Обзорная статья / Review article
УДК 663.031
http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460

Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии

© А.Ю. Шариков, В.И. Степанов, В.В. Иванов

Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал «ФИЦ питания и биотехнологии», г. Москва, Российская Федерация

Резюме: *Развитие пищевых биотехнологий предполагает совершенствование и оптимизацию всех стадий технологического процесса – от предобработки сырья до стадий биокатализа, ферментации и получения готового продукта. На основе релевантных научных источников проведен обзор перспектив интеграции в пищевые биотехнологические производства термопластической экструзии, имеющей ряд технологических и экономических преимуществ. Показано, что экструзия как стадия предподготовки сырья повышает степень его растворимости, дальнейшего гидролиза крахмала, белка, некрахмалистых полисахаридов с соответствующим ростом выхода продуктов биоконверсии. В технологии спирта использование экструдирования крахмалсодержащего сырья может стать фактором увеличения выхода этанола и снижения образования побочных метаболитов брожения, в пивоваренной – позволяет расширить применение несоложеных материалов при приготовлении сусла, при глубинном культивировании микроорганизмов (продуцентов ферментов) – повысить концентрацию среды и синтез ферментов. Приведены положительные результаты получения питательных сред на экструдированном сырье для микробиологического продуцирования L(+) молочной кислоты, производства заквасок и поликомпонентных сквашенных молокосодержащих продуктов. Совмещение экструзии и биокатализа в камере экструдера позволяет получать мальтодекстрины с дектрозным эквивалентом до 10 ед. Помимо переработки крахмалсодержащих субстратов экструзия в комплексе с биокаталитической обработкой обеспечивает глубокую модификацию биополимеров сырья с высоким содержанием белка и пищевых волокон, например, гидролиз обладающих антигенными свойствами термоустойчивых белковых фракций глицинина и β-конглицинина соевого шрота, повышение функциональности отрубей и содержания водорастворимых арабоксиланов в специализированных экструдированных продуктах. Основными факторами, влияющими на степень переработки сырья и качество целевых продуктов, являются влагосодержание и температура экструзии, дозировка ферментных препаратов. Описаны возможности совмещения процессов экструзии и биокатализа в одной системе реакторов или непосредственно в камере экструдера, что позволяет значительно повысить концентрацию перерабатываемых биотехнологических сред, упростить аппаратурно-технологический состав производственных линий, повысить их производственную мощность и эффективность использования энергоресурсов.*

Ключевые слова: *экструзия, биотехнология, фермент, брожение, микроорганизм, высокая концентрация, биоэтанол*

Благодарности: Работа выполнена за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в рамках Программы Фундаментальных научных исследований государственных академий наук.

Информация о статье: Дата поступления 1 августа 2018 г.; дата принятия к печати 5 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

Для цитирования: Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В. Термопластическая экструзия в процессах пищевой биотехнологии // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология.* 2019. Т. 9, N 3. С. 447–460. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460

Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes

© Anton Yu. Sharikov, Vladimir I. Stepanov, Victor V. Ivanov

Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology, Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russian Federation

Abstract: *The development of food biotechnology involves the improvement and optimisation of all stages of the technological process – from the pretreatment of raw materials to the stages of biocatalysis, fermentation and derivation of finished product. Based on relevant scientific sources, a review of the prospects for the integration of thermoplastic extrusion into food biotechnological production, which has a number of technological and economic advantages, is carried out. It is shown that extrusion as a stage of pre-treatment of raw materials increases the degree of solubility, allowing further hydrolysis of starch, protein and non-starch polysaccharides, with a corresponding increase in the yield of bioconversion products. In distillation processes, the use of extruded starch-containing raw materials can become a factor in increased ethanol yield and a reduction in the formation of minor metabolites of fermentation; in brewing, it allows the expanded use of unmalted materials in the preparation of wort; while, in the deep cultivation of microorganisms (enzyme producers), it can be a factor in the increased concentration of the medium and consequent synthesis of enzymes. Positive results for the derivation of nutrient media on extruded raw materials for microbiological production of L (+) lactic acid, production of starter cultures and multicomponent fermented milk-containing products are reported. A combination of extrusion and biocatalysis in the extruder chamber allows maltodextrins to be obtained having a dextrose equivalent of up to 10 units. In addition to the processing of starchy substrates by extrusion in combination with biocatalytic treatment, a deep modification of biopolymers materials having a high protein and dietary fibre content, for example, hydrolysis with heat-stable antigenic properties of the protein fractions of glycinin and conglycinin in soybean meal, increases the functionality of the bran content of water-soluble araboxylans in specialised extruded products. The main factors affecting the degree of processing of raw materials and the quality of the target products are moisture content and extrusion temperature, as well as dosage of enzyme preparations. The possibilities of combining the processes of extrusion and biocatalysis in one reactor system or directly in the extruder chamber are described. These can significantly increase the concentration of processed biotechnological media, simplify the hardware and process composition of production lines, at the same time as increasing production capacity and energy efficiency.*

Keywords: *extrusion, biotechnology, enzyme, fermentation, microorganism, high concentration, bioethanol*

Acknowledgements: This study was supported by grant of the Fundamental scientific research program of the Russian State Academies of Sciences.

Information about the article: Received August 1, 2018; accepted for publication September 5, 2019; available online September 30, 2019.

For citation: Sharikov A.Yu., Stepanov V.I., Ivanov V.V. Thermoplastic extrusion in food biotechnology processes. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2019, vol. 9, no. 3, pp. 447–460. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-447-460

ВВЕДЕНИЕ

Экструзия как комплекс непрерывных процессов смешивания, гомогенизации, термомеханической и барообработки с различным содержанием влаги, а также формования материалов является универсальной и эффективной технологией, широко применяемой в пищевой и перерабатывающей отраслях. В процессе экструдирования смесь пищевых ингредиентов подвергается воздействию высокой температуры (100–180 °C), давления и напряжения сдвига, вырабатываемых силами трения шнеков экструдера. Использование высокой температуры снижает время обработки и позволяет перевести сырье в необходимое функциональное состояние за 30–120 с. Непрерывная термопластическая экструзия имеет ряд экономических преимуществ благодаря замене многих периодических процессов, а также обработке сырья с минимальным добавлением воды, что позволяет избежать необходимости ее последующего принудительного выпаривания [1].

Влияние экструзии на изменение физико-химических свойств сырья определяется прежде всего режимами обработки и его исходным составом. Основные эффекты включают разрушение нативной структуры сырья, клейстеризацию и частичную декстринизацию крахмала, денатурацию белка, разрушение антипитательных факторов, повышение растворимости некрахмалистых полисахаридов и снижение окисления липидов [2].

Процессуальные и экономические преимущества экструзии обусловили ее технологическое и научно-техническое развитие применительно к запросам пищевой и кормовой отраслей. Актуальными, но менее изученными являются вопросы внедрения процесса экструзии в биотехнологии переработки растительного сырья. При этом использование технологии может быть разнообразным: в качестве этапа термомеханической предобработки перед биоконверсией или эксплуатация экструдера в качестве биокаталитического реактора. По сравнению с традиционными реакторами с мешалкой экструдеры могут представлять собой конкурентоспособный альтернативный тип реактора для ферментативной модификации ма-

териалов, особенно при ориентации на конечные продукты с низкой влажностью, поскольку могут работать при более высоком содержании сухих веществ.

Для биотехнологических процессов концентрация сухих веществ в среде является одним из ключевых экономических факторов. Например, в настоящее время процессы производства глюкозных сиропов из крахмала используют количество воды, примерно в 5 раз превышающее минимально необходимое для гидролиза, что создает перспективу для интенсификации процесса за счет снижения содержания воды в процессе биокатализа [3]. Разработка процессов гидролиза сельскохозяйственного сырья при пониженных количествах воды актуальна по ряду причин. Прежде всего, это возможность повышения производственной мощности, энергетической эффективности за счет снижения затрат на нагрев избыточного количества воды и ее последующего испарения в случае получения сухих продуктов. Также важны эффективность использования емкостного оборудования и снижение количества вторичных сырьевых ресурсов. Таким образом, внедрение процессов экструзии в биотехнологические производства перспективно ввиду эффективной трансформации биополимеров сырья для последующей биоконверсии, а также возможности повышения концентрации проэкструдированых субстратов.

Целью настоящего обзора является исследование современных научно-технических достижений в вопросах использования экструзионных технологий в биотехнологических процессах с целью дальнейшего их развития, модернизации и экологизации.

Экструзионная предобработка сырья. Важнейшим этапом биокаталитических технологий является водно-тепловая обработка сырья, которая, например, в случае крахмалсодержащих субстратов обеспечивает клейстеризацию крахмала и повышение его ферментативной атакуемости. С учетом того, что экструзия позволяет клейстеризовать крахмал при низкой влажности сырья (10–20%), ее использование более чем оправдано в случае получения субстратов для последующего гидролиза без стадии варки для спиртовой, крахмалопаточной, микробиологической и пивоваренной отраслей.

Использование экструзии как предварительного этапа подготовки сырья к осахариванию исследовалось в ряде работ [4–8], где традиционные для спиртового производства процессы разваривания под давлением или многочасовая механико-ферментативная обработка заменялись растворением и скоротечным гидролизом экструдатов амилолитическими ферментными препаратами (ФП) при низких температурах. Экструдирование кукурузы в автогенном режиме только за счет сил трения позволило повысить при дальнейшем гидролизе и сбраживании выход глюкозы на 4,7% и этанола на 8,4% по сравнению с развариванием под давлением, и на 8,45 и 33,3% соответственно по сравнению с развариванием без давления [4]. При этом оптимальным режимом экструдирования стали: температура – 160 °С, влажность – 15%, скорость вращения шнеков – 1000 об./мин. Проведено исследование влияния температуры экструзии кукурузы в диапазоне 145–215 °С и влажности 15% на качество последующего сбраживания сред с концентрацией 16 и 20% сухих веществ [5]. Было установлено, что максимальный в опыте выход спирта соответствовал более концентрированной среде и составил 0,509 г этанола/г крахмала при значении контроля 0,454 г этанола/г крахмала. Различия в выходе спирта из экструдатов при варьировании температуры экструзии были статистически незначимы. В основу разработки технологии сверхкритической флюидной экструзии для подготовки сорго к сбраживанию была положена инжекция сверхкритической двуокиси углерода, заменяющей воду в качестве вспенивающего агента при взрыве экструдата на выходе из фильеры [6]. Температура по зонам камеры экструдера повышалась с 45 до 90 °С, а в предматричной зоне снижалась до 30 °С. Концентрация этанола в бражках в зависимости от концентрации сусла находилась в диапазоне 8,77–17,0% об. при сбраживании неэкструдированного сорго и 9,14–17,87% об. – для полученного по технологии сверхкритической флюидной экструзии. При сбраживании субстратов с содержанием сухих веществ от 20 до 40% каждой концентрации субстрата соответствовал более высокий выход спирта, полученного с применением сверхкритической флюидной экструзии по сравнению с неэкструдированным сырьем, в среднем выход этанола был выше на 4,2–5,6%.

Изучено влияние режимных параметров экструзии [7] на процесс последующего сбраживания высококонцентрированных замесов с содержанием растворимых сухих веществ 30% с использованием осмофильного штамма спиртовых дрожжей Saccharomyces cerevesiae 1039. Режимы экструзии дифференцировались по содержанию влаги как мягкий, средний и жесткий, соответствующие 20, 15 и 10% влажности. Максимальная концентрация этанола была отмечена для образцов пшеницы, проэкструдированных при жестком режиме, и составила 16,5% об. Общее содержание примесей, сопутствующих спиртовому брожению, с ужесточением режима экструзии уменьшалось с 5545,9 до 5000,7 мг/дм^3 прежде всего за счет снижения концентрации фенилалкоголя и изоамилола. При этом концентрация альдегида, напротив, увеличивалась с 204,9 до 392 мг/дм^3.

Экструзия позволила получить гидролизаты с концентрацией 30% сухих веществ для дальнейшей биоконверсии в этанол зерна ржи [8], более сложного сырья для переработки вследствии высокого содержания некрахмалистых полисахаридов, ухудшающих реологию замесов и сусла. При гидролизе экструдата ржи, полученного при температуре 178–185 °С и содержании влаги 15–17%, совместно с альфа-амилазой и протеазой в состав мультиэнзимного ферментативного комплекса включался гемицеллюллитический ФП, обеспечивающий снижение динамической вязкости до приемлемых для дальнейшей переработки значений. Концентрация и выход этанола в опытном образце зрелой бражки составили 15,09 %об. и 64,7 дал/т условного крахмала соответственно, что на 1% об. и 2,25 дал/т выше контроля. Также было отмечено, что концентрация побочных метаболитов спиртового брожения экструдированной ржи была на 64% меньше по сравнению с механико-ферментативным способом подготовки сырья к сбраживанию и составила 2844 мг/дм^3. Экструзионная предобработка кукурузы для последующего сбраживания бактериями *Zymomonas mobilis* позволила повысить выход этанола на 12,2 и 8,4% для сред с концентрацией 12 и 20 °Р соответственно [9].

В технологии пивоварения экструзия может использоваться для производства несоложеных материалов, позволяющих снизить себестоимость и сократить время затирания [10]. Например, 50%-ная замена солода на экструдаты кукурузы и сорго показала возможность нормальной ферментации, отсутствие воздействия экструзии на коллоидную стабильность и цвет полученного пива, хотя скорость осахаривания и фильтрации значительно ухудшились, в частности, из-за присутствия интактных крахмальных гранул в экструдатах [11]. При аналогичной замене с использованием способа двойного затирания выход углеводов, этанола, концентрация аминного азота были сравнимы с образцами, полученными традиционным способом [12]. Чтобы предотвратить образование резистентного крахмала и снизить вязкость сусла, образцы крахмалов кукурузы и сорго экструдировали с добавлением 0,5–1% стероиллактилата натрия. При изучении влияния экструдата сорго, вносимого в соотношении 1:2,3 ячменного солода, на формирование флейвора пива было показано, что использование экструдата повышает количество ароматических соединений в напитке, который по органолептическим свойствам сопоставим с легкими сортами пива и элем [13].

Возможности экструзии для подготовки сырья к биокатализу не ограничиваются только крахмалсодержащими материалами. В контексте развития технологий биоэтанола из вторичных сырьевых ресурсов рассмотрены технологические аспекты использования экструзии для предобработки пивной дробины и жома стеблей сорго для дальнейшего сбраживания дрожжами *Saccharomyces cerevesiae* и *Issatchenkia orientalis* соответственно [14, 15].

Серией работ подтверждено повышение эффективности гидролиза биополимеров предварительно проэкструдированных шротов и жмыхов масличных культур. Исследование влияния режимов экструзии на последующий гидролиз экструдата подсолнечного шрота ферментным комплексом протеазы и целлюлазы показало возможность повышения содержания восстанавливающих сахаров в гидролизате и степень гидролиза белка на 73 и 18,6% соответственно за счет проведения термомеханической обработки [16]. В развитие данного исследования изучено влияние факторов концентрации субстрата и дозировки ферментных препаратов на качество биоконверсии экструдатов шрота подсолнечника [17]. Повышение концентрации сухих веществ в реакционной смеси при гидролизе экструдированного шрота подсолнечника способствовало повышению степени гидролиза некрахмальных полисахаридов, но затрудняло гидролиз белка до легкоусвояемых растворимых пептидов с молекулярной массой ниже 10 кДа. Применительно к соевым шротам комбинация экструзии и биокатализа сериновыми протеазами при высоких концентрациях субстрата обеспечивает гидролиз термоустойчивых белковых фракций глицинина и бета-конглицинина, имеющих антигенные свойства [18]. Определена оптимальная температура экструзии на стадии предподготовки шротов и жмыхов сои к протеолизу, составляющая 120–130 °С и обеспечивающая последующий эффективный протеолиз глицинина и β-конглицинина с образованием пептидов с молекулярной массой менее 15 кДа [19].

Возможности глубокой трансформации растительного сырья и ряд технологических преимуществ, таких как стерилизация, инактивация ингибиторов ферментов и микотоксинов, позволяют использовать экструзию в качестве подготовительной стадии при получении сред для ферментации и культивирования микроорганизмов. Исследовано продуцирование L(+) молочной кислоты на среде с использованием экструдата сорго культурой *Rhizopus oryzae* NRRL 395 [20]. Экструдирование позволило сократить время ферментации и увеличить производство молочной кислоты на 16–33% в сравнении с неэкструдированым сорго для концентраций сред от 5 до 15%. Степень конверсии крахмала варьировались от 32,9 до 44,1% для экструдированного сорго и от 31,8% до 34,8% – для сорго, переработанного по стандартной технологии. В работах сотрудников

Всероссийского научно-исследовательского института молочной промышленности были показаны перспективность и эффективность использования экструдированной муки при производстве поликомпонентных сквашенных молокосодержащих продуктов с использованием заквасок, в том числе на основе штаммов *Lactococcus lactis subsp. lactis biovar diacetilactis*, пропионовокислого *Propionobacterium freudenreichii subsp. shermani* и уксуснокислого *Acetobacter aceti* [21, 22]. Использование экструдированных крахмалсодержащих субстратов положительно влияет на процесс тестоприготовления и качество хлеба [23], а также на процессы приготовления заквасок для хлебопечения. В работе [24] было установлено положительное влияние использования экструдата пшеницы на культивирование молочнокислых бактерий штаммов *Lactobacillus sakei* MI806, *Pediococcus pentosaceus* MI810 и *Pediococcus acidilactici* MI807, используемых в качестве закваски. В сравнении с контролем экструдат обеспечивал более длительное сохранение популяции микроорганизмов при повышении температуры и в процессе длительного хранения.

Использование экструдированного сырья для получения питательных сред при глубинном культивировании микроорганизмов – продуцентов ферментов, позволяет повысить концентрацию среды и, следовательно, гидролитическую активность получаемых препаратов, а также значительно упрощает технологию их производства, что было показано на примерах штаммов *Aspergillus awamori* ВУД 2Т и *Bacillus subtillis*-82 [25]. Эксперименты по изучению зависимости биосинтеза термостабильной α-амилазы высокопродуктивным штаммом *Bacillus licheniformis* от концентрации в питательной среде экструдатов ржаной, пшеничной, кукурузной и ячменной муки с содержанием от 6 до 24% показали, что с повышением содержания в питательной среде экструдатов всех злаковых культур амилолитическая активность штамма возрастала, достигая своего максимума при концентрации субстрата от 14 до 20% [26]. Максимальную активность в 1 мл культуральной жидкости 240 единиц амилолитической способности, что составило 140–150% по отношению к контролю, наблюдали на средах, содержащих экструдированные 8% кукурузной и 8% пшеничной муки.

Интеграция экструзии и биокатализа в одну систему реакторов. Взрывное испарение воды из жгута экструдата, возникающее вследствие большого перепада давлений внутри камеры экструдера и на выходе из нее, способствует формированию пенообразной структуры экструдатов из крахмалсодержащего сырья, которая упрочняется с последующим остыванием и подсушкой [27]. Наличие воздушных полостей в гранулах значительно затрудняет их быстрое растворение вследствие плавучести. В то же время клейстеризованное состояние крахмала экструдата при растворении измельченных гранул может привести к комкованию при приготовлении биотехнологических сред. Для решения данной прикладной проблемы рядом исследователей были изучены возможности объединения экструзии с последующими стадиями растворения экструдатов и их гидролиза в одной системе аппаратов, так как это позволяет исключить промежуточные стадии хранения экструдата и его транспортировки, более эффективно использовать энергоресурсы и повысить произодственную мощность [28]. В качестве варианта такой интеграции процессов предложено совмещение одношнекового экструдера с шнековыми смесителями, используемыми в качестве постэкструзионной стадии для повышения степени разжижения и гидролиза крахмала [29]. В данном случае точка ввода амилолитического фермента и воды для формирования гидромодуля находилась непосредственно в месте выхода жгута из фильеры экструдера. Температура экструзии по 3 зонам по направлению движения сырья была установлена на значениях 70, 120 и 110 °С. Исследованиями было показано, что степень гидролиза при данном техническом решении может регулироваться несколькими факторами: влагосодержание сырья и температура экструзии, дозировка фермента, гидромодуль, температура в постэкструзионном смесителе и его длина.

Разработан способ совмещения процессов термомеханической и биохимической переработки пшеничного крахмала в технологии получения высококонцентрированных глюкозных сиропов с концентрацией сухих веществ до 60% [30]. Крахмал и вода в необходимой пропорции смешиваются непосредственно в 10-и секционном экструдере с автономным температурным профилем каждой секции, обрабатываются при температуре 120°С и смешиваются с термостабильной амилазой в последних трех секциях экструдера, охлаждаемых до температуры 80–90 °С. Далее гидролиз продолжается в выдерживателе. Представленный способ позволяет получать на выходе такого биореактора высококонцентрированные гидролизаты крахмала со значением декстрозного эквивалента до 6 ед.

Другой способ интеграции процессов экструзии и биокатализа предполагает соединение двухшнекового экструдера с трубчатым реактором вытеснения в одну реакторную систему через специальный гидродинамический узел На основе технического решения построена одностадийная технология получения высококонцентрированных гидролизатов для спиртового производства [31]. Проведенные

вискозиметрические исследования показали, что новый способ позволяет получать гидролизаты пшеницы с концентрацией растворимых сухих веществ до 30% с приемлемыми для дальнейшей переработки реологическими свойствами. При этом из технологии исключаются продолжительные по времени этапы разваривания, механико-ферментативной обработки с соответствующим более эффективным использованием емкостной аппаратуры, водных и энергоресурсов.

Экструдер как биореактор. Эффективность экструдеров, особенно двухшнековых, при гомогенизации смесей, а также возможность осуществления клейстеризации крахмала при низком содержании воды определили еще одно направление исследований – биокатализ непосредственно в камере экструдера, в основном в аспекте влияния на его результаты различных режимных параметров. Исследование влияния повышения температуры экструзии с 95 до 135 °С с инжекцией термостабильной α-амилазы в камеру экструдера на функциональные свойства и последующую биоконверсию экструдатов кукурузного крахмала в этанол показало, что наилучшие результаты соответствовали температуре 115 °С [32]. Для нее отмечены максимальное повышение содержания редуцирующих сахаров (РС) с 0,68 мг/г в нативном сырье до 0,91 мг/г в экструдате без добавления ФП и до 14,2 мг/г в экструдате с ФП и, соответственно, максимальная последующая биоконверсия в этанол. Результатом экструдирования с ФП при варьировании влагосодержания стало повышение содержания РС в экструдатах, находящегося в положительной корреляции с количеством влаги, до 10640% [33]. Также при более высоких концентрациях влаги в экструдере амилаза была более стабильной и активной. Изменялась и влагоудерживающая способность (ВУС) экструдатов: добавление фермента повысило данный показатель до 28,9% для влажности 35% относительно контроля.

В результате исследования факторного пространства режимных параметров переработки крахмала саго в одношнековом экструдере было установлено, что количество влаги и ФП оказывает самый значимый эффект на такие технологические показатели экструдатов, как декстрозный эквивалент (ДЭ), растворимость, ВУС, степень клейстеризации и молекулярное распределения продуктов гидролиза [34]. При этом диапазон изменения ДЭ составлял 0,3–10,4, а максимальное содержание продуктов гидролиза отмечено для олигасахаридов с 3, 5 и 6 ед. глюкозных остатков.

Воспроизведение исследования на двухшнековом экструдере показало аналогичные тренды влияния факторов [35]. Удельный расход энергии на процесс менялся при варьировании режимов в диапазоне от 21 до 97 Вт·ч/кг сырья с ФП и 57–131 Вт·ч/кг без ФП. Дополнительное внесение глюкоамилазы в последние зоны камеры экструдера с последующим 8 часовым дополнительным осахариванием позволили повысить содержание глюкозы в получаемых экструдатах до 29%, а степень осахаривания и декстрозный эквивалент после 8 ч гидролиза составляли 28–49 и 92–98% соответственно [36]. Авторы отмечают, что более ранняя инжекция глюкоамилазы, увеличивающая время ее экспозиции с крахмалом в камере экструдера, влияла на снижение удельного энергопотребления и на более глубокую степень гидролиза. При экструдировании шелушеного зерна ржи наибольшие значения дектрозного эквивалента и степени гидролиза были получены при температуре 100 °С, влагосодержании 50% и дозировке α-амилазы 4% [37]. Глубина гидролиза была выше для сорта ржи с меньшим содержанием β-глюкана, который при повышенной температуре экструзии мог увеличить вязкость перерабатываемой массы и лимитировать действие амилолитического фермента.

Исследовано влияние режимов экструзии на активность и действие ферментных препаратов амилазы Grindamyl Amylase 1000 и протеазы *Grindamyl Protease* 41 при экструдировании пшеничной муки [38]. Оценка влияния ФП на изменение реологических свойств расплава сырья по изменению давления показала, что добавление амилазы наряду с повышением температуры и влажности снижало давление в камере экструдера. Повышение температуры экструдирования благоприятствовало гидролизу α-амилазой, вызывая более высокую декстринизацию крахмала. При использовании протеазы наблюдалось прогрессирующее снижение степени клейстеризации с увеличением дозировки ФП, что может быть связано с образованием низкомолекулярных продуктов гидролиза глютена, лимитирующих доступ воды для клейстеризации крахмала.

Целая серия экспериментальных исследований посвящена экструзионно-биокаталитической переработке клейкого риса (Oryza sativa L. Var. Glutinosa) [39–43] предварительно прошедшего стадию кондиционирования и выдержки с ФП в течение 12 ч при температуре 4 °С. Авторами работы [39] изучено факторное пространство, включающее температуру в диапазоне 90–106 °С, влагосодержание 30–42% и дозировку ферментного препарата 0,1–1,3%, с целью подготовки рисовой сечки как вторичного сырьевого ресурса к сбраживанию в технологии традиционного китайского рисового вина методом экструзии в присутствии термостабильной амилазы. В ходе исследования установлены оптимальные режимы процесса: 98 °С, 42 и 1% соответственно. Таким образом, экструзионно-ферментативная обработка повы-

сила эффективность сбраживания на 34,6%. Изучение влияния степени помола риса на этапе предподготовки к экструзионно-биокаталитической обработке с целью последующего сбраживания в технологии классического китайского рисового вина показало, что более тонкий помол более доступен для действия фермента, при этом отличия в качественных показателях были статистически незначимыми [40]. В сравнении с традиционным процессом сбраживания совместная экструзионная и ферментативная обработка позволили повысить выход спирта и эффективность сбраживания на 26 и 25% соответственно, а содержание аминокислот, формирующих органолептические характеристики продукта, – в 1,8 раз.

Рядом экспериментов было показано, что экструзионно-биокаталитический способ обеспечивает более высокую сохранность антиоксидантной активности и содержания фенольных соединений по сравнению с традиционным развариванием или термопластической экструзией без фермента [41–44]. Общая сохранность после комплексной обработки риса составила 87,73%, что практически в 2 раза выше по сравнению с контрольными способами обработки [41] Потери для галовой, хлоргеновой, ванилиновой, сиреневой и феруловой кислот составили всего 2,66, 2,04, 22,49, 1,89 и 6,37% соответственно. Авторами работы [42] увеличением дозировки α-амилазы до 6% было достигнуто повышение сохранности свободных и связанных фенольных соединений: для шелушенного риса – до 89,2 и до 100%, для нешелушенного – до 86 и 86,7% соответсвенно. При этом удельный расход электроэнергии снизился примерно в 3–4 раза. В сравнении с обычной экструзия с 1% амилазы значительно увеличивала сохранность фенольных соединений и значения антиоксидантной активности по радикалу DPPH (1,1-дефинил-2 пикрилгидразил), по восстановлению антиоксидантами железа и по радикалу ABTS (2,2′-азино-бис(3-этилбензтиазолино-6-сульфоновая кислота) на 22,4 и на 19,5, 14,7, 41,5%, соответственно [44]. По предположению авторов публикации [41], переработанный по экструзионно-биокаталитической технологии рис приобрел более высокие антирадикальные и антиоксидантные свойства благодаря синергетическому действию остаточных фенолов и образовавшихся продуктов реакции Майяра.

В таблице представлены сводные данные по режимам экструдирования различных субстратов совместно с ФП и влиянию такого способа на изменение технологических показателей конечных продуктов переработки.

Исследовано влияние солей двухвалентных металлов $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, $MnSO_4 \cdot H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ и их дозировки 0,6–1,8 ммоль/100 г на процесс экструдирования предварительно смешанной с α-амилазой рисовой сечки [43]. Вискозиметрический анализ показал, что внесение солей Mg(II), Ca(II), Mn(II) и Zn(II) снижает, а солей Fe(II) и Cu(II) повышает вязкость растворов экструдатов. Непереходные металлы – Mg(II) и Ca(II), активировали фермент и улучшили условия экструзии, особенно при высоких дозировках – 1,8/100 и 1,2–1,8 ммоль/100 г соответственно, что в перспективе позволит снижать дозировки ФП при сохранении необходимой степени биоконверсии крахмала.

Рост растворимости крахмала сырья и снижение растворимости белка в результате экструдирования позволяют рассматривать возможность разработки на его основе процессов получения концентратов белка без использования кислотной или щелочной экстракции с сокращением потребления воды и ФП, времени обработки за счет повышения концентрации обрабатываемой среды. Использование комплексного процесса, включающего экструзию сорго с ферментом, постэкструзионную ферментативную обработку, центруфугирование и промывку осадка позволило получить концентрат белка сорго с более высокими показателями содержания и усвояемости белка [45]. Снижение влагосодержания и повышение дозировки ФП при экструдировании оказывали значительное влияние на рост содержания белка в условиях отсутствия постэкструзионного гидролиза. Исследования режимного факторного пространства показали, что оптимальную комбинацию параметров составляли 32% влажности при экструзии, отсутствие фермента в экструдере и постэкструзионный гидролиз 5% α-амилазы, что обеспечивало получение концентрата с максимальным содержанием белка – 82,4%, и показателем его переваримости – 56,7%. Авторы отмечают, что для повышения содержания белка более 70% необходимо увеличение удельного расхода электроэнергии, зависящего согласно математический модели на 92,2% от влагосодержания, выше 450 кДж/кг.

Экономически оправданный переход к переработке концентрированных сред ведет к ряду технологических сложностей, в том числе трудности перемешивания из-за высокой вязкости. Одним из решений может стать формирование высококонцентрированного гидромодуля с ферментом экструдированием при температуре, оптимальной для активности ФП, и последующее проведение биокатализа после экструзии без перемешивания. На примере пшеничных отрубей был проведен биокатализ ксиланазой среды с содержанием 40–63% СВ в течение 4 ч при 50 °С без перемешивания [46]. В сравнении с традиционной водно-ферментативной обработкой с концентрацией 8% СВ и активном перемешивании результаты исследования показали снижение выхода продуктов гидролиза с увеличением концентрации субстрата.

Режимные параметры экструдирования растительного сырья с гидролитическими ферментами

Regimes of extrusion cooking of food plant materials in the presence of hydrolytic enzymes

Авторы работы	Сырье	Фермент	Режим экструзии	Эффект внесения или увеличения дозировки фермента
Myat L. [32]	Кукуруза	Termamyl supra 120L	Двухшнековый экструдер *T* = 95–135 °C; *W* = 30%; *n* = 150 об./мин; *L*:*D* = 25:1	Концентрация спирта ↑ Содержание РС ↑ Свободный аминный азот ↑ Содержание фенольных веществ ↑
Solihin B.W. [33]	Крахмал кукурузы	Termamyl supra 120L	Двухшнековый экструдер *T* = 90 °C; *W* = 25–35%; *n* = 250 об./мин; *L*:*D* = 25:1; *D* = 29 мм	Содержание глюкозы ↑ ВУС ↑ Коэффициент расширения ↓
Govindasamy S. [34]	Крахмал саго	Termamyl 120L Дозировка: 1,48–6,52%	Одношнековый экструдер *T* = 70,5–97,5 °C; *W* = 21–38%; *n* = 80 об./мин; *L*:*D* = 20:1; *D* = 19 мм	ДЭ ↑ Растворимость ↑ ВУС ↓
Govindasamy S. [35]	Крахмал саго	Termamyl 120L Дозировка: 0–1%	Двухшнековый экструдер *T* = 70–130 °C; *W* = 28,5–50,5%; *n* = 70–190 об./мин; *L*:*D* = 16:1; *D* = 25 мм	ДЭ ↑ Растворимость ↑ ВУС ↓ Удельный расход электроэнергии ↓
Vasanthan T. [37]	Шелушенная рожь	Termamyl 120L Дозировка: 0–4%	Двухшнековый экструдер *T* =9 0–140 ºC; *W* = 20–50%; *n* = 50 об./мин; *L*:*D* = 20:1	ДЭ ↑ Степень гидролиза ↑
De Pilli T. [38]	Мука пшеницы	Grindamyl Amylase 1000 Дозировка: 0–2 г/кг Grinamyl Protease 41 Дозировка: 0–2 г/кг	Двухшнековый экструдер *T* = 60–120 °C; *W* = 20–36%; *n* = 1 00–400 об./мин; *L*:*D* = 36:1	Растворимость ↑ ВУС ↓ Степень клейстеризации ↓
Xu E. [41]	Рис	Termamyl 120L Дозировка: 0,01%	Двухшнековый экструдер *T* = 98 °C; *W* = 36% *n* = 100 об./мин *L*:*D* = 25:1	Растворимость ↑ ВУС ↓ Содержание фенольных веществ ↑ Антиоксидантные свойства ↑
Zeng Z. [44]	Коричневый рис	Termamyl SC Дозировка: 0,1–1%	Двухшнековый экструдер *T* = 100 °C; *W* = 30%; *n* = 100 об./мин *L*:*D* = 18:1	Содержание РС ↑ Содержание фенольных веществ ↑ Антиоксидантные свойства ↑

Примечание. T – температура экструдирования; W – влагосодержание сырья как сумма влажности сырья и добавленной воды при экструдировании; n – скорость вращения шнеков, D – диаметр шнека; L – длина шнека; L:D – соотношение длины к диаметру; РС – редуцирующие сахара; ВУС – влагоудерживающая способность; ДЭ – декстрозный эквивалент.

При этом экструзионная предобработка обеспечила эффективное действие ксиланазы на пшеничные отруби при содержании влаги менее 54% без перемешивания с аналогичным водно-ферментативной обработке характером распределения молекулярных масс продуктов гидролиза, возможно, благодаря высокой степени диффузии при экструдировании.

Перспективы экструзионно-ферментативных процессов не ограничиваются исключительно биотехнологическим сектором. Показано, что использование предварительно модифицированных в экструдере гемицеллюлолитическими ферментами отрубей в технологии специализированных экструдированных продуктов обеспечивает рост их функциональности в го-

товой продукции, в том числе улучшение реологических свойств, повышение содержание водорастворимых арабоксиланов [47]. Также разработана технология получения экструдированных продуктов с повышенным содержанием липидов из нативной или желанитизированной пшеничной муки и миндаля, включающая эструзию смеси при 26% влажности и температуре 54 °С совместно с амилолитическими и протеолитическими ФП с последующим формованием, нарезкой и выпеканием в печи при температуре 200 °С в течение 15 мин. [48]. Использование коммерческих ферментов Grindamyl Amylase 1000 и особенно Grindamyl Protease 41 в процессе экструдирования высокожирного сырья даже в небольшой дозировке позволило улучшить реологические и текстур-ные свойства готового продукта.

ВЫВОДЫ

Анализ актуальных литературных источников и исследовательских практик позволяет рассматривать экструзию как перспективный процесс предобработки сырья и получения готовой продукции с использованием ферментных препаратов или микроорганизмов. Среди областей потенциального внедрения можно выделить отрасли, перерабатывающие крахмалсодержащее сырье: спиртовую, пивоваренную, крахмалопаточную, микробиологическую, хлебопекарную. Кроме того, широкие перспективы открываются для разработки новых продуктов, например, молочнокислых, а также ингредиентов и кормовых добавок, таких как белковые гидролизаты, концентраты, модифицированные отруби.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Adekola K.A. Engineering review food extrusion technology and its applications // Journal of Food Science and Engineering. 2016. Vol. 6. P. 149–168. DOI: 10.17265/2159-5828/2016.03.005

2. Singh S., Gamlath S., Wakeling L. Nutritional aspects of food extrusion: a review // International Journal of Food Science and Technology. 2007. Vol. 42. Issue 8. P. 916–929. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x

3. Van der Veen M.E., Veelaert S., Goot A.J., Boom R. Starch hydrolysis under low water conditions: A conceptual process design // Journal of Food Engineering. 2006. Vol. 75. Issue 2. P. 178–186. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.006

4. Korn S.R., Harper J.M. Extrusion of corn for ethanol fermentation // Biotechnology Letters. 1982. Vol. 4. Issue 7. P. 417–422.

5. Chmielewska J., Kawa-Rygielska J., Zięba T. Ethanol fermentation of maize mashes // Polish Journal of Food and Nutrition Sciences. 2007. Vol. 57. No. 4. P. 85–89.

6. Zhan X., Wang D., Bean S.R., Mo X., Sun X.S., Boyle D. Ethanol production from supercritical-fluid-extrusion cooked sorghum // Industrial Crops and Products. 2006. Vol. 23. Issue 3. P. 304–310. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.09.001

7. Шариков А.Ю., Римарева Л.В., Степанов В.И., Иванов В.В., Игнатова Н.И., Веселовская О.В. Влияние режимов экструзионной обработки зернового сырья на эффективность биотехнологических процессов в перерабатывающих отраслях АПК // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. N 5. С. 18–21.

8. Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В., Игнатова Н.И., Скворцова Л.И. Перспективы использования экструдата ржи в биотехнологии этанола // Достижения науки и техники в АПК. 2014. N 5. С. 66–68.

9. Peralta-Contreras M., Aguilar-Zamarripa E., Perez-Carrillo E., Escamilla-García E., Serna-Saldívar S.O. Ethanol production from extruded thermoplastic maize meal by high gravity fermentation with Zymomonas mobilis // Biotechnology Research International. 2014. Vol. 2014. 8 p. DOI: 10.1155/2014/654853

10. Шабурова Г.В., Курочкин А.А., Воронина П.К. Повышение технологического потенциала несоложеных зернопродуктов // Техника и технология пищевых производств. 2014. N 1 (32). С. 90–96.

11. Delcour J.A., Hennebert M.M.E., Vancraenenbroeck R., Moerman E. Unmalted cereal products for beer brewing. Part i. The use of high percentages of extruded or regular corn starch and sorghum // Journal of the Insitute of brewing. 1989. Vol. 95. Issue 4. P. 271–276. https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1989.tb04631.x

12. Cortés-Ceballos E., Nava-Valdez Y., Pérez-Carrillo E., Serna-Saldívar S.O. Effect of the use of thermoplastic extruded corn or sorghum starches on the brewing performance of lager beers // Journal of the American Society of Brewing Chemists. 2015. Vol. 73. No. 4. P. 318–322.

13. Ma C., He Y., Cao Y., Bai X., Li H. Analysis of flavour compounds in beer with extruded sorghum as an adjunct using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography mass spectrometry // Journal of the Insitute of brewing. 2016. Vol. 122. Issue 2. P. 251–260. DOI: 10.1002/jib.330

14. Heredia-Olea E., Pérez-Carrillo E., Serna-Saldívar S.O. Effect of extrusion conditions and hydrolysis with fiber degrading enzymes in the production of C5 and C6 sugars from brewers' spent grain for bioethanol production // Biofuel Research Journal. 2015. Vol. 5. P. 203–208. DOI: 10.18331/BRJ2015.2.1.6

15. Heredia-Olea E., Pérez-Carrillo E., Montoya-Chiw M., Serna-Saldívar S.O. Effects of Extrusion Pretreatment Parameters on Sweet Sorghum Bagasse Enzymatic Hydrolysis and Its Subsequent Conversion into Bioethanol // BioMed Research International. 2015. Vol. 2015, 10 p. DOI: 10.1155/2015/325905

16. Шариков А.Ю., Середа А.С., Великорецкая И.А., Костылева Е.В., Степанов В.И., Иванов В.В.

Режимы экструзии шрота подсолнечника как фактор его предобработки для ферментативного гидролиза // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. Т. 6. N 4. С. 61–67. DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-4-61-67

17. Шариков А.Ю., Середа А.С., Великорецкая И.А., Костылева Е.В., Веселкина Т.Н. Исследование влияния концентрации субстрата и дозировок ферментных препаратов на процесс гидролиза экструдированного шрота подсолнечника // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. N 12 (54). С.157–162. DOI: https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.54.159

18. Sharikov A.Yu., Sereda A.S., Kostyleva E.V., Velikoretskaya I.A., Polyakov V.A. Enzyme hydrolysis of extruded soybean meal at high substrate concentrations // Acta periodica technologica. 2016. Vol. 47. P. 63–73. DOI: 10.2298/APT1647063S

19. Шариков А.Ю., Середа А.С., Костылева Е.В., Смирнова И.А. Влияние температуры экструзии на устранение антипитательных свойств глицинина и бета-конглицинина при протеолизе экструдированных шротов и жмыхов сои // Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2015. N 6 (35). С. 8–13.

20. Zhan X., Wang D., Sun X.S., Kim S., Fung D.Y.C. Lactic acid production using extrusion-cooked grain sorghum // Transactions of the ASAE. 2003. Vol. 46. Issue 2. P. 589–593. DOI: 10.13031/2013.12914

21. Соколова О.В. Новый поликомпонентный молочный продукт // Молочная промышленность. 2013. N 1. С. 78–79.

22. Соколова О.В., Рожкова И.В. Особенности технологии сквашенных мукосодержащих продуктов // Перспективные биотехнологические процессы в технологиях продуктов питания и кормов: сборник трудов VII Международного научно-практического симпозиума (Москва, 09 апреля 2014 г.). М.: Изд-во ВНИИ пищевой биотехнологии РАСХН, 2014. С. 316–322.

23. Ковбаса В.Н., Кобылинская Е.В., Ковалев А.В., Олифиренко В.Н. Экструдированный пшеничный крахмал как улучшитель для хлебопекарных изделий // Известия вузов. Пищевая технология. 1998. N 2-3 (243-244). С. 21–23.

24. Juodeikiene G., Salomskiene J., Eidukonyte D., Vidmantiene D., Narbutaite V., Vaiciulyte-Funk L. The impact of novel fermented products containing extruded wheat material on the quality of wheat bread // Food Technology and Biotechnology. 2011. Vol. 49. Issue 4. P. 502–510.

25. Устинников Б.А., Степанов В.И., Цурикова Н.В., Иванов В.В., Ахметшина М.Р. Экструзионная технология приготовления питательных сред при получении ферментов // Пищевая промышленность. 1991. N 7. С. 66–67.

26. Tsurikova N.V., Nefedova L.I., Kostyleva E.V., Zvenigorodskii V.I., Yasinovskii V.G., Voeikova T.A., Sinitsyn A.P. Selection of a potent bacillus licheniformis strain producing thermostable amylase // Applied Biochemistry and Microbiology. 2002. Vol. 38. No. 5. P. 427–432. DOI: 10.1023/A:1019960216770

27. Moraru C.I., Kokini J.L. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2003. Vol. 2. P. 147–165.

28. Степанов В.И., Римарева Л.В., Иванов В.В. Экструзионный метод переработки крахмалосодержащего сырья в биотехнологическом производстве // Хранение и переработка сельхозсырья. 2002. N 8. С. 48–49.

29. Grafelman D.D., Meagher M.M. Liquefaction of starch by a single-screw extruder and post-extrusion static-mixer reactor // Journal of Food Engineering. 1995. Vol. 24. Issue 4. P. 529–542.

30. Baks T., Kappen F.H.J., Janssen A.E.M., Boom R.M. Towards an optimal process for gelatinisation and hydrolysis of highly concentrated starch–water mixtures with alpha-amylase from B. Licheniformis // Journal of Cereal Science. 2008. Vol. 47. Issue 2. P. 214–225. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.03.011

31. Степанов В.И., Римарева Л.В., Иванов В.В., Шариков А.Ю. Метод переработки крахмалсодержащего сырья при получении концентрированного зернового сусла // Производство спирта и ликероводочных изделий. 2007. N 3. С. 16–17.

32. Myat L., Ryu G.-H. Extrusion with thermostable α-amylase Injection as pretreatment method for ethanol production from corn starch // Microbial & Biochemical Technology. 2013. Vol. 5. Issue 2. P. 47–53. DOI: 10.4172/1948-5948.1000099

33. Solihin B.W., Kim M.H., Im B.S., Cha J.Y., Ryu G..H. Effects of feed moisture (ii) content on enzymatic hydrolysis of corn starch in twin-screw extruder and saccharification of the dried extrudates // Food science and biotechnologie. 2007. Vol.16. No. 3. P. 381–385.

34. Govindasamy S., Campanella O.H., Oates C.G. The single screw extruder as a bioreactor for sago starch hydrolysis // Food Chemistry. 1997. Vol. 60. Issue 1. P. 1–11. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00100-8

35. Govindasamy S., Campanella O.H., Oates C.G. Enzymatic hydrolysis of sago starch in a twin-screw extruder // Journal of Food Engineering. 1997. Vol. 32. Issue 4. P. 403–426. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00017-4

36. Govindasamy S., Campanella O.H., Oates C.G. Enzymatic hydrolysis and saccharification optimisation of sago starch in a twin-screw extruder // Journal of Food Engineering. 1997. Vol. 32. Issue 4. P. 427–446.

37. Vasanthan T., Yeung J., Hoover R. Dextrinization of Starch in Barley Flours with Thermostable alpha-Amylase by Extrusion Cooking // Starch. 2001. Vol. 53. No. 12. P. 616–622. DOI: 10.1002/1521-379X(200112)53:12<616::AID-STAR616>3.0.CO;2-M

38. De Pilli T., Legrand J., Giuliani R., Derossi A., Severini C. Effect of processing variables and enzymatic activity on wheat flour dough extruded under different operating conditions // Food Tech-

nology and Biotechnology. 2009. Vol. 47. No. 4. P. 404–412.

39. Li H., Jiao A., Xu X., Wu Ch., Wei B., Hu X., Jin Zh., Tian Y. Simultaneous saccharification and fermentation of broken rice: an enzymatic extrusion liquefaction pretreatment for Chinese rice wine production // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2013. Vol. 36. Issue 8. P. 1141–1148.

40. Xu E., Wu Z., Long J., Wang F., Pan X., Xu X., Jin Zh., Jiao A. Impact of high-shear extrusion combined with enzymatic hydrolysis on rice properties and Chinese rice wine fermentation // Food and Bioprocess Technology. 2015. Vol. 8. Issue 3. P. 589–604.

41. Xu E., Wu Z., Long J., Wang F., Pan X., Xu X., Jin Zh., Jiao A. Improved bioaccessibility of phenolics and antioxidant activity of glutinous rice and its fermented Chinese rice wine by simultaneous extrusion and enzymatic hydrolysis // Journal of Functional Foods. 2015. Vol. 17. P. 214–226. https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.05.032

42. Xu E., Wu Z., Long J., Wang F., Pan X., Xu X., Jin Zh., Jiao A. Effect of thermostable α-amylase addition on the physicochemical properties, free/bound phenolics and antioxidant capacities of extruded hulled and whole rice // Food and Bioprocess Technology. 2015. Vol. 8. Issue 9. P. 1958–1973.

43. Xu E.,Wu Zh., Jin Zh., Campanella O.H. Bioextrusion of broken rice in the presence of divalent metal salts: effects on starch microstructure and phenolics compounds // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. 2018. Vol. 6. P. 1162–1171. DOI:10.1021/acssuschemeng.7b03459

44. Zeng Z., LiY., Yang R., Liu Ch., Hu X., Luo S., Gong E., Ye J. The relationship between reducing sugars and phenolic retention of brown rice after enzymatic extrusion // Journal of Cereal Science. 2017. Vol. 74. P. 244–249.

45. De Mesa-Stonestreet N.J, Alavi S., Gwirtz J. Extrusion-enzyme liquefaction as a method for producing sorghum protein concentrates // Journal of Food Engineering. 2012. Vol. 108. Issue 2. P.365–375. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.024

46. Santala O., Nordlund E., Poutanen K. Use of an extruder for pre-mixing enhances xylanase action on wheat bran at low water content // Bioresource Technology. 2013. Vol. 149. P. 191–199. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.029

47. Santala O., Kiran A., Sozer N., Poutanen K., Nordlund E. Enzymatic modification and particle size reduction of wheat bran improves the mechanical properties and structure of bran-enriched expanded extrudates // Journal of Cereal Science. 2014. Vol. 60. Issue 2. P. 448–456. DOI: 10.1016/j.jcs.2014.04.003

48. De Pilli T., Severini C., Carbone B.F., Giuliani R., Derossi A. Improving fatty extrudate structure with amylase and protease // Journal of Food Biochemistry. 2004. Vol. 28. Issue 5. P. 387–403. https://doi.org/10. 1111/j.1745-4514.2004.04403.x

REFERENCES

1. Adekola K.A. Engineering review food extrusion technology and its applications. *Journal of Food Science and Engineering*. 2016, vol. 6, pp. 149–168. DOI: 10.17265/2159-5828/2016.03.005

2. Singh S., Gamlath S., Wakeling L. Nutritional aspects of food extrusion: a review. *International Journal of Food Science and Technology*. 2007, vol. 42, issue 8, pp. 916–929. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2006.01309.x

3. Van der Veen M.E., Veelaert S., Goot A.J., Boom R. Starch hydrolysis under low water conditions: A conceptual process design. *Journal of Food Engineering*. 2006, vol. 75, issue 2, pp. 178–186. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.04.006

4. Korn S.R., Harper J.M. Extrusion of corn for ethanol fermentation. *Biotechnology Letters*. 1982, vol. 4, issue 7, pp. 417–422.

5. Chmielewska J., Kawa-Rygielska J., Zięba T. Ethanol fermentation of maize mashes. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*. 2007, vol. 57, no. 4, pp. 85–89.

6. Zhan X., Wang D., Bean S.R., Mo X., Sun X.S., Boyle D. Ethanol production from supercritical-fluid-extrusion cooked sorghum. *Industrial Crops and Products.* 2006, vol. 23, issue 3, pp. 304–310. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.09.001

7. Sharikov A.Yu., Rimareva L.V., Stepanov V.I., Ivanov V.V., Ignatova N.I., Veselovskaya O.V. Influence of cereal extrusion variables on efficiency of biotechnological processes for agroculture processing industries. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ya.* 2012, no. 5, pp. 18–21. (In Russian)

8. Sharikov A.Yu., Rimareva L.V., Ivanov V.V., Stepanov V.I., Ignatova N.I., Skvortsova L.I. *Prospects of using the rye extrudate in ethanol biotechnology.* Dostizheniya nauki i tekhniki v APK. 2014, no. 5, pp. 66–68. (In Russian)

9. Peralta-Contreras M., Aguilar-Zamarripa E., Perez-Carrillo E., Escamilla-García E., Serna-Saldívar S.O. Ethanol production from extruded thermoplastic maize meal by high gravity fermentation with Zymomonas mobilis. *Biotechnology Research International.* 2014, vol. 2014, 8 p. DOI: 10.1155/ 2014/654853

10. Shaburova G.V., Kurochkin A.A., Voronina P.K. Building of the technological potential of processing unmalted grain products. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv.* 2014, no. 1 (32), pp. 90–96. (In Russian)

11. Delcour J.A., Hennebert M.M.E., Vancraenenbroeck R., Moerman E. Unmalted cereal products for beer brewing. Part i. The use of high percentages of extruded or regular corn starch and sorghum. *Journal of the Insitute of brewing*. 1989, vol. 95, issue 4, pp. 271–276. https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.1989.tb04631.x

12. Cortés-Ceballos E., Nava-Valdez Y., Pérez-Carrillo E., Serna-Saldívar S.O. Effect of the use of thermoplastic extruded corn or sorghum starches on the brewing performance of lager beers. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*. 2015, vol. 73, no. 4, pp. 318–322.

13. Ma C., He Y., Cao Y., Bai X., Li H. Analysis of flavour compounds in beer with extruded sorghum as an adjunct using headspace solid-phase microextraction and gas chromatography mass spectrometry. *Journal of the Insitute of brewing*. 2016, vol. 122, issue 2, pp. 251–260. DOI: 10.1002/jib.330

14. Heredia-Olea E., Pérez-Carrillo E., Serna-Saldívar S.O. Effect of extrusion conditions and hydrolysis with fiber degrading enzymes in the production of C5 and C6 sugars from brewers' spent grain for bioethanol production. *Biofuel Research Journal.* 2015, vol. 5, pp. 203–208. DOI: 10.18331/BRJ2015.2.1.6

15. Heredia-Olea E., Pérez-Carrillo E., Montoya-Chiw M., Serna-Saldívar S.O. Effects of Extrusion Pretreatment Parameters on Sweet Sorghum Bagasse Enzymatic Hydrolysis and Its Subsequent Conversion into Bioethanol. *BioMed Research International*. 2015, vol. 2015, 10 p. DOI: 10.1155/2015/325905

16. Sharikov A.Yu., Sereda A.S., Velikoretskaya I.A., Kostyleva E.V., Stepanov V.I., Ivanov V.V. Extrusion conditions as pretreatment factor for sunflower meal enzymatic hydrolysis. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya himiya i biotekhnologiya.* 2016, no. 4, pp. 61–67. (In Russian)

17. Sharikov A.Yu., Sereda A.S., Velikoretskaya I.A., Kostyleva E.V., Veselkina T.N. Effect of solids concentration and enzymes dosages on hydrolysis of extruded sunflower meal. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. 2016, no. 12 (54), pp.157–162. (In Russian). DOI: https://doi.org/10.18454/IRJ.2016.54.159

18. Sharikov A.Yu., Sereda A.S., Kostyleva E.V., Velikoretskaya I.A., Polyakov V.A. Enzyme hydrolysis of extruded soybean meal at high substrate concentrations. *Acta periodica technologica*. 2016, vol. 47, pp. 63–73. DOI: 10.2298/APT1647063S

19. Sharikov A.Yu., Sereda A.S., Kostyleva E.V., Smirnova I.A. Influence of extrusion temperature on elimination of antinutrinional properties of glicinin and beta-conglicinin during proteolisys of extruded soybean meal and press cake. *Tekhnologiya i tovarovedenie innovatsionnykh pishchevykh produktov*. 2015, no. 6 (35), pp. 8–13. (In Russian)

20. Zhan X., Wang D., Sun X.S., Kim S., Fung D.Y.C. Lactic acid production using extrusion-cooked grain sorghum. *Transactions of the* ASAE. 2003, vol. 46, issue 2, pp. 589–593. DOI: 10.13031/2013.12914

21. Sokolova O.V. New poly-component fermented milk product. *Molochnaya promyshlennost'*. 2013, no. 1, pp. 78–79. (In Russian)

22. Sokolova O.V., Rozhkova I.V. *Osobennosti tekhnologii skvashennykh mukosoderzhashchikh produktov* [Features of the technology of fermented flour-containing products*]. Sbornik trudov VII Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo simpoziuma «Perspektivnye biotekhnologicheskie protsessy v tekhnologiyakh produktov pitaniya i kormov»* [Proc. VII Int. Sci. Pract. Symp. «Perspective biotechnological processes in food and feed technologies»]. Moscow: Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology Publ., 2014, pp. 316–322.

23. Kovbasa V.N., Kobylinskaya E.V., Kovalev A.V., Olifirenko V.N. Extruded wheat starch as an improver for bakery products. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya.* 1998, no. 2-3 (243-244), pp. 21–23. (In Russian)

24. Juodeikiene G., Salomskiene J., Eidukonyte D., Vidmantiene D., Narbutaite V., Vaiciulyte-Funk L. The impact of novel fermented products containing extruded wheat material on the quality of wheat bread. *Food Technology* and *Biotechnology*. 2011, vol. 49, issue 4, pp. 502–510.

25. Ustinnikov B.A., Stepanov V.I., Tsurikova N.V., Ivanov V.V., Akhmetshina M.R. Extrusion technology of nutrient media preparation for enzymes production. *Pishchevaya promyshlennost'*. 1991, no. 7, pp. 66–67. (In Russian)

26. Tsurikova N.V., Nefedova L.I., Kostyleva E.V., Zvenigorodskii V.I., Yasinovskii V.G., Voeikova T.A., Sinitsyn A.P. Selection of a potent bacillus licheniformis strain producing thermostable amylase. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2002, vol. 38, no. 5, pp. 427–432. DOI: 10.1023/A:1019960216770

27. Moraru C.I., Kokini J.L. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2003, vol. 2, pp. 147–165.

28. Stepanov V.I., Rimareva L.V., Ivanov V.V. An extrusive method of starch-containing raw material processing in the biotechnological manufacture. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyr'ya.* 2002, no. 8, pp. 48–49. (In Russian)

29. Grafelman D.D., Meagher M.M. Liquefaction of starch by a single-screw extruder and post-extrusion static-mixer reactor. *Journal of Food Engineering*. 1995, vol. 24, issue 4, pp. 529–542.

30. Baks T., Kappen F.H.J., Janssen A.E.M., Boom R.M. Towards an optimal process for gelatinisation and hydrolysis of highly concentrated starch–water mixtures with alpha-amylase from B. Licheniformis. *Journal of Cereal Science*. 2008, vol. 47, issue 2, pp. 214–225. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.03.011

31. Stepanov V.I., Rimareva L.V., Ivanov V.V., Sharikov A.Yu. A method for processing starch-containing raw materials in the preparation of concentrated grain wort. *Proizvodstvo spirta i likero-vodochnykh izdelii*. 2007, no. 3, pp. 16–17.

32. Myat L., Ryu G.-H. Extrusion with thermostable α-amylase Injection as pretreatment method for ethanol production from corn starch. *Microbial & Biochemical Technology.* 2013, vol. 5, issue 2, pp. 47–53. DOI: 10.4172/1948-5948.1000099

33. Solihin B.W., Kim M.H., Im B.S., Cha J.Y., Ryu G..H. Effects of feed moisture (ii) content on enzymatic hydrolysis of corn starch in twin-screw extruder and saccharification of the dried extrudates. *Food science and biotechnologie*. 2007, vol.16, no. 3, pp. 381–385.

34. Govindasamy S., Campanella O.H., Oates C.G. The single screw extruder as a bioreactor for sago starch hydrolysis. *Food Chemistry.* 1997, vol. 60, issue 1, pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(96)00100-8

35. Govindasamy S., Campanella O.H., Oates C.G. Enzymatic hydrolysis of sago starch in a twin-screw extruder. *Journal of Food Engineering*. 1997, vol. 32, issue 4, pp. 403–426. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00017-4

36. Govindasamy S., Campanella O.H., Oates C.G. Enzymatic hydrolysis and saccharification optimisation of sago starch in a twin-screw extruder. *Journal of Food Engineering.* 1997, vol. 32, issue 4, pp. 427–446.

37. Vasanthan T., Yeung J., Hoover R. Dextrinization of Starch in Barley Flours with Thermostable alpha-Amylase by Extrusion Cooking. *Starch.* 2001, vol. 5, no. 12, pp. 616–622. DOI: 10.1002/1521-379X(200112)53:12<616::AID-STAR616>3.0.CO;2-M

38. De Pilli T., Legrand J., Giuliani R., Derossi A., Severini C. Effect of processing variables and enzymatic activity on wheat flour dough extruded under different operating conditions. *Food Technology and Biotechnology*. 2009, vol. 47, no. 4, pp. 404–412.

39. Li H., Jiao A., Xu X., Wu Ch., Wei B., Hu X., Jin Zh., Tian Y. Simultaneous saccharification and fermentation of broken rice: an enzymatic extrusion liquefaction pretreatment for Chinese rice wine production. *Bioprocess and Biosystems Engineering.* 2013, vol. 36, issue 8, pp. 1141–1148.

40. Xu E., Wu Z., Long J., Wang F., Pan X., Xu X., Jin Zh., Jiao A. Impact of high-shear extrusion combined with enzymatic hydrolysis on rice properties and Chinese rice wine fermentation. *Food and Bioprocess Technology*. 2015, vol. 8, issue 3, pp. 589–604.

41. Xu E., Wu Z., Long J., Wang F., Pan X., Xu X., Jin Zh., Jiao A. Improved bioaccessibility of phenolics and antioxidant activity of glutinous rice and its fermented Chinese rice wine by simultaneous extrusion and enzymatic hydrolysis. *Journal of Functional Foods*. 2015, vol. 17, pp. 214–226. https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.05.032

42. Xu E., Wu Z., Long J., Wang F., Pan X., Xu X., Jin Zh., Jiao A. Effect of thermostable α-amylase addition on the physicochemical properties, free/bound phenolics and antioxidant capacities of extruded hulled and whole rice. *Food and Bioprocess Technology*. 2015, vol. 8, issue 9, pp. 1958–1973.

43. Xu E.,Wu Zh., Jin Zh., Campanella O.H. Bioextrusion of broken rice in the presence of divalent metal salts: effects on starch microstructure and phenolics compounds. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2018, vol. 6, pp. 1162–1171. DOI:10.1021/acssuschemeng.7b03459

44. Zeng Z., Li Y., Yang R., Liu Ch., Hu X., Luo S., Gong E., Ye J. The relationship between reducing sugars and phenolic retention of brown rice after enzymatic extrusion. *Journal of Cereal Science*. 2017, vol. 74, pp. 244–249.

45. De Mesa-Stonestreet N.J, Alavi S., Gwirtz J. Extrusion-enzyme liquefaction as a method for producing sorghum protein concentrates. *Journal of Food Engineering*. 2012, vol. 108, issue 2, pp. 365–375. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.024

46. Santala O., Nordlund E., Poutanen K. Use of an extruder for pre-mixing enhances xylanase action on wheat bran at low water content. *Bioresource Technology*. 2013, vol. 149, pp. 191–199. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.029

47. Santala O., Kiran A., Sozer N., Poutanen K., Nordlund E. Enzymatic modification and particle size reduction of wheat bran improves the mechanical properties and structure of bran-enriched expanded extrudates. *Journal of Cereal Science*. 2014, vol. 60, issue 2, pp. 448–456. DOI: 10.1016/j.jcs.2014.04.003

48. De Pilli T., Severini C., Carbone B.F., Giuliani R., Derossi A. Improving fatty extrudate structure with amylase and protease. *Journal of Food Biochemistry*. 2004, vol. 28, issue 5, pp. 387–403. https://doi.org/10.1111/j.1745-4514.2004.04403.x

Критерии авторства

Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Шариков А.Ю., Степанов В.И., Иванов В.В. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Contribution

Anton Yu. Sharikov, Vladimir I. Stepanov, Victor V. Ivanov carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Anton Yu. Sharikov, Vladimir I. Stepanov, Victor V. Ivanov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шариков Антон Юрьевич,
к.т.н., старший научный сотрудник,
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал «ФИЦ питания и биотехнологии»,
✉ e-mail: anton.sharikov@gmail.com

AUTHORS' INDEX

Anton Yu. Sharikov,
Ph.D. (Engineering), Senior Researcher,
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology, Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety,
✉ e-mail: anton.sharikov@gmail.com

Степанов Владимир Иванович,
к.т.н., заведующий отделом,
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал «ФИЦ питания и биотехнологии»,
e-mail: foodbiotech@yandex.ru

Иванов Виктор Витальевич,
к.т.н., ведущий научный сотрудник,
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал «ФИЦ питания и биотехнологии»,
e-mail: ivanov.v.v@li.ru

Vladimir I. Stepanov,
Ph.D. (Engineering), Head of the Department,
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology, Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety,
e-mail: foodbiotech@yandex.ru

Victor V. Ivanov,
Ph.D. (Engineering), Leading Researcher,
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology, Federal Research Center of Food, Biotechnology and Food Safety,
e-mail: ivanov.v.v@li.ru