

DOI 10.17516/1997-1389-0392

EDN: NXFKUH

УДК 577.151:636.087: 663.18

The Influence of the Sorghum Grain Composition on the Efficiency of its Microbial Conversion to Ethanol and Lysine

Elena M. Serba^{*a},

Lyubov V. Rimareva^a, Van Chi Tran^b,

Marina B. Overchenko^a, Nadezhda I. Ignatova^a,

Anzhelika A. Pavlova^a and Irina M. Abramova^a

*^aRussian Research Institute of Food Biotechnology-
Branch of the Federal Research Center for Nutrition,
Biotechnology and Food Safety
Moscow, Russian Federation*

*^bThai Nguyen University of Agriculture and Forestry
Thai Nguyen, Vietnam*

Received 26.03.2021, received in revised form 16.07.2021, accepted 21.10.2021

Abstract. Sugar sorghum has been extensively studied as a promising crop for the production of alcohol instead of traditionally used food crops. However, the issues of combined biotechnological processing of grain sorghum into ethanol and protein-amino acid feed supplements have hardly been investigated. The aim of the present work was to study the effect of the polymer composition of sorghum grain on the quality of wort, the efficiency of its fermentation, the yield of alcohol, and the synthesis of lysine. Different varieties of grain sorghum, alcohol yeast *Saccharomyces cerevisiae* 985-T, and lysine producer *Brevibacterium* RCAM 01129 were used in this study. The wort prepared from sorghum grain with higher starchiness had adequate extract content and contained the maximum amount of soluble dry and reducing carbohydrates. However, the high content of non-starch polysaccharides and proteins negatively affected the rheological properties of the wort, the viscosity of which increased by 20–30 %. The level of ethanol synthesis was essentially determined by the quality parameters of the wort and the content of the main polymers in the grain. Thus, the results of fermentation of wort prepared from sorghum grain with starch content of about 72 % but differing in the content of other polymers showed that the

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: serbae@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1660-2634 (Serba E.); 0000-0003-3097-0836 (Rimareva L.); 0000-0001-5067-6189 (Tran V.C.); 0000-0001-9297-0554 (Abramova I.)

level of alcohol formation was higher in the brews of varieties with reduced hemicellulose content. The lowest degree of conversion of carbohydrates to ethanol was observed in the fermentation of wort prepared from sorghum with hemicellulose content of 8.3 %, despite its highest starchiness (75.6 %). At the same time, the yield of alcohol from 100 g of starch was 64.3 cm³, which was 3.3–3.6 % lower than where varieties with lower content of non-starch polysaccharides were used. The level of synthesis of lysine, as well as ethanol, was influenced by the content of carbohydrate and protein polymers in the sorghum varieties studied in this work. The highest lysine yield (28.7 %) was achieved on nutrient media prepared from sorghum varieties high in starch (74.1 %) and protein (12.0 %) but low in hemicellulose (6.1 %). A scheme of combined production of alcohol and lysine-protein feed supplements has been developed, in which the protein and lysine contents are higher by a factor of 1.8 and 36.5, respectively, compared to grain vinasse.

Keywords: grain sorghum, wort, microbial conversion, ethanol, lysine.

Acknowledgements. The research was supported by the subsidy for the fulfillment of the state task within the framework of the Program of Fundamental Scientific Research.

Citation: Serba E. M., Rimareva L. V., Tran V. C., Overchenko M. B., Ignatova N. I., Pavlova A. A., Abramova I. M. The influence of the sorghum grain composition on the efficiency of its microbial conversion to ethanol and lysine. Sib. Fed. Univ. Biol., 2022, 15(3), 347–362. DOI: 10.17516/1997-1389-0392



Влияние особенностей состава зерна сорго на эффективность его микробной конверсии в этанол и лизин

**Е. М. Серб^а, Л. В. Римарева^а,
В. Т. Чан^б, М. Б. Оверченко^а,**

Н. И. Игнатова^а, А. А. Павлова^а, И. М. Абрамова^а

^аВсероссийский научно-исследовательский институт

пищевой биотехнологии –

филиал Федерального исследовательского центра питания,

биотехнологии и безопасности пищи

Российская Федерация, Москва

^бТхайнгуенский университет сельского и лесного хозяйства

Вьетнам, Тхайнгуен

Аннотация. Показана перспективность использования сахарного сорго в производстве спирта взамен традиционно применяемых зерновых культур пищевого назначения. Однако практически не исследованы вопросы комплексной биотехнологической переработки зернового сорго в этанол и кормовые белково-аминокислотные добавки. Цель работы состояла в изучении влияния

особенностей состава полимеров зерна сорго на качество суслу, эффективность его сбраживания, выход спирта и синтез лизина. Объектами исследований являлись различные сорта зернового сорго, спиртовые дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* 985-T и продуцент лизина *Brevibacterium* RCAM 01129. Сусло, приготовленное из зерна сорго с более высокой крахмалистостью, обладало хорошей экстрактивностью и содержало максимальное количество растворимых сухих и редуцирующих углеводов. Однако высокое содержание некрахмальных полисахаридов и белков отрицательно сказывалось на реологических свойствах суслу, вязкость которого повышалась на 20–30 %. Уровень синтеза этанола существенно зависел от качественных показателей суслу и от содержания в зерне основных полимеров. Так, результаты сбраживания суслу, приготовленного из зерна сорго с крахмалистостью порядка 72 %, но различающегося по содержанию других полимеров, показали, что более высокий уровень образования спирта отмечен в бражке из сортов с пониженным содержанием гемицеллюлозы. Наиболее низкая степень конверсии углеводов в этанол отмечена при сбраживании суслу, приготовленного из сорта сорго с содержанием гемицеллюлозы 8,3 %, несмотря на самую высокую его крахмалистость (75,6 %). При этом выход спирта со 100 г крахмала составил 64,3 см³, что на 3,3–3,6 % ниже аналогичных показателей в вариантах, где использовались сорта с более низким содержанием некрахмальных полисахаридов. На уровень синтеза лизина, так же как этанола, оказывало влияние содержание углеводных и белковых полимеров в исследуемых сортах сорго. Наибольший выход лизина (28,7 %) достигнут на питательных средах, приготовленных из сортов сорго с высоким содержанием крахмала (74,1 %) и белка (12,0 %), но пониженным – гемицеллюлоз (6,1 %). Представлена схема комплексного производства спирта и кормовой лизино-белковой добавки, в которой содержание белка в 1,8 раза, а лизина – в 36,5 раза выше, чем в зерновой барде.

Ключевые слова: зерновое сорго, сусло, микробная конверсия, этанол, лизин

Благодарности. Исследования проведены за счет средств субсидии на выполнение государственного задания в рамках Программы фундаментальных научных исследований.

Цитирование: Серба, Е. М. Влияние особенностей состава зерна сорго на эффективность его микробной конверсии в этанол и лизин / Е. М. Серба, Л. В. Римарева, В. Т. Чан, М. Б. Оверченко, Н. И. Игнатова, А. А. Павлова, И. М. Абрамова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Биология, 2022. 15(3). С. 347–362. DOI: 10.17516/1997-1389-0392

Введение

Проблема рационального использования сырьевых ресурсов в перерабатывающих отраслях агропромышленного комплекса является весьма актуальной. Особенно это относится к спиртовому производству, которое в настоящее время методами биотехнологии ежегодно перерабатывает порядка 2 млн т зерна пшеницы, кукурузы и ржи, имеющих широкую востребованность в пищевой промышленности

(Серба, Поляков, 2015). При условии реализации в России промышленной технологии топливного биоэтанола потребность в зерновом сырье резко возрастет. Поэтому исследования, направленные на подбор нетрадиционных видов растительного сырья и разработку эффективных методов их переработки на спирт, становятся сегодня наиболее перспективными.

В последнее время внимание исследователей привлекает зерновая культура сахарного

сорго – *Sorghum bicolor* (L.) Moench, которая отличается хорошей устойчивостью к условиям выращивания и обладает достаточно высокой продуктивностью, а по содержанию крахмала конкурирует с зерновыми культурами (Володько и др., 2012; Гаршин и др., 2014; Григоренко, 2016; Алабушев и др., 2016а; Ковтунова и др., 2017). Зерно сахарного сорго является не только источником углеводов, но и содержит белок, витамины и минеральные вещества. По содержанию ряда витаминов (В₃, В₄, В₅), макро- (Ca, P, Mg, Se) и микроэлементов (Fe, Zn, Cu, Mn) превосходит зерно кукурузы (Николаев и др., 2018).

Результаты сравнительных исследований биохимического состава наиболее продуктивных по крахмалу зерновых культур по усредненным данным ряда авторов приведены в табл. 1 (Алабушев и др., 2016а; 2016b; Ковтунова и др., 2017; Николаев и др., 2018; Карл Хосни, 2006; Зверев, Зверева, 2007; Новикова и др., 2007; Sanjana Reddy et al., 2011; Абрамова и др., 2019; Ковтунова, Ковтунов, 2019). Как видно из представленных данных, состав основных компонентов зерна сорго сравним с зерном кукурузы и риса; при этом по содержанию белка и крахмала – даже несколько превосходит. В состав зерна сорго входят также некрахмальные полисахариды, при этом отмечено достаточно высокое содержание арабиноксиланов (пентозанов).

Крахмал сорго, как и у других зерновых культур, состоит из амилозы и амилопектина и хорошо подвергается биокаталитической декстринизации и осахариванию. Соотношение амилозы и амилопектина в крахмале сорго, по данным исследователей, составляет порядка 25–30 % против 70–75 % соответственно и зависит от сорта сорго и условий произрастания культуры (Гаршин и др., 2014; Николаев и др., 2018; Алабушев и др., 2013). В настоящее время существует довольно большое количество сортов и гибридов зернового сорго, различающихся по уровню содержания основных углеводных и белковых компонентов (Алабушев и др., 2013; 2016b; Bahadure et al., 2014).

Результаты последних исследований подтвердили перспективность использования сорго зернового в качестве полноценного сырья для производства спирта, пива, крахмала и кормов (Nahar, 2011; Alhajturki et al., 2012; Kruger et al., 2012; Oyier et al., 2017). В то же время мало изучена взаимосвязь состава основных полимеров зерна с выходом и качеством целевых продуктов.

Известно, что определяющее значение для организации производства кормов, обогащенных незаменимыми аминокислотами, имеют вопросы рационального использования сырья и вторичных ресурсов агропромышленного комплекса. Особенно необходимы ресурсосбе-

Таблица 1. Сравнительный биохимический состав зерна кукурузы, риса, сорго

Table 1. Comparative biochemical composition of corn, rice, and sorghum grains

Показатель	Концентрация, % сух. веса		
	Кукуруза	Рис	Сорго
Крахмал	61,0 -71,0	62,0-72,0	61,0-76,0
Белок	9,0-10,5	7,5-9,0	10,2-14,0
Клетчатка	3,2 – 4,0	2,9 - 6,7	2,2- 3,8
Гемицеллюлоза	2,4 -3,2	2,0-4,5	4,0-9,5
Арабиноксиланы	5,9 – 6,2	1,8 – 2,2	3,8 – 8,5
Липиды	4,1 - 5,2	3,1	2,1-4,3
Зольность	1,3 -2,1	2,3	1,6 -2,6

регающие технологии для производства спирта, в котором наряду с основным продуктом образуется существенный объем отходов в виде послеспиртовой барды (Серба, Поляков, 2015; Иванов и др., 2015; Зуева и др., 2019; Кривченко и др., 2019). В последнее время твердую фазу барды после разделения сушат и используют для кормления сельскохозяйственных животных. Однако остается проблема реализации большого объема жидкой фазы (Амелякина и др., 2012). Для повышения биологической ценности барду можно обогатить лизином, используя ее в качестве субстрата в составе питательной среды для лизинпродуцирующих бактерий. Проведенные ранее исследования показали принципиальную возможность получения кормового лизина при культивировании *Brevibacterium* sp. на питательных средах, содержащих крахмалсодержащее сырье, полупродукты и отходы броидильных производств (Серба, Поляков, 2015; Римарева и др., 2008; Римарева, Григорьев, 2009). Однако исследований по влиянию состава полимеров, содержащихся в зерне различных сортов зерновых культур, в том числе и сорго, используемых для приготовления суслу, на выход спирта и уровень синтеза лизина практически не проводилось.

Цель данных исследований состояла в изучении влияния особенностей состава полимеров в зерне различных сортов сорго на качество суслу, эффективность его сбраживания, выход спирта и синтез лизина.

Материалы и методы

Объектами исследований являлись различные сорта зернового сорго, предоставленные ВНИИ сорго и других зерновых культур (г. Зерноград), различающиеся по содержанию белковых и углеводных полимеров; спиртовые дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* расы 985-Т (Серба и др., 2019) и продуцент лизина *Brevibacterium* RCAM 01129, селекциониро-

ванные во ВНИИ пищевой биотехнологии (Римарева и др., 2008).

Зерно сорго измельчали до размера частиц 40–120 мкм при помощи мультифункциональной дробилки Вилитек VLM-6, Россия. Приготовление зернового суслу проводили по схеме ферментативно-гидролитической обработки зерна в колбах Эрленмейера объемом 750 см³, содержащих 50 г измельченного зерна и 150 см³ воды (гидромодуль 1:3), помещенных в водяную баню ПЭ-4300 («Экрос», Россия). В водно-зерновую суспензию добавляли термостабильную α -амилазу, катализирующую разжижение и декстринизацию крахмала, в дозировке 0,5 ед. АС/г крахмала и выдерживали при температуре 40–60 °С в течение 30 мин. Поскольку температура клейстеризации крахмала сорго составляет 70–80 °С, дальнейшее приготовление замеса осуществляли при температуре 85–90 °С в течение 120 мин, периодически перемешивая. Далее содержимое колб охлаждали до 60 °С и инкубировали в присутствии ферментов в течение 60 мин (Иванов и др., 2015; Зуева и др., 2019; Кривченко и др., 2019). Для получения зернового суслу осахаривание крахмала и гидролиз некрахмальных полисахаридов, в том числе арабиноксиланов, осуществляли ферментными препаратами (ФП) – источниками глюкоамилазы (9,0 ед. ГлС/г крахмала) и ксиланазы (0,15 ед. КС/г сырья), для гидролиза белковых веществ использовали ФП, содержащий комплекс грибных протеаз (0,1 ед. ПС/г сырья).

В работе использовали традиционные для спиртового производства ферментные препараты с различной субстратной специфичностью: Amylex 5T («Genencor», США) – источник термостабильной α -амилазы (2000 ед. АС/см³), Diazyme X5 («Genencor», США) – глюкоамилазы (8000 ед. ГлС/см³), Tegazyme RT 75L («Lyven SA», Франция) – ксиланазы (3600 ед. КС/см³), Протооризин («ВНИИПБТ», Россия) – протеазы (600 ед. ПС/см³).

Массовую долю растворимых сухих веществ определяли на рефрактометре УРЛ модель-1. Содержание в сухом веществе крахмала анализировали по методу Эверса, белка (сырого протеина) – по методу Кьельдаля на автоматической установке определения азота Vadopest 10 (Gerhardt, Германия) с использованием автоматического титратора DL 15 (Mettler Toledo, Швейцария); содержание аминокислот – на хроматографе KNAUER EUROCHROM 2000 с последующим детектированием компонентов спектрофотометрическим детектором Smartline UV Detector 2500 (Германия) при $\lambda=570$ нм; концентрацию редуцирующих веществ (РВ) тестировали методом Антрона; концентрацию аминного азота (NH_2^+) – медным способом (ОФС.1.2.3.0022.15; Поляков и др., 2007). Динамическую вязкость зернового суслу оценивали методом вибрационной вискозиметрии с использованием синусоидального вибрационного вискозиметра SV-10 (A&D, Япония) с программным обеспечением Win-CT Viscosity.

Процесс сбраживания суслу, приготовленного из зерна сорго, осуществляли с использованием селекционированной расы дрожжей *S. cerevisiae* 985-Т, обладающей термотолерантными и осмофильными свойствами, при температуре 34–35 °С в течение 68 часов (Серба и др., 2019). Концентрацию суслу, дрожжей, остаточных углеводов, спирта и его выход контролировали согласно инструкции теххимического контроля спиртового производства (Поляков и др., 2007).

Культивирование *Brevibacterium* RCAM 01129 осуществляли на питательных средах, приготовленных на отъеме суслу из различных сортов сорго и послеспиртовой барды в соотношении 1:1. Стерилизацию питательной среды проводили в автоклаве при 0,8 атм (0,081 МПа) в течение 40 мин. Засев стерильной среды осуществляли посевным материа-

лом в виде суспензии бактерий в количестве 4 % (об./об.). Культивирование *Brevibacterium* проводили в колбах Эрленмейера объемом 750 см³, содержащих 25 см³ питательной среды, на круговой качалке (скорость вращения 220–240 об/мин) в течение 48 часов при температуре 30 °С. Содержание лизина определяли методом тонкослойной хроматографии на пластинках Silufol UV 254 высотой 15 см (Римарева и др., 2010).

Статистическую обработку данных, полученных не менее чем в 3 повторностях, осуществляли с помощью программы Microsoft Excel с использованием коэффициента Стьюдента (доверительный интервал – 0,95).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе из исследованных сортов зернового сорго было отобрано семь с более высоким содержанием крахмала: 68,7–75,6 % при влажности зерна не более 14 %. Именно это качество дает культуре зернового сорго преимущество в использовании не только как сырья для производства этилового спирта, но и как источника углеводов для микробной конверсии их в лизин.

Отобранные сорта сорго по количеству крахмала в зерне превосходили традиционно применяемые в спиртовом производстве зерновые культуры, такие как пшеница, рожь и кукуруза (Абрамова и др., 2019), и различались по уровню содержания белка и гемицеллюлозы (рис. 1).

Из исследованных сортов сорго наибольшей крахмалистостью обладали два сорта III и V, уровень крахмала в которых соответствовал 74,1 и 75,6 %, белка – 12,0 и 10,4 %, гемицеллюлоз – 6,1 и 8,3 % соответственно. Наиболее высокое содержание белка отмечено в сорте II (13,7 %) и сорте IV (12,5 %), в которых крахмалистость составила менее 70 % (рис. 1).

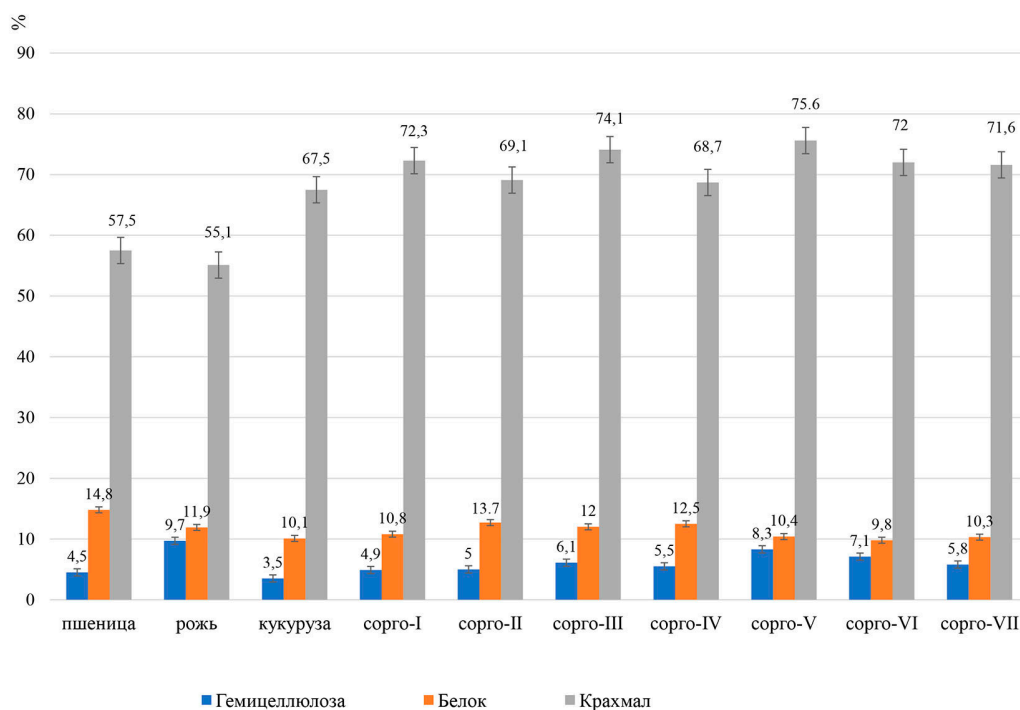


Рис. 1. Содержание (% сух. веса) крахмала, гемицеллюлозы и белка в исследованных сортах сорго в сравнении с зерном пшеницы, кукурузы и ржи

Fig. 1. The content (% d.w.) of starch, hemicellulose, and protein in the sorghum varieties compared with wheat, corn, and rye grains

Результаты исследований аминокислотного состава белка зернового сорго показали, что сорт культуры не оказывал на него существенного влияния. Биологическая ценность белков сорго подтверждалась присутствием всех незаменимых аминокислот (табл. 2). В табл. 2 представлены результаты исследований, проведенных с сортом сорго-II с более высоким содержанием белка. Практически аналогичные данные были получены при исследовании аминокислотного состава других сортов сорго. Для сравнения выбрана кукуруза как культура с наиболее высоким содержанием крахмала из традиционно применяемых в спиртовом производстве. Количественное содержание аминокислот в сорго незначительно отличалось от аминокислотного состава кукурузы, но немного превосходило по содержанию

лизина и лейцина и уступало по количеству метионина.

Результаты сравнительных исследований технологических свойств зерна ряда сортов сорго как сырья для приготовления суслу в производстве спирта позволили отобрать наиболее перспективные из них (рис. 1, табл. 3). При этом установлено, что уровень содержания в зерне основных полимеров оказывал определенное влияние на качественные характеристики суслу.

Суслу из сорго готовили с соблюдением стандартных условий ферментативно-гидролитической обработки зерна (Серба и др., 2018). Для полноты осахаривания крахмала и улучшения реологических свойств суслу использовали ФП – источники глюкоамилазы и ксиланазы; для деструкции белковых веществ в усвояемые дрожжами ами-

Таблица 2. Аминокислотный состав белков зерна кукурузы и сорго (сорт II)

Table 2. Amino acid composition of corn and sorghum (variety II) grain proteins

Аминокислоты	Количественное содержание, %	
	Кукуруза	Сорго
Лизин	2,00±0,10	2,60±0,10
Метионин	2,50±0,08	1,92±0,06
Триптофан	0,60±0,02	0,94±0,03
Валин	4,72±0,30	5,12±0,26
Изолейцин	3,84±0,15	4,02±0,16
Лейцин	13,20±0,45	13,75±0,50
Треонин	3,50±0,15	3,76±0,12
Фенилаланин	5,12±0,25	5,05±0,24
Гистидин	2,84±0,13	2,34±0,12
Аргинин	3,82±0,15	4,16±0,17
Аспарагиновая кислота	6,23±0,30	6,42±0,32
Глютаминовая кислота	21,00±0,80	19,85±0,75
Серин	4,74±0,20	4,24±0,18
Пролин	8,72±0,42	7,73±0,35
Глицин	3,24±0,14	3,36±0,14
Аланин	8,16±0,35	8,71±0,36
Цистин	1,82±0,08	1,32±0,06
Тирозин	4,34±0,16	5,34±0,20

Таблица 3. Влияние сортов зернового сорго на качество сусла и спиртовое брожение

Table 3. Influence of grain sorghum varieties on wort quality and alcoholic fermentation

Сорт сорго	Характеристика сусла				Характеристика бражки		
	PCB, %	Вязкость, мПа·с	PB, г/100 см ³	Аминный азот, мг%	PB, г/100 см ³	Концентрация спирта, % об	Выход спирта, см ³ /100 г крахмала
I	24,1±1,2	20,1±1,0	19,2±0,9	25,2±1,3	0,27±0,01	12,05±0,50	66,7±2,1
II	22,9±1,1	20,4±1,1	18,2±0,7	26,2±1,4	0,28±0,01	11,70±0,42	66,6±2,0
III	24,5±1,3	23,7±1,4	19,6±1,0	25,9±1,2	0,30±0,02	12,30±0,55	66,5±2,0
IV	22,6±1,0	21,6±1,2	18,7±0,7	26,1±1,4	0,28±0,01	11,42±0,38	66,5±1,9
V	24,4±1,4	29,1±1,5	19,5±1,0	24,8±1,2	0,49±0,03	12,12±0,55	64,3±1,4
VI	24,0±1,2	26,8±1,4	19,1±0,9	24,6±1,2	0,37±0,02	11,75±0,42	65,3±1,6
VII	24,1±1,2	22,9±1,2	19,2±1,0	25,1±1,3	0,30±0,02	11,92±0,46	66,5±2,0

Примечание: PB – редуцирующие вещества, PCB – растворимые сухие вещества

нокислоты вводили ФП – источник кислой протеиназы и пептидазы. Концентрация растворимых сухих веществ (PCB) сусла составила 22,6–24,5 % в зависимости от использованного сорта сорго.

Сусло из сортов сорго с более высокой крахмалистостью обладало хорошей экстрактивностью и содержало максимальное

количество PCB и PB (табл. 3). В сусле, приготовленном из сортов сорго II и IV, характеризовавшихся высоким содержанием белка, отмечена более высокая концентрация аминного азота (свыше 26,0 мг%). Наиболее высокой вязкостью отличалось сусло, приготовленное из сортов сорго с повышенным содержанием гемицеллюлоз: 29,1 мПа·с (сорт V)

и 26,8 мПа·с (сорт VI), что на 20–30 % превосходило аналогичные показатели суслу из других сортов.

Результаты исследований процесса сбраживания суслу, приготовленного из испытанных сортов сорго, подтвердили, что количество крахмала в зерне – основного источника сбраживаемых углеводов, является важным показателем, обеспечивающим синтез этанола. Однако присутствие в зерне некрахмальных полисахаридов и белка, способных образовывать достаточно прочные комплексы, оказывает корректирующее влияние на выход целевого продукта. Это, по-видимому, связано со снижением доступа амилолитических ферментов к крахмалу и понижением степени его конверсии, а также с ухудшением реологических свойств суслу, что подтверждается результатами ряда исследований и полученными экспериментальными данными (Родионова и др., 1992; Guillaume et al., 2019; Римарева и др., 2017). Так, сравнительные результаты эффективности сбраживания суслу,

приготовленного из зерна сорго (I, VI и VII) с практически одинаковой крахмалистостью (порядка 72 %), но различающегося по содержанию гемицеллюлозы, показали, что более высокий уровень образования спирта отмечен в бражке из сортов (I и VII) с пониженным содержанием некрахмальных полисахаридов (табл. 3, рис. 2). Наиболее низкая степень конверсии углеводов в этанол отмечена при сбраживании суслу, приготовленного из сорта V с самым высоким содержанием крахмала (75,6 %) и гемицеллюлоз (8,3 %), при этом выход спирта со 100 г крахмала составил 64,3 см³, что на 3,3–3,6 % ниже аналогичных показателей в вариантах, где использовались сорта как с более низким содержанием крахмала, так и гемицеллюлоз.

Таким образом, показано, что на эффективность сбраживания зернового суслу, приготовленного из различных сортов сорго, существенное влияние оказывает не только крахмалистость зерна, но и содержание некрахмальных полисахаридов, негативно

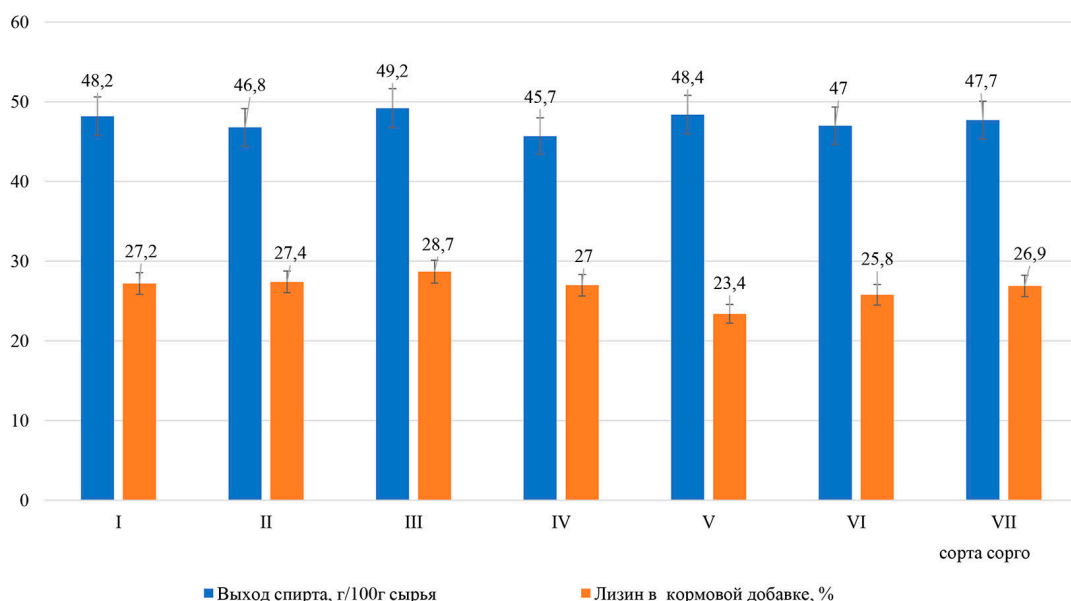


Рис. 2. Зависимость выхода спирта (г/100 г сырья) и лизина (% сух. веса) от сорта сорго

Fig. 2. Dependence of alcohol (g/100 g raw material) and lysine (% d.w.) yields on sorghum variety

сказывающиеся на реологических свойствах сусла. В связи с этим сорта сорго с более высоким содержанием крахмала и низким – гемицеллюлоз предпочтительно использовать в производстве этанола.

На следующем этапе работ подтверждена возможность комплексной ресурсосберегающей переработки зернового сорго в этанол и содержащую лизин кормовую добавку. Как следует из выше приведенных данных, исследованные сорта сорго по содержанию крахмала превосходили другие зерновые культуры (рис. 1). Кроме того, наличие в зерне помимо крахмала белковых веществ, незаменимых аминокислот позволило обогатить среду легкоусвояемым аминным азотом, что особенно важно для синтеза лизина (табл. 2 и 3).

Используемый в работе продуцент лизина *Brevibacterium* RCAM 01129, как и многие другие промышленные штаммы, является аукокотрофным, имеющим потребность в присутствии в среде аминокислот (треонина, метионина, предшественником которых является гомосерин), витаминов и микроэлементов (Римарева, Григорьев, 2009; Андрияш и др., 2012, 2014). Штамм синтезирует внутриклеточные пептидазы и способен эффективно усваивать короткие пептиды, но не образует внеклеточных протеаз и не ассимилирует белки и высокомолекулярные пептиды из питательной среды. Поэтому применение зернового сорго, содержащего помимо полисахаридов другие ценные компоненты (белки, витамины и микроэлементы), позволило повысить эффективность биоконверсии углеводов в лизин. Для приготовления питательной среды использовали отъемы сусла и барды, содержащие растворимые углеводы и аминный азот, ассимилируемые продуцентом лизина.

Результаты исследований подтвердили эффективность использования комплекса

грибных протеаз для гидролиза белков зерна при приготовлении сусла. Проведение протеолиза способствовало накоплению в питательной среде свободных аминокислот, что восполнило потребность продуцента в ростовых веществах. Кроме того, в связи с тем, что зерновое сусло имело довольно вязкую консистенцию, что затрудняло доступ кислорода к клеткам бактерий, введение в качестве ингредиента питательной среды спиртовой барды позволило улучшить условия аэрации бактерий без существенной потери питательной ценности среды.

Как видно из приведенных данных, на уровень синтеза лизина, так же как этанола, оказывало влияние содержание углеводов и белковых полимеров в исследуемых сортах сорго (рис. 2). Наибольший выход лизина (28,7 %) достигнут на питательных средах, приготовленных из сортов сорго с высоким содержанием крахмала (74,1 %) и белка (12,0 %), но пониженным – гемицеллюлоз (6,1 %).

Таким образом, установлено, что количество крахмала в сырье ещё не является гарантом более высокого выхода спирта. Сорта сорго, которые характеризовались самым высоким содержанием крахмала в зерне, не были в числе лидеров по выходу спирта и лизина. Как показали исследования, синтез целевых продуктов напрямую связан с характеристикой составных ингредиентов зерна: крахмала, белка, некрахмальных полисахаридов. Последние и являются негативным фактором в отношении синтеза этанола и лизина. Следовательно, высокий выход спирта и лизина можно гарантировать как за счет увеличения количества крахмала в зерне, так и в результате снижения содержания гемицеллюлоз (рис. 2).

Проведенные исследования показали возможность создания комплексного ресур-

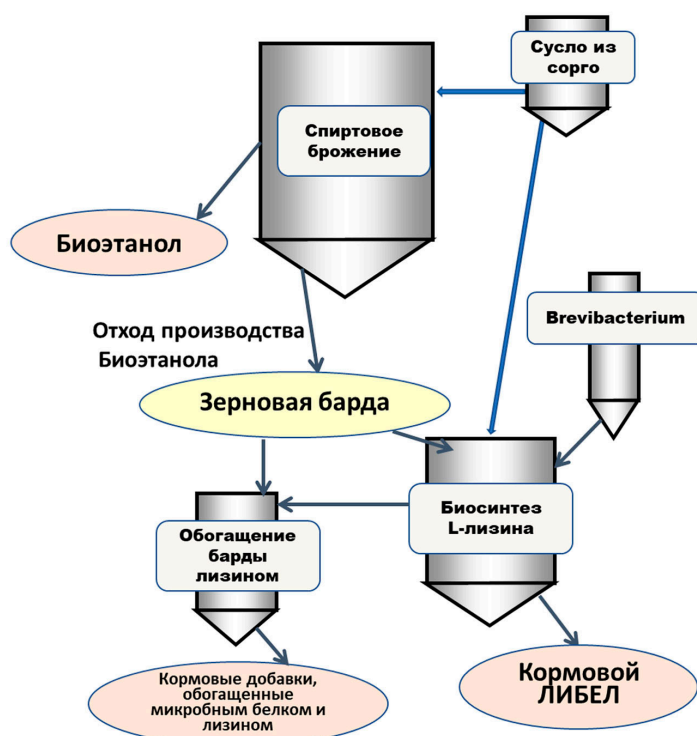


Рис. 3. Схема комплексной переработки зернового сорго на спирт и кормовые продукты

Fig. 3. A scheme of combined processing of grain sorghum to alcohol and feed products

Таблица 4. Сравнительная характеристика кормовых продуктов, полученных на основе комплексной конверсии зернового сорго на спирт и кормовые продукты

Table 4. Comparative characteristics of feeds produced using combined conversion of grain sorghum to alcohol and feed products

Продукт	Сырой протеин, % сух. веса	Истинный белок, % сух. веса	Лизин, % сух. веса
Зерновая барда	24,5±1,2	17,9±0,8	0,75±0,03
Лизино-белковый препарат	43,9±2,4	26,7±1,4	27,40±1,40

собоерегающего производства спирта и кормовой лизино-белковой добавки «Либел» на основе микробной конверсии зернового сорго (рис. 3).

Ввиду идентичности исходного сырья и части технологической схемы производства спирта, а также для обеспечения максимального использования сырья и промежуточных продуктов переработки предполагается в технологическую схему производства спир-

та ввести линию по получению кормового лизина.

В результате микробной конверсии полупродуктов и отходов спиртового производства получен кормовой продукт, в котором содержание белка было в 1,8 раза, а лизина – в 36,5 раза выше, чем в составе сухой барды (табл. 4).

Кроме того, по комплексной технологии переработки зернового сорго на спирт

можно получать дополнительные продукты, такие как кормовой лизино-белковый препарат и зерновая барда, обогащенная лизином (рис. 3).

Заключение

В результате исследований подтверждена перспективность использования зернового сорго не только как сырья для производства этилового спирта, но и как источника углеводов для микробной конверсии их в лизин. Показано, что отобранные сорта сорго по количеству крахмала в зерне превосходили пшеницу, рожь и кукурузу и различались по уровню содержания белка и гемицеллюлозы. Соотношение полимеров в составе зерна исследованных сортов сорго оказало влияние на качество и реологические свойства суслу.

Результаты исследований показали возможность комплексной биотехнологической переработки зерна сорго в этанол и кормо-

вую лизино-белковую добавку на основе конверсии полупродуктов и отходов спиртового производства. Установлено, что присутствие в зерне некрахмальных полисахаридов и белка, определяющих повышенную вязкость суслу, оказывало корректирующее влияние на выход целевых продуктов. В результате сбраживания суслу, приготовленного из сортов зернового сорго с практически одинаковой крахмалистостью, и микробной конверсии барды более высокий уровень образования этанола и лизина отмечен при использовании сортов с пониженным содержанием гемицеллюлозы.

При создании новых сортов сорго для бродильного производства необходимо выделять высокопродуктивные по крахмалу генотипы с пониженным содержанием некрахмальных полисахаридов, что обеспечит более высокий выход спирта и эффективную конверсию углеводов в лизин.

Список литературы / References

Абрамова И. М., Римарева Л. В., Туршатов М. А. (2019) *Исходные требования к качеству зернового сырья, обеспечивающие высокие показатели эффективности производства спирта*. М., Библиоглобус, 114 с. [Abramova I. M., Rimareva L. V., Turshatov M. A. (2019) *Initial requirements for the quality of grain raw materials that ensure high performance indicators of alcohol production*. Moscow, Biblioglobus, 114 p. (in Russian)]

Алабушев А. В., Ковтунов В. В., Ковтунова Н. А. (2013) *Качество зерна коллекционных образцов сорго зернового*. Ростов-на-Дону, ЗАО Книга, 144 с. [Alabushev A. V., Kovtunov V. V., Kovtunova N. A. (2013) *Grain quality of collection samples of grain sorghum*. Rostov-on-Don, CJSC Kniga, 144 p. (in Russian)]

Алабушев А. В., Ковтунов В. В., Лушпина О. А. (2016а) Сорго зерновое – перспективное сырьё для производства крахмала. *Достижения науки и техники АПК*, 30(7): 64–66 [Alabushev A. V., Kovtunov V. V., Lushpina O. A. (2016a) Grain sorghum as promising raw material for starch production. *Achievements of Science and Technology of AIC* [Dostizheniya nauki i tekhniki APK], 30(7): 64–66 (in Russian)]

Алабушев А. В., Ковтунов В. В., Ковтунова Н. А., Горпиниченко С. И. (2016б) Семеноводство сорго зернового в Ростовской области. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*, 1: 12–15 [Alabushev A. V., Kovtunov V. V., Kovtunova N. A., Gorpichenko S. I. (2016b) Breeding of grain sorghum in the Rostov region. *Agricultural Science Euro-North-East* [Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka], 1: 12–15 (in Russian)]

Амелякина М. В., Римарева Л. В., Степанов В. И., Иванов В. В. (2012) Влияние протеолитических ферментов на эффективность разделения зернового суслу на твердую и жидкую фракции в комплексной технологии спиртового производства. *Производство спирта и ликероводочных изделий*, 2: 27–29 [Ameliakina M. V., Rimareva L. V., Stepanov V. I., Ivanov V. V. (2012) Influence of proteolytic enzymes on the efficiency of the separation of the grain mash into solid and liquid fractions in the complex technology of manufacture of alcohol. *Production of Alcohol and Alcoholic Beverages* [Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdelii], 2: 27–29 (in Russian)]

Андрияш Г. С., Заболотная Г. М., Шульга С. М. (2012) Ауксотрофность продуцентов лизина. *Біотехнологія*, 5(1): 70–77 [Andriyash G. S., Zabolotna G. M., Shulga S. M. (2012) Auxotrophy of producers of lysin. *Biotechnology* [Biotekhnologiya], 5(1): 70–77 (in Ukrainian)]

Андрияш Г. С., Заболотная Г. М., Шульга С. М. (2014) Мутантные штаммы микроорганизмов – продуцентов лизина и треонина. *Biotechnologia Acta*, 7(3): 95–101 [Andriiash G. S., Zabolotna G. M., Shulga S. M. (2014) The mutant strains of microorganisms – producers of lysine and threonine. *Biotechnologia Acta*, 7(3): 95–101 (in Ukrainian)]

Володько А. И., Новак А. Г., Цыганков С. П. (2012) Сахарное сорго – энергетическая культура для производства биоэтанола в Украине. *Відновлююча енергетика*, 2: 88–93 [Volodko A. I., Novak A. G., Tsygankov S. P. (2012) Sugar sorghum – energy culture for bioethanol production in Ukraine. *Renewable Energy* [Vidnovlyunova energetika], 2: 88–93 (in Russian)]

Гаршин А. Ю., Жужукин В. И., Семин Д. С. (2014) Определение комбинационной способности сортообразцов сахарного сорго по качеству зерна в тестерных скрещиваниях. *Кукуруза и сорго*, 1: 20–23 [Garshin A. Yu., Zhuzhukin V. I., Semin D. S. (2014) Determination of combining ability of sweet sorghum accessions quality grain testernyh crossbreeding. *Corn and Sorghum* [Kukuruza i sorgo], 1: 20–23 (in Russian)]

Григоренко Н. О. (2016) Сорго сахарное и перспективное направление его использования. *Вестник пищевой промышленности «Сахарная отрасль»*, 5: 5–7 [Grigorenko N. O. (2016) Sugar sorghum and a promising direction of its use. *Bulletin of the Food Industry “Sugar Industry”* [Vestnik pishchevoi promyshlennosti «Sakharnaya otrasl'»], 5: 5–7 (in Russian)]

Зверев С. В., Зверева Н. С. (2007) *Физические свойства зерна и продуктов его переработки*. М., ДеЛи принт, 176 с. [Zverev S. V., Zvereva N. S. (2007) *Physical properties of grain and products of its processing*. Moscow, DeLi Print, 176 p. (in Russian)]

Зуева Н. В., Агафонов Г. В., Корчагина М. В., Долгов А. Н., Чусова А. Е. (2019) Выбор ферментных препаратов и температурно-временных режимов водно-тепловой и ферментативной обработки при разработке комплексной технологии переработки зернового сырья. *Вестник ВГУ-ИТ*, 81(1): 112–119 [Zueva N. V., Agafonov G. V., Korchagina M. V., Dolgov A. N., Chusova A. E. (2019) Selection of enzyme preparations and temperature-time regimes of water-heat and enzymatic treatment in the development of complex technology of processing of grain raw materials. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies* [Vestnik VGUIT], 81(1): 112–119 (in Russian)]

Иванов С. В., Шиян П. Л., Мудрак Т. Е., Ковальчук С. С. (2015) Ресурсосберегающие технологии подготовки крахмалсодержащего сырья к сбраживанию. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 1: 24–28 [Ivanov S. V., Shiyan P. L., Mudrak T. Y., Koval'chuk S. S. (2015) Saving technologies to prepare raw starch digestion. *Storage and Processing of Farm Products* [Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya], 1: 24–28 (in Russian)]

Карл Хосни Р. (2006) *Зерно и зернопродукты*. С.-Петербург, Профессия, 336 с. [Karl Hosni R. (2006) *Grain and grain products*. St. Petersburg, Professiya, 336 p. (in Russian)]

Ковтунова Н. А., Ерешко А. С., Ржевская А. А. (2017) Итоги испытания новых сортов и гибридов сахарного сорго. *Научное обозрение. Международный научно-практический журнал*, 2: 4–7 [Kovtunova N., Ereshko A., Rzhetskaya A. (2017) The test results of sugar sorghum new varieties and hybrids. *Scientific Review. International Scientific and Practical Journal* [Nauchnoe obozrenie. Mezhdunarodnyi nauchno-prakticheskii zhurnal], 2: 4–7 (in Russian)]

Ковтунова Н. А., Ковтунов В. В. (2019) Использование сорго сахарного в качестве источника питательных веществ для человека (обзор литературы). *Зерновое хозяйство России*, 3: 3–9 [Kovtunova N. A., Kovtunov V. V. (2019) The use of sweet sorghum as a source of nutritious substances for human (literature review). *Grain Economy of Russia* [Zernovoe khozyaistvo Rossii], 3: 3–9 (in Russian)]

Кривченко В. А., Туршатов М. В., Соловьев А. О., Абрамова И. М. (2019) Спиртовое производство – технологическая основа комплексной переработки зерна с получением пищевых продуктов. *Пищевая промышленность*, 4: 53–54 [Krivchenko V. A., Turshatov M. V., Solovyev A. O., Abramova I. M. (2019) Ethanol production is a technological basis of grain complex processing with foodstuff producing. *Food Industry* [Pishchevaya promyshlennost'], 4: 53–54 (in Russian)]

Николаев С. И., Карапетян А. К., Плешакова И. Г., Струк А. Н., Струк М. В. (2018) Сравнительный химический состав и питательность зерна кукурузы и сорго. *Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование*, 2: 293–302 [Nikolaev S. I., Karapetyan A. K., Pleshakova I. G., Struk A. N., Struk M. V. (2018) Comparative chemical composition and nutrition of grain of corn and sorgho. *News of the Nizhnevolzhsky Agro-University Complex: Science and Higher Professional Education* [Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie], 2: 293–302 (in Russian)]

Новикова И. В., Яковлев А. Н., Востриков С. В., Чернышов А. В., Митрофанова Е. К. (2007) Состав сахаросодержащего сырья для производства этанола. *Производство спирта и ликероводочных изделий*, 1: 27–29 [Novikova I. V., Yakovlev A. N., Vostrikov S. V., Chernyshov A. V., Mitrofanova E. K. (2007) Structure of sacchariferous raw material for manufacture of ethanol. *Production of Alcohol and Alcoholic Beverages* [Proizvodstvo spirta i likerovodochnykh izdelii], 1: 27–29 (in Russian)]

ОФС.1.2.3.0022.15 Определение аминного азота методами формольного и йодометрического титрования [OFS.1.2.3.0022.15 Determination of amine nitrogen by formol and iodometric titration methods (in Russian)]

Поляков В. А., Абрамова И. М., Польшалина Г. В., Римарева Л. В., Корчагина Г. Т., Пискарева Е. Н. (2007) *Инструкция по технохимическому и микробиологическому контролю спиртового производства*. М., ДеЛи принт, 480 с. [Polyakov V. A., Abramova I. M., Polygalina G. V., Rimareva L. V., Korchagina G. T., Piskareva E. N. (2007) *Instructions for technochemical and microbiological control of alcohol production*. Moscow, DeLi Print, 480 p. (in Russian)]

Римарева Л. В., Оверченко М. Б., Игнатова Н. И. (2008) Микробная конверсия растительного сырья и вторичных сырьевых ресурсов АПК в высокоэффективный лизино-белковый препарат. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 12: 48–51 [Rimareva L. V., Overchenko M. B., Ignatova N. I. (2008) Microbial conversion of plant raw material and secondary raw material resources of the agro-industrial complex into a highly effective lysine-protein preparation. *Storage and processing of agricultural raw material*, 12: 48–51]

Ignatova N.I. (2008) Microbic conversion of vegetative raw materials and secondary source of raw materials of agrarian and industrial complex in highly effective lysine-albuminous preparation. *Storage and Processing of Farm Products* [Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya], 12: 48–51 (in Russian)]

Римарева Л.В., Григорьев М.А. (2009) Создание безотходной технологии в свете ответственности производителей за переработку сырьевых отходов на примере пивоваренного производства. *Экология промышленного производства*, 1: 43–46 [Rimareva L.V., Grigoriev M.A. (2009) Creating a waste-free technology in the light of the responsibility of producers for the processing of raw waste, using brewing production as the example. *Industrial Ecology* [Ekologiya promyshlennogo proizvodstva], 1: 43–46 (in Russian)]

Римарева Л.В., Оверченко М.Б., Дормашова С.С. (2010) Экспресс-метод определения лизина на основе тонкослойной хроматографии с целью оперативного контроля качества кормов. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 7: 31–34 [Rimareva L.V., Overchenko M.B., Dormashova S.S. (2010) Definition express method lizin on a basis slim-layer a chromatography for the purpose of operative quality assurance of forages. *Storage and Processing of Farm Products* [Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya], 7: 31–34 (in Russian)]

Римарева Л.В., Серба Е.М., Соколова Е.Н., Борщева Ю.А., Игнатова Н.И. (2017) Ферментные препараты и биокаталитические процессы в пищевой промышленности. *Вопросы питания*, 86(5): 63–74 [Rimareva L.V., Serba E.M., Sokolova E.N., Borshcheva Yu.A., Ignatova N.I. (2017) Enzyme preparations and biocatalytic processes in the food industry. *Voprosy Pitaniia*, 86(5): 63–74 (in Russian)]

Родионова Н.А., Капрельянц Л.В., Середницкий П.В., Килимник А.Ю. (1992) Гемичеселлюлозы зерна злаков и ферменты, катализирующие их расщепление. *Прикладная биохимия и микробиология*, 28(5): 645–664 [Rodionova N.A., Kaprel'iants L.V., Serednitskii P.V., Kilimnik A.I. (1992) Hemicelluloses of cereal grains and enzymes, catalyzing their cleavage (review). *Prikladnaia biokhimiia i mikrobiologiia*, 28(5): 645–664 (in Russian)]

Серба Е.М., Поляков В.А. (2015) *Биотехнологические основы комплексной переработки зернового сырья и вторичных биоресурсов в этанол и белково-аминокислотные добавки*. М, ВНИИПБТ, 133 с. [Serba E.M., Polyakov V.A. (2015) *Biotechnological basis of combined processing of grain raw materials and secondary bioresources into ethanol and protein-amino acid supplements*. Moscow, All-Russian Research Institute of Food Biotechnology, 133 p. (in Russian)]

Серба Е.М., Абрамова И.М., Римарева Л.В., Оверченко М.Б., Игнатова Н.И., Грунин Е.А. (2018) Влияние ферментных препаратов на технологические показатели зернового сусле и качество спирта. *Пиво и напитки*, 1: 50–54 [Serba E.M., Abramova I.M., Rimareva L.V., Overchenko M.B., Ignatova N.I., Grunin E.A. (2018) Influence of enzymatic preparations on technological parameters of grain wort and quality of alcohol. *Beer and Beverages* [Pivo i napitki], 1: 50–54 (in Russian)]

Серба Е.М., Оверченко М.Б., Игнатова Н.И., Римарева Л.В. (2019) Сравнительные исследования штаммов дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, перспективных для сбраживания концентрированного зернового сусла. *Актуальные вопросы индустрии напитков*, 3: 201–207 [Serba E.M., Overchenko M.B., Ignatova N.I., Rimareva L.V. (2019) Comparative studies of *Saccharomyces cerevisiae* yeast strains, promising for concentrated grain wort fermentation. *Current Issues of the Beverage Industry* [Aktual'nye voprosy industrii napitkov], 3: 201–207 (in Russian)]

Alhajturki D., Aljamali M., Kanbar A., Azmah F. (2012) Potential of some sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes under two water regimes for sugar and bio-ethanol production. *Sugar Tech*, 14(4): 376–382

Bahadure D. M., Marker S., Umakanth A. V., Prabhakar, Patil J. V., Synrem G. J. (2014) Assessment of genetic diversity for biomass related traits in Sweet Sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench.). *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 7(8): 32–34

Guillaume A., Thorigné A., Carré Y., Vinh J., Levavasseur L. (2019) Contribution of proteases and cellulases produced by solid-state fermentation to the improvement of corn ethanol production. *Bioresources and Bioprocessing*, 6(11): 7

Kruger J., Oelofse A., Taylor J., Taylor J. R. N. (2012) Potential for improvement in yeast nutrition in raw whole grain sorghum and maize lager brewing and bioethanol production through grain genetic modification and phytase treatment. *Journal of the Institute of Brewing*, 118(1): 70–75

Nahar K. (2011) Sweet sorghum: an alternative feedstock for bioethanol. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 2(1): 58–61

Oyier M. O., Owuoché J. O., Oyoo M. E., Cheruiyot E., Mulianga B., Rono J. (2017) Effect of harvesting stage on sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes in Western Kenya. *Scientific World Journal*, 2017: 8249532

Sanjana Reddy P., Reddy B., Srinivasa Rao P. (2011) Genetic analysis of traits contributing to stalk sugar yield in sorghum. *Cereal Research Communications*, 39(3): 453–464