пектина кислотной экстракции. Превышение удельного расхода электроэнергии более 130 кВт·ч/т позволило при этом получить больший выход пектина в сравнении с кислотной экстракцией. С использованием экструзии выход пектина варьировал в диапазоне 11,94-19,75 %, в неэкструдированном – 3,68 %, а при кислотной экстракции составил 14,4 %.

Экструзия жома сахарной свеклы увеличивала растворимость пектинов [33], но значительно снижала характеристическую вязкость и молекулярную массу, которая после экструдирования и водной экстракции составила  $2,51 \cdot 10^4$ , после экстракции с использованием соляной кислоты –  $5,44 \cdot 10^4$ . Содержание галактуроновой кислоты, арабинозы и рамнозы в экструдированных образцах было значительно выше, содержание галактозы – примерно одинаково. Степень метилирования и ацетилирования в экструдированном пектине также была выше. Все это позволяет предположить, что

экструзия разрушает основную цепь пектинов на основе рамногалактуронанов и оказывает небольшое разрушающее действие на боковые цепи в отличие от кислотной обработки.

Важную роль в обогащении продуктов пищевыми волокнами отводится инулину, полисахариду из группы фруктанов, биополимеров на основе молекул  $\beta$ -D-фруктозы. Инулин, как ингредиент, может использоваться в качестве пребиотика для профилактики осложнений функционирования желудочно-кишечного тракта, улучшает усвоение минералов, стимулирует работу иммунной системы, обладает свойствами моделирования текстуры, замены жиров [35]. Исследовано влияние инулина с разной степенью полимеризации (10 и 23), внесенного в экструдированную смесь в количестве от 2 до 7 % [36]. Показано, что во время экструзии происходит разрушение биополимерной цепи инулина, содержание фруктана снижалось в среднем на 17,5 %, но не отмечено повышения образования продуктов реакции Майяра. Химического взаимодействия между крахмалом и инулином не происходит, инулин с меньшей полимеризацией больше влияет на структурные и текстурные свойства экструдатов.

*Модификация свойств камедей.* Экструзия позволяет модифицировать и структуру камедей из различных источников, выполняющих в пищевой промышленности функции влагоудерживающих агентов, загустителей, стабилизаторов, эмульгаторов. Основные технологические проблемы их использования заключаются в трудности получения однородных растворов, образовании комков и медленной скорости гидратации. В результате экструдирования ксантановой камеди при температуре 70 °C улучшается ее диспергируемость в воде [37]. Отмечено, что превышение температуры фазового перехода «порядок-беспорядок» приводит к необратимой потере структуры биополимера. Согласно выводам исследований по влиянию экструзии на изменение свойств камеди сесбании [38] при температуре 80 °C, камеди пажитника [39] при более высоких температурах до 150 °C термомеханическая обработка изменила молекулярно-массовое распределение и повысила полидисперсность биополимеров. После обработки повысились растворимость в воде, вязкость при гидратации воды и скорость водопоглощения. Экструзионная обработка камедей привела к некоторым изменениям в структуре камеди, включая

нарушение структуры клеточной стенки и повышение доступности воды к гидрофильным группам, что улучшило гидратационные свойства обработанной камеди. При этом не отмечено значимого различия в водоудерживающей способности, маслоудерживающей способности, эмульгирующей способности обработанной и необработанной камеди.

*Использование хитозана в экструзии.*

Все большее распространение в фармацевтической и пищевой отраслях, в кормопроизводстве получает хитозан – полисахарид, получаемый из хитина панциря ракообразных или низших грибов. Экструзия хитозана используется в тканевой инженерии, при гранулировании в фармацевтической промышленности и инкапсулировании в пищевой промышленности. Хитин и хитозан в отличие от крахмала и целлюлозы обладают низкой термостойкостью, пластичностью и почти нерастворимы в обычных растворителях. Эти недостатки устраняются путем совмещения хитина или хитозана с другими полимерами для получения гибридных полимерных материалов. Преобразовывать эти полимеры в новый материал без использования агрессивных реагентов и длительных, многостадийных процессов с помощью физического воздействия позволяет экструзионная обработка [40]. Например, с использованием экструдирования разработаны пищевые биоразлагаемые пленки на основе нанокристаллов хитина и водной суспензии целлюлозы [41]. В связи с актуальностью использования хитозана в пищевых продуктах, обусловленной его гипохолестеринемическими и гипоурикемическими свойствами [42], исследована возможность внесения хитозана в рецептуры экструдированных продуктов для улучшения их функциональных свойств [43]. Показано, что добавление 1-3%-го хитозана к экструдированной смеси повышает уровень содержания пищевых волокон, ингибирует процесс клейстеризации крахмала, повышает уровень кристалличности, а также улучшает функциональные свойства готового продукта. При этом исследование методом инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье показало стабильность хитозана в условиях экструзионной переработки.

*Антипитательные факторы.* Повышение пищевой ценности продуктов обеспечивается не только внесением функциональных ингредиентов, но и инактивацией антипита-

тельных факторов или минимизацией их образования, а также снижением потерь биологически активных веществ. К небелковым антипитательным факторам можно отнести галактоолигосахариды – стахиозу, раффинозу и вербаскозу [44], метаболизируемые в организме с образованием метана и диоксида углерода и вызывающие газообразование в кишечнике. Данные, представленные в различных исследованиях, относительно влияния экструзии на концентрацию галактоолигосахаридов достаточно противоречивы. Обзор данной проблемы [44] показал, что ряд исследований содержит сведения об уменьшении концентрации галактоолигосахаридов в результате экструзии бобовых до 68 % в зависимости от вида сырья и условий экструзии, в некоторых источниках показано увеличение от 2 до 97 %. Предполагается, что отсутствие консенсуса в результатах может быть связано с частичным гидролизом олигосахаридов при определенных режимах экструзии, возможностью вступления сахаров в сахароаминную реакцию, что, в свою очередь, может влиять на экстрагируемость олигосахаридов для анализов.

Экстремальные температурные режимы экструдирования, в некоторых случаях превышающие 200 °С, могут стать причиной нежелательной сахароаминной реакции Майяра, с одной стороны, положительно влияющей на органолептические свойства экструдатов, но, с другой стороны, приводящей к потерям аминокислот, снижению усвояемости белка [45]. В данном аспекте наиболее реакционно-способны пентозы, потом гексозы (d-галактоза > d-манноза > d-глюкоза) и дисахариды. Замедлить реакцию Майяра при экструдировании углеводов возможно путем изменения технологических режимов: снижением температуры экструзии, скорости вращения шнеков, увеличением производительности и подачи воды в камеру экструдера [46].

**Заключение.** Анализ литературных источников показывает перспективность использования экструзии для модификации свойств углеводов и сельскохозяйственного сырья, основными компонентами которого они являются. Возможности варьирования гидротермомеханических режимов определяют степень воздействия на углеводы и изменения физико-химических, технологических свойств экструдатов. Показано, что экструзия обеспечивает клейстеризацию крахмала в условиях низкого влагосодержания, повышает раство-



римость некрахмальных полисахаридов, что связано с разрушением ковалентных и нековалентных связей в углеводах, изменением молекулярной структуры и образованием более мелких и растворимых молекулярных фрагментов. На основании проведенного обзора можно выделить ряд перспективных направлений развития экструзионных технологий, связанных с модификацией углеводов. К ним можно отнести разработку новых видов модифицированных крахмалов, в том числе с использованием органических кислот в качестве реагентов, получением функциональных добавок на основе некрахмальных полисахаридов с повышенным содержанием раство-

римых пищевых волокон, получение модифицированных камедей, разработку пищевых продуктов, обогащенных функциональными ингредиентами-углеводами. Важным аспектом инноваций в пищевой промышленности является более рациональное использование сырья, повышение экологизации производства, снижение образования отходов. Данному тренду соответствуют возможности использования экструзии для переработки вторичных сырьевых ресурсов агропромышленного комплекса в продукты высокой добавленной стоимости как, например, экструдирование жомов овощей и фруктов в производстве пектина в качестве альтернативы кислотной экстракции.

### References

1. Gomez M. H., Aguilera J. M. A physicochemical model for extrusion of corn starch. *Journal of Food Science*. 1984;49(1):40-43. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1984.tb13664.x>
2. Obuchowski W., Chalcarz A., Paschke H. The effect of raw material composition on a soluble substances content as well as the direction and extend of changes in saccharides during extrusion process. *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities. Series Food Science and Technology*. 2007;10(1):17. URL: <http://www.ejpau.media.pl/volume10/issue1/art-17.html>
3. Colonna P., Tayeb J., Mercier C. Extrusion cooking of starch and starchy products. In *Extrusion Cooking*, 2TH edition. USA. American Association of Cereal Chemists, 1998. 472 p. URL: <https://www.amazon.com/Extrusion-Cooking-C-Mercier/dp/0913250678>
4. Jackson D. S., Gomez M. H., Waniska R. D., Rooney L. W. Effects of single-screw extrusion cooking on starch as measured by aqueous high-performance size-exclusion chromatography. *Cereal chemistry*. 1990;67(6):529-532. URL: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1990/Documents/67\\_529.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1990/Documents/67_529.pdf)
5. Butrim S. M., Litvyak V. V., Moskva V. V. A study of physicochemical properties of extruded starches of varied biological origin. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2009;82(7):1195-1199. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070427209070076>
6. Linko P., Colonna P., Mercier C. High temperature, short time extrusion cooking. *Advances in Cereal Science and Technology*. 1981;4:145-235.
7. Cheftel J. C. Nutritional effects of extrusion cooking. *Food Chemistry*. 1986;20(4):263-283. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(86\)90096-8](https://doi.org/10.1016/0308-8146(86)90096-8)
8. Liu W.-C., Halley P. J., Gilbert R. G. Mechanism of degradation of starch, a highly branched polymer, during extrusion. *Macromolecules*. 2010;43(6):2855-2864. DOI: <https://doi.org/10.1021/ma100067x>
9. Tang J., Ding X.-L. Relationship between functional properties and macromolecular modifications of extruded corn starch. *Cereal Chemistry*. 1994;71(4):364-369. URL: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71\\_364.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1994/Documents/71_364.pdf)
10. Thuwall M., Boldizar A., Rigdahl M. Extrusion processing of high amylose potato starch materials. *Carbohydrate Polymers*. 2006;65(4):441-446. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.01.033>
11. Shrestha A. K., Ng C. S., Lopez-Rubio A., Blazek J., Gilbert E. P., Gidley M. J. Enzyme resistance and structural organization in extruded high amylose maize starch. *Carbohydrate Polymers*. 2010;80(3):699-710. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.12.001>
12. Cervantes-Ramírez J. E., Cabrera-Ramírez A. H., Morales-Sánchez E., Rodríguez-García M. E., Reyes-Vega M. L., Ramírez-Jiménez A. K., Contreras-Jiménez B. L., Gaytán-Martínez M. Amylose-lipid complex formation from extruded maize starch mixed with fatty acids. *Carbohydrate Polymers*. 2020;246:116555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116555>
13. Cabrera-Ramírez A. H., Cervantes-Ramírez E., Morales-Sánchez E., Rodríguez-García M. E., Reyes-Vega M. de la L., Gaytán-Martínez M. Effect of Extrusion on the Crystalline Structure of Starch during RS5 Formation. *Polysaccharides* 2021;2(1):187-201. DOI: <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2010013>
14. Burey P., Bhandari B. R., Rutgers R. P. G., Halley P. J., Torley P. J. Confectionery Gels: A Review on Formulation, Rheological and Structural Aspects. *International Journal of Food Properties*. 2009;12(1):176-210. DOI: <https://doi.org/10.1080/1094291080223404>
15. Beleia A., Miller R. A., Hosney R. C. Starch Gelatinization in Sugar Solutions. *Starch–Starke*. 1996;48(7-8):259-262. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.19960480705>

16. Matthey F. P., Hanna M. A. Physical and functional properties of twin-screw extruded whey protein concentrate-corn starch blends. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*. 1997;30(4):359-366. DOI: <https://doi.org/10.1006/fstl.1996.0189>
17. Allen K., Carpenter C. E., Walsh M. K. Influence of protein level and starch type on an extrusion-expanded whey product. *International Journal of Food Science Technology*. 2007;42(8):953-960. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01316.x>
18. Chen B., Chen Yu., Junfei L., Yuling Y., Xinchun Sh., Shaowei L., Xiaozhi T. Physical properties and chemical forces of extruded corn starch fortified with soy protein isolate. *International Journal of Food Science & Technology*. 2017;52(12):2604-2613. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13547>
19. Aćkar Đ., Babić J., Jozinović A., Miličević B., Jokić S., Miličević R., Rajić M., Šubarić D. Starch Modification by Organic Acids and Their Derivatives: A Review. *Molecules*. 2015;20(10):19554-19570. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules201019554>
20. Соломина Л. С., Соломин Д. А. Технологические аспекты получения и свойства пшеничного крахмалоцитрата. *Пищевая промышленность*. 2021;(4):50-54. DOI: <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-4-0041>
- Solomina L. S., Solomin D. A. *Tekhnologicheskie aspekty polucheniya i svoystva pshenichnogo krakhmalotsitrata*. [Technological aspects of production and properties of wheat starch citrate]. *Pishchevaya promyshlennost'* = Food Industry. 2021;(4):50-54. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24412/0235-2486-2021-4-0041>
21. Neder-Suárez D., Amaya-Guerra C. A., Pérez-Carrillo E., Quintero-Ramos A., Méndez-Zamora G., Sánchez-Madrigal M. Á., Barba-Dávila B. A., Lardizábal-Gutiérrez D. Optimization of an Extrusion Cooking Process to Increase Formation of Resistant Starch from Corn Starch with Addition of Citric Acid. *Starch-Stärke*. 2020;72(3-4):1-2. DOI: <https://doi.org/10.1002/star.201900150>
22. Шариков А. Ю., Степанов В. И., Иванов В. В. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2019;9(3):447-460. DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460>
- Sharikov A. Yu., Stepanov V. I., Ivanov V. V. *Termoplasticheskaya ekstruziya v protsessakh pishchevoy biotekhnologii*. [Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes]. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2019;9(3):447-460. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460>
23. Brennan M. A., Derbyshire E., Tiwari B. K., Brennan C. S. Ready-to-eat snack products: the role of extrusion technology in developing consumer acceptable and nutritious snacks. *International Journal of Food Science & Technology*. 2013;48(5):893-902. DOI: <https://doi.org/10.1111/ijfs.12055>
24. Onwulata C. I., Thomas A. E., Cooke P. H., Phillips J. G., Carvalho C. W. P., Ascheri J. L. R., Tomasula P. M. Glycemic Potential of Extruded Barley, Cassava, Corn, and Quinoa Enriched With Whey Proteins and Cashew Pulp. *International Journal of Food Properties*. 2010;13(2):338-359. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942910802398487>
25. Нормы физиологических потребностей в энергии и пищевых веществах для различных групп населения Российской Федерации: методические рекомендации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 36 с. Режим доступа: [https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT\\_ID=4583](https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=4583)
- Normy fiziologicheskikh potrebnostey v energii i pishchevykh veshchestvakh dlya razlichnykh grupp naseleniya Rossiyskoy Federatsii: metodicheskie rekomendatsii*. [Norms of physiological requirements in energy and nutrients in various groups of population in Russian Federation: methodological recommendations]. Moscow: *Federal'nyy tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora*, 2009. 36 p. URL: [https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT\\_ID=4583](https://www.rosпотребнадзор.ru/documents/details.php?ELEMENT_ID=4583)
26. Qiao H., Shao H., Zheng X., Liu J., Liu J., Huang J., Zhang C., Liu Zh., Wang J., Guan W. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion. *Food Chemistry*. 2021;335:127522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127522>
27. Robin F., Schuchmann H. P., Palzer S. Dietary fiber in extruded cereals: Limitations and opportunities. *Trends in Food Science & Technology*. 2012;28(1):23-32. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.06.008>
28. Björck I., Nyman M., Asp N. G. Extrusion cooking and dietary fiber: effects on dietary fiber content and on degradation in the rat intestinal tract. *Cereal Chemistry*. 1984;61(2):174-179. URL: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1984/Documents/Chem61\\_174.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1984/Documents/Chem61_174.pdf)
29. Wang W.-M., Klopfenstein C. F., Ponte J. G. Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheat bran on the baking quality of the wheat bran. *Cereal Chem*. 1993;70(6):707-711. URL: [https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1993/Documents/70\\_707.pdf](https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1993/Documents/70_707.pdf)
30. Zhang Y., Li H., Li X., Gibril M. E., Yu M. Chemical modification of cellulose by in situ reactive extrusion in ionic liquid. *Carbohydrate Polymers*. 2014;99:126-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.07.084>
31. Lin Q., Huang Y., Yu W. An in-depth study of molecular and supramolecular structures of bamboo cellulose upon heat treatment. *Carbohydrate Polymers*. 2020;241:116412. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116412>
32. Nessi V., Falourd X., Maigret J.-E., Cahier K., D'Orlando A., Descamps N., Gaucher V., Chevigny Ch., Lourdin D. Cellulose nanocrystals-starch nanocomposites produced by extrusion: Structure and behavior in physiological conditions. *Carbohydrate Polymers*. 2019;225:115123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115123>



33. Ralet M.-C., Thibault J.-F., Della Valle G. Solubilisation of sugar-beet cell wall polysaccharides by extrusion-cooking. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*. 1991;24(2):107-112.  
URL: [https://www.researchgate.net/publication/232091823\\_Solubilisation\\_of\\_sugarbeet\\_cell\\_wall\\_polysaccharides\\_by\\_extrusion-cooking](https://www.researchgate.net/publication/232091823_Solubilisation_of_sugarbeet_cell_wall_polysaccharides_by_extrusion-cooking)
34. Hwang J. K., Kim C. J., Kim Ch. T. Extrusion of Apple Pomace Facilitates Pectin Extraction. *Journal of Food Science*. 1998;63(5):841-844. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1998.tb17911.x>
35. Shoaib M., Shehzad A., Omar M., Rakha A., Raza H., Sharif H. R., Shakeel A., Ansari A., Niazi S. Inulin: Properties, health benefits and food applications. *Carbohydrate Polymers*. 2016;147:444-454. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.04.020>
36. Peressini D., Foschia M., Tubaro F., Sensidoni A. Impact of soluble dietary fibre on the characteristics of extruded snacks. *Food Hydrocolloids*. 2015;43:73-81. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.04.036>
37. Sereno N. M., Hill S. E., Mitchell J. R. Impact of the extrusion process on xanthan gum behavior. *Carbohydrate Research*. 2007;342(10):1333-1342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carres.2007.03.023>
38. Li R., Jia X., Wang Y., Li Y., Cheng Y. The effects of extrusion processing on rheological and physico-chemical properties of sesbania gum. *Food Hydrocolloids*. 2019;90:35-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.11.048>
39. Chang Y. H., Cui S. W., Roberts K. T., Ng P. K. W., Wang Q. Evaluation of extrusion-modified fenugreek gum. *Food Hydrocolloids*. 2011;25(5):1296-1301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.12.003>
40. Duan B., Huang Y., Lu A., Zhang L. Recent advances in chitin based materials constructed via physical methods. *Progress in Polymer Science*. 2018;82:1-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2018.04.001>
41. Herrera N., Salaberria A. M., Mathew A. P., Oksman K. Plasticized polylactic acid nanocomposite films with cellulose and chitin nanocrystals prepared using extrusion and compression molding with two cooling rates: Effects on mechanical, thermal and optical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016;83:89-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.05.024>
42. Muzzarelli R. Chitosan-based dietary foods. *Carbohydrate Polymers*. 1996;29(4):309-316.
43. Kumara R., Xavier K. A. M., Lekshmi M., Balange A., Gudipati V. Fortification of extruded snacks with chitosan: Effects on techno functional and sensory quality. *Carbohydrate Polymers*. 2018;194:267-273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.050>
44. Pedrosa M. M., Guillamón E., Arribas C. Autoclaved and extruded legumes as a source of bioactive phytochemicals: a review. *Foods*. 2021;10(2):379. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10020379>
45. Singh S., Gamlath S., Wakeling L. Nutritional aspects of Food extrusion: A review. *International Journal of Food Science & Technology*. 2007;42(8):916-929. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x>
46. Day L., Swanson B. G. Functionality of Protein-Fortified Extrudates. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2013;12(5):546-564. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12023>

#### Сведения об авторах

✉ Шариков Антон Юрьевич, кандидат техн. наук, зав. отделом оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр питания, биотехнологии и безопасности пищи», ул. Самокатная, д. 4Б, г. Москва, Российская Федерация, 111033, e-mail: [4953624495@mail.ru](mailto:4953624495@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-52090>, e-mail: [anton.sharikov@gmail.com](mailto:anton.sharikov@gmail.com)

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

#### Information about the authors

✉ Anton Yu. Sharikov, PhD in Engineering, Head of the Department, Department of food production equipment and membrane technologies, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety», Samokatnaya Str., 4B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: [4953624495@mail.ru](mailto:4953624495@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9483-52090>, e-mail: [anton.sharikov@gmail.com](mailto:anton.sharikov@gmail.com)

Maria V. Amelyakina, PhD in Engineering, researcher, Department of food production equipment and membrane technologies, All-Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – branch of Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety», Samokatnaya Str., 4B, Moscow, Russian Federation, 111033, e-mail: [4953624495@mail.ru](mailto:4953624495@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5138-6746>

✉ – Для контактов / Corresponding author