

**Казанский Федеральный Университет**  
**Кафедра высоковязких нефтей и природных битумов<sup>1</sup>**  
**Kazan Federal University,**  
**Department of high-viscosity oils and natural bitumen**  
**Российское газовое общество<sup>2</sup>**  
**Russian Gas Society**

**Синтетическое жидкое топливо, на основе возобновляемого сырья из  
лигноцеллюлозной биомассы**

**Synthetic liquid fuel based on renewable raw materials from lignocellulose  
biomass**

**Джамалов Зохид Зафарович, Djamalov Zohid Zafarovich<sup>a</sup>**

**Кемалов Руслан Алимович, Kemalov Ruslan Alimovich<sup>b</sup>**

**Кемалов Алим Фейзрахманович, Kemalov Alim Feizrahmanovich<sup>c</sup>**

аспирант кафедры высоковязких нефтей и природных битумов<sup>a</sup>

кандидат технических наук, доцент кафедры высоковязких нефтей и природных битумов,  
Член Экспертного совета РГО, и.о. руководителя группы «Водородная и альтернативная»,  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высоковязких нефтей и  
природных битумов

Казань, Россия

E-mail: z.djamalov@mail.ru, kemalov@mail.ru

**Аннотация:** Основными движущими силами развития рынка биотоплив являются нестабильность мировых цен на нефть, надежность энергоснабжения, глобальное потепление и создание новых возможностей для сельского хозяйства. Интерес к коммерческому производству биотоплива для транспорта возобновился в середине 1970-х годов, когда из сахарного тростника (Бразилия) и кукурузы (США) начали производить этанол с учетом требования о добавках в топливо, определяющее долю биотоплива, которое должно использоваться для транспортного топлива. В настоящее время более 50 стран приняли требования о добавках в топливо. Однако биотопливо все еще мало представлено в сравнение с ископаемым топливом. В этой главе будут обсуждаться достижения в производстве биотоплива первого, второго и третьего поколений, главным

образом этанола из сахара и крахмала, обычного биодизеля, биогаза и биометана, целлюлозного этанола, синтез-газа, биомасла путем пиролиза и гидротермального процесса, водорода, и концепция биопереработки.

**Ключевые слова:** биодизель, биотопливо, биогаз, биомасса, биомасло, этанол, водород

**Abstract:** The main driving forces behind the development of biofuels are the volatility of world oil prices, the reliability of energy supplies, global warming and the creation of new opportunities for agriculture. Interest in the commercial production of biofuels for transportation was revived in the mid-1970s when ethanol was produced from sugar cane (Brazil) and corn (USA), subject to a fuel additive requirement that determines the proportion of biofuels to be used for transportation fuels. More than 50 countries have now adopted fuel additive requirements. However, biofuels are still underrepresented in comparison to fossil fuels. This chapter will discuss advances in the production of first, second and third generation biofuels, mainly ethanol from sugar and starch, conventional biodiesel, biogas and biomethane, cellulosic ethanol, synthesis gas, biofuel by pyrolysis and hydrothermal process, hydrogen, and the concept of biorefinery

**Keywords:** biodiesel, biofuel, biogas, biomass, biofuel, ethanol, hydrogen

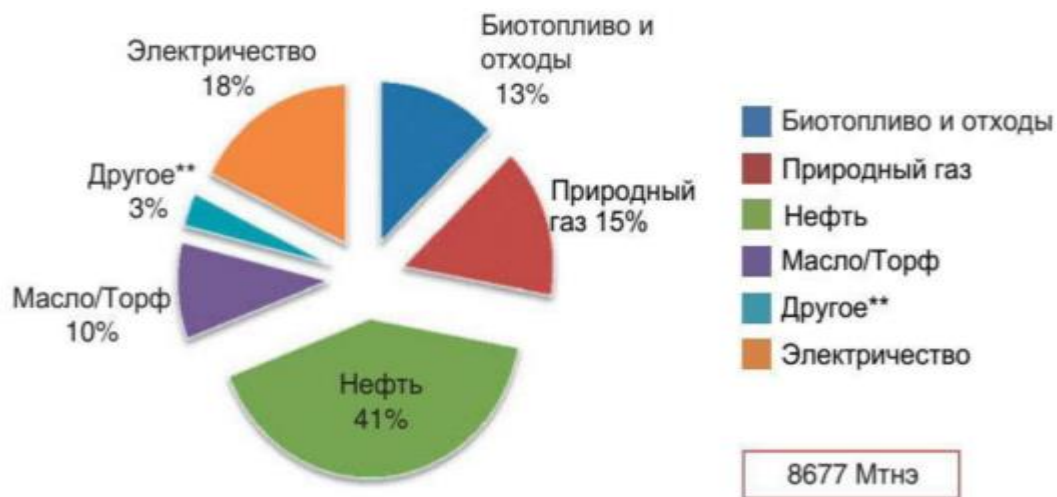
### **Введение (Introduction)**

Проблемы, связанные с нестабильностью мировых цен на нефть, безопасностью энергоснабжения, глобальным потеплением и созданием новых возможностей для сельского хозяйства, стимулируют поиск источников энергии, которые являются чистыми, устойчивыми и конкурентоспособными с ископаемым топливом. Это основные движущие силы развития биотоплива, которое стало одним из наиболее перспективных видов энергии для обеспечения устойчивой энергетической матрицы [1,2]. Биотопливо начали производить в конце 19-го века, когда биоэтанол был получен из кукурузы, а первый двигатель Rudolf Diesel работал на арахисовом масле. До 1940 г. биотопливо считалось жизнеспособным транспортным топливом, но падение цен на ископаемое топливо остановило их дальнейшее развитие. Интерес к коммерческому производству биотоплива для

транспорта вновь возрос в середине 1970-х годов, когда этанол начали производить из сахарного тростника в Бразилии, а затем из кукурузы в Соединенных Штатах. В большинстве регионов мира самый быстрый рост производства биотоплива произошел за последние 10 лет при поддержке амбициозной государственной политики.

Помимо вопросов энергетической безопасности и устойчивого сельского хозяйства, сокращение выбросов СС<sub>2</sub> в транспортном секторе стало особенно важной движущей силой для развития биотоплива. Одной из наиболее распространенных мер поддержки является требование о добавках, определяющий долю биотоплива, которое должно использоваться в автомобильном топливе, и часто сочетается с другими мерами, такими как налоговые льготы [3]. Более 50 стран приняли постановления или требования о добавках, и еще несколько стран объявили квоты на биотопливо на будущие годы [4, 5]. Поэтому биотопливо приобретает все большее значение среди альтернатив ископаемому топливу. Тем не менее, биотопливо все еще мало представлено по сравнению с ископаемым топливом (рис. 1). Их крупномасштабное производство в конечном итоге зависит от повышения производительности, чтобы смягчить любые негативные последствия, связанные с ними, такие как сокращение численности коренных лесов или рост цен на сельскохозяйственные товары в результате землепользования. В свете этого идет всемирная технологическая гонка по разработке биотоплива второго и третьего поколений, основные программы поддержки которого осуществляются Соединенными Штатами (США) и Европейским союзом (ЕС).

Биотопливо получают из возобновляемых источников биомассы. Преобразование солнечного света в химическую энергию является одним из наиболее важных процессов для поддержания жизни на планете. Процесс преобразования солнечной энергии в химическую энергию, ответственную за воспроизводство растений, включает потребление O<sub>2</sub> и производство CO<sub>2</sub> и растительных ресурсов. Термин «биомасса» используется для наименования растительных ресурсов, используемых для производства биоэнергии.



**Рисунок 1.** Процент источников энергии в 2010 году. Поматериалам МЭА [6].

Основными источниками биомассы являются леса, сельскохозяйственные культуры и отходы, полученные в результате агролесоводства и животноводства.

Биомасса классифицируется как современная или традиционная, в зависимости от ее происхождения и типа обработки. Традиционная биомасса связана с производством энергии при использовании ресурсов неустойчивого управления и методов, которые характеризуются низкой эффективностью и высоким уровнем выбросов загрязняющих веществ. Современная биомасса получается путем правильного управления, с использованием технологий, которые гарантируют высокую эффективность процессов производства и конверсии и обеспечивают получение высококачественного биотоплива, такого как этанол, биогаз и биомасло из растительных масел, лесоматериалов, промышленных и коммунальных отходов и т.д. [7].

Биомасса является одним из древнейших энергетических ресурсов, используемых человечеством. Хотя точных данных нет, по оценкам, одна треть населения мира зависит от традиционной биомассы в качестве основного источника энергии (дерево, сельское хозяйство, животноводство и лесное хозяйство, среди прочих источников), так что около 90% потребления биомассы - традиционная биомасса. В некоторых регионах Африки, Азии и Латинской Америки семьи используют традиционную биомассу для удовлетворения своих энергетических потребностей, главным образом для приготовления пищи. В этих случаях использование биомассы обычно неэффективно, что приводит к

обесцениванию природных ресурсов и наносит ущерб здоровью, людей, пользующихся устройствами для приготовления пищи. Качество энергоуслуг, предоставляемых этим типом применения, обычно низкое, и работы по сбору и транспортировке топлива являются трудоемкими. Эти работы обычно выполняются женщинами и детьми. Кроме того, производство топлива из традиционных источников биомассы может усугубить проблему обезлесения, увеличивая нагрузку на местную экосистему и чистые выбросы парниковых газов (ПГ). Несмотря на эти недостатки, миллиарды людей по-прежнему используют традиционные источники биомассы для удовлетворения своих энергетических потребностей, поскольку они более доступны и дешевле. Сухую биомассу легко получить и хранить, и ее использование имеет культурные корни во многих обществах. Более того, в отсутствие этой функции многим странам пришлось бы увеличить импорт энергии, а многим нуждающимся семьям пришлось бы тратить больше денег на приобретение других видов энергии [7].

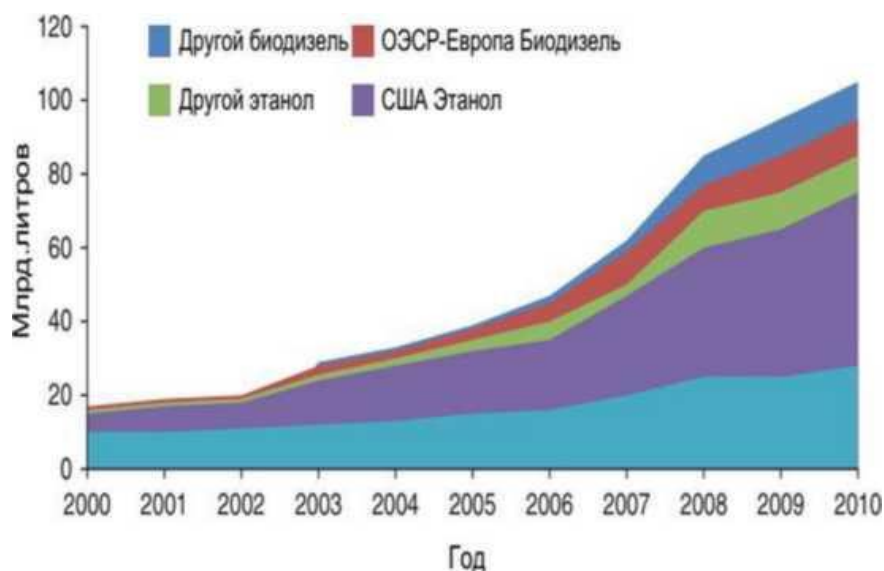
Биотопливо - энергоносители, произведенные из современной биомассы. Их преобразование происходит посредством физических, химических и/или биологических процессов. Производство жидкого биотоплива для замены нефти (особенно дизельного топлива и бензина) вызвало особый интерес и считается многообещающей альтернативой энергетическому рынку. Американский национальный план по биотопливу указывает на пять стратегических областей в цепочке производства биотоплива, у которых должны быть федеральные инвестиции: производство сырья; логистика распределения сырья; лучший процесс преобразования; системы распределения топлива; и технологии для эффективного использования топлива. Конгресс США в 2007 году принял «Стандарт на возобновляемое топливо» (СВТ) в рамках Закона об энергетической независимости и безопасности (ЗЭНБ). Этот закон направлен на сокращение потребления бензина на 20% к 2017 году. Это будет достигнуто за счет увеличения внутреннего производства биотоплива. Для реализации этого предложения необходимо ежегодно увеличить производство биотоплива на 35 млрд. галлонов.

Европа также стимулировала производство биотоплива. Общая

сельскохозяйственная политика (ОСП), пересмотренная в 2003 году, стимулирует фермеров, которые выбирают европейские виды для энергетических целей, таких как рапс и сахарная свекла. Новая политика предусматривает специальное вознаграждение в размере 45 фунтов стерлингов за гектар для производства биоэнергии, и в этих районах нельзя выращивать продовольственные культуры [8].

Мировое производство биотоплива достигло 105 млрд. литров в 2010 г., что представляет собой увеличение на 17% в сравнение с примерно 90 млрд. литрами в 2009 г. (Рисунок 2). Однако эта цифра значительно отстает от увеличения на 35 млрд. галлонов, предложенного ЗЭНБ для сокращения потребления бензина. Поэтому еще многое предстоит сделать для достижения цели и превращение биотоплива в рентабельную замену топлива из нефти.

Бразилия является вторым по величине производителем этанола в мире и вторым по величине производителем биотоплива в мире. Бразильская программа по алкоголю (этанолу) (ProAlcool) была начата в 1975 г. как политика, направленная на уменьшение зависимости страны от импорта нефти.



**Рисунок 2.** Мировое производство биотоплива в период 2000-2010 гг. По материалам МЭА (Международное энергетическое агентство) [9].

Она поощряла производство этанола из сахарного тростника, который сегодня является важной культурой для экономического развития Бразилии и замены бензина для транспорта. Сегодня около 50% бразильских самолетов

летают на двигателях с гибким выбором топлива: бензин, этанол или их смеси. Кроме того, сахарный тростник является источником остаточной биомассы (жмых), которая используется для выработки электроэнергии при сжигании, но которую также можно использовать в процессах второго поколения для производства биоэтанола [10].

По оценкам, в 2010 г. во всем мире было произведено 86 млрд. литров этанола и 19 млрд. литров биодизеля. Десять лет назад производство биотоплива не превысило 20 млрд. литров (рис. 2.2.) [9]. Однако, несмотря на все экологические преимущества, предоставляемые биотопливом, расширение их производства ограничено их высокой себестоимостью по сравнению с конкурентами: ископаемое топливо (дизель и бензин). Одним из основных факторов, делающих производство биотоплива первого поколения более дорогим, является стоимость сырья. У сырья для производства биотоплива, обычно высокая добавленная стоимость, такое как кукуруза и сахарный тростник, которые используются для производства биоэтанола и соя, которая используется для производства биодизеля. Таким образом, стоимость продукции обычно высока. Из-за этого, за исключением этанола из сахарного тростника, производимого в Бразилии, биотопливу по-прежнему требуются субсидии для производства [11].

В 2011 г., согласно прогнозам, биоэтанол превзойдет отрасль кормления животных как крупнейшего потребителя кукурузы в США, что поможет увеличить рентабельность производства и снизить потребность в субсидиях. Стандарт возобновляемого топлива (СВТ) Агентства по охране окружающей среды в США (АООС) обеспечивает гарантированный рынок в 50 млрд. литров в 2012 году, но отрасль почти достигла этой цели в 2010 г., предполагая, что только одно требование не поддержит существующий рынок. В связи с требованием производство этанола из кукурузы увеличится до 57 млрд. литров в 2015 г.

Бразильский этанол из сахарного тростника, вероятно, станет более распространенным в США, если американские субсидии и тарифы на этанол будут отменены. Биоэтанол из сахарного тростника дешевле и его эффективнее

производить, хотя есть опасения, что его производство может косвенно привести к вырубке леса. Бразилия планирует построить 100 новых сахарных заводов к 2019 г., увеличив мощность на 66%, чтобы увеличить производство и экспорт бразильского этанола в ближайшие годы.

Учитывая данный сценарий, в области биотоплива предстоит еще многое сделать для повышения экономической целесообразности. Технологические достижения в производстве и переработке биотоплива могут привести к появлению более конкурентоспособных видов топлива. Развитие химических и биологических наук, наряду с новыми культурами для производства энергии, новыми ферментами и искусственным моделированием биологических процессов (анаэробное сбраживание, ферментация и т.д.) может снизить их производство [12]. Поэтому в развитие этих технологий вкладываются большие средства. Целью данной работы является обзор некоторых самых последних достижений в производстве биотоплива.

## **Материалы и методы исследования**

### **Биотопливо первого поколения**

Биотопливо первого поколения получают из продуктов питания/кормов, таких как кукуруза, сахарный тростник [1] или растительное масло [2]. Переработка этих видов топлива хорошо изучена, в частности, для биоэтанола, поскольку он является наиболее широко используемым биотопливом [3]. Поскольку эти виды топлива производятся из сельскохозяйственных источников, они подвергаются серьезной критике, что ведет к дебатам касательно топлива и продуктов питания [4, 5]. Эти виды топлива составляют основную долю биотоплива, которое доступно на рынке сегодня.

### **Биотопливо второго поколения**

Биотопливо второго поколения получают из непищевых/пищевых источников, таких как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин из растений,



биодизель из водорослевых липидов и биомассы (таблица 1). Их производство ограничено на уровне лабораторий/опытных масштабов и экономически нецелесообразно [6]. Многие правительства не поощряют производство биотоплива первого поколения из сырья, поскольку оно сказывается на спросе продуктов питания. Это привело к разработке биотоплива второго поколения, которое не влияет на спрос на продукты питания [7]. Научное сообщество с нетерпением ждет этих видов биотоплива, в частности биодизеля из целлюлозного спирта [8-10] из водорослей [11] и синтез-газа из биомассы [12-14]. Основным препятствием для производства биотоплива второго поколения являются высокие начальные инвестиции, что приводит к более высокой стоимости конечного продукта в сравнение с ископаемым топливом или другими видами биотоплива первого поколения.

Таблица 1. Биотопливо, источники и связанные с ним процессы

№	Источник биотоплива	Конкретное биотопливо	Связанные процессы
1.	Водорослевые липиды	Биодизель	Производство биомассы водорослей / Добыча нефти / Снижение вязкости / Переэтерификация /
2.	Целлюлоза / Лигнин	Этанол	Гидролиз / Ферментация
3.	Биомасса	Синтез-газ	Газификация / Ферментация

### **Источники лигноцеллюлозной биомассы**

Лигноцеллюлоза - это общий термин для растительных веществ, а «отходы или биомасса» образуются в лесном и сельском хозяйстве, различных отраслях промышленности и муниципалитетах. [6-8]. Основными источниками лигноцеллюлозных соединений являются:

Сельскохозяйственные отходы: кукурузная, пшеничная и рисовая солома, жмых сахарного тростника, рисовая шелуха, остатки ячменя, оливковая мякоть и другие сельскохозяйственные отходы (включая солому, корм, кожуру, початки, стебли, ореховые скорлупы и непродовольственные семена).

**Отходы лесного хозяйства:** отведенные энергетические культуры, отходы после уборочных работ, в лесу после спила стволов деревьев (ветви, листья, корни и т. д.).

**Промышленные отходы:** древесные отходы целлюлозно-бумажной промышленности (включая отходы лесопилки и бумажной фабрики) и отходы пищевой промышленности.

**Биологические отходы:** твердые бытовые отходы (в основном кухонные, садовые, и лигноцеллюлозные отходы, сточные воды), отходы деревянной тары, бытовые, рыночные, пищевой промышленности и целлюлозы (газетная бумага, макулатура, переработанная бумага)

Состав лигноцеллюлозы сильно зависит от ее источника. Существует значительное различия в содержания лигноцеллюлозы и (геми) целлюлозы в зависимости от, того из древесины твердых пород, хвойных пород или трав. В зависимости от источника биомассы лигноцеллюлозы процентное содержание целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина варьируется. В таблице 4.1 приведен состав целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина в зависимости от доступного источника [9]. Лигноцеллюлозная биомасса, которая представляет собой крупнейший возобновляемый резервуар потенциально сбраживаемых углеводов на земле [10], в основном тратится впустую в виде потерь сельскохозяйственного производства до и после сбора урожая, а также отходов пищевой промышленности. Он используется в качестве целлюлозы в бумажной промышленности и сжигается в качестве топлива, используется для корма для животных и образования навоза.

Таблица 2. Состав лигноцеллюлозы из нескольких источников в сухом виде [9].

Лигноцеллюлозные материалы		Целлюлоза (%)	Гемицеллюлоза (%)	Лигнин (%)
Древесина лиственных пород		40-55	24-40	18-25
Древесина		45-50	25-35	25-35
Ореховая скорлупа		25-30	25-30	30-40
Кукурузные		45	35	15
Травы		25-40	35-50	10-30
Бумага		85-99	0	0-15
Пшеничная солома		30	50	15
Листья		15-20	80-85	0
Семенное волокно		80-95	5-20	0
Газета		40-55	25-40	18-30
Макулатура		60-70	10-20	5-10
Первичные твердые вещества в		8-15	нет данных	24-29
Навоз КРС		1.6 <sup>^</sup> 4.7	1.4-3.3	2.7-5.7
Просо		45	31.4	12.0

### **Лигноцеллюлозную биомассу можно использовать для производства биоэтанола**

Лигноцеллюлоза - это возобновляемая и широко доступная биомасса, которую можно преобразовать в ценные химические вещества, включая топлива и полимерные прекурсоры, имеющие стратегическое значение для устойчивости, развития энергетики и химической промышленности [11-21].

Биотопливо из лигноцеллюлозной биомассы может не только значительно вытеснить ископаемое топливо, но и повысить ценность побочных продуктов сельского хозяйства, отходов лесного хозяйства или муниципальных отходов. Лигноцеллюлозная биомасса - низкзатратное сырье с тем преимуществом, что оно либо доступно в больших количествах в виде сельскохозяйственных

остатков, либо может культивироваться с высокой урожайностью на гектар и низкими затратами энергии. Поэтому она считается предсказуемым, осуществимым и устойчивым ресурсом для возобновляемого топлива. Сельскохозяйственные отходы, такие как остатки растительности, отходы лесной и пищевой промышленности, являются потенциальными источниками лигноцеллюлозы. Годовое производство биомассы оценивается во всем мире в 191010 метрических тонн [22].

Действительно, топливо из лигноцеллюлозных биомасс, представляет особый интерес, поскольку количество двуокиси углерода, получаемой в результате использования биомассы, равно количеству, поглощаемому в процессе фотосинтеза. Кроме того, биоконверсия лигноцеллюлозной биомассы для производства биотоплива представляет экологический интерес, поскольку это является еще одним решением проблемы управления отходами. Кроме того, биотопливо, которое можно использовать в качестве присадок к дизелю или бензину, способствует снижению энергетической зависимости. Имеются значительные возможности, чтобы биотопливо из целлюлозной биомассы стало будущим альтернативным топливным ресурсом. Несколько положительных примеров в поддержку производства биоэтанола из лигноцеллюлозных биомасс в том, что целлюлозная биомасса является более распространенной и менее дорогой, чем другие продовольственные культуры, обычно используемые для производства биотоплива. Объем сахара большинства форм целлюлозной биомассы в пересчете на сухую тонну равен или превышает количество сахара, получаемого обычной обработкой из кукурузы или сахарного тростника. Выбросы парниковых газов у этанола из целлюлозной биомассы намного меньше, чем этанола из кукурузы.

### **Процесс производства биоэтанола**

Лигноцеллюлозная биомасса содержит сложную смесь углеводных полимеров в стенках клеток растений, известную как целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Это наиболее перспективный возобновляемый ресурс для производства биоэтанола. Биоконверсия лигноцеллюлозной биомассы в биоэтанол является очень сложным процессом. Общее производство топливного

этанолола включает пять основных этапов: предварительную обработку биомассы, гидролиз целлюлозы, ферментацию сахара и дистилляцию. Кроме того, можно провести детоксикация токсичных соединений, выделяющихся на стадии предварительной обработки и гидролиза. (Рисунок 3).



\*Предварительная обработка путем физического / химического / биологического метода

\*Гидролиз путем кислотного или ферментного метода

\*Ферментация путем РГФ/ООФ/ООСФ/КБ

**Рисунок 3.** Схема производства биоэтанола с использованием различной лигноцеллюлозной биомасс

### Предварительная обработка

Предварительная обработка лигноцеллюлозной биомассы является очень важным этапом для получения сбраживаемого сахара в процессе гидролиза. Предварительная обработка направлена на снижение кристалличности целлюлозы, увеличение площади поверхности биомассы, удаление гемицеллюлозы, разрушение барьера лигнина и увеличение пористости лигноцеллюлозного материала.

Это делает целлюлозу более доступной для гидролитических ферментов, которые способствуют быстрому превращению углеводных полимеров в сбраживаемые сахара с сопутствующим увеличением выхода. Поскольку у многих лигноцеллюлоз разные физико-химические характеристики, то необходимо использовать подходящую технологию предварительной обработки с учетом их свойств. Предварительная обработка должна отвечать следующим требованиям: улучшать образование сахаров или способность впоследствии

образовывать сахара путем гидролиза, избегать разложения или потери углеводов, избегать образования побочных продуктов, которые препятствуют последующим процессам гидролиза и ферментации, и быть экономически целесообразной. Предварительная обработка включает физические, физико-химические, химические и биологические методы и их комбинации.

### **Заключение (Conclusions)**

В связи с возросшим спросом на энергию, биоконверсия лигноцеллюлозной биомассы в биоэтанол является приоритетной областью исследований. Лигноцеллюлозный этанол производится из недорогого и широко доступного сырья, которое может снизить нашу зависимость от ископаемого топлива. Биоэтанол способствует тому, чтобы окружающая среда не загрязнялась, поскольку выбросы СС<sub>2</sub> при сжигании биоэтанола равны объему, которое растения поглощают из атмосферы во время фотосинтеза. Следовательно, они могут уменьшить проблему глобального потепления. Биоэтанол является возобновляемой и устойчивой альтернативой ископаемому топливу, потому что сырье для его производства доступно в изобилии и можно легко вырастить. Переработка сельскохозяйственных отходов обеспечит экономическую выгоду населению сельских районов. Биоконверсия лигноцеллюлозной биомассы в простые сахара для ферментации является очень сложным процессом.

Лигноцеллюлозы очень сложны с точки зрения их морфологии, и кристалличность является основным препятствием для биоконверсии. Для биоконверсии лигноцеллюлозной биомассы требуется многие ферменты, которые взаимно действуют для производства простых сахаров с целью расщепления лигнина. Не существует микроорганизма, в котором есть все ферменты, необходимые для полного процесса. Многие ферменты, которые могут разлагать лигноцеллюлозную биомассу и ингибировать конечный продукт, не могут полностью осваивать биомассу. Совместное культивирование микроорганизмов может решить проблему биоконверсии сложных лигноцеллюлозных биомасс. Микроорганизмы из экстремальных условий

окружающей среды могут обеспечивать ферменты с улучшенными свойствами, подходящими для промышленного применения. Сочетание нескольких подходов, таких как метагеномика, исследования биоразнообразия и метаболическая инженерия, могут улучшить свойства ферментов. Во время гидролиза лигноцеллюлозы производится сложная смесь сахара и многих других токсических соединений, которые ингибируют активность ферментирующих микроорганизмов. Генную инженерию можно использовать для развития ферментирующих микроорганизмов, которые способны ферментировать пентозу и гексозу, без воздействия ингибиторов. Разработка генно-инженерных микроорганизмов и разработка новых биореакторов с улучшенными выходами и производительностью снизят стоимость производства биоэтанола в будущем.

### Список литературы (References):

1. P. Raven, R. Evert, S. Eichhom, *Biology of plants*, New York, NY, USA, 5th edition, p. 791, 1992.
2. J.L. Faulon, and P. G. Hatcher, *Energy and Fuels*, Vol. 8, p. 402-407, 1994.
3. A.J. Stamm, *Wood and Cellulose Science*, The Ronald Press Co, New York, p. 142-165, 1964.
4. V. Balan, L.D.C. Sousa, S.P.S. Chundawat, D. Marshall, L.N. Sharma, C.K. Chambliss, and B.E. Dale, *Biotechnology Process*, Vol. 25, p. 365-375, 2009.
5. R.L. Howard, E. Abotsi, E.L. Jansen van Rensburg, and S. Howard, *African Journal of Biotechnology*, Vol. 2 (12), p. 602, 2003.
6. B.C. Qi, C. Aldrich, L. Lorenzen, and G.W. Wolfaardt, *Chemical Engineering Communications*, Vol. 192(9), p. 1221-1242. 2005.
7. A. Roig, M.L. Cayuela, and M.A. Sanchez-Monedero, *Waste Management*, Vol. 26(9), p. 960-969, 2006.
8. G. Rodriguez, A. Lama, R. Rodriguez, A. Jimenez, R. Guillena, and J. Fernandez-Bolanos, *Bioresource Technology*, Vol. 99(13), p. 5261-5269. 2008.
9. Y. Sun, and J. Cheng, *Bioresource Technology*, Vol. 83, p. 1-11, 2002.
10. G. Mtui, and Y. Nakamura, *Tanzania Biodegradation*, Vol. 16(6), p. 493-499, 2005.
11. L.A. Nogueira. Does biodiesel make sense? *Energy*, Vol 36(6), p. 3659-3666, 2011.
12. I. Council. *Lighting the way: Toward a sustainable energy > future*. InterAcademy Council, FAPESP, 2007.
13. IEA, *Technology' Roadmap: Biofuels for Transport*. International Energy Agency, France, p. 56, 2011.
14. Fulton, L. *Biofuels for Transport: An International Perspective*. International Energy Agency: France. 2005.
15. M. Balat and H. Balat. *Applied Energy*, Vol. 86(11), p. 2273-2282, 2009.