КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 663.48:579.66-027.2236
EDN: MXBKIG
DOI: 10.21285/achb.983

Оценка эффективности культивирования микроорганизмов – продуцентов белка на гидролизатах пивной дробины

Д.С. Кожемякин✉, Е.П. Каменская, В.П. Вистовская

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Российская Федерация

Аннотация. *Целью настоящего исследования являлась оценка эффективности культивирования штаммов дрожжей и дрожжеподобных грибов на средах, полученных из отходов пивоваренного производства, таких как пивная дробина и ее ферментативный гидролизат. В работе использованы продуценты кормового белка: штаммы дрожжей Saccharomyces cerevisiae Y-365, Saccharomyces cerevisiae Y-722, Saccharomyces cerevisiae Y-1155 и штамм дрожжеподобных грибов Saccharomycopsis fibuligera Y-310 из Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов. Исследовано изменение численности данных микроорганизмов в процессе культивирования на пивной дробине без использования мультэнзимной композиции и на ее ферментативном гидролизате. Рассчитаны показатели эффективности биоконверсии редуцирующих сахаров и установлены изменения концентрации белка в процессе культивирования. Показано, что для повышения эффективности биоконверсии пивной дробины целесообразна предварительная обработка сырья с использованием комплекса ферментов целлюлолитического, гемицеллюлазного и протеолитического действия, при этом продуктами ферментолиза являются моно-, дисахариды, аминокислоты, являющиеся источниками энергии, углерода и азота, необходимые для дальнейшего продуцирования микробного белка. Экспериментально подтверждено, что максимальная эффективность биоконверсии редуцирующих сахаров 78,6%, а также прирост количества белка в 10,5 раза отмечаются при культивировании штамма Saccharomyces cerevisiae Y-365 на ферментолизате пивной дробины. Результаты исследования могут быть полезны при получении кормовых добавок на основе процесса биоферментации пивной дробины с использованием штамма Saccharomyces cerevisiae Y-365, позволят более качественно использовать пивную дробину, повысив ее питательную ценность и усвояемость.*

Ключевые слова: *белок, гидролизаты, дрожжи, пивная дробина, редуцирующие сахара, ферментные препараты*

Для цитирования: 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. Т. 15. N 3. DOI: 10.21285/achb.983. EDN: MXBKIG.

BRIEF COMMUNICATION

Efficiency of culturing protein-producing microorganisms In the hydrolysates of brewer's spent grain

Denis S. Kozhemyakin✉, Elena P. Kamenskaya, Viktoria P. Vistovskaya

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation

Abstract. *The present study aims to evaluate the efficiency of culturing yeast strains and yeast-like fungi in media derived from the byproducts of the brewing process, such as brewer's spent grain and its enzymatic hydrolysate. The study used the following feed protein producers: Saccharomyces cerevisiae strains (Y-365, Y-722, and Y-1155) and a strain of yeast-like fungi, Saccharomycopsis fibuligera strain Y-310, from the All-Russian Collection of Industrial Microorganisms. Changes in the number of these microorganisms were studied in the process of their culturing in*

© Кожемякин Д.С., Каменская Е.П., Вистовская В.П., 2025

brewer's spent grain without the use of a multienzyme composition and in its enzymatic hydrolysate. Bioconversion efficiency for reducing sugars and changes in protein concentration during culturing were determined. It was shown that in order to increase the efficiency of bioconversion of brewer's spent grain, a pre-treatment of raw materials using a complex of cellulolytic, hemicellulase, and proteolytic enzymes is recommended; the products of enzymolysis are monosaccharides, disaccharides, and amino acids, which are the sources of energy, carbon and nitrogen, necessary for further production of microbial protein. The bioconversion of reducing sugars was experimentally confirmed to have the maximum efficiency of 78.6%; also, a 10.5-fold increase in the amount of protein was observed when culturing Saccharomyces cerevisiae strain Y-365 in the enzyme lysate of brewer's spent grain. The study results can be used in obtaining feed additives through the biofermentation of brewer's spent grain with Saccharomyces cerevisiae strain Y-365 and will enable a better use of brewer's spent grain, increasing its nutritional value and digestibility.

Key words: *protein, hydrolysates, yeast, brewer's spent grain, reducing sugars, enzymatic preparations*

For citation: Kozhemyakin D.S., Kamenskaya E.P., Vitovskaya V.P. Efficiency of culturing protein-producing microorganisms In the hydrolysates of brewer's spent grain. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology.* 2025;15(3). (In Russian). DOI: 10.21285/achb.983. EDN: MXBKIG.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуальность вопроса переработки вторичных сырьевых ресурсов ни у кого не вызывает сомнений. Касается эта проблема и пивоваренных производств, где образуется значительное количество вторичных сырьевых ресурсов, основную долю из которых занимает пивная дробина. Химический состав дробины, в зависимости от ряда факторов, может значительно различаться, но в целом она характеризуется высоким уровнем протеинов и высокомолекулярных полисахаридов: целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы. Кроме того, дробина содержит в своем составе ряд аминокислот, витаминов, макро- и микроэлементов и т.д. [1–6]. В основном пивная дробина используется в кормовых целях, однако в последнее время актуальным является ее использование в качестве субстрата для культивирования различных групп микроорганизмов [7–13].

Для повышения эффективности биоконверсии пивной дробины целесообразна предварительная обработка сырья, в частности ферментолиз с использованием комплекса ферментов целлюлолитического, гемицеллюлазного и протеолитического действия, продуктами которого являются моно-, дисахариды, аминокислоты, являющиеся источниками энергии, углерода и азота, необходимые для дальнейшего продуцирования микробного белка [14–18].

В связи с вышесказанным цель проведенного исследования заключалась в осуществлении сравнительной оценки эффективности культивирования различных микроорганизмов – продуцентов белка на пивной дробине и на ее ферментолизате.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования использовались четыре продуцента кормового белка Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов: штаммы дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* Y-365, *Saccharomyces cerevisiae* Y-722, *Saccharomyces cerevisiae* Y-1155, а также штамм дрожжеподобных грибов *Saccharomycopsis fibuligera* Y-310. Выбранные продуценты способны ферментировать субстраты, содержащие в своем составе целлюлозу и гемицеллюлозы, при минимальном образовании побочных продуктов.

Активация штаммов осуществлялась в течение 24 ч на полной дрожжевой среде следующего состава, г/л: глюкоза – 20, пептон – 10, дрожжевой экстракт – 5.

Питательной средой для биосинтеза белка являлась пивная дробина, полученная при производстве светлого пива на АО «Форштадтская пивоварня» (г. Барнаул, Россия). В опытных питательных средах перед культивированием в течение 6 ч при температуре 50±1 °С проводился ферментолиз с использованием мультиэнзимной композиции, разработанной с применением методов математического моделирования [19, 20]. Контролем служили субстраты, состоящие из измельченной пивной дробины и воды в соотношении 1:5 без внесения мультиэнзимной композиции. Питательные среды стерилизовали при 121 °С в течение 30 мин до обработки ферментами.

Продуценты вносили в питательные среды в количестве 3% инокулята от объема питательной среды. Титр клеток в начале засева питательных сред составил 2×10^6 КОЕ/см^3.

Культивирование осуществляли в колбах Эрленмейера объемом 500 мл в режиме непрерывного перемешивания на шейкер-инкубаторе Ecotron в течение 3 сут. при температуре 28±1 °С и частоте встряхивания 110 об/мин. При снижении представленного оптимума частоты встряхивания отмечалось замедление процессов жизнедеятельности в клетках дрожжей и дрожжеподобных грибов, а при увеличении происходил синтез побочных продуктов, которые негативно влияли на белоксинтетическую активность микроорганизмов.

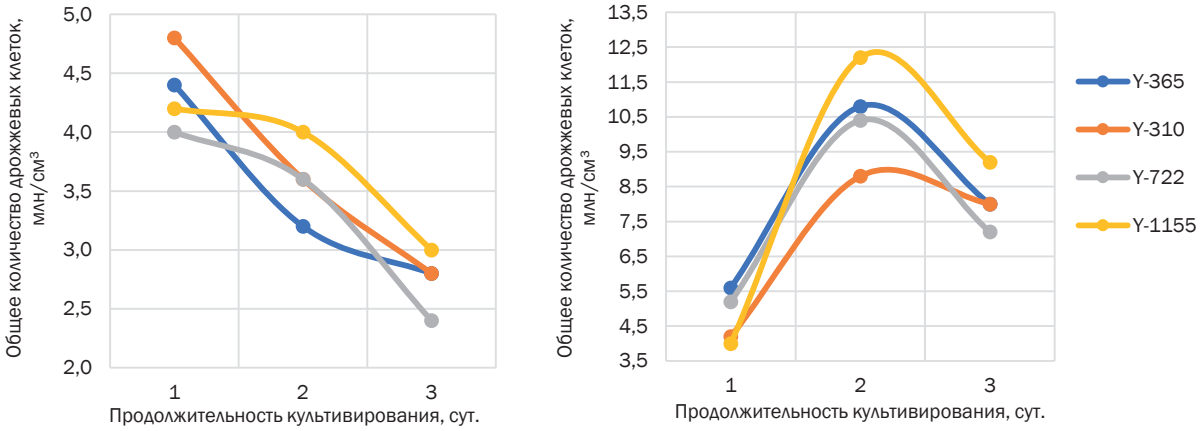
Концентрация редуцирующих сахаров определялась перманганатным методом Бертрана, общее содержание белка в средах – методом Лоури. Для определения общего количества дрожжевых клеток использовали метод прямого подсчета в камере Горяева.

Экспериментальные данные были получены в трехкратной повторности с расчетом среднего значения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке приведена динамика изменения численности клеток исследуемых штаммов дрожжей и дрожжеподобных грибов в процессе культивирования.

В ходе исследования было обнаружено, что при культивировании на контрольном субстрате максимальный прирост клеток достигается на первые сутки штаммом дрожжеподобных грибов *S. fibuligera* Y-310, он составляет 4,8 млн/см^3. Далее происходит постепенное снижение количества клеток у всех штаммов, что может быть связано с низким содержанием редуцирующих веществ



Прирост численности дрожжей в процессе культивирования на пивной дробине без использования мультиэнзимной композиции (a) и на ферментативном гидролизате (b)

Yeast population increase in brewer's spent grain culture without the use of a multienzyme composition (a) and on enzymatic hydrolysate (b)

на момент внесения инокулята (1,5 г/дм³) и отсутствием дополнительных биогенных элементов.

Во всех опытных образцах в первые сутки культивирования количество клеток практически не отличалось от контроля. Тем не менее на вторые сутки наблюдался прирост титра клеток в среднем в 2,5–3,0 раза, максимума в 12,2 млн/см³ он достиг у штамма *S. cerevisiae* Y-1155. Дальнейшее истощение питательной среды, накопление продуктов метаболизма и падение активности многих внутриклеточных ферментов на третьи сутки, вероятно, способствовало разобщению энергетического и конструктивного обмена веществ и обусловило стадию затухания роста дрожжевых клеток, а именно снижение их количества и предавтолиз. Кроме того, на процесс метаболизма дрожжей в данный период, видимо, оказала влияние реакция среды, а именно снижение pH субстрата с 5,5 до 4,0, что привело к ингибированию роста и размножения клеток ионами водорода.

В ходе эксперимента также анализировались показатели эффективности биоконверсии редуцирующих сахаров и накопление белка на вторые сутки культивирования на ферментолизате изучаемых продуцентов (таблица). Эффективность конверсии редуцирующих сахаров рассчитывалась как отношение утилизированных редуцирующих сахаров к их общему содержанию, выраженное в процентах.

Согласно данным, представленным в таблице, максимальная эффективность биоконверсии редуцирующих сахаров 78,6% отмечается при культивировании штамма *S. cerevisiae* Y-365 на ферментолизате пивной дробины, что на 18,6% превышает данный показатель при его культивировании на субстрате пивной дробины без использования мультиэнзимной композиции. Остальные штаммы микроорганизмов также продемонстрировали более высокую эффективность биоконверсии редуцирующих сахаров при выращивании на ферментативном гидролизате.

При культивировании изучаемых продуцентов на контрольном субстрате биосинтез белка либо полностью отсутствовал (*S. cerevisiae* Y-722, *S. fibuligera* Y-310), либо был незначительным – на 2 мг% выше начальной концентрации (*S. cerevisiae* Y-365, *S. cerevisiae* Y-722). В то же время при культивировании на ферментолизате пивной дробины во всех образцах конечная концентрация белка возрастала в среднем в 9,6–10,5 раза. При этом максимальный прирост белка в 10,5 раза отмечался при использовании штамма *S. cerevisiae* Y-365.

Показатели эффективности биоконверсии редуцирующих сахаров и биосинтез белка в процессе культивирования

Indicators of bioconversion of reducing sugars and protein biosynthesis in the culture process

Продуцент	Пивная дробина				Ферментативный гидролизат			
	Y-365	Y-310	Y-722	Y-1155	Y-365	Y-310	Y-722	Y-1155
Редуцирующие вещества								
Начальная концентрация, г/дм³	1,5				4,2			
Конечная концентрация, г/дм³	0,6	0,5	0,5	0,6	0,9	1,3	1,2	1,1
Эффективность биоконверсии, %	60,0	66,7	66,7	60,0	78,6	69,1	71,4	73,8
Белок								
Начальная концентрация, мг%	4,0				30,0			
Конечная концентрация, мг%	6,0	4,0	4,0	6,0	315,0	287,5	287,5	295,0

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что ферментативной гидролизат пивной дробины является более благоприятной средой для культивирования изучаемых штаммов дрожжей и дрожжеподобных грибов в отличие от ее аналога, не подвергнутого ферментативной обработке. Установлено, что наилучшие показатели эффективности биоконверсии редуцирующих сахаров (78,6%) и биосинтеза кормового белка обеспечивает штамм дрожжей *S. cerevisiae* Y-365, способствующий увеличению концентрации белка на вторые сутки до 315 мг%.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bonifácio-Lopes T., Vilas-Boas A., Machado M., Costa E.M., Silva S., Pereira R.N., et al. Exploring the bioactive potential of brewers spent grain ohmic extracts // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2022. Vol. 76. P. 102943. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102943.

2. Castro L.E.N., Colpini L.M.S. All-around characterization of brewers' spent grain // European Food Research and Technology. 2021. Vol. 247. P. 3013–3021. DOI: 10.1007/s00217-021-03860-5.

3. Данильченко А.С., Сиюхов Х.Р., Короткова Т.Г., Хачатуров В.Н. Физико-химические показатели сырой пивной дробины // Новые технологии. 2020. Т. 16. N 6. С. 28–36. DOI: 10.47370/2072-0920-2020-16-6-28-36. EDN: TZCSTQ.

4. Плиева З.А., Калабеков А.Л. Химический состав пивной дробины // Известия Горского государственного аграрного университета. 2011. Т. 48. N 2. С. 274–276. EDN: OPRSEB.

5. Плиева З.А., Цугкиев Б.Г. Химический состав пивной дробины // Известия Горского государственного аграрного университета. 2012. Т. 49. N 4. С. 376–379. EDN: PJWCOH.

6. Плиева З.А., Хозиев А.М. Минеральный состав пивной дробины // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51. N 3. С. 331–333. EDN: SNUMRT.

7. Akermann A., Weiermüller J., Chodorski N.J., Nestriepke M.J., Baclig M.T., Ulber R. Optimization of bioprocesses with Brewers' spent grain and *Cellulomonas uda* // Engineering in Life Sciences. 2022. Vol. 22, no. 3-4. P. 132–151. DOI: 10.1002/elsc.202100053.

8. Zeng J., Sheng F., Hu X., Huang Z., Tian X., Wu Z. Nutrition promotion of brewer's spent grain by symbiotic fermentation adding *Bacillus velezensis* and *Levilactobacillus brevis* // Food Bioscience. 2022. Vol. 49. P. 101941. DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101941.

9. Zeng J., Huang W., Tian X., Hu X., Wu Z. Brewer's spent grain fermentation improves its soluble sugar and protein as well as enzymatic activities using *Bacillus velezensis* // Process Biochemistry. 2021. Vol. 111. P. 12–20. DOI: 10.1016/j.procbio.2021.10.016.

10. Castilla-Archilla J., Thorn C.E., Pau S., Lens P.N.L. Screening for suitable mixed microbial consortia from anaerobic sludge and animal dungs for biodegradation of brewery spent grain // Biomass and Bioenergy. 2022. Vol. 159. P. 106396. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106396.

11. Плиева З.А., Цугкиев Б.Г., Хозиев А.М. Культивирование дрожжей на кислотном гидролизате пивной дробины // Известия Горского государственного аграрного университета. 2015. Т. 52. N 4. С. 411–416. EDN: UZBVWF.

12. Хозиев А.М., Плиева З.А. Размножение дрожжей на питательной среде, приготовленной на основе пивной дробины // Известия Горского государственного аграрного университета. 2014. Т. 51. N 3. С. 344–349. EDN: SNUMSX.

13. Bianco A., Budroni M., Zara S., Mannazzu I., Fancello F., Zara G. The role of microorganisms on biotransformation of brewers' spent grain // Applied Microbiology and Biotechnology. 2020. Vol. 104. P. 8661–8678. DOI: 10.1007/s00253-020-10843-1.

14. Фазлиев И.И., Минзанова С.Т., Ахмадуллина Ф.Ю., Миронова Л.Г. Ферментативный гидролиз пивной дробины // Экология и промышленность России. 2012. N 8. С. 20–22. EDN: PBQCOL.

15. Петухова Н.И., Щербакова Д.В., Шараева А.А., Зорин В.В. Синтез полиненасыщенных жирных кислот грибом *Mortierella alpina* гр-1 при культивировании на пивной дробине // Башкирский химический журнал. 2014. Т. 21. N 4. С. 90–96. EDN: TGDIZD.

16. Грибкова И.Н., Харламова Л.Н., Севостьянова В.М., Лазарева И.В., Захаров М.А., Борисенко О.А. Анализ возможностей извлечения органических соединений пивной дробины различными способами // Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. N 3. С. 469–489. DOI: 10.21603/2074-9414-2022-3-2383. EDN: VLWIRO.

17. Кожемякин Д.С., Каменская Е.П. Анализ способов гидролиза пивной дробины // Ползуновский альманах. 2023. N 2-2. С. 23–25. EDN: AXXUUG.

18. Кобелев К.В., Гернет М.В., Грибкова И.Н. Разработка инновационного способа получения биологически активных соединений пивной дробины // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. N 1. С. 113–124. DOI: 10.21603/2074-9414-2021-1-113-124. EDN: AXBBIN.

19. Вистовская В.П., Каменская Е.П., Кожемякин Д.С., Дикалова Е.С. Разработка мультиэнзимной композиции для гидролиза пивной дробины с применением методов математического моделирования // Ползуновский вестник. 2023. N 3. С. 134–141. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.018. EDN: KSGYGV.

20. Касаткина А.Н., Градова Н.Б., Удалова Э.В. Использование мультиэнзимных композиций для деструкции пивной дробины // Биотехнология. 2008. N 2. С. 59–64. EDN: JVVQCF.

REFERENCES

1. Bonifácio-Lopes T., Vilas-Boas A., Machado M., Costa E.M., Silva S., Pereira R.N., et al. Exploring the bioactive potential of brewers spent grain ohmic extracts. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2022;76:102943. DOI: 10.1016/j.ifset.2022.102943.

2. Castro L.E.N., Colpini L.M.S. All-around characterization of brewers' spent grain. *European Food Research and Technology*. 2021;247:3013-3021. DOI: 10.1007/s00217-021-03860-5.

3. Danilchenko A.S., Siyukhov Kh.R., Korotkova T.G., Khachaturov V.N. Physical and chemical indicators of raw

spent grain. *New technologies*. 2020;16(6):28-36. (In Russian). DOI: 10.47370/2072-0920-2020-16-6-28-36. EDN: TZCSTQ.

4. Plieva Z.A., Kalabekov A.L. Chemical composition of brewer's grain. *News of the Gorsky State Agrarian University*. 2011;48(2):274-276. (In Russian). EDN: OPRSEB.

5. Plieva Z.A., Tsugkiev B.G. Chemical composition of brewer's grain. *News of the Gorsky State Agrarian University*. 2012;49(4):376-379. (In Russian). EDN: PJWCOH.

6. Plieva Z.A., Khoziev A.M. Mineral composition of beer pellet. *News of the Gorsky State Agrarian University*. 2014;51(3):331-333. (In Russian). EDN: SNUMRT.

7. Akermann A., Weiermüller J., Chodorski N.J., Nestriepke M.J., Baclig M.T., Ulber R. Optimization of bioprocesses with Brewers' spent grain and *Cellulomonas uda*. *Engineering in Life Sciences*. 2022;22(3-4):132-151. DOI: 10.1002/elsc.202100053.

8. Zeng J., Sheng F., Hu X., Huang Z., Tian X., Wu Z. Nutrition promotion of brewer's spent grain by symbiotic fermentation adding *Bacillus velezensis* and *Levilactobacillus brevis*. *Food Bioscience*. 2022;49:101941. DOI: 10.1016/j.fbio.2022.101941.

9. Zeng J., Huang W., Tian X., Hu X., Wu Z. Brewer's spent grain fermentation improves its soluble sugar and protein as well as enzymatic activities using *Bacillus velezensis*. *Process Biochemistry*. 2021;111:12-20. DOI: 10.1016/j.procbio.2021.10.016.

10. Castilla-Archilla J., Thorn C.E., Pau S., Lens P.N.L. Screening for suitable mixed microbial consortia from anaerobic sludge and animal dungs for biodegradation of brewery spent grain. *Biomass and Bioenergy*. 2022;159:106396. DOI: 10.1016/j.biombioe.2022.106396.

11. Plieva Z.A., Tsugkiev B.G., Khoziev A.M. Cultivation of yeast on acid hydrolysate of brewer's grains. *News of the Gorsky State Agrarian University*. 2015;52(4):411-416. (In Russian). EDN: UZBVWF.

12. Khoziev A.M., Plieva Z.A. Reproduction of yeasts on nutrient medium prepared on the basis of beer pellet. *News of the Gorsky State Agrarian University*. 2014;51(3):344-349. (In Russian). EDN: SNUMSX.

13. Bianco A., Budroni M., Zara S., Mannazzu I., Fancello F., Zara G. The role of microorganisms on biotransformation of brewers' spent grain. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020;104:8661-8678. DOI: 10.1007/s00253-020-10843-1.

14. Fazliyev I.I., Minzanova S.T., Akhmadullina F.Yu., Mironova L.G. Enzymatic hydrolysis of spent grains. *Ecology and Industry of Russia*. 2012;8:20-22. (In Russian). EDN: PBQCOL.

15. Petukhova N.I., Shcherbakova D.V., Sharaeva A.A., Zorin V.V. Synthesis of polyunsaturated fatty acids by fungus *Mortierella alpina* gr-1 while culturing on brewer's spent grain. *Bashkir Chemical Journal*. 2014;21(4):90-96. (In Russian). EDN: TGDIZD.

16. Gribkova I.N., Kharlamova L.N., Sevostianova E.M., Lazareva I.V., Zakharov M.A., Borisenko O.A. Extracting organic compounds from brewer's spent grain by various methods. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2022;52(3):469-489. (In Russian). DOI: 10.21603/2074-9414-2022-3-2383. EDN: VLWIRO.

17. Kozhemyakin D.S., Kamenskaya E.P. Analysis of methods of brewer's spent grain hydrolysis. *Polzunovskii al'manakh*. 2023;2-2:23-25. (In Russian). EDN: AXXUUG.

18. Kobelev K.V., Gernet M.V., Gribkova I.N. Innovative method for obtaining biologically active compounds from brewery mash. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(1):113-124. (In Russian). DOI: 10.21603/2074-9414-2021-1-113-124. EDN: AXBBIN.

19. Vistovskaya V.P., Kamenskaya E.P., Kozhemyakin D.S., Dikalova E.S. Development of a multienzymatic composition for brewer's spent grain hydrolysis through use of mathematical modeling methods. *Polzunovskiy vestnik*. 2023;3:134-141. (In Russian). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.018. EDN: KSGYGV.

20. Kasatkina A.N., Gradova N.B., Udalova E.V. The use of multienzyme composition for destruction of brewer's grains. *Biotekhnologiya*. 2008;2:59-65. (In Russian). EDN: JVVQCF.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кожемякин Денис Сергеевич,
магистрант,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Российская Федерация,
✉ denkzm1998@mail.ru
https://orcid.org/0009-0007-4051-569X

Каменская Елена Петровна,
к.б.н., доцент,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Российская Федерация,
ekam2007@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-3760-6914

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis S. Kozhemyakin,
Master's Student,
Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation,
✉ denkzm1998@mail.ru
https://orcid.org/0009-0007-4051-569X

Elena P. Kamenskaya,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor,
Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation,
ekam2007@yandex.ru
https://orcid.org/0000-0003-3760-6914

Вистовская Виктория Петровна,
к.т.н., доцент,
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46,
Российская Федерация,
vpvist@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0000-0606-4599

Viktoria P. Vistovskaya,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Polzunov Altai State Technical University,
46, Lenin Ave., Barnaul, 656038,
Russian Federation,
vpvist@yandex.ru
https://orcid.org/0009-0000-0606-4599

Вклад авторов

Д.С. Кожемякин – проведение исследования, курирование данных, формальный анализ, валидация результатов, написание черновика рукописи.
Е.П. Каменская – разработка концепции, валидация результатов, редактирование рукописи.
В.П. Вистовская – разработка методологии, валидация результатов.

Contribution of the authors

Denis S. Kozhemyakin – investigation, data curation, formal analysis, validation, writing – original draft.
Elena P. Kamenskaya – conceptualization, validation, editing.
Viktoria P. Vistovskaya – methodology, validation.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interest

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

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.07.2024.
Одобрена после рецензирования 06.10.2024.
Принята к публикации 31.05.2025.

Information about the article

The article was submitted 18.07.2024.
Approved after reviewing 06.10.2024.
Accepted for publication 31.05.2025.