

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 2 / 2025, Vol. 8, Iss. 2 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 663.54

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-4

## Перспективы развития и анализ сырья для производства биоэтанола

<sup>1</sup> Валеева А.Р. \*,

<sup>1</sup> Хазиахмедова Р.М.,

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технологический университет,

\* Ответственный автор E-mail: [a8695v@yandex.ru](mailto:a8695v@yandex.ru)

**Аннотация:** цель работы – рассмотрение биоэтанола в качестве перспективного возобновляемого топлива, анализ технологии его производства, сырьевой базы, технологических поколений, а также структуры мирового рынка и экологической роли.

**Методы** заключаются в анализе исторического развития технологии. Обзоре сырьевой базы (сахаросодержащие, крахмалсодержащие, лигноцеллюлозные материалы) и анализе мирового опыта (Бразилия, США, ЕС) и потенциала России. Освещается история развития биоэтанола, начиная с первых разработок Генри Форда и заканчивая современными тенденциями и технологиями. Анализируются факторы, способствующие росту интереса к технологии производства биоэтанола. Рассматриваются различные поколения биоэтанола. Особое внимание уделяется обзору мирового рынка биоэтанола, его текущему состоянию и прогнозам роста, обусловленным строгими экологическими нормами и увеличением использования биотоплива в транспортной отрасли.

**Результаты.** Систематизированы данные по различным поколениям биоэтанола, их преимуществам и недостаткам. Приведен сравнительный анализ эффективности разных видов сырья (урожайность, выход этанола). Дана оценка перспектив России в развитии биоэтаноловой отрасли на фоне мирового опыта. В статье рассмотрены сырьевая база и технологии производства биоэтанола первого поколения из сахарного тростника, кукурузы, пшеницы, сахарной свеклы. Помимо этого, рассматриваются перспективные направления технологии получения биоэтанола второго и третьего поколений. Особое внимание уделено сравнению эффективности разных видов сырья: сахаросодержащих культур (сахарная свекла, тростник), крахмалсодержащих (зерновые, картофель) и лигноцеллюлозных отходов (солома, древесина, мискантус). Подчеркивается экологическая роль биоэтанола и его значение для энергетической безопасности.

**Выводы.** Сахаросодержащее сырьё демонстрирует высокую эффективность, однако его использование ограничено сезонностью и конкуренцией с пищевой промышленностью. Крахмалсодержащие культуры обеспечивают стабильный выход этанола, но требуют дополнительных этапов гидролиза и. Лигноцеллюлозное сырьё не конкурирует с пищевыми ресурсами, но требует более сложных технологий переработки. Лидеры рынка – Бразилия (тростниковый этанол), США (кукурузный), ЕС (лигноцеллюлозные технологии).

**Ключевые слова:** биоэтанол, гидролиз, топливо из растительного сырья, сырьё для биоэтанола, этанол второго поколения, производство биоэтанола, зеленая энергетика

**Для цитирования:** Валеева А.Р., Хазиахмедова Р.М. Перспективы развития и анализ сырья для производства биоэтанола // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 2. 4. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-4

Поступила в редакцию: 18 января 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 24 марта 2025 г.; Принята к публикации: 27 мая 2025 г.

## Prospects for the development and analysis of raw materials for bioethanol production

<sup>1</sup> Valeeva A.R. \*

<sup>1</sup> Khaziakhmedova R.M.,

<sup>1</sup> Kazan National Research Technological University,

\* Corresponding author E-mail: a8695v@yandex.ru

**Abstract: objectives:** the purpose of the work is to consider bioethanol as a promising renewable fuel, analyze its production technology, raw material base, technological generations, as well as the structure of the global market and its environmental role.

**The methods** consist in analyzing the historical development of technology. A review of the raw material base (sugar-containing, starch-containing, lignocellulose materials) and an analysis of global experience (Brazil, USA, EU) and the potential of Russia. The article highlights the history of bioethanol development, starting with the first developments of Henry Ford and ending with modern trends and technologies. The factors contributing to the growing interest in bioethanol production technology are analyzed. The different generations of bioethanol (first, second, third and fourth) are considered in detail. Special attention is paid to the overview of the global bioethanol market, its current state and growth forecasts due to strict environmental regulations and the increased use of bio-fuels in the transportation industry.

**Results.** The data on different generations of bioethanol, their advantages and disadvantages are systematized. A comparative analysis of the effectiveness of different types of raw materials (yield, ethanol yield) is presented. An assessment of Russia's prospects in the development of the bioethanol industry is given against the background of international experience. The article discusses the raw material base and technologies for the production of first-generation bioethanol from sugar cane, corn, wheat, and sugar beet. In addition, promising areas of technology for the production of bioethanol of the second and third generations are being considered. Where lignocellulose raw materials such as wood waste, straw waste, and fast-growing energy crops are used as raw materials. Special attention is paid to comparing the effectiveness of different types of raw materials: sugar-containing crops (sugar beet, cane), starch-containing (cereals, potatoes) and lignocellulose waste (straw, wood, miscanthus). The ecological role of bioethanol and its importance for energy security are emphasized.

**Conclusions.** Sugar-containing raw materials demonstrate high efficiency, but their use is limited by seasonality and competition with the food industry. Starch-containing cultures provide stable ethanol yield, but require additional hydrolysis steps. Lignocellulose raw materials are the most promising direction for second-generation bioethanol. It solves the problem of waste disposal and does not compete with food resources, but requires more sophisticated processing technologies. The market leaders are Brazil (cane ethanol), the USA (corn), and the EU (lignocellulose technologies). Their success is linked to government support and environmental regulations. Russia also has significant raw material potential for the development of this industry. The article is based on current research and contains comparative characteristics of raw materials, which makes it useful for specialists in the field of bioenergy, agriculture and ecology.

**Keywords:** bioethanol, hydrolysis, plant-based fuel, bioethanol feedstock, second-generation ethanol, bioethanol production, green energy

**For citation:** Valeeva A.R., Khaziakhmedova R.M. Prospects for the development and analysis of raw materials for bioethanol production. Chemical Bulletin. 2025. 8 (2). 4. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-4

The article was submitted: January 18, 2025; Approved after reviewing: March 24, 2025; Accepted for publication: May 27, 2025.

### Введение

Биоэтанол представляет собой форму этилового спирта, производимого из растительной биомассы. В качестве биомассы чаще всего используются такие культуры как кукуруза, сахарный тростник, пшеница, а также целлюлозные материалы, включая отходы сельскохозяйственного производства, древесину и другие виды растительной биомассы [1].

Еще в 1896 году Генри Форд создал первый автомобиль Ford Quadricycle который имел потенциал работы на этаноле, считается, что Форд активно продвигал использование этого вида топлива. Так к 1938 году заводы в Канзасе уже производили около 54 000 тонн этанола в год. Однако активное развитие технологий добычи и переработки нефти и газа привели к снижению интереса использова-

ния этанола в качестве топлива и как следствие привело к отказу от данной технологии. [2] [3].

В конце 1970-х годов, после первого нефтяного кризиса, различные нефтяные компании начали продавать бензин, содержащий 10% этанола под названием «газохол», пользуясь налоговыми льготами, предоставляемыми на этанол. Однако биоэтанол не добился широко распространения, из-за конкуренции с метил-трет-бутиловым эфиром (МТБЭ) с более высокими характеристиками и экономической составляющей чем этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ). В последующие годы выяснилось, что МТБЭ сильно загрязняет окружающую среду, поэтому его запретили, а биоэтанол снова стал привлекательным в качестве перспективных альтернативного топлива и решения для сокращения выбросов CO<sub>2</sub> [4]. Широкое развитие в первую очередь сдерживают экономические и технологические вопросы, помимо этого, существует этическая проблема, связанная с производством биоэтанола из растительного сырья, которые в противном случае предназначались бы для пищевой промышленности [5].

На сегодняшний день интерес к топливу из биоэтанола растет. Фактором роста интереса служит признание приближения глобальной энергетической системы к точке перелома, при котором кривая снижения доступности нефтяных ресурсов вследствие истощения месторождений пересекает траекторию растущего спроса, формируя структурный дефицит углеводородов. Данный ожидаемый переломный момент в энергобалансе, создал предпосылки для переориентации на возобновляемые альтернативные источники энергии.

Растущая осведомленность об изменении климата и его последствиях так же стала важным фактором роста рынка биоэтанола. Правительства и организации по всему миру всё чаще инвестируют в возобновляемые источники энергии. Биоэтанол, являясь возобновляемым и биоразлагаемым топ-

ливом, представляет собой отличную альтернативу.

Сегодня биоэтанол чаще всего используется в качестве добавки к бензину [6], однако биоэтанол может и полностью заменить бензин. Часто для маркировки топлива с использованием биоэтанола используется следующее обозначение: E100 К 100% биоэтанола, в смеси с бензином E15 – 15% биоэтанола. Наиболее часто используемая в Бразилии смесь – E20 и E25 [7]. В США и Европе широко используется E85, E15 – основная смесь, используемая в Нидерландах [8]. Помимо топлива есть и другие потенциальные области применения биоэтанола – в качестве растворителя [9] (в фармацевтике, химии и косметике) и в качестве химического сырья для различных смол и пластмасс [10].

Стоит отметить, несмотря на то, что биоэтанол часто называют углеродно-нейтральным из-за эквивалентного обмена углерода при сжигании и создании биомассы, процесс выращивания сельскохозяйственных культур и производства биоэтанола включает в себя неизбежные элементы, такие как использование сельскохозяйственного оборудования, удобрений, орошение, транспортировка, переработка, производство оборудования и т.д., которые могут создавать углеродный след [11]. Тем не менее, по сравнению с этанолом на основе этилена, биоэтанол оставляет значительно меньший углеродный след [12].

Мировой рынок биоэтанола в 2024 году оценивался в 87,90 млрд долларов согласно аналитическим данным исследовательских центров, достигнет 133,88 млрд долларов США к 2032 году (рис. 1). Согласно аналитическим данным, в течение с 2025 по 2032 год рынок, вероятно, будет расти со среднегодовым темпом 5,40%, в первую очередь за счёт увеличения спроса на возобновляемые источники энергии.

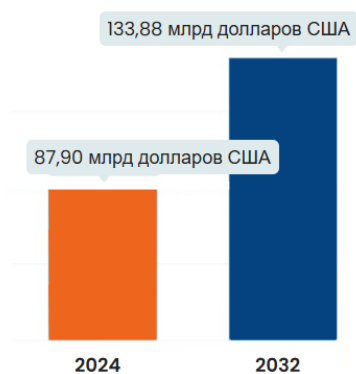


Рис. 1. Прогнозируемый рост рынка биоэтанола в США [13].  
Fig. 1. Projected growth of the bioethanol market in the USA [13].

Считается что рост будет обусловлен строгими государственными ограничениями на выбросы углекислого газа и растущим использованием биотоплива в транспортной отрасли [13].

Процесс производства биоэтанола включает в себя ферментацию сахаров, содержащихся в биомассе, с последующей дистилляцией для получения чистого спирта.

Первоначально биоэтанол производился в основном из зерновых культур, таких как кукуруза и пшеница. Однако, с ростом производства и потребления биоэтанола возникли опасения по поводу его влияния на продовольственную безопасность и цены на продукты питания. Повышение спроса на пищевое сырье приводит к росту цен на продовольствие и занятость сельскохозяйственных земель. В связи с этим, начались активные исследования и разработки в области производства биоэтанола из непищевого сырья, такого как целлюлоза, древесные отходы и другие виды биомассы [14].

Выделяют четыре поколения биоэтанола, отличающиеся типом используемого сырья и технологией производства. Биоэтанол первого поколения производится из сельскохозяйственных культур, содержащих крахмал или сахар, таких как кукуруза и сахарный тростник. Биоэтанол второго поколения производится из целлюлозной биомассы, что позволяет использовать более широкий спектр сырья и снизить конкуренцию с продовольственными культурами. Разрабатываются и технологии производства биоэтанола третьего и четвертого

поколений, использующие водоросли и генетически модифицированные микроорганизмы для повышения эффективности и экологичности производства.

Технологии биоэтанола второго поколения (advanced biofuels) позволяют использовать более дешевое и доступное непищевое сырье, не создавая конкуренции на продовольственном рынке. Однако широкое внедрение и дальнейшее развитие данных технологий требуют значительных финансовых инвестиций [14]. Водоросли в качестве сырья для производства биоэтанола третьего поколения обладают преимуществами, связанными с высокой продуктивностью и отсутствием потребности в использовании сельскохозяйственных земель [15]. Обладают высокой скоростью роста и большим выходом биомассы, превосходящей многие наземные культуры. Кроме того, макроводоросли обычно содержат достаточно большое количество гидролизуемых углеводов (табл. 1). Однако технологии производства биоэтанола третьего поколения находятся на начальном исследовательском этапе развития. Несмотря на это, растущее внимание к сокращению выбросов углекислого газа и продвижению более чистых источников энергии способствует развитию данной отрасли.

Прослеживается тенденция роста государственной поддержки в некоторых странах, выражающаяся в вводе требований по повышению доли этанола в топливе. В марте 2024 года правительство США повысило требования к содержанию этанола в топливе до 15% (E15).

Таблица 1

Сравнение основных наземных культур, используемых для производства биоэтанола и макроводорослей [16].

Table 1

Comparison of the main land crops used for bioethanol production and macroalgae [16].

	Пшеница (зерно)	Кукуруза (зерно)	Сахарная свекла	Сахарный тростник	Макро- водоросли
Средняя мировая урожайность (кг/га в год)	2800	4815	47,070	68,260	730,000
Содержание гидролизуемых углеводов (кг/га в год)	1560	3100	8825	11,600	40,150
Потенциальный объём производства биоэтанола (л/га в год)	1010	2010	5150	6756	23,400

В декабре 2023 года Бразилия объявила о планах расширить свою программу RenovaBio [17], стимулируя производителей биотоплива увеличивать производство этанола и снижать углеродоёмкость. В сентябре 2023 года Европейский союз поставил новые цели в области экологичного авиационного топлива (SAF), увеличив инвестиции в производство реактивного топлива на осно-

ве этанола [18]. В марте 2024 года авиакомпания United Airlines объявила о планах расширить использование SAF на основе этанола, чтобы сократить выбросы углекислого газа в своём авиапарке. В ноябре 2023 года British Airways заключила партнёрское соглашение с LanzaJet для разработки авиационного топлива на основе биоэтанола, что стало частью стратегии устойчивого развития. В

сентябре 2023 года Европейский союз ввёл новые требования к авиационному топливу, согласно которым к 2030 году авиакомпаниям должны использовать топливо на биологической основе в минимальном объёме.

Россия обладает значительным потенциалом для производства биоэтанола благодаря обширным сельскохозяйственным ресурсам, но его развитие сдерживается регуляторными и экономическими факторами. В 2023 году производство биоэтанола в России составило около 700–800 млн литров. Российский рынок биотоплива отстает от мирового из-за низкого спроса на продукт ввиду отсутствия политики по стимулированию расширения его использования и дороговизны в сравнении с ископаемым топливом. Несмотря на это, 4 декабря 2018 года Президент России Владимир Путин подписал закон о регулировании производства и оборота биоэтанола, используемого в качестве топлива. Изменения регламентируют производство и применение топливного биоэтанола, открывая тем самым новые возможности для российского бизнеса [19].

Использование биоэтанола в качестве топлива имеет ряд преимуществ. Во-первых, биоэтанол является возобновляемым источником энергии, что снижает зависимость от ископаемого топлива и способствует устойчивому развитию. Во-вторых, при сгорании биоэтанола выделяется меньше парниковых газов, чем при сгорании бензина, что способствует снижению негативного воздействия на климат. В-третьих, добавление биоэтанола в бензин повышает октановое число топлива, что улучшает работу двигателя и снижает выбросы вредных веществ. В отличие от ископаемого топлива, биоэтанол производится из биомассы, которая в процессе роста поглощает углекислый газ из атмосферы. Таким образом, при сгорании биоэтанола выделяется углекислый газ, который ранее был поглощен растениями, что создает замкнутый углеродный цикл. Однако стоит отметить, что реальное снижение выбросов зависит от способа производства биоэтанола, используемого сырья и энергозатрат на каждом этапе процесса.

Вторым важным аспектом является энергетическая безопасность. Производство биоэтанола внутри страны позволяет снизить зависимость от импорта нефти и других ископаемых ресурсов. Это особенно актуально для стран, не обладающих собственными запасами нефти.

Для эффективного получения биоэтанола сырьё должно обладать высоким содержанием ферментируемых углеводов, таких как сахароза, глюкоза, крахмал или целлюлоза. Важно, чтобы в сырьё было минимальное количество примесей, так как

они снижают выход продукта и усложняют технологический процесс. Например, лигнин, присутствующий в целлюлозном сырьё, затрудняет гидролиз, а высокая влажность увеличивает энергозатраты на переработку. Кроме того, сырьё должно быть доступным и дешёвым, чтобы обеспечить экономическую целесообразность производства, а также обладать хорошей устойчивостью к хранению, предотвращая порчу до момента переработки.

### Материалы и методы исследований

Основу данного исследования составил комплексный аналитический обзор научной литературы, отраслевых отчетов и статистических данных, посвященных производству биоэтанола. Методология работы включала несколько взаимосвязанных этапов. Первым этапом стал историко-технологический анализ, направленный на выявление предпосылок и закономерностей развития производства биоэтанола. Вторым ключевой этап заключался в сравнительном анализе сырьевой базы. Была проведена систематизация всего спектра сырья по трем основным категориям: сахаросодержащее, крахмалсодержащее и лигноцеллюлозное. Для каждого типа сырья анализировались технологические схемы переработки, включая этапы подготовки, гидролиза, ферментации и дистилляции, а также оценивались их преимущества и ограничения.

Третьим этапом выступил сравнительно-географический анализ, в рамках которого был изучен мировой опыт лидеров рынка. Особое внимание уделялось влиянию государственной политики, экологических нормативов и сложившейся сельскохозяйственной инфраструктуры на выбор доминирующего типа сырья и технологий в каждом регионе. На фоне мировых тенденций был оценен потенциал Российской Федерации, для чего проанализированы объемы производства зерна, сахарной свеклы и образование отходов агропромышленного комплекса.

Для объективной оценки эффективности различных видов сырья был применен количественный анализ. На основе данных научных публикаций и отраслевых отчетов были сформированы сравнительные таблицы, включающие такие показатели, как средняя мировая урожайность (кг/га в год), содержание гидролизуемых углеводов (%) и потенциальный выход биоэтанола (л/кг сырья или л/га в год). Этот подход позволил провести сопоставимую оценку экономической и технологической целесообразности использования рассмотренных видов биомассы.

### Результаты и обсуждения

*Сахаросодержащее сырьё.* Сахаросодержащее

сырьё является наиболее удобным для производства биоэтанола, так как содержит ферментируемые сахара (сахарозу, глюкозу, фруктозу) в чистом виде. Наиболее популярными видами сырья, содержащими сахарозу, являются сахарный тростник, сахарная свёкла, меласса, сладкое сорго.

Производственный цикл начинается с подготовки сырья, которое варьируется в зависимости от его вида. Для сахарного тростника это измельчение стеблей с целью извлечения сока, сахарная свёкла подвергается нарезке и диффузионной экстракции сахаров, а меласса – побочный продукт сахарного производства – требует лишь разбавления водой до концентрации 15-20% сахаров перед дальнейшей переработкой. Полученный в процессе предварительной обработки сироп проходит обязательную стадию очистки, включающую известкование для нейтрализации кислот, осаждение примесей и последующую фильтрацию. Очистка позволяет удалить органические кислоты, белки и минеральные вещества.

Следующим этапом является ферментация очищенного сока при pH 4,5-5,0 и температуре 30-32°C с использованием дрожжей сахаромикетов (*Saccharomyces cerevisiae*) [20]. Этот биологический процесс, длящийся 18-24 часа, включает гидролиз сахарозы до глюкозы и фруктозы с последующим их преобразованием в этанол и углекислый газ. В результате получается бражка с содержанием этанола 8-12% об., которая затем подвергается дистилляции с получением спирта-сырца (85-90% об.) и последующей ректификации до 96% об. Для топливного применения проводится дополнительная дегидратация до достижения концентрации 99,5+%.

Для производства биоэтанола наиболее важным сырьём, содержащим сахарозу, несомненно, являются сахарный тростник и сахарная свёкла. Две трети мирового производства сахара приходится на тростник, а одна треть – на свёклу [21]. Потен-

циальная урожайность сахарного тростника может превышать 100 тонн сухого вещества с гектара в год. Биотопливо из сахарного тростника можно производить в больших объёмах не только из его растворимого сахара, но и из основного отхода производства сахарного тростника - жмыха.

Традиционным сахаросодержащим сырьём для России является сахарная свёкла. Научной группой изучались гибриды зарубежной селекции сахарной свёклы, обеспечивающие валовой сбор очищенного сахара на уровне 10,846-10,973 т/га [22]. Современные исследовательские работы так же рассматривают возможность использования в качестве сырья свекловичный жом. Тем самым получение биоэтанола из такого сырья переводит его в разряд второго поколения [23, 24].

В качестве сахаросодержащего сырья так же рассматривались сахарное сорго (*Sorghum bicolor* L) и топинамбур. Сорго – высокопродуктивный, засухоустойчивый вид, в стеблях которого содержится много сахарозы, зёрна богаты крахмалом, а в листьях и жмыхе много целлюлозы [25, 26]. Клубни топинамбура богаты инулином (полимером фруктозы), который может быть использован для получения сиропа как в пищевой промышленности, так и при производстве этанола [27, 28].



Меласса, является побочным продуктом при производстве сахара (свеклосахарная, сахаротростниковая) так же считается сырьём для производства биоэтанола. Сообщается что наиболее стабильным сырьём для спиртовой промышленности является свеклосахарная (СМ). Не смотря на высокое содержание сахаров (до 45%) в мелассе присутствуют вредные примеси, возникающие под действием высоких температур. Присутствие карамелей и меланоидинов затрудняет сбраживание мелассного сусла, повышенное содержание диоксида серы и летучих кислот угнетает рост дрожжей что требует тщательного контроля [29].

Таблица 2

Содержание сахаров в различных видах сырья.


Table 2

Sugar content in different types of raw materials.

Сырьё		Содержание сахаров
Сахарный тростник		12-20% [30]
Сахарная свёкла		16-20% [31]



Продолжение таблицы 2  
Continuation of Table 2

Меласса		45-55%
Сладкое сорго		14-18%

Ключевыми преимуществами использования сахаросодержащего сырья являются упрощённая технологическая схема (отсутствие стадии осахаривания), высокая скорость ферментации, большой выход конечного продукта с единицы сырья и сниженные энергозатраты на переработку по сравнению с крахмалосодержащими и целлюлозными аналогами. Однако существуют и определённые проблемы, включая сезонность поставок сырья (особенно актуальную для сахарной свёклы), конкуренцию с пищевой промышленностью за сырьевые ресурсы и пахотные земли.

**Крахмалосодержащее сырьё.** На сегодняшний день, для производства этанола из крахмалосодержащего сырья применяют в основном зерновые культуры, клубни или клубнеплоды, такие как маниока. Крахмал – это биополимер, сложенный из молекул глюкозы. Для получения спирта из крахмала, его углеводные цепочки необходимо расщепить с получением глюкозного сиропа, который затем можно преобразовать с помощью дрожжей. Для эффективного гидролиза необходим предварительный процесс, называемый клейстеризацией. Во время этого предварительного процесса гранулы крахмала набухают, что приводит к разрыву водородных связей. В процессе расщепления крахмала обычно применяют ферменты типа амилаза. После подготовительного этапа раствор глюкозы можно ферментировать в этанол при темпе-

ратуре около 35°C, в присутствии дрожжей (обычно *Saccharomyces cerevisiae*) (рис. 2).

Основными зерновыми культурами для производства биоэтанола считаются кукуруза, пшеница, ячмень, рожь. Кукуруза является основным сырьем в Соединенных Штатах, а кукурузная ботва – самый распространённый сельскохозяйственный отход в Соединённых Штатах. В исследовании, проведенном Министерством сельского хозяйства США и Министерством энергетики США в 2005 году было подсчитано, что к 2030 году можно будет собрать от 170 до 256 миллионов тонн кукурузной муки, которые потенциально могут быть использованы для производства 54,9-82,5 миллиарда литров биоэтанола [32, 33].

Пшеница ценная и хорошо распространенная сельскохозяйственная культура. Имеет широкое распространения и готовую инфраструктуру для производства биоэтанола в России. Сдерживающим фактором является высокий спрос на данную культуру в пищевой промышленности. В сравнении ячмень не имеет такого большого спроса в качестве пищевого сырья и является засухоустойчивой и адаптируемой культурой. Озимая рожь (*Secale cereale* L) – злаковая культура с высоким содержанием глюкана и ксилана (40,8% и 22,3%) но данная культура сильно зависит от наличия азота в почве.

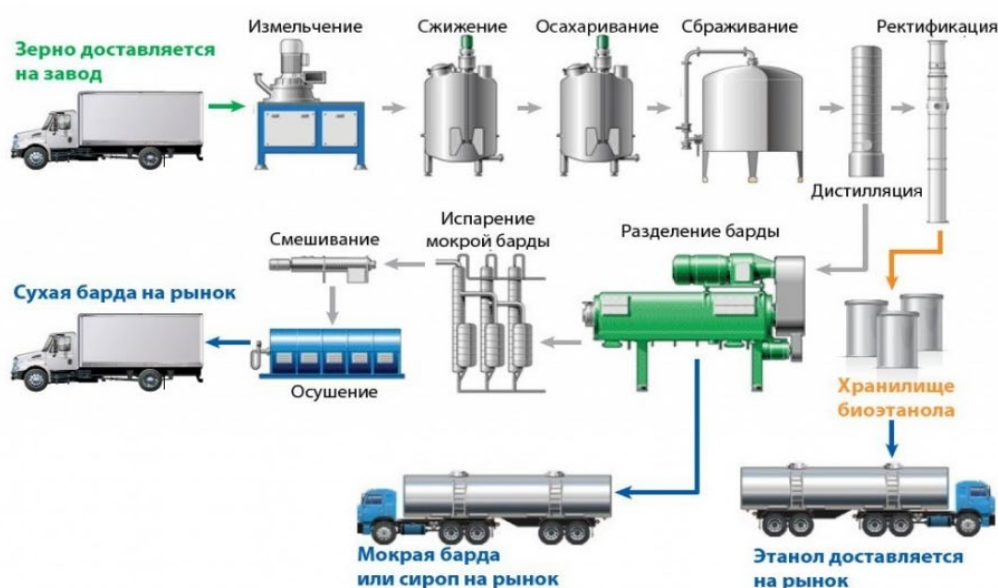


Рис. 2. Схема производства биоэтанола из зерна [34].  
Fig. 2. Scheme for producing bioethanol from grain [34].

Маниока (*manihoc esculenta*) – клубнеплод с высоким содержанием крахмала, произрастающий в тропических странах. Выход этанола эквивалентен выходу из зерновых культур. Является потенциальной культурой для производства биоэтанола, однако, сообщается о высоких эксплуатационных расходах на переработку. Современные исследования часто направлены на оптимизацию производства с использованием новых ферментов [35].

Среди основных веществ клубней картофеля крахмал занимает основную часть. Он составляет 70-80 % сухой массы клубня, или 95-99 % всего количества накапливаемых картофелем углеводов [36]. Современные исследования обосновывают использование картофеля для производства биоэтанола. И разрабатывают различные технологии и схемы переработки картофеля в биоэтанол [37] [38].

Преимущества переработки крахмального сырья включают высокий выход этанола (до 400-450 литров из тонны кукурузы), отработанные технологии и доступность. Однако есть и недостатки, такие как конкуренция с пищевой промышленностью, необходимость предварительного гидролиза крахмала и образование побочных продуктов (барды, диоксида углерода).

**Непищевое лигноцеллюлозное сырье.** К данному виду сырья относятся различные виды растительных отходов и специально выращиваемые энергетические культуры. Основными источниками лигноцеллюлозы являются отходы сельского хозяйства (солома злаковых, ботва сахарной свёклы,

подсолнечная лузга), лесные отходы (опилки, щепа, кора), а также быстрорастущие энергетические культуры типа мискантуса, тополя и свитчграсса. Химический состав лигноцеллюлозного сырья включает три основных компонента: целлюлозу (30-50%), полимер глюкозы; гемицеллюлозу (15-30%) - смесь различных сахаров, включая ксилозу и арабинозу; и лигнин (15-30%) – ароматический полимер, являющийся нежелательным компонентом при производстве биоэтанола.

Процесс переработки лигноцеллюлозы в биоэтанол включает несколько ключевых этапов. Первым является предварительная обработка сырья, включающая механическое измельчение, воздействие высоких температур и давления и химическое разложение (кислотный или щелочной гидролиз). Эта стадия необходима для расщепления сложной структуры полисахарида целлюлозы до моносахаридов. Полученные сахара затем сбраживаются в этанол с помощью дрожжей или бактерий.

Основное преимущество лигноцеллюлозного сырья заключается в его доступности и отсутствии конкуренции с пищевыми ресурсами, что делает его экологически предпочтительным вариантом для производства биоэтанола второго поколения. Кроме того, использование сельскохозяйственных и лесных отходов позволяет решить проблему их утилизации. Однако переработка лигноцеллюлозной биомассы сопряжена с более сложной технологической цепочкой, высокой стоимостью ферментов для гидролиза, образование побочных про-



дуктов (таких как фурфурол и гидроксиметилфурфурол), которые могут ингибировать процесс ферментации, а также относительно низкий выход этанола по сравнению с традиционными крахмальными и сахарными культурами.

Перспективы развития этого направления связаны с совершенствованием технологий предварительной обработки, созданием более эффективных и дешёвых ферментных комплексов, а также разработкой микроорганизмов, способных одновременно расщеплять целлюлозу и сбраживать полученные сахара.

Важен поиск и выведение устойчивых энергетических культур способных к быстрому приросту биомассы. Одним из таких перспективных культур является Мискантус (*Miscanthus*).

Это многолетняя энергетическая культура отличается исключительно высокой продуктивностью – в благоприятных условиях урожайность сухой биомассы может достигать 15-25 тонн с гектара в год. Растение демонстрирует высокую скорость роста (до 3-4 метров за сезон), многолетний цикл развития (15-20 лет без необходимости пересадки), нетребовательность к качеству почв, устойчивость к болезням и вредителям. С суммарным содержанием целлюлозы и гемицеллюлозы

до 70% [39]. Низкое содержание лигнина (в сравнение с древесиной) облегчает процесс предварительной обработки сырья. Процесс переработки мискантуса в биоэтанол включает стандартные для лигноцеллюлозного сырья этапы. Отмечается увеличение выхода биоэтанола на 12-40% по сравнению с традиционными методами при предварительной обработке разбавленной азотной кислотой. [40]. После азотнокислотной обработки биомассы мискантуса полученные варочные растворы можно использовать в качестве лигногуминовых удобрений. Кроме того, гидролизаты целлюлозы мискантуса служат качественной питательной средой для биотехнологических процессов, таких как производство бактериальной целлюлозы и выделение микробных ферментов [41].

Выращивание мискантуса для биоэтанола обладает рядом преимуществ, заключающихся в возможности использования маргинальных земель, объёмное поглощение углекислого газа в процессе роста, низкие требования к уходу. Ограничением развития являются высокие первоначальные затраты на закладку плантаций и необходимость специализированной уборочной техники.

Таблица 3

Выход этанола из основных видов сырья [42].

Table 3

Ethanol yield from the main raw materials [42].

	Урожайность, т/га	Содержание углеводов, %	Выход спирта, л/кг
Сахарный тростник	60-70	21	0,123
Сахарная свекла	40-80	17,5	0,082-0,12
Пшеница	3-5	59,5	0,4-0,43
Кукуруза зерно	5-7	43,48	0,4-0,45
Картофель	30-50	16,3	0,11-0,18
Мискантус	10-15	60-70	0,19-0,25
Сахарное сорго	40-120	65-75%	0,1-0,2
Древесина (щепа)	11-25	70-75	0,2-0,25

### Выводы

Производство биоэтанола в значительной степени определяется агроклиматическими особенностями региона. Так, к примеру, в Северной Америке и Европе доминирует использование крахмалсодержащего сырья (кукуруза, пшеница) вследствие невозможности масштабного выращивания сахарного тростника из-за температурного режима и сложившейся сельскохозяйственной инфраструктуры (зерновой сектор исторически развит). В то же время тропические и субтропические регионы (Бразилия, Индия, Юго-Восточная Азия) ориентированы на сахаросодержащее сырьё (сахарный тростник, сахарное сорго), обеспечиваю-

щее более высокий выход этанола с учётом значительно большей урожайности.

Лигноцеллюлозные материалы (мискантус, солома, древесные отходы) рассматриваются как основа для этанола второго поколения благодаря высокой доступности, отсутствию конкуренции с пищевыми культурами, низкой себестоимости сырья, потенциалу для замкнутого цикла (отходы сельского хозяйства и лесопереработки). Но есть технологические сложности, связанные с необходимостью предварительной обработки (гидролиз целлюлозы и гемицеллюлозы). Этанол второго поколения – перспективное направление, но тре-

бует государственной поддержки для масштабирования технологий.

В целом экономическая целесообразность производства биоэтанола должна учитывать не только выход этанола, но и затраты на логистику и переработку и экологический эффект.

Россия, один из ведущих мировых экспортеров зерна (около 60 млн тонн в год) и входит в пятерку лидеров по производству сахарной свеклы (40–45 млн тонн сырья ежегодно) что говорит о большом потенциале для производства биоэтанола первого поколения. Еще большим потенциалом Россия об-

ладает в вопросе производства биоэтанола второго поколения так как вырабатывает огромное количество отходов сельского и лесного хозяйства. Помимо этого, развитая нефтехимическая отрасль имеет готовую инфраструктуру для интегрирования биоэтанола при наличии государственной поддержки. Ключевым условием для превращения этого потенциала в реальность заключаются в принятии закона о биотопливе, закрепляющих налоговые льготы, субсидии и другие меры поддержки, стимулирующие производство и потребление биоэтанола.

### Финансирование

Публикация осуществляется в рамках гранта Правительства Республики Татарстан «Алгарыш» 2024 года в категории «Проектные группы» от 09.08.2024 № под-1413/24

### Список источников

1. Петухова М.С., Пхунсомбат С. Анализ тенденций развития рынка биотоплива в контексте сотрудничества России и стран юго-восточной Азии // Инновации и продовольственная безопасность. 2025. № 1. С. 118 – 129.
2. Grandis A. et al. Scientific research on bioethanol in Brazil: history and prospects for sustainable biofuel // Sustainability. 2024. Т. 16. № 10. С. 4167.
3. Awodi P.S., Ogbonna J.C., Nwagu T.N. Bioconversion of mango (*Mangifera indica*) seed kernel starch into bioethanol using various fermentation techniques // Heliyon. 2022. Vol. 8. № 6
4. Ahmednooh M., Menezes B. Ethanol Content Increase in Gasoline Toward Sustainable Liquid Fuels Worldwide: Impacts on Manufacturing and Supply Chains via Discrete-Event Scenarios // Sustainability. 2025. Vol. 17. № 11. P. 4884.
5. Ghosh N. et al. Ethical issues pertaining to sustainable biodiesel synthesis over trans/esterification process // Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2023. Vol. 33. P. 101123.
6. Pecho P. et al. Possibilities of Using Bioethanol as an Alternative Fuel in the Conditions of Jet Engines // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 59. P. 183 – 192. (Scopus)
7. Ethanol Blending Mandate [Электронный ресурс] // International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org/policies/2021-ethanol-blending-mandate> (дата обращения: 09.01.2025)
8. Warguła Ł. et al. Critical Concerns Regarding the Transition from E5 to E10 Gasoline in the European Union, Particularly in Poland in 2024 – A Theoretical and Experimental Analysis of the Problem of Controlling the Air–Fuel Mixture Composition (AFR) and the  $\lambda$  Coefficient // Energies. 2025. Vol. 18. № 4. P. 852.
9. Hans M. et al. Production of first-and second-generation ethanol for use in alcohol-based hand sanitizers and disinfectants in India // Biomass conversion and biorefinery. 2023. Vol. 13. № 9. P. 7423 – 7440.
10. Rahman M.H., Bhoi P.R. An overview of non-biodegradable bioplastics // Journal of cleaner production. 2021. Vol. 294. P. 126218.
11. Bustamante-Silveira M. et al. Carbon footprint of four bioethanol cropping systems in a temperate region // Biofuels. 2024. Vol. 15. № 8. P. 1029 – 1039.
12. Benavides P. T. et al. Cradle-to-Gate greenhouse gas emissions of the production of ethylene from US Corn ethanol and comparison to fossil-derived ethylene production // Bioresource Technology. 2025. P. 132565.
13. RES in Transport Barometer 2022 [Электронный ресурс] // EurObserv'ER. 2022. URL: <https://www.eurobserv-er.org/res-in-transport-barometer-2022> (дата обращения: 09.01.2025)
14. Головин М. С. Производство биоэтанола второго поколения в Российской Федерации на фоне мировых тенденций // Экономика и управление. 2022. Vol. 28. № 11. P. 1133 – 1145.
15. Chandrasekhar T. et al. Algae: the reservoir of bioethanol // Fermentation. 2023. Vol. 9. № 8. P. 712.
16. Adams J.M., Gallagher J.A., Donnison I.S. Fermentation study on *Saccharina latissima* for bioethanol production considering variable pre-treatments // Journal of applied Phycology. 2009. Т. 21. С. 569-574.
17. MME discute transição energética na aviação [Электронный ресурс] // Ministério de Minas e Energia (Brasil). 2023. URL: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-discute-transicao-energetica-na-aviacao> (дата обращения: 09.01.2025)

18. Fit for 55: соглашение о более амбициозном сокращении выбросов в авиации [Электронный ресурс] // Европейский парламент. 2022. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> (дата обращения: 09.01.2025)
19. Юрова Я. Автомобили зернового откорма [Электронный ресурс] // Коммерсантъ. 2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6744832> (дата обращения: 09.01.2025)
20. Набиева Ф.С., Кудратова З.Э., Кувандинов Г.Б. Роль *Saccharomyces cerevisiae* в развитии современной биотехнологии // Достижения науки и образования. 2021. № 5 (77). С. 57 – 60.
21. Global Sugar Market Report – May 2023 [Электронный ресурс] // Ragus. 2023. URL: <https://www.ragus.co.uk/global-sugar-market-report-may-2023/> (дата обращения: 09.01.2025)
22. Гулидова В.А. Технологические качества гибридов сахарной свеклы фирмы KWS в условиях северо-запада ЦЧР // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2021. № 1 (64). С. 15.
23. Федулова Т.П., Хуссейн А.С., Налбандян А.А. Перспективная стратегия применения молекулярных маркеров в селекции *Beta vulgaris* L. (обзор) // Аграрный вестник Урала. 2023. № 02 (231). С. 71 – 82. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-231-02-71-82
24. Козеняшева А.А. Методы обработки свекловичного жома для получения биоэтанола // Молодёжь для устойчивого развития регионов: Материалы научно-практической конференции студенческих научных объединений, Тамбов, 21 сентября 2023 года. Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2023. С. 174 – 177.
25. Wirawan S.S. et al. Unlocking Indonesia's sweet sorghum potential: A techno-economic analysis of small-scale integrated sorghum-based fuel grade bioethanol industry // Bioresource Technology Reports. 2024. Vol. 25. P. 101706.
26. Романюкин А.Е., Ковтунова Н.А. Изучение перспективных сортов сорго сахарного // Аграрный вестник Урала. 2023. № 7 (236). С. 22 – 31.
27. Медриш М. Э. и др. Анализ технологий переработки топинамбура в дистилляты и алкогольные напитки на их основе // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2023. № 12 (201). С. 260 – 266.
28. Горпиниченко С.И., Ковтунов В.В. Перспективы производства биоэтанола из сорго // Зерновое хозяйство России. 2009. № 4. С. 26 – 34.
29. Давидович Е.А. Влияние качественных показателей мелассы на выход спирта // Пищевая и перерабатывающая промышленность. Реферативный журнал. 2010. № 4. С. 1026.
30. Noorghadami Z. et al. Investigation on the effect of drying-off and harvest date management on quantitative and qualitative yield of sugarcane // Sugar Tech. 2022. Vol. 24. № 6. P. 1699 – 1709.
31. Некрасова Т.П., Ерёмченко К.С. Формирование урожайности и выход сахара в корнеплодах гибридов сахарной свеклы // А25 Аграрная наука на Севере – сельскому хозяйству: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием) / отв. ред.: А.А. Юдин, Т.В. Тарабукина, Т.В. Косолапова. Сыктывкар 2025. С. 64 – 68/
32. Бацазов А.Р., Алиев К.Р. Исследования влияния комплекса ферментных препаратов на процесс осахаривания при производстве спирта из кукурузы // Технические и Естественные науки: сборник статей международной научной конференции, Санкт-Петербург, 2022. С. 60 – 63.
33. Joyia M.A.K. et al. Trends and advances in sustainable bioethanol production technologies from first to fourth generation: a critical review // Energy Conversion and Management. 2024. Т. 321. С. 119037.
34. Биоэтанол: перспективы производства и использования в России и мире [Электронный ресурс] // Группа Миранда. URL: [https://mirandagroup.ru/?p=9677\\_bioetanol](https://mirandagroup.ru/?p=9677_bioetanol) (дата обращения: 09.06.2025)
35. Rewlay-Ngoen C. et al. Evaluation of the environmental performance of bioethanol from cassava pulp using life cycle assessment // Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124741.
36. Коршунов А.В. и др. Управление содержанием крахмала в картофеле // Аграрный вестник Урала. 2011. № 2. С. 47 – 50.
37. Бряков В.К. и др. Технология получения концентрированного корма и технического спирта на основе картофеля // Техника и оборудование для села. 2014. № 1. С. 14 – 16.
38. Гельфанд Е.Д., Емельянова М.В. Патент № 2451080 С1 Российская Федерация, МПК C12P 7/06. Способ подготовки картофеля к переработке на спирт: № 2010144588/10; заявл. 29.10.2010; опубл. 20.05.2012 / заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Северный (Арктический) федеральный университет" (С(А)ФУ).

39. Ковернинский И.Н., Дубовый В.К., Гедьо В.М. и др. Целлюлозно-волокнистый материал для бумаги из мискантуса // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 2022. С. 189 – 191.
40. Скиба Е.А. Трансформация мискантуса гигантского в продукты биотехнологического синтеза: расчет материальных потоков // ВIOAsia-Altai. 2024. Т. 4. № 1. С. 500 – 504.
41. Шавыркина Н.А., Гисматулина Ю.А., Будаева В.В. Перспективы химической и биотехнологической переработки мискантуса // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. № 3 (42). С. 383 – 393.
42. Baras J.K., Gaćeša S.B., Pejin D.J. Ethanol is a strategic raw material // Hemijska industrija. 2002. Т. 56. № 3. С. 89 – 104.

### References

1. Petukhova M.S., Phunsombat S. Analysis of biofuel market development trends in the context of cooperation between Russia and Southeast Asian countries. *Innovations and Food Security*. 2025. No. 1. P. 118–129.
2. Grandis A. et al. Scientific research on bioethanol in Brazil: history and prospects for sustainable biofuel. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. No. 10. P. 4167.
3. Awodi P.S., Ogbonna J.C., Nwagu T.N. Bioconversion of mango (*Mangifera indica*) seed kernel starch into bioethanol using various fermentation techniques. *Heliyon*. 2022. Vol. 8. No. 6
4. Ahmednooh M., Menezes B. Ethanol Content Increase in Gasoline Toward Sustainable Liquid Fuels Worldwide: Impacts on Manufacturing and Supply Chains via Discrete-Event Scenarios. *Sustainability*. 2025. Vol. 17. No. 11. P. 4884.
5. Ghosh N. et al. Ethical issues pertaining to sustainable biodiesel synthesis over trans/esterification process. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023. Vol. 33. P. 101123.
6. Pecho P. et al. Possibilities of Using Bioethanol as an Alternative Fuel in the Conditions of Jet Engines. *Transportation Research Procedia*. 2021. Vol. 59. P. 183 – 192. (Scopus)
7. Ethanol Blending Mandate [Electronic resource]. International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org/policies/2021-ethanol-blending-mandate> (date of access: 01.09.2025)
8. Warguła Ł. et al. Critical Concerns Regarding the Transition from E5 to E10 Gasoline in the European Union, Particularly in Poland in 2024 – A Theoretical and Experimental Analysis of the Problem of Controlling the Air–Fuel Mixture Composition (AFR) and the  $\lambda$  Coefficient. *Energies*. 2025. Vol. 18. No. 4. P. 852.
9. Hans M. et al. Production of first-and second-generation ethanol for use in alcohol-based hand sanitizers and disinfectants in India. Biomass conversion and biorefinery. 2023. Vol. 13. No. 9. P. 7423 – 7440.
10. Rahman M.H., Bhoi P.R. An overview of non-biodegradable bioplastics. *Journal of cleaner production*. 2021. Vol. 294. P. 126218.
11. Bustamante-Silveira M. et al. Carbon footprint of four bioethanol cropping systems in a temperate region. *Biofuels*. 2024. Vol. 15. No. 8. P. 1029 – 1039.
12. Benavides P. T. et al. Cradle-to-Gate greenhouse gas emissions of the production of ethylene from US Corn ethanol and comparison to fossil-derived ethylene production. *Bioresource Technology*. 2025. P. 132565.
13. RES in Transport Barometer 2022 [Electronic resource]. EurObserv'ER. 2022. URL: <https://www.eurobserv-er.org/res-in-transport-barometer-2022> (date of access: 09.01.2025)
14. Golovin M.S. Second-generation bioethanol production in the Russian Federation against the background of global trends. *Economy and Management*. 2022. Vol. 28. No. 11. P. 1133 – 1145.
15. Chandrasekhar T. et al. Algae: the reservoir of bioethanol. *Fermentation*. 2023. Vol. 9. No. 8. P. 712.
16. Adams J.M., Gallagher J.A., Donnison I.S. Fermentation study on *Saccharina latissima* for bioethanol production considering variable pre-treatments. *Journal of applied Phycology*. 2009. T. 21. P. 569 – 574.
17. MME discute transição energética na aviação [Electronic resource]. Ministério de Minas e Energia (Brasil). 2023. URL: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-discute-transicao-energetica-na-aviacao> (date of access: 09.01.2025)
18. Fit for 55: agreement on more ambitious emission reductions in aviation [Electronic resource]. European Parliament. 2022. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> (date of access: 09.01.2025)
19. Yurova Ya. Grain-fed vehicles [Electronic resource]. Kommersant. 2024. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6744832> (date accessed: 09.01.2025)
20. Nabieva F.S., Kudratova Z.E., Kuvandikov G.B. The role of *Saccharomyces cerevisiae* in the development of modern biotechnology. *Achievements of science and education*. 2021. No. 5 (77). P. 57 – 60.

21. Global Sugar Market Report – May 2023 [Electronic resource]. Ragus. 2023. URL: <https://www.ragus.co.uk/global-sugar-market-report-may-2023/> (date of access: 09.01.2025)
22. Gulidova V.A. Technological qualities of KWS sugar beet hybrids in the conditions of the northwest of the Central Black Earth Region. Bulletin of Michurinsk State Agrarian University. 2021. No. 1 (64). P. 15.
23. Fedulova T.P., Khussein A.S., Nalbandyan A.A. Promising strategy for the use of molecular markers in the breeding of *Beta vulgaris* L. (review). Agrarian Bulletin of the Urals. 2023. No. 02 (231). P. 71 – 82. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-231-02-71-82
24. Kozenyasheva A.A. Methods of processing sugar beet pulp for bioethanol production. Youth for sustainable development of regions: Proceedings of the scientific and practical conference of student scientific associations, Tambov, September 21, 2023. Tambov: Tambov State Technical University, 2023. P. 174 – 177.
25. Wirawan S.S. et al. Unlocking Indonesia's sweet sorghum potential: A techno-economic analysis of small-scale integrated sorghum-based fuel grade bioethanol industry. Bioresource Technology Reports. 2024. Vol. 25. P. 101706.
26. Romanyukin A.E., Kovtunova N.A. Study of promising varieties of sweet sorghum. Agrarian Bulletin of the Urals. 2023. No. 7 (236). P. 22 – 31.
27. Medrish M.E. et al. Analysis of technologies for processing Jerusalem artichoke into distillates and alcoholic beverages based on them. Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University. 2023. No. 12 (201). P. 260 – 266.
28. Gorpinichenko S.I., Kovtunov V.V. Prospects for the production of bioethanol from sorghum. Grain Economy of Russia. 2009. No. 4. P. 26 – 34.
29. Davidovich E.A. Influence of qualitative indicators of molasses on the yield of alcohol. Food and processing industry. Abstract journal. 2010. No. 4. P. 1026.
30. Noorghadami Z. et al. Investigation on the effect of drying-off and harvest date management on quantitative and qualitative yield of sugarcane. Sugar Tech. 2022. Vol. 24. No. 6. P. 1699 – 1709.
31. Nekrasova T.P., Eremenko K.S. Formation of yield and sugar yield in root crops of sugar beet hybrids. A25 Agrarian science in the North – for agriculture: Proceedings of the VII All-Russian scientific and practical conference (with international participation). eds.: A.A. Yudin, T.V. Tarabukina, T.V. Kosolapova. Syktyvkar 2025. P. 64 – 68.
32. Batsazov A.R., Aliev K.R. Studies of the Influence of a Complex of Enzyme Preparations on the Saccharification Process in the Production of Alcohol from Corn. Technical and Natural Sciences: Collection of Articles from the International Scientific Conference, St. Petersburg, 2022. P. 60 – 63.
33. Joyia M.A.K. et al. Trends and Advances in Sustainable Bioethanol Production Technologies from First to Fourth Generation: a Critical Review. Energy Conversion and Management. 2024. Vol. 321. P. 119037.
34. Bioethanol: Prospects for Production and Use in Russia and the World [Electronic Resource]. Miranda Group. URL: [https://mirandagroup.ru/?p=9677\\_bioetanol](https://mirandagroup.ru/?p=9677_bioetanol) (date of access: 06.09.2025)
35. Rewlay-Ngoen C. et al. Evaluation of the environmental performance of bioethanol from cassava pulp using life cycle assessment. Journal of Cleaner Production. 2021. Vol. 284. P. 124741.
36. Korshunov A.V. et al. Managing starch content in potatoes. Agrarian Bulletin of the Urals. 2011. No. 2. P. 47 – 50.
37. Bryakov V.K. et al. Technology for producing concentrated feed and industrial alcohol based on potatoes. Machinery and equipment for the village. 2014. No. 1. P. 14 – 16.
38. Gelfand E.D., Emelyanova M.V. Patent No. 2451080 C1 Russian Federation, IPC C12P 7/06. Method of preparing potatoes for processing into alcohol: No. 2010144588/10: declared 29.10.2010: published 20.05.2012. applicant Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Professional Education "Northern (Arctic) Federal University" (NAFU).
39. Koverninsky I.N., Dubovy V.K., Gedio V.M. et al. Cellulose-fiber material for paper from miscanthus. Forests of Russia: policy, industry, science, education: proceedings of the VII All-Russian scientific and technical conference, St. Petersburg, 2022. P. 189 – 191.
40. Skiba E.A. Transformation of giant miscanthus into biotechnological synthesis products: calculation of material flows. BIOAsia-Altai. 2024. Vol. 4. No. 1. P. 500 – 504.
41. Shavyrkina N.A., Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V. Prospects for Chemical and Biotechnological Processing of Miscanthus. News of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2022. Vol. 12. No. 3 (42). P. 383 – 393.
42. Baras J.K., Gaćeša S.B., Pejin D.J. Ethanol is a Strategic Raw Material. Hemijska industrija. 2002. Vol. 56. No. 3. P. 89 – 104.



***Информация об авторах***

Валеева А.Р., кандидат технических наук, доцент, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, 68, [a8695v@yandex.ru](mailto:a8695v@yandex.ru)

Хазиахмедова Р.М., старший преподаватель, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9278-816X>, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Республика Татарстан, Казань, ул. К. Маркса, 68, [rimmo4ka0694@gmail.com](mailto:rimmo4ka0694@gmail.com)

© Валеева А.Р., Хазиахмедова Р.М., 2025

***Information about the authors***

Valeeva A.R., PhD (Engineering), Associate Professor, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8656-7643>, Kazan National Research Technological University, Republic of Tatarstan, Kazan, 68 K. Marksa Street, Kazan, [a8695v@yandex.ru](mailto:a8695v@yandex.ru)

Khaziakhmedova R.M., Senior Lecturer, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9278-816X>, Kazan National Research Technological University, Republic of Tatarstan, Kazan, 68 K. Marksa Street, Kazan, [rimmo4ka0694@gmail.com](mailto:rimmo4ka0694@gmail.com)

© Valeeva A.R., Khaziakhmedova R.M., 2025