

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6463

УДК: 630.3

Обзор

## **Проблемы и перспективы получения и применения топлив из биомассы, снижающих выбросы парниковых газов**

**Беляев Сергей Васильевич**

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [sergbel2014@mail.ru](mailto:sergbel2014@mail.ru)*

**Левина Мария Сергеевна**

*младший научный сотрудник, отдел комплексных научных исследований ФИЦ «Карельский научный центр РАН», [marilevine@ya.ru](mailto:marilevine@ya.ru)*

*Получена: 15 июня 2022 / Принята: 26 сентября 2022 / Опубликовано: 29 сентября 2022*

---

**Аннотация:** Энергетический кризис, неуклонный спрос на энергоносители вызывают увеличение интереса к альтернативным источникам получения топлив, в т. ч. из биомассы, для генерации электроэнергии и использования на транспорте. Более строгие требования, предъявляемые к экологическим характеристикам к топливам и энергоустановкам, привели к масштабному поиску новых, экономически эффективных, экологически чистых энергоносителей. В статье рассматриваются и анализируются вопросы производства и применения биотоплив, которые в настоящее время во многих регионах мира считаются приоритетными, альтернативными видами топлив. Рассматриваются основные пути и технологии получения биотоплив первого и второго поколений, их важнейшие свойства, экологические характеристики и влияние на сокращение выбросов парниковых газов. Вероятно, что биотоплива второго поколения с использованием технологии Фишера — Тропша имеют существенные преимущества по сравнению с биотопливами первого поколения. Можно предположить, что, используя относительно дешёвые ресурсы биомассы, они могут создать конкуренцию нефтяным топливам в отдельных регионах Европы и мира. Потенциальные выгоды от расширения использования биотоплив и биоэнергии видятся в том, что биоэнергетика может способствовать развитию экономики, увеличению рабочих мест, особенно в аграрном и лесном секторах, оздоровлению окружающей среды; повышению энергетической безопасности ряда регионов и стран. Можно ожидать, что в среднесрочной перспективе

будущие технологические достижения повысят конкурентоспособность биотоплив первого и второго поколений. В настоящее время в европейских странах рассматривают увеличение объёмов производства биотоплив как способ сокращения зависимости от импорта российской нефти и газа, а также сокращения выбросов парниковых газов. С другой стороны, в России достаточно много запущенных земель, которые можно использовать для выращивания культур для нужд биоэнергетики, как для собственного потребления, так и для экспорта, повышая свой потенциал на мировых рынках биотоплив.

**Ключевые слова:** биомасса; биотоплива; парниковые газы; первое и второе поколения биотоплив, технологии Фишера — Тропша

---

DOI: 10.15393/j2.art.2022.6463

*Review*

## **Problems and prospects of obtaining and using biomass fuels that reduce greenhouse gas emissions**

**Sergey Belyaev**

*PhD in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
sergbel2014@mail.ru*

**Maria Levina**

*Junior Researcher, Department of Multidisciplinary Scientific Research, KarRC RAS  
(Russian Federation), marilevina@ya.ru*

*Received: 15 Jun 2022 / Accepted: 26 September 2022 / Published: 29 September 2022*

---

**Abstract:** The energy crisis and steady demand for energy sources lead to keen interest in alternative sources of fuel production including biomass usage for generating electricity and for transportation. Stricter requirements for the environmental characteristics of fuels and power plants have led to a far-reaching search for new, cost-effective, and environmentally friendly energy carriers. The article discusses and analyzes the issues of production and use of biofuels, which are currently considered priority alternative fuels in many regions of the world. The main ways and technologies of obtaining biofuels of the first and second generations, their most important properties, environmental characteristics and their impact on reducing greenhouse gas emissions are considered. It is likely that second-generation biofuels obtained by using Fischer-Tropsch technology have significant advantages over first-generation biofuels and it can be assumed that because of relatively cheap biomass resources they might create competition for petroleum fuels in certain regions of Europe and the world. The potential benefits of expanding biofuels and bioenergy use might be gained due to economy development, new jobs, especially in the agricultural and forestry sectors, environmental enhancement and energy security improvement in a number of regions and countries. It can be expected that in the medium term period future technological advances will increase the competitiveness of biofuels of both the first and second generations. Currently, European countries are considering increasing the production of biofuels as a way to reduce the level of energy dependence on Russian oil and gas import and to reduce greenhouse gas emissions. It should be noted that there are quite a lot of neglected lands in Russia that can be used for growing crops for bioenergetics

demands, both for internal consumption and for export thus increasing the potential in the global biofuel markets.

**Keywords:** Biomass, biofuels, greenhouse gases, first and second generation biofuels, Fischer-Tropsch technology

---

## 1. Введение

Неуклонный спрос на энергоносители вызывает увеличение интереса к альтернативным источникам получения топлива для генерации электроэнергии и использования его на транспорте. Рост количества и плотности автомобилей на квадратный километр в городских условиях, более строгие требования к экологическим характеристикам транспортных средств привели к широкомасштабному поиску новых, экономически эффективных, экологически чистых энергоносителей.

В центре внимания многих исследований научных центров и компаний, прежде всего, стоит вопрос о влиянии новых технологий на уменьшение выбросов парниковых газов и глобальное потепление.

## 2. Материалы и методы

Объектом исследования являются материалы и информация, статьи из открытых литературных источников по актуальным вопросам получения и применения топлив и энергоносителей из биомассы разного происхождения по современным и перспективным технологиям, которые уменьшают выбросы парниковых газов.

В статье использованы такие методы исследования, как анализ и системный подход. Предлагается рассматривать биоэнергетику в качестве системы, которая динамично развивается с имеющимися противоречиями и рисками.

## 3. Результаты

Парниковые газы, в основном, состоят из диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ), который содержится в выхлопных газах автомобилей, работающих на нефтяных топливах. Если общественное мнение и ситуация на рынках будут настроены на дальнейшее снижение выбросов парниковых газов в транспортном секторе, то новые технологии с меньшим выделением парниковых газов будут развиваться более динамично. Доля выбросов парниковых газов, приходящихся на транспорт в промышленно развитых странах, достигает 30 % и около 20 % в мире [1], [2]. Чтобы корректно провести анализ по сравнению выбросов среди современных и будущих транспортных технологий, методика должна учитывать полный их жизненный цикл. Например, жизненный цикл автомобильной технологии включает все этапы снабжения топливом, производство автомобиля, его эксплуатацию и утилизацию неисправного автомобиля. Применение методики оценки жизненного цикла очень значимо при использовании на автомобиле нового топлива и позволяет исследовать, насколько меньше или больше автомобиль потребляет топлива и выделяет углекислого газа на километр пройденного пути [19].

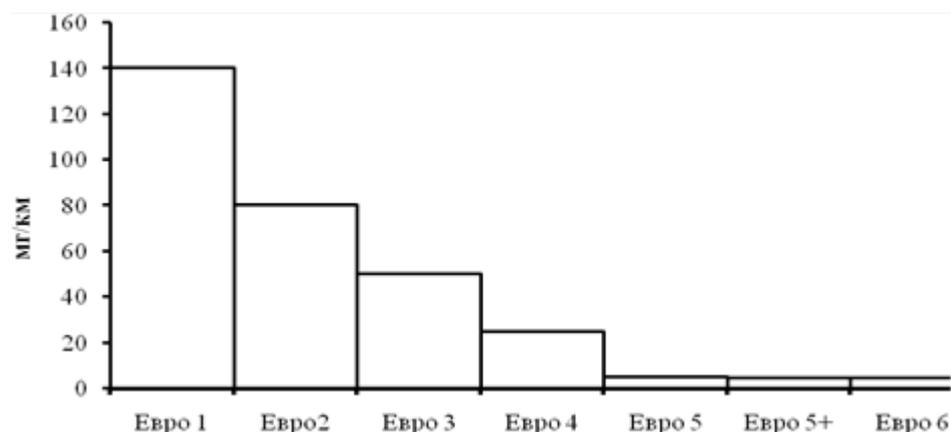
При детальном анализе применения того или иного топлива следует проследить всю технологическую цепочку продвижения его до автомобиля: от места добычи исходного сырья (нефти, газа и пр.) до переработки, транспортировки и т. д. Также топливо должно быть доставлено до места потребления и оказаться в баке автомобиля. Вышеперечисленная технологическая цепочка, включающая отдельные стадии продвижения топлива к автомобилю, часто определяется как «well — to — tank». Аналогично происходит и с автомобилями. Следует учитывать все затраты энергии, выбросы вредных веществ на всех этапах производства автомобиля, некоторых его узлов, доставку к потребителю.

Сжигание традиционных топлив, получаемых из нефти, характеризуется серьёзным отрицательным влиянием на окружающую среду. В результате внедрения новых технологий за последние годы были достигнуты впечатляющие результаты по улучшению экологических свойств нефтяных топлив и технико-экономических параметров тепловых двигателей и транспортных средств. Внедрение «зелёных» транспортных технологий неизбежно и сегодня, и в перспективе. Например, использование нефтяных топлив, к которым относятся топливный этанол, биодизель, водород [10], [11], [12]. Автомобили, способные работать на спирто-бензиновых смесях, называют «Flex-Fuel Vehicle» или FFV. Данные технологии уже апробированы во многих странах и регионах мира (Бразилия, США, Европа и т. д.) [7], [8].

Большие надежды на создание почти идеального, экологически чистого автомобиля связаны с применением водородных топливных элементов. Однако ряд нерешённых технических задач (стоимость получения водорода, логистика, хранение и т. д.) не позволяет рассматривать водородные технологии готовыми для их широкой коммерциализации [8].

Еще в начале 1970-х гг. в США и Европе в связи резким увеличением количества автомобилей и ухудшением экологии производители транспортных средств были вынуждены внедрять новые технологии и совершенствовать системы питания двигателей внутреннего сгорания и очистки вредных выбросов [6]. В результате предпринятых мер традиционные автомобильные двигатели, работающие на нефтяном топливе, суммарно сократили выбросы токсичных веществ более чем на 90 %. На рисунке показана динамика сокращения крайне токсичных, твёрдых, сажистых частиц, обладающих канцерогенными свойствами и вызывающих рак лёгких (по данным ВОЗ).

Особое внимание уделяется получению биотоплив в регионах мира, богатых биоресурсами различной природы. Эффективность применения топлива из биомассы уже доказана в ряде стран. Потенциально биотоплива могут решить некоторые экономические, экологические и энергетические проблемы и внести свой вклад в диверсификацию энергоносителей. По мере того как цены на энергоносители растут и становятся всё более неустойчивыми на фоне политических событий, экономического кризиса в ряде регионов мира, а также свидетельств глобального изменения климата, аргументы в пользу чистых, возобновляемых, внутренних источников энергии становятся более очевидными.



**Рисунок.** Динамика уменьшения выбросов сажистых частиц для дизельных двигателей (мг/км)

**Figure.** Dynamics of soot particle concentration for diesel engines (mg/km)

Биомасса, в основном вещество растительного происхождения, может быть преобразована в тепло, электричество и топливо, которое составляет альтернативу нефтяным топливам. Потенциальные выгоды от расширения использования биотоплив и биоэнергии видятся в том, что биоэнергетика может способствовать развитию экономики, увеличению рабочих мест, особенно в аграрном и лесном секторах, оздоровлению окружающей среды, повышению энергетической безопасности ряда регионов и стран. Опыт Скандинавских стран, таких как Финляндия и Швеция, убедительно это доказывает. Если же рассматривать энергетическую безопасность регионов, критически зависящих от нефтяных топлив, то баланс выгод может склоняться в пользу использования биомассы и местных источников энергии. Это особенно актуально для стран, зависящих от импортируемых углеводородов в большом объёме [14], [15].

Принятые решения в последнее десятилетие Европейским союзом по оздоровлению окружающей среды реализуются за счёт законодательного внедрения норм, предписывающих объёмное и массовое содержание особо вредных веществ в отработавших газах автомобилей. Более чем тридцатилетний опыт применения данных мер показал высокую их эффективность как в глобальном масштабе, так и на локальном уровне. Предпринятые усилия привели к значительному уменьшению выбросов и на порядок повысили экологические характеристики и дизельных, и бензиновых двигателей. Как вариант потенциального решения проблем в перспективе, оздоровления экологической обстановки и радикального уменьшения выбросов парниковых газов является переход на использование водородных топливных элементов. На сегодняшний день этот вариант пока является достаточно затратным с технической и экономической точки зрения.

Топлива из возобновляемых ресурсов биомассы существуют на рынке энергоносителей достаточно давно. Среди них можно отметить биоэтанол, получаемый при ферментации

сахара или крахмала (для бензиновых двигателей), и биодизель, производимый в результате реакции трансэстерификации (образования сложных эфиров растительных масел или животных жиров). Обычно вышеназванные топлива относят к биотопливам первого поколения. Биотоплива первого поколения получают из возобновляемых ресурсов: сахарного тростника, свеклы, масленичных культур, пшеницы. По сравнению с нефтяными топливами они представляют собой топлива с более высокими экологическими характеристиками. Основное достоинство — уменьшение эмиссии диоксида углерода. В то же время их преимущества по многим критериям являются сомнительными. Например, себестоимость производства выше их ископаемых конкурентов, относительно небольшой выход топлива с гектара земли, уже имеющаяся конкуренция с сельскохозяйственными культурами пищевого назначения. Некоторые сельскохозяйственные культуры (например, сахарный тростник, маис и масличная пальма, из мякоти её плодов получают пальмовое масло) могут иметь большой выход с гектара в ряде стран с благоприятными климатическими условиями для их произрастания.

Что касается суммарного сокращения выбросов парниковых газов, то этот показатель зависит от многих факторов. Если проанализировать весь жизненный цикл получения биотоплива, то в большинстве случаев результат их применения очень скромный, если не сказать отрицательный. Здесь необходимо учитывать комплекс факторов, среди которых можно отметить: необходимость добычи, транспортировки и внесения удобрений, затраты на выращивание и сбор урожая, транспортировку и обработку огромных объёмов растительного материала, доставку исходных материалов для получения биотоплива от места произрастания к местам переработки / потребления.

Создание нового поколения лигноцеллюлозных культур для получения энергии требует решения трёх основных задач:

1. Максимальное производство биомассы с единицы площади за один год.
2. Выход на устойчивое развитие с минимальными затратами.
3. Получение максимального количества топлива из единицы биомассы.

Перспективным направлением можно считать и создание специальных лесонасаждений, предназначенных для нужд энергетики. Энергетические леса (плантации) выращиваются с целью получения энергии. Стоимость производства их остаётся достаточно высокой, однако возможно её уменьшение с созданием и выращиванием плантаций различных культур с высокой урожайностью и применением эффективных методов лесозаготовок. В настоящее время энергоплантации создаются, например, в Бразилии, где эвкалиптовые леса обеспечивают сталелитейную промышленность древесным углём. Энергетические леса (плантации) часто могут быть выращены на земельных угодьях с относительно низким уровнем качества почвы. Они не требуют применения удобрений и пестицидов в большом количестве. Однако особое внимание должно быть уделено селекционным видам и большим монокультурам. В отдалённой перспективе наилучшие результаты могут быть получены при использовании местных и смешанных видов с сохранением некоторого биоразнообразия.

Очень важно также найти приемлемый баланс между высокой продуктивностью таких плантаций и сохранением питательных свойств лесных земель. Инновационные энергоресурсы и растения, специально созданные для промышленного производства биотоплив, могут быть созданы на основе новых биотехнологий и технологических процессов [15], [17].

Последние научные достижения в лабораториях США и Европы показывают, что существуют пути для дальнейшего повышения эффективных технологий получения этанола из целлюлозной биомассы. С этой целью в США разработана стратегия по развитию биотопливной промышленности на основе широкого использования целлюлозной биомассы. В рамках данной стратегии планируется к 2030 г. довести до 30 % применение на транспорте биотоплив, тем самым значительно уменьшить потребление нефтяных топлив [15], [17].

Следует отметить, что уровень потребления и производства этанола значительно вырос за последние 20 лет. Многие страны принимают меры по стимулированию расширения его производства и сфер потребления. Россия имеет все необходимые условия для широкомасштабного производства топливного этанола. По мнению ряда экспертов, а также в результате проведенных исследований [9], [10] с целью снижения затрат на производство этанола из целлюлозной биомассы следует больше внимания уделить совершенствованию технологии по предварительной обработке биомассы и объединению основных биопроцессов (гидролиз целлюлозы, ферментация гемицеллюлозы и сахаров) в одном технологическом цикле, на одном реакторе и с использованием одних ферментов. Россия одна из немногих стран, которая обладает богатым опытом получения этанола по гидролизным технологиям, но которые недостаточно эффективны и уже устарели. Однако для широкого применения этанола в качестве моторного топлива или добавок в топлива, очевидно, требуются дополнительные усилия для повышения эффективности существующих технологий, уменьшения стоимости целлюлозного этанола.

Кроме того, биотоплива первого поколения не предлагают долгосрочного решения проблемы возрастающего количества выбросов парниковых газов. Тем не менее этанол и биодизель могут быть получены по относительно простым и доступным технологиям. Применение биотоплив первого поколения доказало их преимущества перед нефтяными энергоносителями: минимальное содержание серы, улучшение смазывающих свойств биодизеля (даже в качестве присадки 1—2 % при использовании в современных дизельных двигателях), высокие октановые числа спиртов, существенное снижение сажистых частиц, оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) (кроме биодизеля) и оксида углерода ( $\text{CO}$ ) в выбросах.

В среднесрочной перспективе можно ожидать появления синтетических жидких моторных топлив, получаемых из других ископаемых ресурсов (помимо нефти, природного газа и угля), а также из биомассы. Производство синтетического топлива состоит из двух этапов, независимо от используемого сырья. В первую очередь сырьё преобразуется в синтез-газ (водород и монооксид углерода). Затем процесс Фишера — Тропша используется для получения жидких продуктов, которые применяются при производстве

дизельного и реактивного топлива. Этот путь позволяет получить моторное топливо очень высокого качества. Исходным сырьём может быть природный газ, уголь или биомасса. Термин ХТЛ используется для обозначения преобразования различных видов сырья в жидкости. Преимущества каждого пути и связанные с ним затраты, будь то экологические или экономические, в значительной степени зависят от типа используемого сырья. Различные отходы, такие как опилки, солома, бытовые пищевые отходы, бытовые сточные воды, навоз, также могут быть сырьём для производства биотоплива. Топлива, полученные по технологиям переработки отходов, принято называть биотопливами второго поколения.

Химический состав биотоплива второго поколения может отличаться от биотоплива первого поколения. Как правило, биотоплива второго поколения обладают более высокой энергетической плотностью, что делает их наиболее привлекательными для потенциальных потребителей. Например, синтетическое дизельное топливо может обладать более высоким цетановым числом, иметь лучшие вязкостно-температурные показатели, стабильность, в нём не содержится сера и т. п. Биодизель второго поколения более удобен для использования с традиционным дизельным топливом, чем биодизель первого поколения. Биэтанол второго поколения (из лигноцеллюлозы) химически идентичен с тем, что производится сегодня.

Известны следующие технологии получения биотоплива второго поколения:

- Биологические и ферментные процессы, преимущественно для получения биоэтанола из целлюлозного сырья, например, используя ферментный или кислотный гидролиз.
- Термохимические процессы и связанные с ними каталитические технологии для получения различных биотоплив, в т. ч. синтетического дизельного топлива и бензина.

Термохимические технологии имеют свои преимущества. Они позволяют получать углеводороды, которые совместимы с нефтяными топливами, что очень важно для развития инфраструктуры и получения топливных смесей. Термохимические технологии для производства биотоплива второго поколения включают:

- Газификацию биомассы — получение синтетического газа.
- Пиролиз (на практике мгновенный пиролиз) для производства пиролизного масла.
- Гидротермическая обработка влажной биомассы.
- Синтез Фишера — Тропша (Fisher — Tropesch) углеводородов из синтетического газа с процессами перегонки и обработки (FT).
- Синтез метанола с последующим синтезом бензина и/или дизеля при помощи технологии метанол в олефин, бензин, или дизель, или метанол в бензин.

Особенно высок потенциал получения биотоплив из лигноцеллюлозной биомассы по технологиям Фишера — Тропша [13], [18]. Для производства моторных топлив одной из ключевых технологий современности является технология Фишера — Тропша, которая успешно применяется в технологиях преобразования газа в жидкость (GTL) и угля в жидкость (CTL). Надо отметить, что уже существует несколько промышленных установок, использующих эту технологию, и количество их неуклонно растёт. Первые шаги навстречу промышленному использованию данных технологий были предприняты компанией Choren

Industries. Итогом работы специалистов стало недавнее завершение строительства этой компанией установки по изготовлению синтетического топлива из биомассы разной природы по технологии BTL, с объёмом производства до 18 млн л топлива ежегодно. Технология получения BTL основана на косвенной термохимической конверсии биомассы. BTL является одним из вариантов получения биотоплива второго поколения.

В последние годы разработаны обширные исследовательские программы по изучению биохимического превращения лигноцеллюлозной биомассы в этанол. Промышленная жизнеспособность технологий производства этанола из лигноцеллюлозной биомассы ещё требует дополнительных исследований. Доведение этого процесса до промышленного масштаба поставило бы ряд вопросов, связанных с оптимизацией каждого этапа (предварительная обработка, гидролиз и ферментация), особенно с экономической точки зрения. Первые опытные лигноцеллюлозные установки, предназначенные для производства этанола, были построены ещё в Северной Америке в 2006 г.

Быстрый рост производства биотоплива был обусловлен инновациями частного сектора. Для поддержания этого роста правительства стран Европейского союза активно работают в партнёрстве с частным сектором для достижения улучшений по всем видам сырья, которые могут быть использованы для получения биотоплив в ближайшем и долгосрочном периодах [14—16].

Для производства биотоплив возможно использовать широкий спектр исходного сырья:

– Сырьё первого поколения. Например, в США это кукуруза для этанола и соевые бобы для биодизеля. В настоящее время это сырьё используется и его урожайность растёт. В различных регионах возможны и другие варианты.

– Сырьё второго поколения состоит из остатков урожая сельскохозяйственных и лесных культур. Их использование показывает многообещающие перспективы для краткосрочного внедрения с развитием технологий конверсии целлюлозы.

– Сырьё третьего поколения — это культуры, которые требуют дальнейших исследований и разработок для коммерциализации, такие как многолетние травы, быстро растущие деревья и водоросли. Они предназначены исключительно для производства топлива и обычно называются «энергетическими культурами», представляют собой ключевой долгосрочный компонент устойчивой биотопливной промышленности.

В ряде регионов мира активно проводятся НИОКР по созданию высокоурожайных технологических систем для получения биомассы и специализированных энергетических культур, которые не нарушают существующие производственные парадигмы, поддерживают и укрепляют важнейшие природные ресурсы, необходимые для их производства (например, воду, воздух и почву). Также разрабатываются специальные биоэнергетические культуры с помощью традиционной селекции и передовых биотехнологий.

Одной из самых современных разработок, относящихся к топливам, создаваемым из возобновляемых источников сырья и их отходов, является биологическое дизельное топливо нового поколения NExBTL фирмы Neste Oil. Это топливо, которое, с одной

стороны, увеличивает срок службы двигателя, а с другой — серьёзно снижает эмиссию вредных газов, в т. ч. и парниковых [19]. Биотопливо NexBTL доступно в продаже в Европе и США, руководство компании рассматривает возможность выхода и на другие рынки.

**Таблица.** Сравнение основных свойств топлив для дизелей

**Table.** Comparison of the main properties of diesel fuels

Основные свойства топлив	NexBTL NESTE OIL	GTL газ в жидкость	FAME биодизель (из рапса)	Летнее дизельное топливо
Плотность, кг/м <sup>3</sup> , при 15° С	775—785	770—785	885	835
Вязкость, мм <sup>2</sup> /с, 40° С	2,9—3,5	3,2—4,5	4,5	3,5
Цетановое число	80—99	73—81	51	53
Удельная теплота сгорания, МДж/кг	44,0	43,0	37,5	42,7
Содержание ароматических веществ, %	0	0	0	30
Содержание кислорода, %	0	0	11	0
Содержание серы, мг/кг	< 10	< 10	< 10	< 10
Температура помутнения, ° С	от -5 до -25	от 0 до -25	-5	-5

Многие из вышеперечисленных технологий были апробированы в промышленных масштабах. Как оказалось, основные задачи, которые придётся решать в перспективе, не связаны с техническими вопросами. Устойчивое снабжение сырьём для установок промышленного получения конечного продукта (BTL) будет наиболее важной проблемой и требует ряда организационных и логистических решений обеспечения биомассой, которые позволят оптимизировать финансовую, углеродную и энергетическую составляющие затрат на производство конечного продукта.

Другой существенной частью расходов являются капитальные вложения на газификацию и установку Фишера — Тропша. Снижение затрат возможно с увеличением объёмов производства биотоплив по технологии Фишера — Тропша на установках с высокой производительностью, что, в свою очередь, как сказано выше, тесно связано с устойчивым обеспечением сырьём в очень больших объёмах. По мнению ряда экспертов, именно эти факторы могут привести к вынужденным ограничениям выработки альтернативного

топлива. На первом этапе потребуются крупные капитальные вложения, что не только скажется на цене продукта, но и представляет инвестиционный риск. Это является огромным барьером на пути внедрения данных технологий. Пока не будет оценена основная выгода от использования биотоплива второго поколения в части уменьшения выбросов парниковых газов, не будет и стимула для вложения основных инвестиций.

Предварительная оценка эффективности работы установки FT [4], [5] в Европе показала, что объём производимого топлива должен превышать 100 млн л в год, на что потребуется 1,5 млн м<sup>3</sup> древесины. Для европейских стран, как правило, стоимость древесины достаточно высока. Наиболее дешёвое сырьё сосредоточено вне еврозоны и импортируется (из России, стран Балтии). Один из путей уменьшения стоимости сырья биомассы — использовать сырьё, несущее отрицательную рыночную цену, для которого определена необходимость утилизации, например, бытовые органические отходы и осадки сточных вод. Данные виды сырья содержат много воды, что делает их неудобными для газификации без затратной (финансово и энергетически) сушки и транспортировки в больших объёмах. Для использования данного вида сырья необходима гидротермическая доработка и сверхкритическая газификация, которые находятся на ранних стадиях разработки. Другие шаги к уменьшению цены включают адаптацию упрощённых типов перегонных процессов (таких как гидрокрекинг) биомасс производственных жидкостей вместе с разработками катализаторов.

#### 4. Обсуждение и заключение

С учётом последних изменений на рынке энергоносителей и законодательных тенденций в области защиты окружающей среды можно ожидать, что второе поколение биотоплив имеет неплохие перспективы. Возможно, что через 5—10 лет может начаться их активный этап коммерциализации. Применительно к балансу парниковых газов они выигрывают по сравнению с биотопливами первого поколения — биотоплива второго поколения требуют меньше земельных ресурсов. Используя современные биотехнологии, с одного гектара можно получить в 2—3 раза больше конечного продукта.

Не вызывает сомнения, что страны Европейского союза и США в конечном счёте будут последовательно сокращать свою зависимость от нефти; проблема лишь в том, сколько времени на это потребуется и какова цена вопроса перехода на альтернативные источники энергии [7], [8].

Высокоэффективное управление технологическими процессами должно быть интегрировано со специализированным оборудованием для обеспечения качества, последовательности и надёжности поставок сырья с течением времени, сохраняя при этом разумную стоимость поставки. Однако естественные риски сельскохозяйственной системы, включая ежегодные колебания в производстве, севооборотах и поддержании питательных веществ в почве в долгосрочной перспективе, затрудняют принятие мер по сокращению

затрат. Препятствия, которые необходимо преодолеть, можно разделить на две основные категории:

– Логистика, проектирование и управление предприятием: система сбора, хранения и предварительной обработки сырья будет варьироваться в зависимости от его типа, региональной географии и структуры собственности на систему. Задача состоит в том, чтобы снизить эксплуатационные затраты на рабочую силу и топливо, которые составляют практически все расходы в этом элементе цепочки поставок.

– Развитие технологий: новые технологии необходимы для поддержки эффективного, экономичного и устойчивого сбора и обработки биомассы. Они включают творческие подходы к перемещению сырья с поля на завод, такие как отправка суспензии по специальным трубопроводам, однопроходные комбайны для сбора сельскохозяйственных остатков во время уборки товарных культур и лесные измельчители для обеспечения уплотнения лесных остатков во время сбора [15], [18].

Хотя НИОКР в области целлюлозного этанола позволили добиться прогресса в сокращении предполагаемых затрат на конверсию, производственные затраты остаются слишком высокими для того, чтобы топливо на основе биомассы могло конкурировать на рынке. Для того чтобы сделать биотопливо на основе растительного волокна экономически жизнеспособным, очевидно, потребуются оригинальные технологические решения в фундаментальной и прикладной науке. Например, одним из ключевых барьеров является естественная устойчивость растительного волокна к расщеплению на промежуточные продукты. Научно-технические проблемы здесь огромны. Значительная работа необходима для лучшего понимания клеточных стенок растений, в которые встроено растительное волокно или лигноцеллюлоза, чтобы обеспечить экономически эффективное разрушение и деконструкцию растительного материала. Биотехнологическая революция обещает развитие биологических знаний на системном, клеточном и молекулярном уровне, которые могли бы позволить нам «перестроить» растения, ферменты и микробы, чтобы преодолеть существующие препятствия.

Ещё одним ключевым барьером является понимание того, как растительный материал разрушается термически. Кроме того, существует потенциал для нового прогресса в химических и термохимических процессах конверсии за счёт улучшения катализа. Значительные фундаментальные и прикладные исследования будут необходимы для разработки экономически эффективных и коммерчески жизнеспособных конверсионных технологий для получения в больших объёмах биотоплива из древесной биомассы [14]. [20].

На сегодняшний день исследователи сосредоточились преимущественно на целлюлозном этаноле, который стал первым целлюлозным биотопливом, коммерчески доступным для ряда регионов мира. Но существует также потенциал для производства других видов топлива, включая высшие спирты, «зелёный» бензин и дизельное топливо, а также авиационное топливо, получаемое путём ферментативной, микробиологической и/или химической каталитической переработки биомассы. Остаются существенные вопросы стоимости

и объёмов производства. Однако такое современное биотопливо будет иметь многочисленные преимущества, например, иметь энергетическое содержание, сопоставимое с нынешним топливом на основе нефти, и более лёгкую интеграцию в существующую топливную инфраструктуру.

В связи с вышеизложенным необходимы дополнительные усилия и следующие шаги:

- Развитие знаний о растениях, микробах и ферментах на системном, клеточном и молекулярном уровнях.
- Разработка технологий совместного производства товарного топлива и сопутствующих продуктов с добавленной стоимостью, которые могут улучшить общую экономику производства.
- Открытие и разработка более совершенных технологий получения углеводородного топлива из лигноцеллюлозной биомассы с использованием микробиологических, термохимических или каталитических процессов.
- Решение фундаментальных вопросов катализа в газовой и жидкой фазах, включая характеристику и долговечность.
- Оптимизация процессов для обеспечения экономической жизнеспособности технологий в малых масштабах.
- Выявление процессов и инноваций, достигнутых в смежных отраслях, таких как нефтепереработка, которые могут быть использованы для повышения эффективности путей преобразования биотоплива.

## 5. Выводы

1. Необходимо осуществлять планомерное снижение выбросов парниковых и других нежелательных выбросов. Особое место занимают меры, стимулирующие использование биотоплив. Их разновидности предоставляют потенциально значительные возможности для сокращения выбросов CO<sub>2</sub>.

2. Новое поколение топлив из биомассы разной природы может обеспечить большее сокращение выбросов парниковых газов при более низкой себестоимости, хотя остаётся ещё и ряд неопределённостей.

3. Очевидно, не обойтись без поддержки исследований и развития биотоплив второго поколения на государственном уровне. В связи с крайней нестабильностью на рынке углеводородов, скачками цен на нефть примером являются США, Европейский союз, которые делают всё возможное для реализации поставленных целей.

4. Стимулы разработки биотоплив следует увязывать с показателями эффективности снижения CO<sub>2</sub> «от скважины до колеса». Следует также отметить, что все виды биотоплива обеспечивают самые большие и наиболее рентабельные сокращения выбросов, когда биомассу для его производства используют, скорее, взамен генерирования электроэнергии на базе ископаемого топлива, чем в качестве горючего для транспорта, которое требует вторичной переработки и распределения.

5. В последнее время ужесточение экологических требований к топливам и транспорту, а также высокие цены на нефть вызывают повышенный интерес к жидким биотопливам.

6. Можно ожидать, что в среднесрочной перспективе будущие технологические достижения повысят конкурентоспособность биотоплив и первого, и второго поколений.

7. В настоящее время многие эксперты в западных странах рассматривают увеличение объёмов производства биотоплив как способ сокращения зависимости от импорта российской нефти и газа, а также сокращения выбросов парниковых газов.

8. В России достаточно много запущенных земель, которые можно использовать для выращивания культур для биоэнергетики, как для собственных нужд, так и экспорта, повышая свой потенциал на мировых рынках биотоплив.

### Список литературы

1. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Современное состояние и перспективы применения биомассы для получения биотоплив // Актуальные вопросы науки и техники. 2015. С. 61—63.
2. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Биотоплива второго поколения: европейский опыт // Учёные записки Петрозаводского государственного университета. 2012. Т. 2, № 8 (129). С. 61—64.
3. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Проблемы и перспективы применения топливного этанола: Деп в ВИНТИ. 2012. № 216-В2012. 12 с.
4. *Беляев С. В., Давыдков Г. А., Перский С. Н.* Газификация биомассы — современное состояние и перспективы развития // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Вып. 9. С. 8—9.
5. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* К вопросу газификации биомассы // Леса России в XXI веке: Материалы Шестой междунар. научно-технич. Интернет-конференции. СПб.: СПбГЛУ, 2011. С. 236—239. URL: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=7&a=376>. Текст: электронный.
6. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* Проблемы и перспективы применения водорода в тепловых двигателях // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123). Текст: электронный.
7. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* Проблемы и перспективы получения целлюлозного этанола из биомассы. СПб.: ЛТА, 2010. URL: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=1&a=67>. Текст: электронный.
8. *Беляев С. В., Давыдков Г. А.* Эволюция экологических стандартов в Европе // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественных и технических наук. 2018. С. 45—48.
9. *Давыдков Г. А., Беляев С. В.* Этанол как моторное топливо // Автомобильная промышленность. 2011. № 4. С. 26—28.
10. О проблемах производства биотоплива в мире // БИКИ. № 8118872. 21.07.2005. С. 12—14.
11. Biofuels for Sustainable Transportation. Available at: <http://www.IEA.org>. Text. Image: electronic.
12. Biofuels for transport. Available at: <http://www.IEA.org/books>. Text. Image: electronic.
13. Biofuels in the European Union a vision for 2030 and beyond. Final draft report of the Biofuels Research Advisory Council. 2006. 31 p.

14. *Broadhead J. S., Bahdon J., Whiteman A.* Past trends and future prospects for the utilization of wood for energy // *Global Forest Products Outlook Study*. 2001. No 5.
15. Large-scale forest-based biofuel production in the Nordic forest sector: Effects on the economics of forestry and forest industries / Eirik Ognér Jåstad, Torjus Folsland Bolkesjø, Erik Trømborg, Per Kristian Rørstad // *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 184. P. 374—388.
16. Forest land sustainability and second generation biofuels. Informal meeting of Environmental ministers. 2008.
17. Forest service research and development bioenergy and biobased products strategic direction 2009—2014 United States Department of Agriculture Forest Service FS-940. 2010.
18. *Lohse-Busch H.* Current and future trends in alternative fuel vehicles — a research perspective. IL Chamber of Commerce Panel. 2011.
19. NExBTL Renewable Synthetic Diesel (PDF). 2010.04.10.
20. Technology state-of-the-art. Philippe Girard, Abigail Fallot, Fabien Dauriac. Forest Department of CIRAD. 2002. 55 p.

## References

1. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. Current status and prospects of using biomass for biofuels. *Actual issues of science and technology*, 2015, pp. 61—63. (In Russ.)
2. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. Second generation biofuels: European experience. *Proceedings of Petrozavodsk State University*, 2012, vol. 2, no. 8 (129), pp. 61—64. (In Russ.)
3. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. *Problems and prospects of using fuel ethanol*. DEP in VINITI, 2012, no. 216-B 2012. 12 p. (In Russ.)
4. Belyaev S. V., Davydkov G. A., Perskij S. N. Gasification of biomass — current status and development prospects. *Proceedings of the Forest Engineering Faculty of PetrSU*, 2012, vol. 9, pp. 8—9. (In Russ.)
5. Belyaev S. V., Davydkov G. A. On the issue of biomass gasification. *Forests of Russia in the 21st century. Materials of the 6th international scientific and technical Internet conference*. Saint Petersburg, SPBGLU, 2011, pp. 236—239. Available at: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=7&a=376>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
6. Belyaev S. V., Davydkov G. A. Problems and prospects of hydrogen application in heat engines. *Engineering Bulletin of the Don*, 2019, no. 8. Available at: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N8y2019/6123). Text. Image: electronic. (In Russ.)
7. Belyaev S. V., Davydkov G. A. *Problems and prospects of obtaining cellulosic ethanol from biomass*. Saint Petersburg, LTA, 2010. Available at: <http://www.ftacademy.ru/science/internet-conference/index.php?c=1&a=67>. Text. Image: electronic. (In Russ.)
8. Belyaev S. V., Davydkov G. A. Evolution of ecological standards in Europe. *Fundamental and applied research in natural and technical sciences*, 2018, pp. 45—48. (In Russ.)
9. Davydkov G. A., Belyaev S. V. Ethanol as a motor fuel. *Automotive industry*, 2011, no. 4, pp. 26—28. (In Russ.)
10. On the problems of fuel production in the world. *BIKI*, 2005, July 21, no. 8118872, pp. 12—14. (In Russ.)
11. *Biofuels for Sustainable Transportation*. Available at: <http://www.IEA.org>. Text. Image: electronic.
12. *Biofuels for transport*. Available at: <http://www.IEA.org/books>. Text. Image: electronic.
13. *Biofuels in the European Union a vision for 2030 and beyond. Final draft report of the Biofuels Research Advisory Council*, 2006. 31 p.

14. Broadhead J. S., Bahdon J., Whiteman A. Past trends and future prospects for the utilization of wood for energy. *Global Forest Products Outlook Study*, 2001, no 5.
15. Eirik Ognér Jåstad, Torjus Folsland Bolkesjø, Erik Trømborg, Per Kristian Rørstad. Large-scale forest-based biofuel production in the Nordic forest sector: Effects on the economics of forestry and forest industries. *Energy Conversion and Management*, 2019, vol. 184, pp. 374—388.
16. *Forest land sustainability and second generation biofuels. Informal meeting of Environmental ministers*. 2008.
17. *Forest service research and development bioenergy and biobased products strategic direction 2009—2014 United States Department of Agriculture Forest Service FS-940*. 2010.
18. Lohse-Busch H. *Current and future trends in alternative fuel vehicles — a research perspective. IL Chamber of Commerce Panel*. 2011.
19. *NExBTL Renewable Synthetic Diesel (PDF)*. 2010.04.10.
20. *Technology state-of-the-art. Philippe Girard, Abigail Fallot, Fabien Dauriac. Forest Department of CIRAD*. 2002. 55 p.

© Беляев С. В., Левина М. С., 2022