

УДК 661.155.3

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-398-09-141-150

Д.Б. Просвирников ✉

Д.В. Тунцев

Р.Т. Валева

Л.М. Исмагилова

А.В. Броднева

Р.М. Одилова

Казанский национальный
исследовательский технологический
университет, Казань, Россия

✉ prosvirnikov_dmi@mail.ru

Поступила в редакцию: 13.05.2025

Одобрена после рецензирования: 13.08.2025

Принята к публикации: 28.08.2025

© Просвирников Д.Б., Тунцев Д.В.,
Валева Р.Т., Исмагилова Л.М.,
Броднева А.В., Одилова Р.М.

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2025-398-09-141-150

Dmitry B. Prosvirnikov ✉

Denis V. Tuntsev

Rauza T. Valeeva

Lilia M. Ismagilova

Anna V. Brodneva

Rachima M. Odilova

Kazan National Research Technological
University, Kazan, Russia

✉ prosvirnikov_dmi@mail.ru

Received by the editorial office: 13.05.2025

Accepted in revised: 13.08.2025

Accepted for publication: 28.08.2025

© Prosvirnikov D.B., Tuntsev D.V., Valeeva R.T.,
Ismagilova L.M., Brodneva A.V., Odilova R.M.

Ферментативный гидролиз сельскохозяйственных растительных материалов с последующим культивированием кормовых дрожжей *Candida tropicalis* и *Saccharomyces cerevisiae*

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Растительные материалы — перспективный ресурс для производства кормового белка. Их переработка с помощью ферментативного гидролиза и культивирования дрожжей позволяет получать микробную биомассу с высокой пищевой ценностью. Это актуальное направление способствует решению проблемы дефицита кормового белка в животноводстве и устойчивому использованию ресурсов в условиях экологических и экономических вызовов.

Методы. Компонентный анализ сырья (лузга подсолнечника, пивная дробина, люпин, свекольный жом) проводили по стандартным методикам, сырье измельчали, сушили, подвергали ферментативному гидролизу с применением ферментных препаратов ГК «Фермент» (Республика Беларусь) при оптимальных pH и температуре с контролем выхода сахаров, pH и конверсии. На полученных гидролизатах культивировали дрожжи *S. cerevisiae* и *C. tropicalis* и анализировали потенциал использования агроотходов.

Результаты. При гидролизе пивной дробины получен максимальный выход сахаров (1,8%), у люпина — 1,7% (два пика выхода сахаров наблюдались в 2–4 и 7–9 ч.), у жома — 0,95% (пик в 4–5 ч.). При культивировании *S. cerevisiae* и *C. tropicalis* на гидролизатах пивной дробины и люпина дрожжи активнее росли на пивной дробине, достигая после сушки содержания протеина 68,18% и 72,63% а. с. в. и используя преимущественно при росте растворенные в гидролизате белковые фракции исходного сырья. Наиболее перспективны гидролизаты пивной дробины и люпина, оптимальная продолжительность ферментативного гидролиза 6–10 ч.

Ключевые слова: гидролиз, ферменты, растительное сырье, люпин, пивная дробина, свекольный жом, лузга подсолнечника, культивирование, дрожжи, кормовая добавка, кормовой белок

Для цитирования: Просвирников Д.Б., Тунцев Д.В., Валева Р.Т., Исмагилова Л.М., Броднева А.В., Одилова Р.М. Ферментативный гидролиз сельскохозяйственных растительных материалов с последующим культивированием кормовых дрожжей *Candida tropicalis* и *Saccharomyces cerevisiae*. *Аграрная наука*. 2025; 398(09): 141–150. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-141-150>

Enzymatic hydrolysis of plant agricultural materials followed by cultivation of fodder yeasts *Candida tropicalis* and *Saccharomyces cerevisiae*

ABSTRACT

Relevance. Agro-food waste is a promising resource for the production of feed protein. Their processing using enzymatic hydrolysis and yeast cultivation allows obtaining microbial biomass with high nutritional value. This relevant area helps to solve the problem of feed protein deficiency in animal husbandry and sustainable use of resources in the context of environmental and economic challenges.

Methods. Component analysis of raw materials (sunflower husk, brewer's grain, lupine, beet pulp) was carried out according to standard methods, the raw materials were crushed, dried, subjected to enzymatic hydrolysis using enzyme preparations of the Ferment Group of Companies (Republic of Belarus) at optimal pH and temperature, with control of sugar yield, pH and conversion. Yeasts *S. cerevisiae* and *C. tropicalis* were cultivated on the obtained hydrolysates and the potential for using agro-waste was analyzed.

Results. The maximum sugar yield was obtained during the hydrolysis of brewer's grains (1.8%), for lupine — 1.7% (two peaks of sugar yield were observed at 2–4 and 7–9 hours), for pulp — 0.95% (peak at 4–5 hours). When cultivating *S. cerevisiae* and *C. tropicalis* on hydrolysates of brewer's grains and lupine, the yeast grew more actively on brewer's grains, reaching a protein content of 68.18% and 72.63% a. d. w. after drying, and using mainly the protein fractions of the original raw material dissolved in the hydrolysate during growth. The most promising hydrolysates are brewer's grains and lupine, the optimal duration of enzymatic hydrolysis is 6–10 hours.

Key words: hydrolysis, enzymes, plant materials, lupine, brewer's grains, beet pulp, sunflower husk, cultivation, yeast, feed additive, feed protein

For citation: Prosvirnikov D.B., Tuntsev D.V., Valeeva R.T., Ismagilova L.M., Brodneva A.V., Odilova R.M. Enzymatic hydrolysis of plant agricultural raw materials with subsequent cultivation of fodder yeast *Candida tropicalis* and *Saccharomyces cerevisiae*. *Agrarian science*. 2025; 398(09): 141–150 (in Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2025-398-09-141-150>

Введение/Introduction

Отходы сельского хозяйства и пищевой промышленности составляют большую часть (почти 30%) мирового сельскохозяйственного производства. Эти отходы в основном состоят из лигноцеллюлозных материалов, образующихся при переработке зерна, фруктов, овощей, сахарного тростника. Растительные отходы агропромышленного комплекса богаты многими биологически активными и нутрицевтическими соединениями, такими как полифенолы, каротиноиды и пищевые волокна [1], и являются ценным сырьем, при грамотной переработке которого возможно решить некоторые проблемы кормления животных, в частности получения кормовых продуктов, обогащенных белком [2, 3].

Такие технологии переработки растительных отходов включают ферментацию твердого субстрата, силосование или глубокую биотехнологическую переработку [4] и должны учитывать их особенности и среду, в которой они образуются, перерабатываются и используются. В частности, результатом таких технологий должны стать продукты, которые безопасны не только для использования в качестве корма для животных, но и с точки зрения питания человека [5].

Ожидаемый дефицит традиционных белковых кормов (соевой и рыбной муки) вынудит искать альтернативные источники [6]. Сегодня животноводство зависит от глобальных поставок растительного белка, что вызывает нехватку в отдельных регионах и увеличивает нагрузку на экосистемы [7].

В качестве устойчивой альтернативы белок, полученный из микроорганизмов, таких как бактерии, дрожжи и водоросли, обеспечивает высокую ценность при меньшем воздействии на окружающую среду в отраслях животноводства [8]. Производство белка значительно продвинулось благодаря совершенствованию технологических процессов, внедрению экологически безопасных субстратов, включая агропромышленные и пищевые отходы [9], а также использованию безопасных для человека и окружающей среды микроорганизмов. Существующие промышленные мощности обладают потенциалом для переоснащения с целью получения кормового белка путем ферментации с образованием одноклеточной биомассы. Среди микроорганизмов, применяемых для этих целей, дрожжи занимают ведущее место благодаря высокому содержанию питательных веществ и хорошей потребительской приемлемости [10, 11].

Микробная биомасса может выращиваться для производства продуктов питания и корма для животных благодаря высокому содержанию белка и тому факту, что представляют собой богатый источник углеводов, минералов, жиров, витаминов и аминокислот [12]. Одним из ключевых преимуществ микробной биомассы является высокая скорость ее получения, обусловленная быстрым

ростом продуцирующих микроорганизмов и возможностью использования агропромышленных отходов, остатков и побочных продуктов в качестве сырья в рамках возобновляемых биотехнологий [13].

Агропромышленные отходы и побочные продукты представляют собой материалы, образующиеся в результате различных технологических процессов в сельском хозяйстве и смежных отраслях [14]. С учетом их химического состава, физико-химических свойств и значительных объемов они обладают значительным потенциалом для производства устойчивых биопродуктов, включая микробную биомассу.

Существует большое количество исследований, посвященных переработке сельскохозяйственных растительных отходов в корма для животных, в частности в микробный кормовой белок. Так, например, Г. Шело с коллегами представили комплексный обзор по повышению ценности отходов агропромышленного комплекса методом твердофазной ферментации [15]. Они, как и многие, сообщают, что агропродовольственные промышленные отходы производятся в больших количествах по всему миру. Подавляющее большинство этих отходов — лигноцеллюлозные материалы, которые являются потенциальным сырьем для создания продуктов с добавленной стоимостью (например, с применением технологий твердофазной ферментации, позволяющей на растительном субстрате производить рост микроорганизмов).

К. Држимала с коллегами исследовали сельскохозяйственные отходы ржи и овса как субстраты-кандидаты для производства биомассы нетрадиционными дрожжами *Yarrowia lipolytica* [16]. После комбинированного процесса кислотно-ферментативного гидролиза были проанализированы концентрация и состав ферментируемых моносахаридов в полученных гидролизатах. Гидролизат ржаных отрубей имел самое высокое содержание сахара — 80,8 г/л. Результаты показали, что эти дрожжи способны расти на недорогой среде и производить биомассу, которую можно использовать в качестве корма в виде одноклеточного белка. Биомасса дрожжей, выращенных на гидролизате овсяных отрубей, составила более 9 г/л через 120 ч., при этом общий выход биомассы и общая производительность составили 0,141 г/г и 0,078 г/ч соответственно. Содержание белка в биомассе дрожжей находилось в диапазоне 30,5–44,5% от сухого веса. Результаты, полученные при культивировании *Y. lipolytica* в ржаных отрубях, показали высокое содержание экзогенных аминокислот (лейцин 3,38 г, лизин 2,93 г, треонин 2,31 г / 100 г сухой массы) и спектр ненасыщенных жирных кислот с преобладанием олеиновой кислоты — 59,28%.

С. Патсиос и др. показали возможность получения кормового белка для животных путем выращивания *Yarrowia lipolytica* на агропромышленных отходах и побочных продуктах [17].

Н.Р. Бишной оптимизировал ферментативный гидролиз предварительно обработанной пшеничной соломы щелочью в СВЧ и производство этанола дрожжами [18]. При оптимальных условиях наблюдали эффективность выхода гидролиза — 82%, после чего концентрированный ферментативный гидролизат был подвергнут ферментации для производства этанола с помощью *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis* и совместной культуры. Выход этанола составил 0,48 г/г субстрата, 0,43 г/г и 0,40 г/г соответственно. Похожие результаты получили С.М. Аджила с колл. [19].

П. Пательски с колл. изучали переработку отходов картофельной промышленности в биомассу кормовых дрожжей [20]. Они сообщают, что часть углеводов в отходах картофельного жома может быть таким образом преобразована в более ценный белок. Были проведены два вида гидролиза (термокислотный и ферментативный) для получения среды для культивирования *Candida guilliermondii* и *Pichia stipitis*. Самый высокий выход биомассы через 48 ч. (39,3%) был отмечен для дрожжей *Candida guilliermondii*, выращенных на среде на основе ферментативного гидролизата.

С. Муньос и др. разработали интегрированный процесс предварительной обработки и ферментативного гидролиза кукурузной соломы [21]. Химическая предварительная обработка биомассы была интегрирована с производством ферментов посредством рециркуляции водных фракций. Пероксидно-щелочная делигнификация кукурузной соломы была проведена для получения 75,1% по весу твердой фракции целлюлозы и для растворения 93,4% и 83,5% исходного лигнина и гемицеллюлозы соответственно. Затем нативный штамм *Pleurotus cystidiosus* был оставлен для роста в течение 120 ч. в полученной жидкой фракции. Максимальная конверсия целлюлозы в глюкозу полученной жидкой фракцией грибковой среды составила $61,3 \pm 0,9\%$ от теоретического выхода конверсии коммерческого фермента. Аналогично конверсия гемицеллюлозы в ксилозу составила $69,5 \pm 1,5\%$.

Авторы исследования [22] изучали характеристику стебля хлопчатника как лигноцеллюлозного сырья для производства одноклеточного белка. Лигноцеллюлозные гидролизаты были приготовлены из различных частей стеблей хлопка и использованы для производства одноклеточного белка. В качестве доказательства концепции гидролизаты стеблей хлопка были успешно преобразованы в одноклеточный белок с использованием *Candida utilis* благодаря его благоприятной эффективности потребления сахара и высокому качеству белка. Была получена самая высокая концентрация белка (5,74 г/л), что дает 0,23 г/г из лигноцеллюлозных сахаров, выделенных из корней стеблей хлопка.

А. Вилковска и др. исследовали совместное культивирование дрожжей и гидролиз пектина

как эффективный метод производства пребиотического корма для животных из жома сахарной свеклы [23]. Различные штаммы дрожжей были подвергнуты скринингу на предмет их способности к синтезу белка и усвоению моносахаридов. Было обнаружено, что комбинированное культивирование дрожжей и гидролиз пектина являются эффективным методом получения пребиотиков. Раздельный ферментативный гидролиз и ферментация привели к высвобождению 3,6 г сахаров на 100 г сухой массы, тогда как выход сахаров, полученных после комбинированного процесса, был на 17,9% выше. Введение дрожжей в процесс улучшило производительность гидролиза из-за более низкого ингибирования ферментов моно- и дисахаридами.

Д. Лапенья и др. изучали возможность производства и характеристику дрожжей, выращенных на средах, состоящих из сахаров, полученных из ели, и гидролизатов белков из куриных субпродуктов [24]. Как сообщают авторы, дрожжи очень хорошо росли на среде на основе ели и куриных субпродуктов с типичным выходом в размере 0,4–0,5 г сухого веса дрожжей и 0,2–0,3 г белка на 1 г сахара. *B. adeninivorans* выделялись как самые универсальные дрожжи с точки зрения потребления питательных веществ, и в этом случае выход достигал 0,9 г биомассы и 0,5 г белка на 1 г сахара. Следующими по производительности дрожжами с точки зрения выхода были *W. anomalus* с выходом до 0,6 г дрожжей и 0,3 г белка на 1 г сахара. Сравнительный анализ состава дрожжей выявил благоприятные профили аминокислот, которые были похожи на профили соевой муки и тем более рыбной муки, особенно по незаменимым аминокислотам.

Цели данного исследования — сравнение характеристик процесса (выход редуцирующих веществ, продолжительность процесса) ферментативного гидролиза лузги подсолнечника, свекловичного жома, люпина белого, пивной дробины, культивирование микробной биомассы *Candida tropicalis* и *Saccharomyces cerevisiae* на полученных ферментативных гидролизатах, имеющих наибольшее содержание редуцирующих веществ, оценка возможности и потенциала биотрансформации исследуемых растительных сельскохозяйственных материалов в источник микробного протеина для кормления сельскохозяйственных животных.

Материалы и методы исследования / Materials and methods

Экспериментальные работы были проведены на кафедре химической кибернетики ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (КНИТУ) в марте 2025 года.

В работе использовали:

✓ лузгу подсолнечника, выработанную в 2024 г. (АО «Казанский жировой комбинат», г. Казань, Россия);

✓ свекловичный жом, выработанный в 2025 г. (ООО «Буинский сахар», г. Буинск, Россия);

✓ люпин белый сорта Дега (отходы заготовки и хранения семян кормового люпина — некондиционные бобы) (собран в Ивановской обл., Россия), урожай 2024 г.;

✓ сухую пивную дробину, выработанную в 2025 г. (ООО «Завод ППД», г. Екатеринбург, Россия).

Образцы сырья растительного происхождения представлены на рисунке 1.

Сырье предварительно измельчали на лабораторной мельнице «Вьюга ЗМТ» (Россия), просеивали через сита с ячейками 0,1–0,5 мм.

Компонентный анализ сырья определяли в масс.% абсолютно сухого вещества (а. с. в.) следующим образом (табл. 1):

✓ влага (W) — на автоматическом анализаторе влажности AND MX-50 (Япония),

✓ целлюлоза ($C_{ц}$) — ГОСТ ISO 6865-2015¹,

✓ легкогидролизуемые полисахариды ($C_{лг}$) — по ГОСТ 26176-2019²,

✓ лигнин ($C_{л}$) — по ГОСТ 26177-84³,

✓ жир ($C_{ж}$) и экстрактивные вещества ($C_{эв}$) — по ГОСТ 13496.15-2016⁴,

✓ общий азот (CN) — по ГОСТ 13496.4-2019⁵ (в установке для мокрого озоления от компании Selecta (Испания) с выносным температурным блоком в вытяжном шкафу),

✓ истинный белок (CN_6) — по ГОСТ Р 5722-2016⁶,

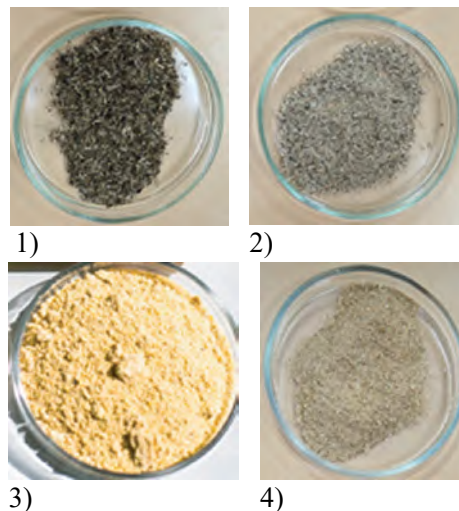
✓ сырая зола (C_3) — по ГОСТ 26226-95⁷.

Статистическую оценку проводили по стандартным методикам⁹. Для проведения ферментативного гидролиза были использованы ферментные препараты ГК «Фермент» (Республика Беларусь). Характеристики представлены в таблице 2.

Поскольку цель работы — избирательный ферментативный гидролиз углеводной фракции люпина и жира, исходя из данных по количественному содержанию компонентов, учитывая активность и теоретическую молекулярную массу субстрата, определяли дозировки ферментных препаратов (табл. 3).

Рис. 1. Измельченное сырье для исследований: 1) лузга подсолнечника, 2) свекловичный жом, 3) люпин белый сорта Дега, 4) сухая пивная дробина

Fig. 1. Crushed raw materials for research: 1) sunflower husk, 2) beet pulp, 3) white lupine of the Dega variety, 4) dry brewer's grains



Ферментативный гидролиз препаратами ГК «Фермент» проводили следующим образом. В стерилизованные колбы 750 мл (по два параллельных измерения на каждый вид сырья) помещали подготовленное сырье (35,0 г) с известной влажностью, ферментную композицию в заданном количестве и соотношении (разведение водой 5 мл) и буфер (лимонная кислота/гидроксид натрия) в расчетном количестве 200 мл, колбы закрывали ватно-марлевым тампоном. Все реактивы использовали квалификации ч. д. а.

Ферментативный гидролиз проводили в лабораторном шейкере-инкубаторе Kuhner ISF1-X (Швейцария) при 130 об/мин в течение 28 ч.

Режимы обработки для каждого вида сырья подбирали на основании ферментных композиций, рабочих и оптимальных диапазонов температуры и pH (табл. 4).

Через 2, 4, 6, 8, 10, 24, 26, 28 ч. ферментативного гидролиза из колб отбирали пробы гидролизата

Таблица 1. Компонентный состав сырья

Table 1. Component composition of raw materials

Сырье	W, % а. с. в.	$C_{эв}$, % а. с. в.	$C_{ц}$, % а. с. в.	$C_{лг}$, % а. с. в.	$C_{л}$, % а. с. в.	$C_{ж}$, % а. с. в.	$C_{лг}$, % а. с. в.	CN, % а. с. в.	CN_6 , % а. с. в.	C_3 , % а. с. в.
Лузга подсолнечника	4,95±0,03	6,02±1,22	30,91±0,50	13,33±0,60	0,01±0,00	25,37±0,22	2,35±0,01	8,92±0,65	4,59±0,78	6,55±0,24
Жом свекловичный	11,65±0,15	2,50±0,97	23,24±0,05	28,51±0,55	0,02±0,00	3,90±0,05	0,89±0,03	12,15±1,41	4,94±0,28	5,08±0,61
Люпин белый	6,87±0,03	1,81±0,02	16,81±0,27	21,9±1,21	5,1±0,01	0,24±0,01	9,98±0,02	39,49±0,32	16,98±0,60	5,15±0,15
Пивная дробина ⁸	10,75±0,05	1,12±0,17	19,56±0,56	56,9±1,343	20,21±0,12	6,92±0,15	1,19±0,03	28,21±0,07	10,36±0,14	8,06±0,27

¹ ГОСТ ISO 6865-2015 Корма для животных. Метод определения содержания сырой клетчатки.

² ГОСТ 26176-2019 Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов.

³ ГОСТ 26177-84 Корма, комбикорма. Метод определения лигнина.

⁴ ГОСТ 13496.15-2016 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения массовой доли сырого жира.

⁵ ГОСТ 13496.4-2019 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения содержания азота и сырого протеина.

⁶ ГОСТ Р 57221-2016 Дрожжи кормовые. Методы испытаний.

⁷ ГОСТ 26226-95 Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения сырой золы.

⁸ ТУ 10.91.10-01-78695730-2022 Корма готовые для сельскохозяйственных животных.

⁹ Сараджишвили С.Э. Статистическая обработка данных: учебное пособие / С.Э. Сараджишвили, В.С. Почернин. 2024; 35.

Таблица 2. Характеристики ферментных препаратов ГК «Фермент»

Table 2. Characteristics of enzyme preparations of the Ferment Group of Companies

Название препарата	Гидролизуемый субстрат	Активность, ед/г	pH раб.	pH опт.	t раб., °С	t опт., °С
Целлюлазный комплекс	Целлюлоза до низкомолекулярных углеводов и глюкозы	10 000	2,0–7,0	3,5–4,5	30–65	50–60
β-глюканаза	β-глюканы и другие некрахмальные полисахариды (глюканы ГМЦ)	20 000	3–7	4–6	30–70	50–60
Белазим ГЦ комплекс бета-глюканазы (6800) и ксиланазы (550)	β-глюканы до низкомолекулярных углеводов и глюкозы (глюканы ГМЦ)	6800	4–7	5–6	30–60	50–55
Ксиланаза	Растворимые и нерастворимые формы арабиноксиланов до низкомолекулярных углеводов и ксилозы. Действует в волокнистой фракции клеточной стенки растений (ксиланы ГМЦ)	30 000	4–7	5–6,5	30–60	50–55
β-маннаназа	Маннан — критический антипитательный фактор в соевых продуктах и шроте (жмыхе) подсолнечника (маннаны ГМЦ)	10 000	5–7	5–6	30–70	55–65
Липрозим С (группа 1)	Сложноэфирные связи в триглицеридах	11 250	6–10	8	20–60	40–45
Белазим ХА α-амилаза	α-1,4-гликозидные связи крахмала до декстринов и олигосахаридов	2000	4–7,5	5,5–6,5	30–70	50–60
Эльзим ГА жидкая глюкоамилаза (3500)	Составные части зернового крахмала (амилоза и амилопектин). Гидролизует предпочтительно высокомолекулярный субстрат, молекулы декстринов и крахмала с образованием глюкозы	3500	3,5–6	4–5	30–60	50–55

Таблица 3. Расчет ферментных композиций

Table 3. Calculation of enzyme compositions

Название препарата	Субстрат	Расчетные дозировки (в % от массы субстрата)	Дозировки ферментов (в % от массы всего сырья)			
			Лузга подсолнечника	Жом свекловичный	Люпин белый	Пивная дробина
Целлюлазный комплекс	Целлюлоза	0,1	0,03	0,02	0,02	0,02
β-глюканаза	Легкогидролизуемые полисахариды	0,15	0,02	0,04	0,03	0,09
Белазим ГЦ комплекс β-глюканазы (6800) и ксиланазы (550)	Легкогидролизуемые полисахариды	0,45	0,06	0,13	0,10	0,26
Ксиланаза	Легкогидролизуемые полисахариды	0,1	0,01	0,03	0,02	0,06
β-маннаназа	Легкогидролизуемые полисахариды	0,2	0,03	0,06	0,04	0,11
Липрозим С (группа 1)	Жир	0,1	0,00	0,00	0,01	0,00
Белазим ХА α-амилаза	Крахмал	0,2	0,00	0,00	0,01	0,04
Эльзим ГА жидкая глюкоамилаза (3500)	Крахмал	0,1	0,00	0,00	0,01	0,02

Таблица 4. Режимы ферментативного гидролиза

Table 4. Enzymatic hydrolysis modes

Режим	Лузга подсолнечника	Жом свекловичный	Люпин белый	Пивная дробина
t, °С	50	50	50	55
pH	4,5–5	4,5–5	4,5–5,5	4,5–5
Гидромодуль	5,2	7,4	5,1	5,5

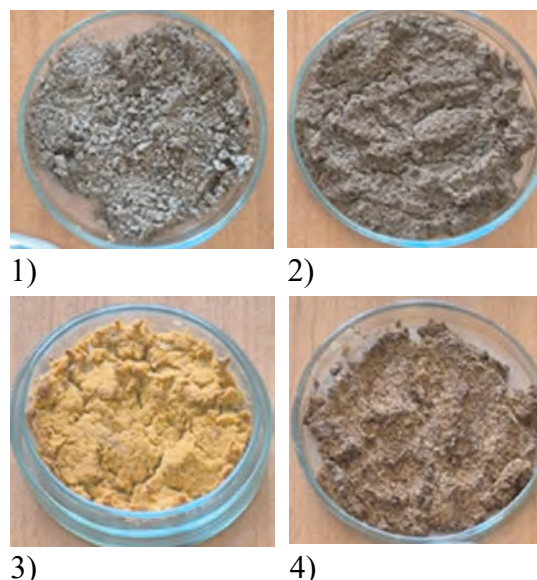
по 10 мл, центрифугировали на центрифуге Biobase (Китай) при 10 000 об/мин в течение 5 мин., в надосадочной жидкости определяли pH («Мультитест ИПЛ-311», Россия), концентрацию редуцирующих веществ (далее — РВ) в пересчете на глюкозу (метод Бенедикта Бертрана).

По окончании ферментативного гидролиза содержимое колб центрифугировали и отделяли надосадочную жидкость (гидролизат) от твердого остатка, стерилизовали кипячением, охлаждали и готовили к дальнейшему культивированию на ней микроорганизмов.

Твердый осадок (рис. 2) сушили в шкафу при 103–105 °С в течение 12 ч., после чего измельчали, количественно взвешивали и по полученным данным рассчитывали конверсию сырья в сахара.

Рис. 2. Твердый остаток после ферментативного гидролиза: 1) лузга подсолнечника, 2) свекловичный жом, 3) люпин белый сорта Дега, 4) пивная дробина

Fig. 2. Solid residue after enzymatic hydrolysis: 1) sunflower husk, 2) beet pulp, 3) white lupine of the Dega variety, 4) brewer's grains



Аэробное культивирование проводили на подготовленных ферментативных гидролизатах углеводной фракции пивной дробины и люпина. В исследовании использовали предварительно засеянные на агаризованной питательной среде (рис. 3.1) культуры одноклеточных дрожжей *Candida tropicalis* ВКПМ У-3 и *Saccharomyces cerevisiae* ВКПМ У-1136, пригодные для производства кормового белка. Оптимальная температура для роста составляет 28–35 °С, pH 4,8–5,0.

Гидролизаты разбавляли дистиллированной водой: гидролизат люпина в 2,5 раза, гидролизат пивной дробины в 4 раза. В стерилизованные качалочные колбы объемом 750 мл добавляли 150 мл разбавленного гидролизата, суспензию чистой культуры дрожжей, разбавленной в 30 мл стерильной воды, компоненты питательной среды ((NH₄)₂SO₄, MgSO₄·7H₂O, KH₂PO₄, K₂HPO₄, KCl, Ca(NO₃)₂, NaCl, дрожжевой автолизат). Колбы помещали в шейкер-инкубатор Kuhner ISF1-X (Швейцария) (рис. 3.2) и выдерживали при температуре 30 °С, pH 4,8–5,0 в течение 24 ч. при оборотах 100 мин⁻¹. Для поддержания pH на оптимальном уровне 4,8–5,0 ед. в процессе роста биомассы дрожжей каждую среду подкисляли соляной кислотой либо подщелачивали аммиачной водой.

Пробы отбирали через 0, 4, 6, 8, 10, 24 ч. культивирования. Одну часть центрифугировали, и определяли pH и концентрацию РВ. Вторую часть использовали для определения оптической плотности с помощью фотоэлектрокалориметра КФК-2 (Россия) при длине волны 590 нм (разведение водой в соотношении 1:9).

Оценку физиологического состояния дрожжевых клеток проводили методом микроскопии на оптическом микроскопе «Микмед-6» (Россия) при увеличении (×450).

По окончании процесса культивирования отработанные гидролизаты охлаждали и осаждали в них дрожжи (рис. 4.3).

Сушку дрожжей проводили в лабораторной распылительной сушилке (рис. 5.1–5.3).

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты ферментативного гидролиза (выход РВ в % от массы гидролизата) при расчетной ферментной композиции представлены на рисунке 5.

Ферментативный гидролиз проводили для углеводной фракции сырья, не затрагивая гидролиз белков (протеолитические ферменты в исследовании не применяли), с получением РВ как питательной среды для дальнейшего культивирования

Рис. 3. Культивирование дрожжей: 1) подготовка культуры к засеиванию, 2) культивирование в шейкере-инкубаторе, 3) осаждение дрожжей

Fig. 3. Cultivation of yeast: 1) preparation of the culture for inoculation, 2) cultivation in a shaker-incubator, 3) sedimentation of yeast



Рис. 4. Сушка дрожжей: 1) лабораторная распылительная сушилка, 2) циклон для сбора сухой биомассы дрожжей, 3) образцы выращенных дрожжей

Fig. 4. Drying of yeast: 1) laboratory spray dryer, 2) cyclone for collecting dry yeast biomass, 3) samples of grown yeast

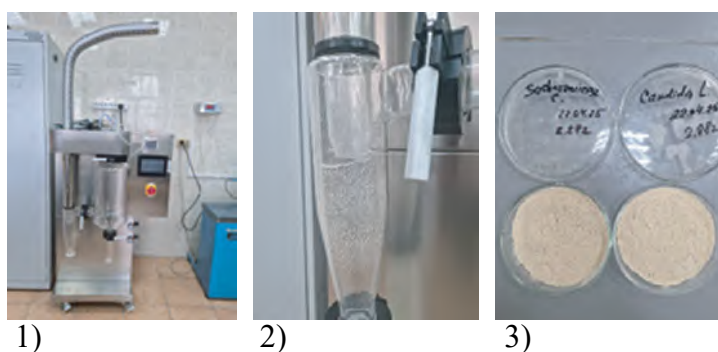
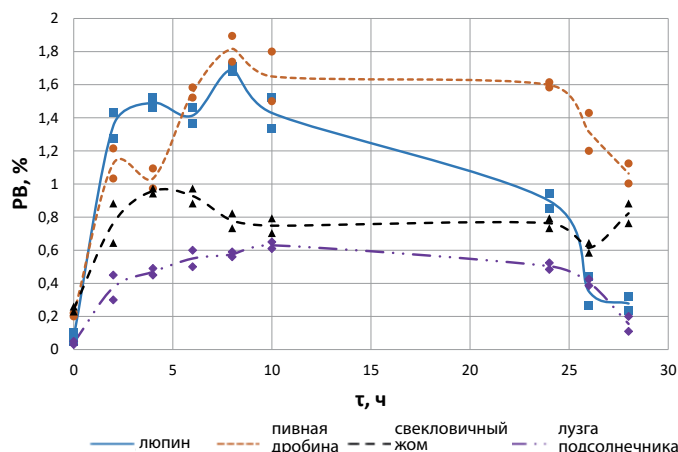


Рис. 5. Выход редуцирующих веществ в гидролизатах

Fig. 5. Yield of reducing substances in hydrolysates



биомассы дрожжей. Наибольший выход РВ (около 1,8%) в пересчете на глюкозу РВ наблюдали при ферментативном гидролизе пивной дробины. Немного меньшие показатели у люпина. Высокие содержания легкогидролизуемых полисахаридов в этих видах сырья, переходящих в гидролизат, очевидно, объясняют такой результат. При этом наблюдали два подъема выхода РВ — в период 2–4 ч. и 7–9 ч.

Вероятно, в первый период подъема происходили интенсивный гидролиз легкогидролизуемых полисахаридов, освобождение стенок растительных тканей, после чего наблюдали гидролиз

целлюлозы (преимущественно ее аморфной фракции). Далее наблюдали снижение выхода РВ, возможно, связанное с образованием сложных нерастворимых комплексов при взаимодействии продуктов гидролиза. Свекловичный жом гидролизуются при расчетной ферментной композиции несколько иначе (с явным наблюдением максимума выхода РВ (0,95%) в период 4–5 ч.) и почти в 2 раза меньше высвобождает сахаров по сравнению с пивной дробинкой и люпином. При этом большая часть выходящих РВ, очевидно, обусловливается присутствием в жоме растворимых сахаров и легкогидролизуемых полисахаридов.

Значительное содержание трудногидролизуемой клетчатки, так же как и у лузги подсолнечника, требует более длительного воздействия целлюлаз и, скорее всего, требует ступенчатого воздействия ферментами: сначала обработка ксиланазой, маннаназой, затем целлюлазным комплексом.

Взаимодействие ферментов друг с другом и их влияние на образующиеся продукты в условиях гидролиза мало изучены, но во многих работах такие сообщения имеются [25]. Так, в зависимости от субстратов целлюлазы могут ингибироваться присутствием липаз, ксиланаз. К тому же само действие ферментов может подавляться образующимися продуктами во время гидролиза: лигнинными комплексами, экстрактивными веществами и другими [26].

По результатам проведенного ферментативного гидролиза сделано предположение, что из рассматриваемого сельскохозяйственного сырья наиболее интересны с точки зрения дальнейшего культивирования на гидролизатах пивная дробина и люпин. Для эффективного ферментативного гидролиза лузги подсолнечника и свекловичного жома, богатых клетчаткой, необходима предварительная обработка (например, кислотным предгидролизом или паровым автогидролизом), что существенно интенсифицирует процесс [27, 28].

Интенсивность культивирования дрожжей на гидролизатах после ферментативного гидролиза позволяет судить о приемлемости и доброкачественности полученных гидролизатов, наличии в них субстратов (простых сахаров) для питания одноклеточных. Результаты сравнения двух углеводных гидролизатов (пивной дробины и люпина), как источников питательных сред, представлены на рисунках 6, 7.

Для всех случаев при росте дрожжей наблюдается лаг-фаза в течение 4 ч., когда клетки привыкают к среде. Далее (начиная с 5 ч.) происходит их активный рост.

Углеводные гидролизаты люпина, как показано на рисунке 6, менее эффективны для роста дрожжей по сравнению с гидролизатом пивной дробины, причем дрожжи *S. cerevisiae* хуже всего растут на обоих гидролизатах. Среда содержит меньшее количество питательных веществ, возможно, недостаточное количество кислорода при

Рис. 6. Изменение оптической плотности гидролизатов по мере накопления биомассы дрожжей

Fig. 6. Change in optical density of hydrolysates as yeast biomass accumulates

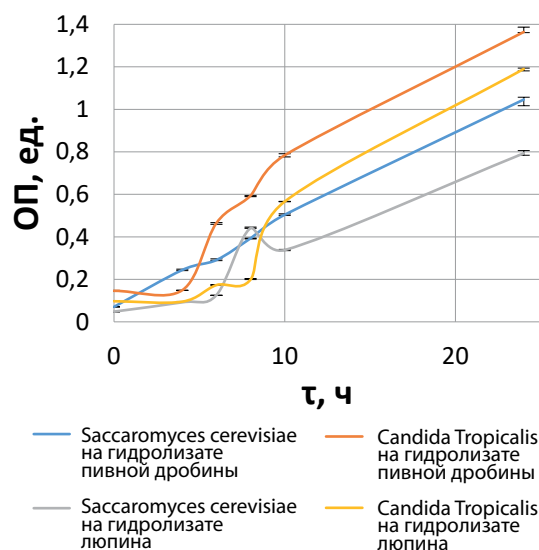
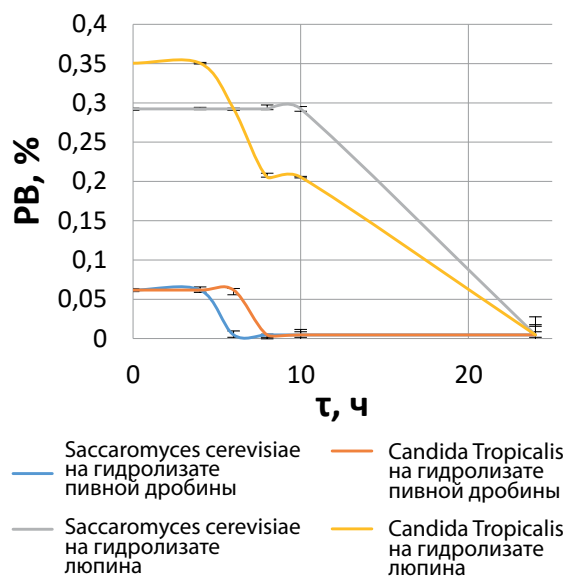


Рис. 7. Изменение содержания РВ в гидролизатах по мере накопления биомассы дрожжей

Fig. 7. Changes in the content of RS in hydrolysates as yeast biomass accumulates



культивировании в колбах ограничивает рост данной культуры.

При этом потребление сахаров (рис. 7) неоднозначно в случае с гидролизатами люпина и пивной дробины. В гидролизате люпина большее количество сахаров (даже с учетом разбавления), при этом их потребление начинается преимущественно с 10 ч. культивирования, хотя заметный рост оптической плотности наблюдается с 6 ч. По-видимому, рост обеспечивается не только лишь углеводами, но и белковыми компонентами, присутствующими в гидролизате, перешедшими при гидролизе в виде водорастворимых фракций протеина. Это явление было отмечено во многих работах [29, 30].

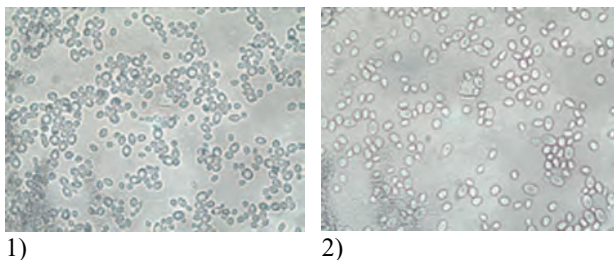
После 10 ч. рост *S. cerevisiae* на люпиновом гидролизате обеспечивается также сахарами. *C. tropicalis* на люпиновом гидролизате ведет себя похожим образом. Возможно, аминокислотный состав растворенных белков люпина играет первостепенную роль в росте микроорганизмов, при этом сахара, особенно для *S. cerevisiae*, важны для роста.

На гидролизатах пивной дробины обе изучаемые культуры растут лучше, причем при низком содержании сахаров. В этой ситуации рост обеспечивается сначала присутствием сахаров (полное потребление в период с 5 до 10 ч. культивирования), затем, по-видимому, растворенными аминокислотами. Учитывая, что исходное сырье пивной дробины содержит сравнительно высокую концентрацию сырого протеина, можно полагать, что часть протеина в виде альбуминов переходит в гидролизат и становится источником питательных веществ для одноклеточных. Причем для *C. tropicalis* это является, видимо, лимитирующим фактором. О похожих результатах сообщалось в [31].

Полученные дрожжи были высушены вместе с растворенными в гидролизате веществами после культивирования. Внешний вид продукта — сухой белый порошок с остаточной влажностью 6–7%, содержание сырого протеина в продукте с *S. cerevisiae* составило 68,18% а. с. в., с *C. tropicalis* — 72,63% а. с. в.

Рис. 8. Микрофотографии (x450) клеток: 1) — *S. cerevisiae*; 2) — *C. tropicalis*

Fig. 8. Micrographs (x450) of *S. cerevisiae* (1) and *C. tropicalis* (2) cells



Все авторы несут ответственность за работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в работу. Авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы объявили об отсутствии конфликта интересов.

Микроскопическое исследование (x450) дрожжей (рис. 8) показало, что клетки *S. cerevisiae* (рис. 8.1) круглые или яйцевидные, эллипсоидные, прорастающие почкованием, 5–10 мкм в диаметре. *C. tropicalis* — клетки с формой от круглой до овальной размером приблизительно от 2 до 10 мкм (рис. 8.2).

Выводы/Conclusions

Наибольший выход редуцирующих веществ (около 1,8%) наблюдали при ферментативном гидролизе пивной дробины, при гидролизе углеводной фракции люпина — 1,7%.

Оптимальная продолжительность ферментативного гидролиза при расчетных ферментных композициях 6–10 ч.

Для эффективного ферментативного гидролиза лузги подсолнечника и свекловичного жома, богатых клетчаткой, необходима предварительная обработка (например, кислотный предгидролиз или паровой автогидролиз), что существенно может интенсифицировать процесс.

Результаты культивирования *C. tropicalis* на гидролизатах люпина и пивной дробины показали наилучший результат. Так, *C. tropicalis* растет почти в 1,5 раза быстрее, чем *S. cerevisiae*. На гидролизатах пивной дробины рост *C. tropicalis* в 1,2 раза быстрее, чем на гидролизатах люпина.

Полученные дрожжи — сухой белый порошок с остаточной влажностью 6–7%, содержание сырого протеина в продукте с *S. cerevisiae* составило 68,18% а. с. в., с *C. tropicalis* — 72,63% а. с. в. Полученная биомасса дрожжей с высоким содержанием сырого протеина может быть рассмотрена в качестве возможного источника белкового питания в кормлении сельскохозяйственных животных и птицы.

Из всех исследуемых растительных сельскохозяйственных материалов наибольший потенциал биотрансформации в источник микробного протеина для кормления сельскохозяйственных животных имеет пивная дробина.

All authors bear responsibility for the work and presented data. All authors made an equal contribution to the work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет предоставленного в 2024 году Академией наук Республики Татарстан гранта на осуществление фундаментальных и прикладных научных работ в научных и образовательных организациях, предприятиях и организациях реального сектора экономики Республики Татарстан.

FUNDING

The research was carried out using a grant provided in 2024 by the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan for the implementation of fundamental and applied scientific work in scientific and educational organizations, enterprises and organizations of the real sector of the economy of the Republic of Tatarstan.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Plakantonaki S., Roussis I., Bilalis D., Priniotakis G. Dietary Fiber from Plant-Based Food Wastes: A Comprehensive Approach to Cereal, Fruit, and Vegetable Waste Valorization. *Processes*. 2023; 11(5): 1580. <https://doi.org/10.3390/pr11051580>
2. Afolalu S.A. et al. Bio-Agro Waste Valorization and its Sustainability in the Industry: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1107: 012140. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012140>

REFERENCES

1. Plakantonaki S., Roussis I., Bilalis D., Priniotakis G. Dietary Fiber from Plant-Based Food Wastes: A Comprehensive Approach to Cereal, Fruit, and Vegetable Waste Valorization. *Processes*. 2023; 11(5): 1580. <https://doi.org/10.3390/pr11051580>
2. Afolalu S.A. et al. Bio-Agro Waste Valorization and its Sustainability in the Industry: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1107: 012140. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012140>

3. Стаценко Е.С., Пензин А.А., Усанов В.С. Анализ использования соевого зерна при создании обогащающих добавок и продуктов пищевого и кормового назначения. *Вестник КрасГАУ*. 2024; (8): 203–218. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-8-203-218
4. Xiong Y. *et al.* Exploring the Effects of Different Bacteria Additives on Fermentation Quality, Microbial Community and In Vitro Gas Production of Forage Oat Silage. *Animals*. 2022; 12(9): 1122. <https://doi.org/10.3390/ani12091122>
5. Kamal M. *et al.* Enhancing the feed efficiency of crop residues in ruminants: a comprehensive review. *Annals of Animal Science*. 2025; 25(2): 529–545. <https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0081>
6. Пахомов В.И. и др. Состояние и перспективы использования растительного сырья в кормах для аквакультуры (обзор). *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2022; (3): 281–294. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294>
7. Cherdthong A. An overview of alternative protein sources for ruminants in the tropical area. *Annals of Animal Science*. 2025; 25(1): 103–118. <https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0049>
8. D'Almeida A.P., de Albuquerque T.L. Is it Possible to Produce Meat Without Animals? The Potential of Microorganisms as Protein Sources. *Fermentation*. 2025; 11(1): 24. <https://doi.org/10.3390/fermentation11010024>
9. Кожемякин Д.С., Каменская Е.П., Вистовская В.П. Оценка эффективности культивирования микроорганизмов — продуцентов белка на гидролизатах пивной дробины. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2025; (3): 1–6. <https://doi.org/10.21285/achb.983>
10. Vlaeminck E. *et al.* Single-Cell Protein Production from Industrial Off-Gas through Acetate: Techno-Economic Analysis for a Coupled Fermentation Approach. *Fermentation*. 2023; 9(8): 771. <https://doi.org/10.3390/fermentation9080771>
11. Фоменко И.А., Керимова Г.М. Биоконверсия растительных отходов в кормовые и пищевые дрожжевые препараты. Новые технологии. 2022; (1): 78–85. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-1-78-85>
12. Bajić B., Vučurović D., Vasić Đ., Jevtić-Mučibabić R., Dodić S. Biotechnological Production of Sustainable Microbial Proteins from Agro-Industrial Residues and By-Products. *Foods*. 2023; 12(1): 107. <https://doi.org/10.3390/foods12010107>
13. Неустроев А.П., Тихонов С.Л., Тихонова Н.В. Технология получения микробного белка из дрожжей. Дальневосточный аграрный вестник. 2023; (4): 209–217. <https://elibrary.ru/item.asp?id=59692783>
14. Куликова М.А., Окковитая К.О., Суржко О.А. Формирование агропромышленных кластеров с комплексной переработкой отходов. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021; (104): 159–165. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.030>
15. Šelo G., Planinić M., Tišma M., Tomas S., Koceva Komlenić D., Bucić-Kojić A. A Comprehensive Review on Valorization of Agro-Food Industrial Residues by Solid-State Fermentation. *Foods*. 2021; 10(5): 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>
16. Drzymała K., Mirończuk A.M., Pietrzak W., Dobrowolski A. Rye and Oat Agricultural Wastes as Substrate Candidates for Biomass Production of the Non-Conventional Yeast *Yarrowia lipolytica*. *Sustainability*. 2020; 12(18): 7704. <https://doi.org/10.3390/su12187704>
17. Patsios S.I., Dedousi A., Sossidou E.N., Zdragas A. Sustainable Animal Feed Protein through the Cultivation of *YARROWIA Lipolytica* on Agro-Industrial Wastes and by-Products. *Sustainability*. 2020; 12(4): 1398. <https://doi.org/10.3390/su12041398>
18. Singh A., Bishnoi N.R. Enzymatic hydrolysis optimization of microwave alkali pretreated wheat straw and ethanol production by yeast. *Bioresource Technology*. 2012; 108: 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.084>
19. Ajila C.M., Brar S.K., Verma M., Tyagi R.D., Godbout S., Valéro J.R. Bio-processing of agro-byproducts to animal feed. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2012; 32(4): 382–400. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.659172>
20. Patelski P. *et al.* Conversion of Potato Industry Waste into Fodder Yeast Biomass. *Processes*. 2020; 8(4): 453. <https://doi.org/10.3390/pr8040453>
21. Serafin Muñoz A.H., Molina Guerrero C.E., Gutierrez Ortega N.L., Leal Vaca J.C., Vargas A.A., Canchola C.C. Characterization and Integrated Process of Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Straw. *Waste and Biomass Valorization*. 2019; 10(7): 1857–1871. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0218-9>
3. Statsenko E.S., Penzin A.A., Usanov V.S. Analysis of the use of soybean grain in the creation of enriching additives and products for food and feed purposes. *Bulletin of KrasSAU*. 2024; (8): 203–218 (in Russian). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-8-203-218
4. Xiong Y. *et al.* Exploring the Effects of Different Bacteria Additives on Fermentation Quality, Microbial Community and In Vitro Gas Production of Forage Oat Silage. *Animals*. 2022; 12(9): 1122. <https://doi.org/10.3390/ani12091122>
5. Kamal M. *et al.* Enhancing the feed efficiency of crop residues in ruminants: a comprehensive review. *Annals of Animal Science*. 2025; 25(2): 529–545. <https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0081>
6. Pakhomov V.I. *et al.* Status and prospects of using plant raw materials in feeds for aquaculture (review). *Agrarian Science of Euro-North-East*. 2022; (3): 281–294 (in Russian). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2022.23.3.281-294>
7. Cherdthong A. An overview of alternative protein sources for ruminants in the tropical area. *Annals of Animal Science*. 2025; 25(1): 103–118. <https://doi.org/10.2478/aoas-2024-0049>
8. D'Almeida A.P., de Albuquerque T.L. Is it Possible to Produce Meat Without Animals? The Potential of Microorganisms as Protein Sources. *Fermentation*. 2025; 11(1): 24. <https://doi.org/10.3390/fermentation11010024>
9. Kozhemyakin D.S., Kamenskaya E.P., Vistovskaya V.P. Evaluation of the efficiency of culturing protein-producing microorganisms on brewer's grain hydrolysates. *News of universities. Applied chemistry and biotechnology*. 2025; (3): 1–6 (in Russian). <https://doi.org/10.21285/achb.983>
10. Vlaeminck E. *et al.* Single-Cell Protein Production from Industrial Off-Gas through Acetate: Techno-Economic Analysis for a Coupled Fermentation Approach. *Fermentation*. 2023; 9(8): 771. <https://doi.org/10.3390/fermentation9080771>
11. Fomenko I.A., Kerimova G.M. Bioconversion of plant waste into feed and food yeast preparations. *New technologies*. 2022; (1): 78–85 (in Russian). <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2022-18-1-78-85>
12. Bajić B., Vučurović D., Vasić Đ., Jevtić-Mučibabić R., Dodić S. Biotechnological Production of Sustainable Microbial Proteins from Agro-Industrial Residues and By-Products. *Foods*. 2023; 12(1): 107. <https://doi.org/10.3390/foods12010107>
13. Neustroev A.P., Tikhonov S.L., Tikhonova N.V. Technology for obtaining microbial protein from yeast. *Far Eastern Agrarian Bulletin*. 2023; (4): 209–217 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=59692783>
14. Kulikova M.A., Okovitya K.O., Surzhko O.A. Formation of agro-industrial clusters with complex waste processing. *International Research Journal*. 2021; (104): 159–165 (in Russian). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.2.030>
15. Šelo G., Planinić M., Tišma M., Tomas S., Koceva Komlenić D., Bucić-Kojić A. A Comprehensive Review on Valorization of Agro-Food Industrial Residues by Solid-State Fermentation. *Foods*. 2021; 10(5): 927. <https://doi.org/10.3390/foods10050927>
16. Drzymała K., Mirończuk A.M., Pietrzak W., Dobrowolski A. Rye and Oat Agricultural Wastes as Substrate Candidates for Biomass Production of the Non-Conventional Yeast *Yarrowia lipolytica*. *Sustainability*. 2020; 12(18): 7704. <https://doi.org/10.3390/su12187704>
17. Patsios S.I., Dedousi A., Sossidou E.N., Zdragas A. Sustainable Animal Feed Protein through the Cultivation of *YARROWIA Lipolytica* on Agro-Industrial Wastes and by-Products. *Sustainability*. 2020; 12(4): 1398. <https://doi.org/10.3390/su12041398>
18. Singh A., Bishnoi N.R. Enzymatic hydrolysis optimization of microwave alkali pretreated wheat straw and ethanol production by yeast. *Bioresource Technology*. 2012; 108: 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.084>
19. Ajila C.M., Brar S.K., Verma M., Tyagi R.D., Godbout S., Valéro J.R. Bio-processing of agro-byproducts to animal feed. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2012; 32(4): 382–400. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.659172>
20. Patelski P. *et al.* Conversion of Potato Industry Waste into Fodder Yeast Biomass. *Processes*. 2020; 8(4): 453. <https://doi.org/10.3390/pr8040453>
21. Serafin Muñoz A.H., Molina Guerrero C.E., Gutierrez Ortega N.L., Leal Vaca J.C., Vargas A.A., Canchola C.C. Characterization and Integrated Process of Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Corn Straw. *Waste and Biomass Valorization*. 2019; 10(7): 1857–1871. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0218-9>

22. Zhong P. *et al.* Characterization of cotton stalk as a lignocellulosic feedstock for single-cell protein production. *Bioresource Technology*. 2025; 417: 131797.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131797>
23. Wilkowska A. *et al.* Combined Yeast Cultivation and Pectin Hydrolysis as an Effective Method of Producing Prebiotic Animal Feed from Sugar Beet Pulp. *Biomolecules*. 2020; 10(5): 724.
<https://doi.org/10.3390/biom10050724>
24. Lapeña D. *et al.* Production and characterization of yeasts grown on media composed of spruce-derived sugars and protein hydrolysates from chicken by-products. *Microbial Cell Factories*. 2020; 19: 19.
<https://doi.org/10.1186/s12934-020-1287-6>
25. Aleixandre A., Gil J.V., Sineiro J., Rosell C.M. Understanding phenolic acids inhibition of α -amylase and α -glucosidase and influence of reaction conditions. *Food Chemistry*. 2022; 372: 131231.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131231>
26. Yuan Y. *et al.* Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*. 2021; 14: 205.
<https://doi.org/10.1186/s13068-021-02054-1>
27. Ruiz E., Cara C., Manzanares P., Ballesteros M., Castro E. Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks. *Enzyme and Microbial Technology*. 2008; 42(2): 160–166.
<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.09.002>
28. Zhang Q., Cheng L., Ma X., Zhou X., Xu Y. Revalorization of sunflower stalk pith as feedstock for the coproduction of pectin and glucose using a two-step dilute acid pretreatment process. *Biotechnology for Biofuels*. 2021; 14: 194.
<https://doi.org/10.1186/s13068-021-02045-2>
29. Chabanon G., Chevalot I., Framboisier X., Chenu S., Marc I. Hydrolysis of rapeseed protein isolates: Kinetics, characterization and functional properties of hydrolysates. *Process Biochemistry*. 2007; 42(10): 1419–1428.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.07.009>
30. Hou Y., Wu Z., Dai Z., Wang G., Wu G. Protein Hydrolysates in Animal Nutrition: Industrial Production, Bioactive Peptides, and Functional Significance. Nollet L.M.L., Ötles S. (eds.). *Bioactive Peptides from Food. Sources, Analysis, and Functions*. Boca Raton: CRC Press. 2022; 209–232.
<https://doi.org/10.1201/9781003106524-14>
31. Westendorf M.L., Wohlt J.E., Sniffen C.J., Ward R.T. Nutrient content of brewers grains produced at a commercial brewery: Variation in protein/nitrogen, fiber, carbohydrate, fat, and minerals. *The Professional Animal Scientist*. 2014; 30(4): 400–406.
<https://doi.org/10.15232/pas.2013-01272>

ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Богданович Просвирников

доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
prosvirnikov_dmi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6736-8788>

Денис Владимирович Тунцев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой, ведущий научный сотрудник
tuncev_d@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1842-5771>

Рауза Тимуровна Валеева

кандидат технических наук, доцент,
старший научный сотрудник
valeevaRT@corp.knrtu.ru

Лилия Масгутовна Исмагилова

кандидат технических наук, доцент,
научный сотрудник
ismagilovaLM@corp.knrtu.ru

Анна Владимировна Броднева

младший научный сотрудник
brodnevaAV@corp.knrtu.ru

Рахима Махмадкаримовна Одилова

лаборант
xkknitu@kstu.ru

Казанский национальный исследовательский
технологический университет,
ул. Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Россия

22. Zhong P. *et al.* Characterization of cotton stalk as a lignocellulosic feedstock for single-cell protein production. *Bioresource Technology*. 2025; 417: 131797.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131797>

23. Wilkowska A. *et al.* Combined Yeast Cultivation and Pectin Hydrolysis as an Effective Method of Producing Prebiotic Animal Feed from Sugar Beet Pulp. *Biomolecules*. 2020; 10(5): 724.
<https://doi.org/10.3390/biom10050724>

24. Lapeña D. *et al.* Production and characterization of yeasts grown on media composed of spruce-derived sugars and protein hydrolysates from chicken by-products. *Microbial Cell Factories*. 2020; 19: 19.
<https://doi.org/10.1186/s12934-020-1287-6>

25. Aleixandre A., Gil J.V., Sineiro J., Rosell C.M. Understanding phenolic acids inhibition of α -amylase and α -glucosidase and influence of reaction conditions. *Food Chemistry*. 2022; 372: 131231.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131231>

26. Yuan Y. *et al.* Recent advances in understanding the effects of lignin structural characteristics on enzymatic hydrolysis. *Biotechnology for Biofuels*. 2021; 14: 205.
<https://doi.org/10.1186/s13068-021-02054-1>

27. Ruiz E., Cara C., Manzanares P., Ballesteros M., Castro E. Evaluation of steam explosion pre-treatment for enzymatic hydrolysis of sunflower stalks. *Enzyme and Microbial Technology*. 2008; 42(2): 160–166.
<https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2007.09.002>

28. Zhang Q., Cheng L., Ma X., Zhou X., Xu Y. Revalorization of sunflower stalk pith as feedstock for the coproduction of pectin and glucose using a two-step dilute acid pretreatment process. *Biotechnology for Biofuels*. 2021; 14: 194.
<https://doi.org/10.1186/s13068-021-02045-2>

29. Chabanon G., Chevalot I., Framboisier X., Chenu S., Marc I. Hydrolysis of rapeseed protein isolates: Kinetics, characterization and functional properties of hydrolysates. *Process Biochemistry*. 2007; 42(10): 1419–1428.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2007.07.009>

30. Hou Y., Wu Z., Dai Z., Wang G., Wu G. Protein Hydrolysates in Animal Nutrition: Industrial Production, Bioactive Peptides, and Functional Significance. Nollet L.M.L., Ötles S. (eds.). *Bioactive Peptides from Food. Sources, Analysis, and Functions*. Boca Raton: CRC Press. 2022; 209–232.
<https://doi.org/10.1201/9781003106524-14>

31. Westendorf M.L., Wohlt J.E., Sniffen C.J., Ward R.T. Nutrient content of brewers grains produced at a commercial brewery: Variation in protein/nitrogen, fiber, carbohydrate, fat, and minerals. *The Professional Animal Scientist*. 2014; 30(4): 400–406.
<https://doi.org/10.15232/pas.2013-01272>

ABOUT THE AUTHORS

Dmitry Bogdanovich Prosvirnikov

Doctor of Technical Sciences,
Professor, Chief Researcher
prosvirnikov_dmi@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6736-8788>

Denis Vladimirovich Tuntsev

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Department, Leading Researcher
tuncev_d@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1842-5771>

Rauza Timurovna Valeeva

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Senior Researcher
valeevaRT@corp.knrtu.ru

Liliya Masgutovna Ismagilova

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Researcher
ismagilovaLM@corp.knrtu.ru

Anna Vladimirovna Brodneva

Junior Researcher
brodnevaAV@corp.knrtu.ru

Rakhima Makhmadkarimovna Odilova

Laboratory Assistant
xkknitu@kstu.ru

Kazan National Research Technological University,

68 Karl Marx Str., Kazan, 420015, Russia