УДК 636.085+ 639.2/.3+ 504.064.47
Код ВАК 4.2.4
https://doi.org/10.32417/1997-4868-2026-26-10-2019-2031

Потенциал вторичных ресурсов биотехнологических производств в кормопроизводстве для аквакультуры: химический и технологический аспекты

А. Ю. Шариков✉, **В. В. Иванов**, **М. В. Амелякина**, **А. А. Голубев**
Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия
✉*E-mail: anton.sharikov@gmail.com*

Аннотация. Производство полнорационных кормов для аквакультуры остается одной из наиболее затратных отраслей комбикормовой промышленности ввиду высоких требований к биологической ценности и физико-химическим характеристикам кормов. Рационы для аквакультуры должны быть сбалансированы по питательным веществам, поддерживающим физиологический рост и продуктивность водных организмов. Как правило, при производстве корма используют вторичные продукты разделки рыб, растительные отходы, водоросли. В условиях необходимости снижения себестоимости, рисков дефицита белковых компонентов и необходимости повышения устойчивого развития аквакультуры возрастает интерес к использованию в рецептурах вторичных ресурсов биотехнологических производств (спиртовая барда, грибная и дрожжевая биомассы). **Цель работы** – комплексный анализ и оценка потенциала вторичных сырьевых ресурсов биотехнологических производств для включения в рецептуры аквакормов с позиций химического состава и технологической переработки, включая технологические режимы экструзии и влияние на физико-механические свойства экструдатов. **Методы.** Изучены материалы научных исследований в области химического состава вторичных ресурсов биотехнологических производств, влияния их добавления в рецептуры кормов в технологии варочной экструзии на режимы процесса, физико-химические и технологические характеристики гранул. 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. **Результаты.** Показано, что рассматриваемые ресурсы обладают высокой биологической ценностью, проанализированы данные химического состава, аминокислотного и минерального профиля, витаминного комплекса побочных продуктов биотехнологических производств. В обзоре оценены диапазоны дозировок вторичных биоресурсов в экструдируемые смеси, показано их совместное с параметрами варочной экструзии влияние на технологические свойства гранул под физиологические особенности различных видов рыб: степень расширения, плотность, плавучесть/скорость погружения, водостойкость, цвет. **Научная новизна.** Предложен практико-ориентированный подход к замещению традиционных ингредиентов аквакормов вторичными ресурсами биотехнологических производств, показаны критические параметры экструзии для достижения заданных технологических свойств и оптимальные уровни включения вторичных ресурсов на примере спиртовой барды.

Ключевые слова: аквакультура, кормопроизводство, биологическая ценность, вторичные сырьевые ресурсы, биотехнология, утилизация, барда, грибная биомасса, экструзия

Благодарности. Исследования выполнены в рамках государственного задания № FGMF-2025-0012.

Для цитирования: Шариков А. Ю., Иванов В. В., Амелякина М. В., Голубев А. А. Потенциал вторичных ресурсов биотехнологических производств в кормопроизводстве для аквакультуры: химический и технологический аспекты // Аграрный вестник Урала. 2026. Т 26, № 10, С. 2019–2031. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2026-26-10-2019-2031.

Дата поступления статьи: 02.06.2025, ***дата рецензирования:*** 12.12.2025, ***дата принятия:*** 07.05.2026.

© Sharikov A. Yu., Ivanov V. V., Amelyakina M. V., Golubev A. A., 2026

Potential of biotechnological by-products in aquaculture feed production: chemical and technological aspect

A. Yu. Sharikov✉, **V. V. Ivanov, M. V. Amelyakina, A. A. Golubev**
Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – a branch of the Federal Research Centre of Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia
✉*E-mail: anton.sharikov@gmail.com*

Abstract. Aquaculture feed manufacture remains among the costliest sectors of the compound-feed industry owing to stringent requirements for nutritional adequacy and physicochemical performance. Diets must supply balanced nutrients to sustain physiological growth and productivity of cultured species. Against growing cost pressure, potential protein-source shortages, and the imperative of sustainability, there is renewed interest in secondary resources from biotechnological production – distillers' dried grains with solubles (DDGS), fungal biomass, and yeast biomass – for aquafeed formulation. **The purpose** of the research was to critically appraise the potential of these resources for inclusion in aquafeeds, with emphasis on chemical composition and processing, including extrusion-cooking regimes and their effects on the physico-mechanical properties of extrudates. **Methods.** A literature review was conducted (ScienceDirect, Google Scholar, PubMed, ResearchGate, eLIBRARY.ru) covering composition data and the impact of these ingredients on extrusion parameters and pellet properties. **Results.** The surveyed resources exhibit high biological value; proximate composition, amino-acid and mineral profiles, and B-vitamin content are summarized. Practical inclusion ranges in extrudable blends are delineated, and their joint effects with extrusion parameters on pellet expansion, bulk density, floatability/sinking rate, water stability, and colour are discussed with regard to species-specific requirements. **Scientific novelty.** A practice-oriented framework is proposed for substituting conventional ingredients with secondary biotechnological resources; critical extrusion parameters and optimal inclusion levels are identified, illustrated with DDGS.

Keywords: aquaculture; feed manufacturing; biological value; secondary raw resources; biotechnology; valorization; DDGS; fungal biomass; extrusion

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the state task № FGMF-2025-0012.

For citation: Sharikov A. Yu., Ivanov V. V., Amelyakina M. V., Golubev A. A. Potential of biotechnological by-products in aquaculture feed production: chemical and technological aspect. *Agrarian Bulletin of the Urals.* 2026; 26 (10): 2019–2031. https://doi.org/10.32417/1997-4868-2026-26-10-2019-2031. (In Russ.)

Date of paper submission: 02.06.2025, ***date of review:*** 12.12.2025, ***date of acceptance:*** 07.05.2026.

Постановка проблемы (Introduction)

Производство рыбных кормов в настоящее время является самым высокозатратным по сравнению с производством комбикормов для других видов животных. Это объясняется тем, что к комбикормам для рыбы предъявляются повышенные требования: рыба имеет короткую пищеварительную систему, которая требует легкоперевариморого корма, содержащего витамины, аминокислоты и микроэлементы, необходимые для нормального роста и развития. Одним из способов сокращения стоимости рыбных кормов может стать использование при его производстве дополнительных функциональных ингредиентов, полученных из вторичных биоресурсов. Вторичные ресурсы биотехнологических производств с высоким содержанием нутриентов в значительной степени могут повысить питательную ценность кормов и рентабельность производства. Данное направление становится все более актуальным [1–3]. Целью работы является комплексный анализ и оценка потенциала вторичных сырьевых ресурсов биотехнологических производств для добавления в рецептуры аквакормов с позиций химического состава и технологической переработки, включая технологические режимы экструзии и влияние на физико-механические свойства экструдатов.

Методология и методы исследования (Methods)

Объект исследования – актуальные данные научных материалов о биохимическом составе вторичных сырьевых ресурсов (ВСР) биотехнологических производств (спиртовая барда, грибная и дрожжевая биомассы) и возможности их использования в кормах аквакультур. Для обзора данных по исследуемой тематике проведен сравнительный анализ литературы, отобраны публикации, изучены списки литературы отобранных публикаций для выявления дополнительных актуальных источников информации и представлены данные по хими-

© Шариков А. Ю., Иванов В. В., Амелякина М. В., Голубев А. А., 2026

ческому, аминокислотному, минеральному, витаминному составу объектов ВСР. В исследование были включены работы, отражающие проблемы питания аквакультур и возможности их решения, Для отбора научных статей на русском и английском языках выполняли поиск по ключевым словам в научных электронных библиотеках и поисковых системах Science Direct, Google Scholar, медицинской базе данных PubMed, портале ResearchGate, научной электронной библиотеке eLIBRARY.ru. Первоначально поиск охватывал период 2010–2025 годов, более ранние публикации изучались в случае высокой цитируемости по рассматриваемому направлению исследования. Поисковые запросы выполняли по следующим ключевым словам на русском и английском языках: аквакультура, кормопроизводство, биологическая ценность, вторичные сырьевые ресурсы, химический состав, биотехнология, утилизация, экструзия, барда, грибная биомасса, aquaculture, feed production, biological value, biotechnology by-products, extrusion, DDGS, filamentous fungal biomass.

Результаты (Results)

Химический состав вторичных ресурсов

Белки и жиры имеют ключевое значение в питании водных организмов: они определяют обмен веществ, рост, служат строительным материалом при формировании тканей тела, источником энергии для правильного развития рыб. Недостаток их в рационе приводит к замедлению роста и болезням рыб [1; 4]. Баланс белков и жиров имеет первостепенное значение при формировании рациона питания аквакультур. Однако продуктивное питание водных организмов зависит не только от количества белка в корме, но и от его сбалансированности по аминокислотному составу. К незаменимым аминокислотам, необходимым для полноценного развития водных организмов относятся аргинин, гистидин, изолейцин, лейцин, лизин, метионин, фенилаланин, треонин, триптофан и валин. Отсутствие или недостаточное количество в рационе аминокислот отрицательно влияет на жизнедеятельность водных организмов [5–7]. Основным эталонным компонентом аквакультур является рыбная мука ввиду сбалансированности по аминокислотному составу, макро- и микроэлементам [5; 7]. В таблицах 1 и 2 приведены сравнительные данные по химическому и аминокислотному составу ВСР биотехнологических производств в пересчете на сухое вещество на основании усредненных литературных данных ряда исследований. Включение дрожжевой биомассы в анализ обусловлено возможностью ее получения на вторичных сырьевых ресурсах биотехнологических производств, сочетанием благоприятного аминокислотного и витаминного профилей с технологической совместимостью экструзии и потенциалом снижения себестоимости аквакормов при сохранении требуемых свойств.

По данным таблиц 1 и 2, вторичные биоресурсы биотехнологических производств демонстрируют широкий интервал показателей питательной ценности: у спиртовой барды протеин составляет 27–41,38 % сухих веществ, у грибной биомассы – до 62,2 %, у дрожжевой биомассы – до 59,2 %. При этом доля клетчатки составляет 7,7–16,97 % для барды, 4,3–11,2 % для грибной биомассы, 2,69–4,63 % дрожжевой биомассы, а сырого жира – до 17,1 % в барде, до 5 % и 17,2 % в дрожжевой и грибной биомассе соответственно, что прямо влияет на формирование энергетического баланса рационов. Важно подчеркнуть, что химический состав этих ресурсов существенно варьирует в зависимости от вида микроорганизмов, применяемых субстратов и условий технологической обработки.

Таблица 1

Химический состав ВСР биотехнологических производств

Показатели пищевой ценности, %	Спиртовая барда [8–11]	Биомасса грибная [12–15]	Биомасса дрожжевая [13, 14, 16–18]
Протеин	27–41,38	19,5–62,2	28,9–59,2
Клетчатка	7,7–16,97	4,3–11,2	2,69–4,63
Сырой жир	4,5–17,1	1,6–17,2	1–5
Хитин		5,4–18,5	2,0–5,0
Зола	1,35–10,5	3,2–8,7	3,35–8,27

Table 1

Chemical profile of biotechnological by-products

Indicators of nutritional value, %	*Distilled dried grains [8–11]*	*Fungal biomass [12–15]*	*Yeast biomass [13, 14, 16–18]*
Crude protein	*27–41.38*	*19.5–62.2*	*28.9–59.2*
Crude fibre	*7.7–16.97*	*4.3–11.2*	*2.69–4.63*
Lipids	*4.5–17.1*	*1.6–17.2*	*1–5*
Chitin		*5.4–18.5*	*2.0–5.0*
Ash	*1.35–10.5*	*3.2–8.7*	*3.35–8.27*

Таблица 2

Аминокислотный состав ВСР биотехнологических производств

Аминокислота, % белка	Спиртовая барда [9, 11, 19]	Биомасса грибная [12, 20]	Биомасса дрожжевая [14, 16]	Рыбная мука [3, 6]
Изолейцин	2,9–5,9	2,8–6,3	3,5–4,28	3,4–4,3
Лейцин	2,1–7,7	5,0–8,8	6,0–6,7	5,4–8,2
Лизин	2,7–4,3	2,6–17,8	6,1–6,9	5,5–7,8
Метионин	1,2–2,1	1,0–3,1	1,9–2,3	2,2–3,3
Фенилаланин	0,6–6,0	2,7–11,1	3,5–3,8	3,0–4,4
Треонин	3,0–3,8	2,9–12,4	1,87–4,9	3,0–4,5
Триптофан	0,9–2,1	–	1,23–8,9	0,9
Валин	2,3–6,6	3,5–7,9	3,8–4,6	3,8–5,1

Table 2

Amino acid profile of biotechnological by-products

Amino acids, % of protein	*Distilled dried grains [9, 11, 19]*	*Fungal biomass [12, 20]*	*Yeast biomass [14, 16]*	*Fish meal [3, 6]*
Isoleucine	*2.9–5.9*	*2.8–6.3*	*3.5–4.28*	*3.4–4.3*
Leucine	*2.1–7.7*	*5.0–8.8*	*6.0–6.7*	*5.4–8.2*
Lysine	*2.7–4.3*	*2.6–17.8*	*6.1–6.9*	*5.5–7.8*
Methionine	*1.2–2.1*	*1.0–3.1*	*1.9–2.3*	*2.2–3.3*
Phenylalanine	*0.6–6.0*	*2.7–11.1*	*3.5–3.8*	*3.0–4.4*
Threonine	*3.0–3.8*	*2.9–12.4*	*1.87–4.9*	*3.0–4.5*
Tryptophan	*0.9–2.1*	–	*1.23–8.9*	*0.9*
Valine	*2.3–6.6*	*3.5–7.9*	*3.8–4.6*	*3.8–5.1*

Аминокислотные профили ВСР демонстрируют значительный разброс: например, содержание лизина составляет 2,6–17,8 % от массы белка грибной биомассы при 6,1–6,9 % в дрожжевой, что требует обязательной стандартизации партии и аминокислотной корректировки рецептур. На этом фоне дрожжевая биомасса по изолейцину, лейцину и лизину наиболее сопоставима с эталонными диапазонами рыбной муки: 3,5–4,28; 6,0–6,7; 6,1–6,9 % белка соответственно, тогда как спектр значений у барды и грибной биомассы более широк и неоднороден. Следовательно, их рациональное использование в кормах для аквакультуры целесообразно при учете исходной вариабельности и последующей технологической адаптации рецептур.

Содержание микроэлементов

Минеральные элементы являются важными факторами остеогенеза, репродуктивной функции и метаболической регуляции рыб. Например, кальций участвует в формировании костей и чешуи, важен для нереста, фосфор необходим для роста и развития организма [1]. В таблице 3 представлены данные по минеральному составу спиртовой барды, биомассы грибной и дрожжевой. В качестве контроля представлены данные минерального состава рыбной муки.

Анализ данных показывает, что профили минерального состава вторичных ресурсов существенно различаются между группами сырья. Для грибной биомассы диапазон содержания кальция – от 0,1 до 5,85 %, что частично перекрывает нижнюю границу контрольного диапазона рыбной муки (5,0–8,0 %) и отличается от стабильно низких уровней у дрожжевой биомассы (0,01–0,05 %) и спиртовой барды (0,13–0,199 %). Это определяет необходимость адресной минерализации рационов, особенно при использовании дрожжевой биомассы и барды. По макроэлементам грибная и дрожжевая биомасса характеризуются повышенными уровнями калия и фосфора, что позволяет покрывать потребности по этим элементам при обязательной корректировке соотношения Ca : P. При этом минеральные компоненты в любом случае остаются конструктивными элементами рецептуры: их дозирование следует рассчитывать с учетом вариабельности химического состава сырья и при необходимости корректировать уровни Ca, P, Mg и микроэлементов для соблюдения целевых балансов. Также можно отметить, что по ключевым элементам не наблюдается превышений относительно рыбной муки, и с учетом происхождения сырья это повышает технологическую безопасность рецептур и снижает риск избыточного ввода минералов.

Содержание витаминов

При составлении рациона питания для аквакультур особое внимание уделяют содержанию витаминов. Они участвуют в регуляции обмена веществ, поддержании иммунной системы. Дефицит витаминов в кормах сдерживает синтез ферментов и ведет к сбою обменных процессов. Каждый вид аквакультуры имеет свои потребности в витаминах и при разработке корма необходимо учитывать их особенности [25]. В таблице 4 представлены данные по витаминному составу объектов исследования.

Таблица 3

Минеральный состав спиртовой барды, биомассы грибной и дрожжевой

Элемент, %	Спиртовая барда [8, 9, 11]	Биомасса грибная [12, 20–23]	Биомасса дрожжевая [14]	Рыбная мука [24]
Натрий	0,241–0,277	0,01–0,48		0,5–1,5
Калий	0,408–0,52	0,07–1,82	0,89–2,58	0,5–1,2
Кальций	0,135–0,199	0,1–5,85	0,01–0,05	5,0–8,0
Магний	0,24–0,5	0,04–0,39	0,04–0,70	0,1–0,3
Фосфор	0,2	0,1–2,75	0,65–2,74	4,0–5,5
Железо	0,008–0,015	0,0004–0,0038		0,01–0,05
Цинк	0,003	0,002–0,0076		0,01–0,02
Медь	0,0065	0,0010–0,0016	0,003–0,059	0,0015
Марганец	0,001–0,007	0,002–0,0046		0,0025

Table 3

Minerals composition of distilled dried grains, fungal and yeast biomass

Mineral, %	*Distilled dried grains [8, 9, 11]*	*Fungal biomass [12, 20–23]*	*Yeast biomass [14]*	*Fish meal [24]*
Sodium	*0.241–0.277*	*0.01–0.48*	–	*0.5–1.5*
Potassium	*0.408–0.52*	*0.07–1.82*	*0.89–2.58*	*0.5–1.2*
Calcium	*0.135–0.199*	*0.1–5.85*	*0.01–0.05*	*5.0–8.0*
Magnesium	*0.24–0.5*	*0.04–0.39*	*0.04–0.70*	*0.1–0.3*
Phosphorus	*0.2*	*0.1–2.75*	*0.65–2.74*	*4.0–5.5*
Iron	*0.008–0.015*	*0.0004–0.0038*	–	*0.01–0.05*
Zinc	*0.003*	*0.002–0.0076*	–	*0.01–0.02*
Copper	*0.0065*	*0.0010–0.0016*	*0.003–0.059*	*0.0015*
Manganese	*0.001–0.007*	*0.002–0.0046*	–	*0.0025*

Таблица 4

Содержание витаминов в биотехнологических объектах вторичного сырья.

Витамины, мг / 100 г	Спиртовая барда [8, 9, 11]	Биомасса грибная [22]	Биомасса дрожжевая [14]
Тиамин (B1)	0,24–0,9	0,19–0,48	2,10–2,85
Рибофлавин (B2)	0,64–1,8	4,28	2,50–3,94
Ниацин (B3)	1,6–10,6	6,65	16,75–17,23
Пантотеновая кислота (B5)	11,2	4,75	2,00–20,00
Пиридоксин (B6)	0,51–0,9	0,12–2,4	2,15–2,37
Эргостерин (провитамин D)	–	–	550–1080
Витамин E	15,3–17	–	–

Table 4

Vitamins content of biotechnological by-products

Vitamin, mg / 100 g	*Distilled dried grains [8, 9, 11]*	*Fungal biomass [22]*	*Yeast biomass [14]*
Thiamine (B1)	*0.24–0.9*	*0.19–0.48*	*2.10–2.85*
Riboflavin (B2)	*0.64–1.8*	*4.28*	*2.50–3.94*
Niacin (B3)	*1.6–10.6*	*6.65*	*16.75–17.23*
Pantothenic acid (B5)	*11.2*	*4.75*	*2.00–20.00*
Pyridoxine (B6)	*0.51–0.9*	*0.12–2.4*	*2.15–2.37*
Ergosterol (provitamin D)	–	–	*550–1080*
Vitamin E	*15.3–17*	–	–

Из представленных данных в таблице видно, что рассматриваемые объекты содержат почти полный комплекс витаминов группы В, которые играют ключевую роль в процессах белкового, липидного и углеводного обмена [14, 23, 26]. Наиболее концентрированным источником витаминов группы В является дрожжевая биомасса. Грибная биомасса демонстрирует выраженное преимущество по рибофлавину при сопоставимых или умеренных значениях B1, B2, B3, B5, B6. Барда содержит витамин Е на уровне 15,3–17 мг / 100 г. В совокупности результаты подтверждают целесообразность

использования дрожжевой биомассы для обогащения рационов витаминами группы В, грибной – для усиления вклада В2, а барды – как источника витамина Е. Наблюдаемые различия содержаний обусловлены составом используемых субстратов, штаммовыми особенностями микроорганизмов и параметрами технологии. Доступные источники по ряду показателей ограничены и методологически неоднородны, что затрудняет прямые сопоставления. Указанное направление требует расширенных стандартизованных исследований.

Эффективность экструзии в аквакультуре

При производстве корма, помимо состава, важно также учитывать его форму и размер. В зависимости от вида рыбы и размера гранулы должны быть определенного диаметра, плавать на поверхности либо тонуть с определенной скоростью, а также сохранять целостность в течение заданного промежутка времени [27]. Донные рыбы, например карп или тиляпия, обычно забирают корм со дна водоема. Это тепловодные рыбы, они едят в 6 раз медленнее, чем хищные, им требуется стабильность наличия корма в воде. Хищные рыбы, например лосось, форель или окунь, ловят медленно опускающийся в воде корм и, как правило, не берут его со дна водоема [1]. Поэтому для аквакормов более важны такие свойства, как водостойкость, плавучесть, индекс водопоглощения, растворимость, объемная плотность, а также высокая пористость, необходимая для поглощения больших доз растительных и животных жиров. В современном производстве рыбных кормов практикуются три способа изготовления: гранулирование с помощью пресса-гранулятора, экспандирование с последующим гранулированием и экструдирование [28].

Технология варочной экструзии особенно эффективна при переработке вторичных биоресурсов. За счет варьирования режимных и конструктивных параметров – влажности, температуры, скорости вращения шнека экструдера, диаметра фильер, давления в предматричной зоне – экструзия позволяет трансформировать структуру сырья, его физические свойства, питательную ценность и химический состав в широких пределах, а также модифицировать вторичное сырье в функциональный продукт с заданными свойствами [29; 30].

В процессе экструдирования продукт приобретает пористую структуру и расширяется. Качества экструдата оценивают по индексу его расширения, твердости, влажности, питательной ценности, сохранности питательных веществ. На индекс расширения и объемную плотность экструдата оказывают влияние влажность, температура, частота вращения шнека экструдера и размер гранул [30]. Высокая влажность перерабатываемых смесей приводит к получению экструдата с малым индексом расширения и высокой объемной плотностью [31]. Температура процесса значительно влияет на степень расширения экструдатов. Расширение обычно не происходит при температуре экструдирования менее 100 °С [29]. Повышение температуры со 100 до 150 °С приводит к увеличению индексов водопоглощения и растворимости. Скорость вращения шнеков экструдера определяет уровень вклада сдвиговых деформации в деструкцию биополимеров сырья и влияет на физико-химические свойства. Например, при увеличении частоты вращения шнека со 100 до 150 об/мин отмечено снижение объемной плотности корма на 12 % и индекса прочности гранул на 13 % [32]. Уменьшение размера частиц сырья в смеси улучшает процесс экструзии, способствует снижению объемной плотности экструдата и повышению водостойкости, индекса водопоглощения гранул экструдированного корма, а также улучшению его переваримости [31].

Отношение длины шнека экструдера к его диаметру L/D также влияет на свойства экструдированного корма [29]. Увеличение значения L/D приводит к уменьшению объемной плотности экструдата, небольшому снижению водостойкости гранул и индекса водопоглощения.

Для экструдирования смеси чаще применяют двухшнековые экструдеры. По сравнению с одношнековым они имеют ряд преимуществ: можно обрабатывать сырье с более высоким (до 25 %) содержанием жира. Содержание жиров до 40 % значительно затрудняет процесс экструдирования, поэтому после завершения этой технологической операции жиры вводят в состав гранул корма путем обычного или вакуумного напыления – продукт получается более однородным по форме, размеру и консистенции, возможно вырабатывать мелкогранулированные корма для рыб с диаметром гранул 0,8–2,0 мм [4; 31].

Использование спиртовой барды в кормах аквакультур

Получение кормов из растительного сырья характеризуется высоким содержанием углеводов, пищевых волокон и сахаров, что оказывает значительное влияние на протекание процесса экструдирования кормов. Происходящая при экструзии трансформация макромолекул крахмала приводит к частичной деполимеризации амилопектиновой фракции по гликозидным связям, происходит клейстеризация гранул крахмала [33]. В результате значимо повышается ферментативная атакуемость компонентов комбикормов.

Методические рекомендации для расчета рецептов комбикормовой продукции не содержат норм ввода в рецептуры кормов для аквакультуры вторичных ресурсов биотехнологических производств [34]. При этом в зарубежной литературе представлены исследования по использованию в аквакормах для различных видов рыб сухой спиртовой

барды с растворимыми веществами (Distillers Dried Grains with Solubles, DDGS), таких как нильская тилапия *Oreochromis niloticus*, желтый окунь *Perca flavescens*, канальный сом *Ictalurus punctatus* и радужная форель *Oncorhynchus mykiss*. Технология спиртового производства с получением биоэтанола по технологии «мокрого помола» с получением DDGS процессуально отличается от традиционно используемой в России. Но также используются технологии сухого помола. Химический состав сухой спиртовой барды после сбраживания кукурузы по технологии характеризуется содержанием сырого белка – 26,4–27 %, сырого жира – 6,4–10,0 %; клетчатки – 9–36,6 %; золы – 4,9–5 %, лизина – 0,73 %, метионина – 0,43–0,55 % [34; 35]. При оценке питательной ценности DDGS необходимо учитывать не только общее содержание протеина, но и доступность отдельных аминокислот: при исследовании 21 образца барды было установлено, что содержание переваримого лизина у свиней коррелирует с концентрацией общего и реакционноспособного лизина, но не с содержанием сырого протеина [36]. Химический состав DDGS существенно зависит от вида перерабатываемого зерна. Так, среднее содержание сырого протеина в пшеничной DDGS составляло 34,6 %, а сырого жира – 4,5 % в пересчете на сухое вещество [37]. В исследовании 36 образцов DDGS европейских заводов установлена значительная вариабельность химического состава барды в зависимости от вида исходного зернового сырья, при этом кукурузная DDGS характеризовалась более стабильным составом по сравнению с пшеничной и полученной из зерновых смесей. Содержание сырого протеина в пшеничной барде было выше, чем в кукурузной (33,6 % против 29,1 %), как и нейтрально-детергентной клетчатки (43,8 против 40,0 % сухого вещества) [38].

Высокая питательная ценность, экономичность и экологичность делают этот ресурс привлекательной альтернативой традиционным источникам белка, таким как рыбная мука и соевый шрот. Содержание DDGS в кормовых смесях в исследованиях варьирует от 20 до 60 %, при этом оптимальный уровень включения без потери качества кормов, как правило, составляет около 40 %. Например, содержание DDGS до 40 % не оказывало негативного влияния на питательную ценность и качество гранул для желтого окуня [39; 40]. В то же время включение до 22,5 % DDGS в корма для радужной форели требует дополнительного введения лимитирующих аминокислот, таких как лизин и метионин, для повышения биологической ценности корма [32; 41; 42].

Включение DDGS оказывает заметное влияние на структурно-механические свойства экструдатов. Увеличение содержания DDGS приводит к снижению степени расширения и увеличению плотности гранул. В работах по исследованию DDGS выявлено, что степень расширения экструдатов уменьшилась на 22,3 % (с 2,15 до 1,67) при увеличении содержания DDGS до 40 %. При этом оптимальные значения степени расширения и плотности достигаются при дозировках DDGS около 20–30 %, тогда как при максимальных дозировках наблюдается значительное снижение степени расширения [39]. Аналогичные результаты были получены и у других исследователей, где при увеличении содержания DDGS с 17,5 % до 27,5 % степень расширения снизилась на 14,8 % и 23,5 % соответственно [43].

На экструдирование смесей с DDGS существенно влияют режимы экструзии, такие как температура и влажность смесей. В исследованиях показано, что повышение температуры экструзии от 90 °C до 140 °C и влажности с 15 % до 25 % приводит к уменьшению степени расширения с 2,03 до 1,62 и увеличивает их плотность при содержании DDGS 40 %. Это связано с усилением процессов желатинизации и денатурации, приводящих к повышению плотности экструдатов. Также влажность смеси играет важную роль: увеличение влажности смеси с 15 % до 25 % при той же дозировке DDGS уменьшает степень расширения экструдатов с 2,05 до 1,75 и увеличивает плотность [39; 43].

Также изменяется цвет кормов: гранулы приобретают более темные оттенки с увеличением содержания DDGS. Повышение дозировки DDGS ведет к снижению светлоты и увеличению красноты и желтизны экструдатов [43].

При увеличении доли DDGS изменяются также плавучесть и водостойкость гранул. Гранулы с содержанием до 40 % DDGS демонстрируют более низкую скорость погружения и повышенную водостойкость по сравнению с гранулами с меньшим содержанием DDGS [42]. В то же время в некоторых работах отмечено, что увеличение содержания DDGS до 27,5 % приводит к небольшому увеличению скорости погружения с 0 м/с (плавающие гранулы) до 0,10 м/с. Это указывает на снижение плавучести при повышении концентрации DDGS, но при этом гранулы сохраняют хорошую структурную целостность и водостойкость, препятствуя быстрому проникновению воды внутрь гранулы [43; 44].

Помимо этого, использование DDGS снижает удельную механическую энергию и вязкость кормовых смесей, что позволяет экономить энергию и снижать износ оборудования. Например, при увеличении содержания DDGS до 25 % удельная механическая энергия снижается на 18,3 % с 17,5 до 14,3 Вт/кг. При увеличении содержания DDGS до 40 % было отмечено дальнейшее незначительное увеличение SME до 14,7 Вт/кг, что все же остается ниже значений для контрольных образцов без DDGS [43; 45].

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Вторичные ресурсы биотехнологических производств обладают высокой кормовой ценностью и значительным потенциалом для применения в производстве кормов для аквакультуры. Анализ химического состава показал, что данные компоненты содержат большое количество белка, сбалансированный аминокислотный профиль, а также существенные уровни минеральных элементов и витаминов. При этом отмечается выраженная меж- и внутригрупповая вариабельность состава, обусловленная различием субстратов, штаммовыми особенностями и параметрами технологии. Дрожжевая биомасса наиболее близка к рыбной муке по ключевым незаменимым аминокислотам и служит концентрированным источником витаминов группы В. Кальций является критичным элементом в химическом составе ВСР: низкое содержание у барды и дрожжей, широкий разброс у грибной биомассы, что требует подбора дозировок, минерализации рецептур с использованием неорганических ингредиентов с целью поддержания целевого соотношения кальция и фосфора.

Анализ технических решений в экструзии показывает, что рост доли барды в виде DDGS в экструдируемых смесях закономерно снижает степень расширения и повышает плотность гранул, влияя на плавучесть и водостойкость. Оптимальные технологические свойства, как правило, достигаются при умеренных уровнях включения около 20–30 % в сочетании с аминокислотной и минеральной коррекцией. Более высокие доли внесения требуют адаптации температурно-влажностных режимов и параметров формования.

Важным аспектом включения вторичных сырьевых ресурсов биотехнологических производств в рецептуры кормов является повышение экологической устойчивости биотехнологических производств, т. е. такие решения реализуют принципы безотходных технологий. Полученные результаты подтверждают целесообразность дальнейших исследований, направленных на оптимизацию рецептур и уточнение параметров экструзии в зависимости от видов водных организмов.

Библиографический список

1. Додаев К. А., Ниезов Х. Н., Суюндиков У. А., Худайберганов Х. Ш. Потребность в белках, маслах, углеводах, минералах при выращивании рыбы // Экономика и социум.2020. № 11 (78). С. 647–651.
2. Malik M. A., Sharma A., Chuphal N., Dar S. Fermentation-driven circular aquafeed solutions: sustainable use of agricultural byproducts // Aquaculture International. 2025. Vol. 33. Article number 510. DOI: 10.1007/s10499-025-02184-5.
3. Пахомов В. И., Хлыстунов В. Ф., Брагинец С. В., Бахчевников О. Н. Состояние и перспективы использования растительного сырья в кормах для аквакультуры (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. № 23 (3). С. 281–294. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294.
4. Bell J. G., Koppe W. Lipids in aquafeeds // In: Fish oil replacement and alternative lipid sources in aquaculture feeds / Edited by G. M. Turchini, W.-K. Ng, D. R. Tocher. 1st edition. Boca Raton: CRC Press, 2010. 551 p. DOI: 10.1201/9781439808634-c2.
5. Штенина Д. В. Значение кормов и их компонентов при выращивании рыбы // Вестник науки и образования. 2022. № 1 (121). Часть 2. С. 31–33.
6. Колмакова В. И., Колмакова А. А. Аминокислоты в перспективных кормах для аквакультуры рыб: обзор экспериментальных данных // Journal of Siberian Federal University. Biology. 2020. № 13 (4). С. 424–442. DOI: 10.17516/1997-1389-0332.
7. Салдеева К. А., Мирошникова Е. П. Альтернативные источники протеина при производстве комбикормов для аквакультуры // Шаг в науку. 2021. № 3. С. 116–119.
8. Калоев Б. С. Сухая барда для бройлеров // Животноводство России. 2018. № 10. С. 9–10.
9. Туршатов М. В., Моисеева Н. Д., Кривченко В. А. [и др.]. Получение высококачественных сухих кормопродуктов из ВСР зерноперерабатывающих предприятий // Пиво и напитки. 2016. № 1. С. 22–25.
10. Ратошный А. Н., Забашта Н. Н., Головко Е. Н. Использование сухой спиртовой барды в рационах растущих свиней // Сборник научных трудов Северо-Кавказского научно-исследовательского института животноводства. 2014. Т. 3, № 3. С. 194–200.
11. Бессонов В. В., Богачук М. Н., Макаренко М. А. [и др.]. Исследование биохимического состава зерновой клетчатки спиртового производства // Пищевая промышленность. 2020. № 2. С. 12–15.
12. Karimi S., Mahboobi Soofiani N., Mahboubi A., et al. Evaluation of nutritional composition of pure filamentous fungal biomass as a novel ingredient for fish feed // Fermentation. 2021. Vol. 7, No. 3. Article number 152. DOI: 10.3390/fermentation7030152.
13. Куликов Д. С., Гулакова В. А., Колпакова В. В., Уланова Р. В. Получение белковых концентратов и кормовой микробной биомассы из экстракта тритикале и гороховой муки с использованием ферментов // Пищевая промышленность. 2019. № 4. С. 49–51.

14. Серба Е. М., Юраскина Т. В., Римарева Л. В. [и др.]. Микробная биомасса – биоресурс для получения функциональных пищевых ингредиентов (обзор) // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53, № 3. С. 426–444. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-3-2446.

15. Минаков Д. В., Конева С. И., Егорова Е. Ю. Ферменты биомассы мицелия грибов Cordyceps militaris и Lentinula edodes в технологии хлеба // Техника и технология пищевых производств. 2024. Т. 54, № 2. С. 222–235. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2502.

16. Фоменко И. А., Дегтярев И. А., Иванова Л. И., Машенцева Н. Г. Получение белкового концентрата из дрожжевой биомассы // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56, № 6. С. 1172–1182. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.6.1172rus.

17. Логвинова Т. И., Колодина Е. Н., Артемьева О. А., Никанова Д. А. Изучение свойств штаммов дрожжей, в качестве микробиологических продуцентов кормового белка // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 12-1. С. 57–61.

18. Туршатов М. В., Кривченко В. А., Соловьев А. О. Разработка технологии производства кормовых дрожжей при комплексной переработке зернового и углеводсодержащего сырья // Пищевая промышленность. 2019. № 10. С. 62–64. DOI: 10.24411/0235-2486-2019-10160.

19. Чабаев М., Пашкова Л., Анисова Н., Некрасов Р., Бляхман Д. Сухая пшеничная барда – полноценный источник белка // Комбикорма. 2014. № 5. С. 53–54.

20. Uwineza C., Parchami M., Bouzarjomehr M., Taherzadeh M. J., Mahboubi A. Recent developments in the application of filamentous fungus *Aspergillus oryzae* in ruminant feed // Animals. 2024. Vol. 14, No. 16. Article number 2427. DOI: 10.3390/ani14162427.

21. Saeed F., Afzaal M., Khalid A., et al. Role of mycoprotein as a non-meat protein in food security and sustainability: a review // International Journal of Food Properties. 2023. Vol. 26, No. 1. Pp. 683–695. DOI: 10.1080/10942912.2023.2178456.

22. Gnaim R., Dyer P. S., Ledesma-Amaro R. Fusarium-based mycoprotein: advancements in the production of sustainable meat substitutes // Trends in Food Science & Technology. 2025. Vol. 159. Article number 104981. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.104981.

23. Зайцева В. В. Химический состав мицелия гриба fusarium sambucinum // Ученые записки учреждения образования «Витебская ордена „Знак Почета“ государственная академия ветеринарной медицины». 2010. Т. 46, № 2. С. 123–126.

24. Hertrampf J. W., Piedad-Pascual F. Fish Meal. In: Handbook on ingredients for aquaculture feeds. Dordrecht: Springer; 2000. Pp. 177–191. DOI: 10.1007/978-94-011-4018-8_18.

25. Юрин Д. А., Максим Е. А., Осепчук Д. В., Гнеуш А. Н., Мачнева Н. Л. Биопрепараты и фитогенные добавки в рыбоводстве: монография. Краснодар: КубГАУ, 2022. 89 с. DOI: 10.48612/monograph-2022-5.

26. Нечаева Т. А. Применение витаминно-аминокислотного комплекса гемобаланс при выращивании радужной форели // Актуальные вопросы ветеринарной биологии. 2014. № 2 (22). С. 44–49.

27. Arevalo A. M., Ascheri J. L. R., de Oliveira E. M. S., Berrios J. D. J. Aquaculture feeds: a review of raw material, manufacturing process and product quality // Journal of Food, Agriculture & Environment. 2018. Vol. 16, No. 3/4. Pp. 10–17. DOI: 10.1234/4.2018.5530.

28. Коноваленко Л. Ю., Мишуров Н. П., Пономарев С. В., Федоровых Ю. В. Технологии производства кормов для аквакультуры: аналитический обзор. Москва: Росинформагротех, 2020. 80 с.

29. Singh B., Sharma C., Sharma S. Fundamentals of extrusion processing // In: Novel food processing technologies // Ed. by V. Nanda, S. Sharma. New Delhi: New Indian Publishing Agency – NIPA, 2017. DOI: 10.31219/osf.io/xqa5n.

30. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and byproducts: a review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2018. Vol. 59, No. 18. Pp. 2979–2998. DOI: 10.1080/10408398.2018.1480007.

31. Singh S. K. Understanding the effect of extrusion processing parameters on physical, nutritional and rheological properties of soy white flakes based aquafeed in a single screw extruder: doctoral dissertation [Электронный ресурс]. Brookings, SD: South Dakota State University, 2016. 252 p. URL: https://openprairie.sdstate.edu/etd/956/ (дата обращения: 09.03.2021).

32. Rosentrater K. A., Muthukumarappan K., Kannadhason S. Effects of ingredients and extrusion parameters on properties of aquafeeds containing DDGS and corn starch // Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition. 2009. Vol. 1, No. 2. Pp. 44–60. DOI: 10.36478/joafsnu.2009.44.60.

33. Шариков А. Ю., Иванов В. В., Амелякина М. В, Поливановская Д. В. Термопластическая экструзия в биотехнологии крахмалсодержащего сырья // Пищевая промышленность. 2021. № 9. С. 60–61. DOI: 10.52653/PPI.2021.9.9.026.

34. Афанасьев В. А., Николенко Л. А., Лисицына Н. В. [и др.]. Методические рекомендации для расчета рецептов комбикормовой продукции. Москва: ВНИИКП, 2003. 176 с.

35. Nutritional characteristics and feeding value of dried corn bran and solubles, de-oiled (Solvent Extracted DDGS), and corn distillers oil in animal diets [Электронный ресурс] / U. S. Grains Council. 2023. Chapter 8. 16 p. URL: https://grains.org/wp-content/uploads/2023/04/Chapter-8-Dried-Corn-Fiber-and-Solubles-Deoiled-DDGS-and-Distillers-Corn-Oil-in-Animal-Feeds.pdf (дата обращения: 12.10.2025).

36. Kim B. G., Kil D. Y., Zhang Y., Stein H. H. Concentrations of analyzed or reactive lysine, but not crude protein, may predict the concentration of digestible lysine in distillers dried grains with solubles fed to pigs // Journal of Animal Science. 2012. Vol. 90, No. 11. Pp. 3798–3808. DOI: 10.2527/jas.2011-4692.

37. Chrenková M., Čerešňáková Z., Formelová Z., et al. Chemical and nutritional characteristics of different types of DDGS for ruminants // Journal of Animal and Feed Sciences. 2012. Vol. 21, No. 3. Pp. 425–435.

38. Böttger C., Südekum K.-H. European distillers dried grains with solubles (DDGS): chemical composition and in vitro evaluation of feeding value for ruminants // Animal Feed Science and Technology. 2017. Vol. 224. Pp. 66–77. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2016.12.012.

39. Ayadi F. Y., Rosentrater K. A., Muthukumarappan K., Brown M. L. Single-screw extrusion processing of Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS)-based yellow perch (Perca flavescens) feeds // Cereal Chemistry. 2011. Vol. 88, No. 2. Pp. 179–188. DOI: 10.1094/CCHEM-08-10-0118.

40. Ayadi F. Y., Rosentrater K. A., Muthukumarappan K., Brown M. L. Twin-screw extrusion processing of Distillers Dried Grains with Solubles (DDGS)-based yellow perch (Perca flavescens) feeds // ASABE Annual International Meeting 2010: Proceedings. Pittsburgh, Pennsylvania, USA, June 20–23, 2010. Vol. 1. Paper No. 1008336. Pp. 267–296. DOI: 10.13031/2013.30025.

41. Chevanan N., Muthukumarappan K., Rosentrater K. A., Julson J. L. Effect of die dimensions on extrusion parameters and properties of DDGS-based aquafeeds // Cereal Chemistry. 2007. Vol. 84, No. 4. Pp. 389–398. DOI: 10.1094/CCHEM-84-4-0389.

42. Rosentrater K. A., Mjoun K. Extruded aquafeeds containing Distillers Dried Grains with Solubles: effects on extrudate properties and processing behaviour // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2011. Vol. 91, No. 15. Pp. 2865–2874. DOI: 10.1002/jsfa.4536.

43. Kannadhason S., Muthukumarappan K. Effect of starch sources on properties of extrudates containing DDGS // International Journal of Food Properties. 2010. Vol. 13, No. 5. Pp. 1012–1034. DOI: 10.1080/10942910902937416.

44. Liu R., Xing S., Cheng H., et al. Effects of a novel bacteria meal (FeedKind®) on the physical properties of extrudates // Aquaculture Reports. 2023. Vol. 33. Article 101744. DOI: 10.1016/j.aqrep.2023.101744.

45. Chevanan N., Rosentrater K. A., Muthukumarappan K. Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS // Food and Bioprocess Technology. 2008. Vol. 3. Pp. 111–120. DOI: 10.1007/s11947-008-0065-y.

Об авторах:

Антон Юрьевич Шариков, кандидат технических наук, заведующий отделом оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия; ORCID 0000-0001-9483-5209, AuthorID 609389. *E-mail: anton.sharikov@gmail.com*

Виктор Витальевич Иванов, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия; ORCID 0000-0002-6492-7070, AuthorID 646373.
E-mail: foodbiotech@ya.ru

Мария Валентиновна Амелякина, старший научный сотрудник отдела оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия; ORCID 0000-0002-5138-6746, AuthorID 644863. *E-mail: foodbiotech@ya.ru*

Алексей Алексеевич Голубев, инженер-технолог первой категории отдела оборудования пищевых производств и мембранных технологий, Всероссийский научно-исследовательский институт пищевой биотехнологии – филиал Федерального исследовательского центра питания, биотехнологии и безопасности пищи, Москва, Россия; ORCID 0000-0002-3847-6472, AuthorID 1139237. *E-mail: foodbiotech@ya.ru*

References

1. Dodaev K. A., Niezov Kh. N., Suyundikov U. A., Khudayberganov Kh. Sh. The need for protein, oil, carbohydrates, minerals when growing fish. *Economics and Society*. 2020; 11 (78): 647–651. (In Russ.)

2. Malik M. A., Sharma A., Chuphal N., Dar S. Fermentation-driven circular aquafeed solutions: sustainable use of agricultural byproducts. *Aquaculture International*. 2025; 33 (6): 510. DOI: 10.1007/s10499-025-02184-5.

3. Pakhomov V. I., Khlystunov V. F., Braginets S. V., Bakhchevnikov O. N. Current state and trends of the use of vegetable feedstock in aquaculture feeds (review). *Agricultural Science Euro-North-East*. 2022; 23 (3): 281–294. DOI: 10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294. (In Russ.)

4. Bell J. G., Koppe W. Lipids in aquafeeds. In: Turchini G. M., Ng W.-K., Tocher D. R., editors. *Fish oil replacement and alternative lipid sources in aquaculture feeds*. Boca Raton: CRC Press, 2010. Pp. 21–59. DOI: 10.1201/9781439808634-c2.

5. Shtenina D. V. The importance of feeds and their components in fish farming. *Bulletin of Science and Education.*. 2022; 1 (2): 31–33. (In Russ.)

6. Kolmakov V. I., Kolmakova A. A. Amino acids in prospective feeds for fish aquaculture: a review of experimental data. *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2020; 13 (4): 424–442. DOI: 10.17516/1997-1389-0332.

7. Saldeeva K. A., Miroshnikova E. P. Alternative protein sources in the production of compound feeds for aquaculture. *Shag v Nauku*. 2021; 3: 116–119. (In Russ.)

8. Kaloyev B. S. Distiller's dried grains for broilers. *Animal Husbandry of Russia*. 2018; 10: 9–10. (In Russ.)

9. Turshatov M. V., Moiseeva N. D., Krivchenko V. A., Solov'ev A. O., Kononenko V. V., Ledenev V. P. Production of high-quality dried feed products from secondary raw materials of grain-processing enterprises. *Beer and Beverages*. 2016; 1: 22–25. (In Russ.)

10. Ratoshnyy A. N., Zabashta N. N., Golovko E. N. Use of dried distillers grains in the diets of growing pigs. *Collection of Scientific Papers of the North Caucasus Research Institute of Animal Husbandry*. 2014; 3 (3): 194–200. (In Russ.)

11. Bessonov V. V., Bogachuk M. N., Makarenko M. A., Sokurenko M. S., Shevyakova L. V., Abramova I. M., Turshatov M. V., Krivchenko V. A., Solov'ev A. O. Study of the biochemical composition of grain fiber from ethanol production. *Food Processing Industry*. 2020; 2: 12–15. DOI: 10.24411/0235-2486-2020-10014. (In Russ.)

12. Karimi S., Mahboobi Soofiani N., Mahboubi A., Ferreira J. A., Lundh T., Kiessling A., Taherzadeh M. J. Evaluation of nutritional composition of pure filamentous fungal biomass as a novel ingredient for fish feed. *Fermentation*. 2021; 7 (3): 152. DOI: 10.3390/fermentation7030152.

13. Kulikov D. S., Gulakova V. A., Kolpakova V. V., Ulanova R. V. Production of protein concentrates and fodder microbial biomass from triticale extract and pea flour using enzymes. *Food Processing Industry*. 2019; 4: 49–51. (In Russ.)

14. Serba E. M., Yuraskina T. V., Rimareva L. V., Tadzibova P. Yu., Sokolova E. N., Volkova G. S. Microbial biomass as a bioresource of functional food ingredients: a review. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023; 53 (3): 426–444. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-3-2446. (In Russ.)

15. Minakov D. V., Koneva S. I., Egorova E. Yu. Mycelial biomass enzymes of Cordyceps militaris and Lentinula edodes in baking technology. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024; 54 (2): 222–235. DOI: 10.21603/2074-9414-2024-2-2502. (In Russ.)

16. Fomenko I. A., Degtyarev I. A., Ivanova L. A., Mashentseva N. G. A technology for obtaining a protein concentrate from yeast biomass of Kluyveromyces marxianus Van der Walt (1965). *Agricultural Biology*. 2021; 56 (6): 1172–1182. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.6.1172rus. (In Russ.)

17. Logvinova T. I., Kolodina E. N., Artem'eva O. A., Nikanova D. A. Study of yeast strain properties as microbial producers of feed protein. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk*. 2016; 12-1: 57–61. (In Russ.)

18. Turshatov M. V., Krivchenko V. A., Soloviev A. O. Development of technology for fodder yeast production of in the complex processing of grain and carbohydrate-containing raw materials. *Food Processing Industry*. 2019; 10: 62–64. DOI: 10.24411/0235-2486-2019-10160. (In Russ.)

19. Chabaev M., Pashkova L., Anisova N., Nekrasov R., Blyakhman D. Dried wheat distillers grains as a complete source of protein. *Compound Feeds*. 2014; 5: 53–54. (In Russ.)

20. Uwineza C., Parchami M., Bouzarjomehr M., Taherzadeh M. J., Mahboubi A. Recent developments in the application of filamentous fungus Aspergillus oryzae in ruminant feed. *Animals*. 2024; 14 (16): 2427. DOI: 10.3390/ani14162427.

21. Saeed F., Afzaal M., Khalid A., Shah Y. A., Ateeq H., Islam F., Akram N., Ejaz A., Nayik G. A., Shah M. A. Role of mycoprotein as a non-meat protein in food security and sustainability: a review. *International Journal of Food Properties*. 2023; 26 (1): 683–695. DOI: 10.1080/10942912.2023.2178456.

22. Gnaim R., Dyer P. S., Ledesma-Amaro R. Fusarium-based mycoprotein: advancements in the production of sustainable meat substitutes. *Trends in Food Science & Technology*. 2025; 159: 104981. DOI: 10.1016/j.tifs.2025.104981.

23. Zaytseva V. V. Chemical composition of the mycelium of the fungus Fusarium sambucinum. *Uchenye zapiski uchrezhdeniya obrazovaniya "Vitebskaya ordena 'Znak Pocheta' gosudarstvennaya akademiya veterinarnoy meditsiny"*. 2010; 46 (2): 123–126. (In Russ.)

24. Hertrampf J. W., Piedad-Pascual F. Fish meal. In: *Handbook on ingredients for aquaculture feeds*. Dordrecht: Springer, 2000. Pp. 177–191. DOI: 10.1007/978-94-011-4018-8_18.

25. Yurin D. A., Maksim E. A., Osepchuk D. V., Gneush A. N., Machneva N. L. *Biological products and phytogenic additives in fish farming: monograph*. Krasnodar: KubGAU, 2022. 89 p. DOI: 10.48612/monograph-2022-5. (In Russ.)

26. Nechaeva T. A. Application of vitamin and amino acids of the complex Haemobalance in rainbow trout rearing. *Actual Questions of Veterinary Biology*. 2014; 2 (22): 44–49. (In Russ.)

27. Arevalo A. M., Ascheri J. L. R., de Oliveira E. M. S., Berrios J. D. J. Aquaculture feeds: a review of raw material, manufacturing process and product quality. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 2018; 16 (3/4): 10–17. DOI: 10.1234/4.2018.5530.

28. Konovalenko L. Yu., Mishurov N. P., Ponomarev S. V., Fyodorovykh Yu. V. *Technologies for the production of feed for aquaculture: analytical overview*. Moscow: Rosinformagrotekh, 2020. 80 p. (In Russ.)

29. Singh B., Sharma C., Sharma S. *Fundamentals of extrusion processing*. Center for Open Science, 2020. DOI: 10.31219/osf.io/xqa5n.

30. Offiah V., Kontogiorgos V., Falade K. O. Extrusion processing of raw food materials and by-products: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2019; 59 (18): 2979–2998. DOI: 10.1080/10408398.2018.1480007.

31. Singh S. K. *Understanding the effect of extrusion processing parameters on physical, nutritional and rheological properties of soy white flakes based aquafeed in a single screw extruder: doctoral dissertation* [Internet]. Brookings, SD: South Dakota State University; 2016 [cited 2021 Mar 09]. 252 p. Available from: https://openprairie.sdstate.edu/etd/956/.

32. Rosentrater K. A., Muthukumarappan K., Kannadhason S. Effects of ingredients and extrusion parameters on properties of aquafeeds containing DDGS and corn starch. *Journal of Aquaculture Feed Science and Nutrition*. 2009; 1 (2): 44–60. DOI: 10.36478/joafsnu.2009.44.60

33. Sharikov A. Yu., Ivanov V. V., Amelyakina M. V., Polivanovskaya D. V. Thermoplastic extrusion in biotechnology of starch-containing raw materials. *Food Processing Industry*. 2021; 9: 60–61. DOI: 10.52653/PPI.2021.9.9.026. (In Russ.)

34. Afanas'ev V. A., Nikolenko L. A., Lisitsyna N. V., Chernyshov N. I., Egorov I., Imangulov Sh. A., Ignatova G. V., Vinogradov V. N., Kirilov M. P., Krokhina V. A., Shcheglov V. V., Makhaev E. A., Gamygin E. A., Ponomarev S. V., Sklyarov V. Ya., Sudakova N. V. *Guidelines for calculating compound feed formulations*. Moscow: VNIIKP, 2003. 176 p. (In Russ.)

35. *Nutritional characteristics and feeding value of dried corn bran and solubles, de-oiled (solvent extracted DDGS), and corn distillers oil in animal diets* [Internet]. U. S. Grains Council; 2023 [cited 2026 Oct 12]; 8. 16 p. Available from: https://grains.org/wp-content/uploads/2023/04/Chapter-8-Dried-Corn-Fiber-and-Solubles-Deoiled-DDGS-and-Distillers-Corn-Oil-in-Animal-Feeds.pdf.

36. Kim B. G., Kil D. Y., Zhang Y., Stein H. H. Concentrations of analyzed or reactive lysine, but not crude protein, may predict the concentration of digestible lysine in distillers dried grains with solubles fed to pigs. *Journal of Animal Science*. 2012; 90 (11): 3798–3808. DOI: 10.2527/jas.2011-4692.

37. Chrenková M., Čerešňáková Z., Formelová Z., Poláčiková M., Mlyneková Z., Fľak P. Chemical and nutritional characteristics of different types of DDGS for ruminants. *Journal of Animal and Feed Sciences*. 2012; 21 (3): 425–435. DOI: 10.22358/jafs/66108/2012.

38. Böttger C., Südekum K.-H. European distillers dried grains with solubles (DDGS): chemical composition and in vitro evaluation of feeding value for ruminants. *Animal Feed Science and Technology*. 2017; 224: 66–77. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2016.12.012.

39. Ayadi F. Y., Muthukumarappan K., Rosentrater K. A., Brown M. L. Single-screw extrusion processing of distillers dried grains with solubles (DDGS)-based yellow perch (Perca flavescens) feeds. *Cereal Chemistry*. 2011; 88 (2): 179–188. DOI: 10.1094/CCHEM-08-10-0118.

40. Ayadi F. Y., Rosentrater K. A., Muthukumarappan K., Brown M. L. Twin-screw extrusion processing of distillers dried grains with solubles (DDGS)-based yellow perch (Perca flavescens) feeds. *ASABE Annual International Meeting 2010: Proceedings.* Pittsburgh, Pennsylvania, USA, June 20–23, 2010. 2010; 1: 267–296. Paper No. 1008336. DOI: 10.13031/2013.30025.

41. Chevanan N., Muthukumarappan K., Rosentrater K. A., Julson J. L. Effect of die dimensions on extrusion processing parameters and properties of DDGS-based aquaculture feeds. *Cereal Chemistry*. 2007; 84 (4): 389–398. DOI: 10.1094/CCHEM-84-4-0389.

42. Mjoun K., Rosentrater K. A. Extruded aquafeeds containing distillers dried grains with solubles: effects on extrudate properties and processing behaviour. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2011; 91 (15): 2865–2874. DOI: 10.1002/jsfa.4536.

43. Kannadhason S., Muthukumarappan K. Effect of starch sources on properties of extrudates containing DDGS. *International Journal of Food Properties*. 2010; 13 (5): 1012–1034. DOI: 10.1080/10942910902937416.

44. Liu R., Xing S., Cheng H., Liang X., Wang J., Wang J., Longshaw M., Hou L., Xue M., Wang H. Effects of a novel bacteria meal (FeedKind®) on the physical properties of extrudates. *Aquaculture Reports*. 2023; 33: 101744. DOI: 10.1016/j.aqrep.2023.101744.

45. Chevanan N., Rosentrater K. A., Muthukumarappan K. Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS. *Food and Bioprocess Technology*. 2010; 3 (1): 111–120. DOI: 10.1007/s11947-008-0065-y.

Authors' information:

Anton Yu. Sharikov, candidate of technical sciences, head of the department of food production equipment and membrane technologies, Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia; ORCID 0000-0001-9483-5209, AuthorID 609389. *E-mail: anton.sharikov@gmail.com*

Viktor V. Ivanov, candidate of technical sciences, leading researcher at the department of food production equipment and membrane technologies, Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia;
ORCID 0000-0002-6492-7070, AuthorID 646373. *E-mail: foodbiotech@ya.ru*

Mariya V. Amelyakina, senior researcher at the department of food production equipment and membrane technologies, Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia; ORCID 0000-0002-5138-6746, AuthorID 644863. *E-mail: foodbiotech@ya.ru*

Aleksey A. Golubev, first-category technological engineer at the department of food production equipment and membrane technologies, Russian Scientific Research Institute of Food Biotechnology – a branch of the Federal Research Center for Nutrition, Biotechnology and Food Safety, Moscow, Russia; ORCID 0000-0002-3847-6472, AuthorID 1139237. *E-mail: foodbiotech@ya.ru*