

УДК 662.63

СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ БЕЛЯЕВ

кандидат технических наук, доцент кафедры тяговых машин лесоинженерного факультета ПетрГУ
sergbel@psu.karelia.ru

ЖАННА СЕРГЕЕВНА КАРПОВА

преподаватель кафедры промышленного транспорта и геодезии лесоинженерного факультета ПетрГУ
jan@psu.karelia.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЭТАНОЛА ИЗ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ БИОМАССЫ

В статье рассмотрены основные источники получения биотоплив, проанализированы характеристики разных видов биотоплив, уделено внимание экологическим свойствам. Сделан вывод о том, что этанол имеет потенциал для замещения существенного количества нефти при использовании относительно дешевых ресурсов целлюлозы с применением новых передовых технологий.

Ключевые слова: биотоплива, этанол, целлюлозная биомасса

Характерной для ведущих компаний мира является опережающая научно-исследовательская и конструкторско-экспериментальная работа по созданию автомобилей будущего и поиску новых экологически чистых топлив. Особое внимание в последние годы во многих странах, в том числе и России, уделяется производству и применению биотоплив, которые в XXI веке могут оказать существенное влияние на развитие энергетики, систем устойчивого энергообеспечения разных регионов и внести свой вклад в диверсификацию используемых видов топлива. В будущем ожидается также существенное увеличение доли выработки электроэнергии и тепла из нетрадиционных и возобновляемых энергоресурсов. Экономический и неиспользуемый потенциал этих ресурсов в России велик – около 270 млн т условного топлива в год, то есть более 20 % общего энергопотребления [1].

Биотоплива для транспорта, включая этанол, биодизель и некоторые другие жидкие и газообразные топлива, имеют перспективы для замещения существенного количества нефти во многих

регионах мира [1], [2], [7]. Лидерами по производству этанола в мире являются США и Бразилия. Однако даже в США этанол используется менее чем на 2 % транспорта (в Бразилии – до 30 %) [7].

В настоящее время многие страны начинают проявлять повышенный интерес к биотопливам. Можно ожидать, что в недалекой перспективе применение биотоплив будет значительно возрастать во многих регионах мира, в том числе и в России [6]. Очевидно, что среди значимых преимуществ биотоплив – повышение энергетической безопасности, уменьшение выбросов парниковых газов и токсичных веществ, улучшение эксплуатационных характеристик автомобилей, развитие экономики, а в некоторых случаях – защита экосистемы и т. д.

Положительные свойства биотоплив не просто оценить в единицах стоимости. В связи с этим можно предположить, что рыночные цены на биотоплива не совсем адекватно отражают их значение. Известно, что стоимость производства жидких биотоплив остается высокой. Однако перечисленные достоинства биотоплив могут в недалеком

будущем проявиться в большей степени благодаря ужесточению экологических требований как к самим топливам, так и к транспортным средствам. Правда, уже сегодня в некоторых странах, например в Бразилии, цена на биотопливо (этанол) ниже, чем в Европе, США, и приближается к стоимости нефтяных топлив. Следует ожидать, что в ближайшее десятилетие стоимость производства и в других странах будет постепенно снижаться. Одной из причин этого, вероятно, будет внедрение в будущем передовых технологий при производстве биотоплив с очень низкими выбросами парниковых газов. Новые технологии позволят в большей степени использовать запасы лигноцеллюлозы, получаемой как из отходов производства, так и из различных лесных и аграрных ресурсов, предназначенных для этой цели. В настоящее время большинство существующих технологий нацелено на получение сахара, крахмала или растительных масел из нескольких типов культур, при этом они используют энергию ископаемых топлив для производства биотоплива. В результате этого выбросы парниковых газов в процессе получения биотоплив меньше от 20 до 50 % по сравнению с нефтяными топливами [6], [7].

На рис. 1 представлена общая схема преобразования биомассы и других отходов в спирты.



Рис. 1. Общая схема получения спиртовых топлив

Передовые технологии, над которыми уже сегодня работают во многих научно-исследовательских центрах США, Европы, Японии, могут радикально улучшить экологические характеристики и открыть путь к утилизации огромных запасов лесных и других ресурсов для получения целлюлозного этанола. Вероятно, Канада может быть одной из первых стран, где в недалеком будущем будут внедрены новые технологии по конверсии целлюлозы в этанол в промышленных масштабах [5]. Во многих странах инициативы, предпринимаемые в области применения биотоплив, связаны с признанием нерыночных преимуществ биотоплив, и довольно часто это приводит к увеличению применения биотоплив на транспорте.

Биотоплива уже сегодня могут заменить нефтяные топлива, применяемые в современных автомобилях. Этанол и его смеси с бензином легко могут использоваться на обычных автомобилях. С повышением содержания этанола (более 10 %) требуется некоторая модификация

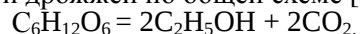
систем питания. Биотоплива могут улучшить состояние воздуха при их использовании как в чистом виде, так и в смесях с нефтяными топливами. Прежде всего, это касается выбросов CO, SO₂ и сажистых частиц. Биотоплива менее токсичны, чем нефтяные топлива, и в некоторых случаях могут утилизировать отходы отдельных производств. Однако иногда применение биотоплив (этанол) может привести к увеличению выбросов углеводородов и альдегидов.

В настоящее время спирты заняли твердую позицию в системе топливообеспечения мирового автомобильного парка. В странах Южной, Центральной Америки и США первенство завоевал этанол, что объясняется значительными ресурсами в этих регионах растительного природного сырья для его производства (биомасса, солома, древесные, кукурузные отходы и т. п.). В России для производства топливных спиртов имеется достаточно серьезная сырьевая, технологическая и промышленная база. На рис. 2 представлены основные технологии переработки биомассы в моторные топлива.



Рис. 2. Технологии переработки биомассы в моторные топлива

В последние годы среди биотоплив особое внимание уделяется этанолу (этиловому спирту). Биоэтанол считается одним из самых многообещающих альтернативных топлив. Традиционно этиловый спирт получают брожением сахаристых веществ, чаще всего глюкозы, под влиянием энзимов и дрожжей по общей схеме [3]:



Нужная для этого производства глюкоза содержится в готовом виде в исходных продуктах, например в соке винограда, при брожении которого получается виноградное вино с содержанием от 8 до 16 % спирта, или получается из так называемых полисахаридов – крахмала или клетчатки (целлюлоза). Общая формула полисахаридов $(C_6H_{10}O_5)_n$. При полном гидролизе они образуют глюкозу. В качестве крахмалосодержащих веществ преимущественно используют хлебные злаки (пшеница, рожь, ячмень), рис, кукурузу и особенно картофель, то есть пищевые продукты. Два важных полисахарида – крахмал и клетчатка (целлюлоза) построены из остатков глюкозы. Элементарная ячейка клетчатки и крахмала $[C_6H_7O_2(OH)_3]$. Крахмал нака-

пливается некоторыми растениями в качестве резервного материала. В промышленности его получают из картофеля. Это белый порошок. Восстановительными свойствами не обладает.

Целлюлоза широко распространена в природе: из нее построены ткани растений. Вата, фильтровальная бумага – наиболее чистые формы целлюлозы (до 96 %). Древесина в основном состоит из целлюлозы и лигнина. При гидролизе целлюлозы получают глюкозу, промежуточный продукт – целлюлоза. От крахмала целлюлоза отличается β -конфигурацией связи между циклами и линейным характером цепей. Стереохимия отдельных остатков глюкозы и наличие только β -связей между ними обуславливают расположение ОН-групп только на внешней стороне каждой очень длинной неразветвленной цепи, благодаря чему возникают идеальные условия для образования водородных связей. Получается жесткий нерастворимый волокнистый материал, идеальный для построения клеточных стенок. β -связь не разрушается пищеварительными ферментами человека, и поэтому целлюлоза не может служить ему пищей. Однако в сложных желудках некоторых животных, в частности жвачных, имеются соответствующие ферменты, поэтому они могут использовать клетчатку как компонент пищи.

Биотоплива могут быть получены из биомассы различного происхождения: обычные продукты сельскохозяйственных производств, такие как семена масличных культур и культур, богатых сахаром и крахмалом; лигноцеллюлозные продукты и отходы.

Целлюлоза более распространена в природе и дешевле, поэтому она более конкурентоспособна, чем сельскохозяйственные культуры, из которых получают продукты питания. В принципе, для многих специалистов уже сегодня очевидны существенные преимущества развития и повышения качества биотоплив, получаемых из целлюлозы:

- меньше влияния на рынок сельскохозяйственной продукции;
- повышение доходов ферментов за счет более полного использования своей продукции;
- повышение потенциала получения биотоплива с одного гектара земли;
- более полное и эффективное использование земельных угодий (в том числе с бедным почвенным слоем) для выращивания энергетических лесонасаждений (быстрорастущих видов деревьев – тополя, ивы и других);
- возможность использования городских твердых отходов.

Большая часть растений (особенно древесная биомасса) состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Целлюлоза и гемицеллюлоза, в отличие от лигнина, могут быть преобразованы в этанол.

Содержание целлюлозы в древесной и травяной биомассе может меняться от 30 до 70 %. Остаток представляет органическую часть – лигнин, который можно использовать для выработки энергии или получения биосинтетического топлива.

Древесная биомасса включает в себя древесину и все отходы – остатки лесозаготовок, деревообработки и т. д. Она наиболее широко распространена в природе и является возобновляемой. Россия занимает первое место в мире по запасам древесной биомассы. Еще в середине прошлого столетия в СССР была создана гидролизная промышленность (более 40 гидролизных и биохимических заводов), где в качестве сырья использовались отходы деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности, сельскохозяйственные отходы, а также некоторые виды отходов пищевой продукции.

Целлюлозный этанол отвечает многим, если не всем требованиям, предъявляемым к транспортным топливам. Однако в связи со сложной структурой клетки растению целлюлозную биомассу значительно сложнее превратить в сахара, чем крахмал. В клетке растений обнаружены три основных полимера: целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин. Эти полимеры образуют сложную композитную наноструктуру, которая обеспечивает растениям высокую прочность и сопротивление внешним нагрузкам. Их жесткая структура и является основным препятствием для широкого производства топливного этанола.

Традиционные технологии по переработке целлюлозной биомассы в этанол достаточно сложны, имеют высокую стоимость и уменьшают общую эффективность процесса. Существующая стратегия производства этанола из биомассы в основном базируется на технологиях, открытых в 1930-е годы в Германии, а позже активно применяемых в России вплоть до последнего времени. Этот процесс включает три основные фазы: кислотная предварительная обработка биомассы; гидролиз; ферментация.

Последние исследования и новые технологии (рис. 3) позволили значительно уменьшить стоимость энзимов (ферментов) и повысить эффективность процесса за счет одновременно проходящей ферментации и сахарификации (SSF – simultaneous saccharification and fermentation) [8]. Таким образом, гидролиз целлюлозы и ферментация глюкозы объединены в одну фазу.



Рис. 3. Современные технологии получения целлюлозного этанола

Создание нового поколения лигноцеллюлозных культур для получения энергии требует решения трех основных задач [3], [4], [6], [8]:

- максимальное производство биомассы с единицы площади за один год;
- выход на устойчивое развитие с минимальными затратами;
- 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 их производства остается достаточно высокой, однако возможно ее уменьшение с созданием 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 углем. Энергетические леса могут быть выращены на земельных угодьях относительно низкого качества. Они не требуют применения большого количества удобрений и пестицидов. Однако особое внимание должно быть уделено селекционным видам и большим монокультурам.

В отдаленной 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.

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

Следует отметить, что уровень потребления и производства этанола значительно вырос

в последние 20 лет. Многие страны принимают меры по стимулированию расширения его производства и сфер потребления. По мнению ряда экспертов и по данным проведенных исследований [6], [8], с целью снижения затрат на производство этанола из целлюлозной биомассы следует больше внимания уделить совершенствованию технологии предварительной обработки биомассы и объединению основных биопроцессов (гидролиз целлюлозы, ферментация гемицеллюлозы и сахаров) в одном технологическом цикле, на одном реакторе с использованием одних ферментов.

Россия – одна из немногих стран, которая обладает богатым опытом получения этанола по гидролизным технологиям. 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 [5], [6], [7], [8]. России, США и другим странам без специальной программы правительств, объединяющей усилия научно-исследовательских центров по биотехнологиям, химии и технологии топлив, энергетики и энергосбережения и т. д., добиться значимых результатов будет непросто. Биотоплива, полученные из зерна и других культур по традиционным технологическим процессам, будут конкурировать с нефтяными топливами до тех пор, пока цены на нефть будут оставаться высокими. Только использование относительно дешевых ресурсов целлюлозы с применением новых передовых технологий позволяет открыть широкие возможности коммерциализации этанола.

Более благоприятные условия для повышения потенциала биотоплив будут складываться в том случае, если расширять ресурсную базу для их производства (лесную биомассу, отходы целлюлозных культур и другие виды биомассы) с применением новых технологий. Технологии производства топливного этанола быстро развиваются. Предполагается, что через 10 лет этанол уже сможет конкурировать с нефтяным топливом. Новые технологии на базе биотехнологий позволят сократить издержки и ослабить зависимость от традиционного сырья. Широкое применение биомассы в качестве топлива для транспорта может также сдерживаться и конкуренцией со стороны других потребителей, связанных с производством тепла и электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробей Н. И. Глобальные тенденции в энергетике на рубеже столетий // Энергия: экономика, техника, экология. 2000. № 12. С. 38–31.
2. О проблемах производства биотоплива в мире // БИКИ № 8118872, 21.07.2005. С. 12–14.
3. Петров А. А., Бальян Х. В., Трошенко А. Т. Органическая химия: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1981. 592 с.
4. Biofuels Joint Roadmap, June 2006, U. S. Department of Energy. Fuelling mobility 21st century transportation fuels: <http://www.Shell.com>.
5. Biofuels for Sustainable Transportation: <http://www.IEA.org>.
6. Biofuels for transport: <http://www.IEA.org/books>.
7. Bioethanol and the Ethanol Industry today. US. DOE. Biomass Program: <http://www.DOE.BiomassPublications.htm>.
8. Cario N., Hamelinck Geertje van Hooijdonk. Prospects for ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance as development. Report NWS-E-2003-55. Utrecht University: <http://www.DOE.htm>.