

УДК 662.754

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ЖИДКОГО БИОТОПЛИВА В РОССИИ

© 2023 г. А. Ю. Крылова¹, В. М. Зайченко^{1,*}, Т. Н. Гаева², И. И. Лищинер¹, О. В. Малова¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: zaitch@oivtran.ru

Поступила в редакцию 05.10.2022 г.

После доработки 18.10.2022 г.

Принята к публикации 18.10.2022 г.

Рассмотрены процессы производства моторных топлив из биомассы. Проведено сравнение качества биотоплива. Высказано предположение, что наиболее перспективным методом производства жидкого биотоплива является двухстадийный процесс, включающий в себя гидротермальную карбонизацию биомассы с последующей гидрогенизацией полученного биоугля.

DOI: 10.56304/S1992722323010065

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Основные виды жидких моторных биотоплив и технологии их производства

1.1. Спирты

1.2. Сложные эфиры

1.3. Пиролизное масло

1.4. Синтетические топлива

2. Жидкие моторные биотоплива: возможности и перспективы для России

Заключение

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большое внимание уделяется рассмотрению вопросов получения различных видов биотоплив, в том числе жидких. Жидкие биотоплива – это жидкие продукты топливного назначения, преимущественно моторные топлива, полученные из биомассы. Производство моторных топлив из биомассы представляет собой относительно новую задачу.

Еще сравнительно недавно основные объемы электроэнергии и моторных топлив производили с использованием природных ископаемых (угля, нефти и природного газа). В настоящее время ситуация в значительной степени меняется. В первую очередь это касается энергетической сферы: происходит поэтапное замещение электрической энергии, получаемой по традиционным технологиям, на электроэнергию из возобновляемых источников, позволяющих минимизировать

отрицательное воздействие энергетики на окружающую среду. Начиная с 2011–2012 гг., стоимость электрической энергии, получаемой от ветряных и солнечных установок, стала равной стоимости энергии, производимой на традиционных ТЭС. Как следствие, в 2017 г. в мире объем производства энергии из возобновляемых источников превысил объем мощностей традиционной энергетики. Ситуация с жидкими моторными топливами, возможно, будет соответствовать сценарию развития возобновляемых источников в энергетике. Первоначально топлива из биомассы не смогут конкурировать с производимыми из нефтяного сырья, но в дальнейшем при проведении определенного объема исследований вероятно возможность создания технологий производства моторных топлив с использованием биомассы, которые будут с экономической точки зрения более выгодными по сравнению с традиционными.

С развитием биотехнологий все чаще возникает вопрос о целесообразности использования в нашей стране, занимающей одно из первых мест в мире по добыче нефти, жидких моторных топлив, произведенных из альтернативного сырья и прежде всего из биомассы. Еще в конце 2007 г. в России был взят курс на промышленное производство биотоплива [1]. Однако, несмотря на многочисленные заявления о необходимости развития этих видов топлив, до настоящего момента не выработана четкая государственная политика в отношении их производства.

Отметим, что, несмотря на неуклонный рост мирового производства жидких биотоплив с начала 2000-х гг., к 2009 г. оно достигло уровня

1635 тыс. баррелей в сутки, что составляет примерно 2% мировой мощности нефтеперерабатывающих предприятий [2]. Таким образом, этот энергоноситель не оказал серьезного влияния на мировую структуру потребления жидких видов топлив, и на текущий момент ситуация мало изменилась.

Не углубляясь в детали технологического оформления отдельных процессов производства жидких моторных биотоплив, постараемся понять, почему внедрение этих технологий протекает так медленно, какое направление является наиболее перспективным и что нужно сделать для максимального ускорения его развития.

1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЖИДКИХ МОТОРНЫХ БИОТОПЛИВ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА

При рассмотрении жидких биотоплив наибольшее внимание уделяют жидким моторным топливам, т.е. топливам, которые могут быть использованы вместо нефтяных (бензина и дизельного топлива) в двигателях внутреннего сгорания, причем предпочтительно без их конструктивного изменения. Известно, что большинство биотоплив значительно различаются по физико-химическим свойствам и теплотехническим характеристикам от традиционных жидких углеводородных топлив. Тем не менее жидкие биотоплива рассматриваются обычно именно как альтернатива современным нефтепродуктам, т.е. как способ полной замены традиционных топлив на ненефтяные, возобновляемые, имеющие иной источник происхождения. С целью понимания, насколько правомерен этот тезис в отношении России, остановимся кратко на основных видах жидких биотоплив.

Существует немало как уже давно известных, так и инновационных технологий, позволяющих получать разные виды жидкого биотоплива путем переработки биомассы, прежде всего растительной. В настоящее время рассматриваются следующие виды жидких моторных биотоплив:

- спирты (в основном биоэтанол и биометанол)
- сложные эфиры (биодизельное топливо или биодизель);
- пиролизное масло (пиромасло или пиронефть);
- синтетические углеводороды (синтетический бензин, синтетический дизель, синтетический керосин).

1.1. Спирты

Биоэтанол – этиловый спирт низкой степени очистки. Биоэтанол с давних времен производят спиртовым брожением биомассы, содержащей

углеводы (виноград, ягоды и т.п.) или крахмал (картофель, рис, кукуруза и т.п.), под действием ферментов дрожжей и бактерий [3, 4]. Наиболее перспективным для России сырьем для производства биоэтанола является непищевое целлюлозосодержащее сырье (древесина, солома, отходы обработки зерна и т.д.), поскольку крахмало- и сахаросодержащее сырье дорого и в наших природно-климатических условиях может быть использовано только для выработки спирта пищевого и медицинского назначения.

В основе биологической деградации лигноцеллюлозы лежит действие целлюлолитических ферментов [5]. Реакционная способность лигноцеллюлозы невелика, поэтому для ферментативного осахаривания необходимо обеспечить максимально большую поверхность сырья и разрушить микрофибрилярную структуру целлюлозы. Реакционную способность природных субстратов снижает и наличие лигнина. Наиболее эффективным, но также дорогим и энергоемким способом предварительной подготовки сырья является разmol. Поэтому в качестве обработки используют воздействие щелочи, гамма-облучение, механическую и термообработку в разбавленной серной кислоте с последующей экстракцией лигнина и другие методы. Гидролиз можно проводить серной кислотой или биологическим способом, с помощью ферментов, выделяемых грибами. Далее при использовании дрожжей можно получить спирт. В результате брожения получается раствор, содержащий не более 15% этанола, так как в более концентрированных растворах дрожжи обычно гибнут. Из этого раствора этанол выделяют дистилляцией.

Биоэтанол производится и с успехом используется в двигателях внутреннего сгорания в США, Бразилии и Европе. Среди всех видов жидкого биотоплива биоэтанол является самым распространенным. Мировой объем его производства составляет более 70 млн т с тенденцией к ежегодному увеличению не менее чем на 5% [1]. Несмотря на то что по энергетической плотности биоэтанол значительно уступает бензину (теплота сгорания биоэтанола 19.6 МДж/л, а бензина – 32 МДж/л), замена бензина биоэтанолом приводит к пропорциональному снижению выброса CO₂ в атмосферу. Кроме того, даже небольшое содержание биоэтанола в бензине обеспечивает значительное снижение токсичности выхлопных газов, так как присутствующий в биоэтаноле кислород обеспечивает полное сгорание смеси. Однако необходимо учитывать, что биоэтанол является окислителем и эффективным растворителем, поэтому для работы на чистом этаноле современные двигатели нуждаются в модификации. В связи с этим биоэтанол используется в основном как эффективный высокооктановый компонент жидких моторных топлив. Сегодня в

США около 30% всего бензина применяют с добавлением биоэтанола. В основном используют смеси биоэтанола с нефтяным топливом, содержащие до 15% спирта. Считается, что такое соотношение топлива не вредит системам автомобиля. То есть этанол является не полной альтернативой моторному топливу (так называемым *drop-in*-биотопливом), а существенным дополнением к нему.

Вместе с тем в США уже разработаны автомобили, способные потреблять чистый биоэтанол в качестве топлива. Можно согласиться, что эксплуатация таких автомобилей представляет определенную альтернативу в ряде стран. Однако для России этот путь маловероятен. Главной причиной является исключительная гигроскопичность этанола, способного смешиваться с водой в любых отношениях и образовывать азеотропные смеси. Наличие воды в топливе приводит не только к снижению его теплотворной способности, но и препятствует его возгоранию, т.е. делает топливо непригодным к использованию. Учитывая, что на большинстве территорий России климат холодный и влажный, гигроскопичность этанола превращается в большую проблему. Кроме того, нельзя не принимать во внимание определенный национальный менталитет, который неизбежно проявится при переходе на биоэтанол (биоспирт) как на альтернативное топливо.

Биометанол можно получить из растительной биомассы синтетическим методом через стадию газификации или метановым сбраживанием. Биометанол отличается от биоэтанола более низкой теплотой сгорания (около 16 МДж/л), более высокой гигроскопичностью, коррозионной агрессивностью и токсичностью паров. Производство биометанола из растительной биомассы в качестве жидкого моторного топлива сегодня не представляет промышленного интереса. К тому же метанол получают в больших объемах синтетическим путем. Кроме того, метанол – сильнейший яд. Сходство его физических свойств с этанолом делает его еще более опасным в случае широкомасштабного использования в России.

1.2. Сложные эфиры

Биодизель, как и биоспирты, по своему составу существенно отличается от соответствующего нефтяного топлива [6]. Биодизель представляет собой эфиры карбоновых кислот, которые получают переэтерификацией растительных масел. Этот вид топлива можно производить более чем из 50 видов масличных культур (подсолнечника, рапса, сои, хлопка, льна, арахиса и т.д.).

К безусловным достоинствам биодизеля относятся отличные смазочные свойства, биоразлагаемость, низкий уровень токсичности, а также

простота и дешевизна производства. Однако этот вид топлива характеризуется агрессивным воздействием на детали двигателя и лакокрасочные покрытия автомобиля. Вязкость “чистого” биодизеля на 1–2 порядка выше вязкости нефтяного дизельного топлива и возрастает с понижением температуры, что затрудняет его перекачку по топливной магистрали от бака до двигателя, особенно в условиях холодного климата. Наличие в топливе эфиров непредельных жирных кислот является причиной постепенного осмоления топливной смеси под воздействием окружающей среды. Все это приводит к необходимости использования смеси биодизель–нефтяное дизтопливо с содержанием биодизеля не более 20%.

Отметим, что при производстве биодизеля, как и биоэтанола, образуется значительное количество отходов (багассы, жмыхов, глицерина), нуждающихся в утилизации, что неизбежно приводит к удорожанию процесса. При производстве биодизеля получается смесь, которая после отстоя разделяется на легкие фракции, обычно метиловых эфиров карбоновых кислот (собственно биодизель), и тяжелые фракции (глицериновую фазу). Глицериновая фаза нуждается в очистке до состояния чистого глицерина, без чего ее хранение и утилизация представляют серьезную проблему из-за повышенной щелочности и содержания метанола.

Таким образом, даже если не принимать во внимание вопросы природопользования, биоэтанол, биометанол и биодизель в настоящее время трудно представить в качестве реальной альтернативы нефтяному моторному топливу в масштабах всей России.

1.3. Пиролизное масло

Пиролизное масло (*пиромасло* или *пиронефть*) получают путем пиролиза (нагрева биомассы в анаэробных условиях) при температурах выше 500°C. Сырьем для производства пиронефти является любая биомасса. Для получения пиронефти из биомассы можно использовать любой вид пиролиза: медленный (до 30 мин), быстрый (1–2 с) и ультрабыстрый (<1 с). Наиболее предпочтителен быстрый пиролиз, позволяющий довести выход целевых продуктов до 70%. К его существенным недостаткам относят необходимость проведения предварительной сушки сырья до влажности 5%, а также высокую температуру реакции (выше 800°C). При высоких скоростях нагрева (1000°C/с и более) до 650°C с последующим быстрым закаливанием реакционной смеси происходит конденсация жидких продуктов. Доля твердого углеродсодержащего осадка при этом минимальна или он вообще не образуется.

Имеется опыт использования пиротоплива в котлах, дизельных и газотурбинных двигателях. Топливо этого вида во многом подобно природной нефти. В его состав входят углеводороды разных гомологических рядов (преимущественно ароматические) и кислородсодержащие соединения (преимущественно спирты и эфиры).

К сожалению, из пиронефти невозможно получить товарные моторные топлива путем простой перегонки. Получаемые таким образом продукты не отвечают большинству требований, предъявляемых к товарным моторным топливам: они отличаются низкой теплотой сгорания, высоким содержанием кислорода (25–40%, в мазуте – до 1%), высокой кислотностью и, как следствие, высокой коррозионной активностью [7]. То есть качество пиротоплива, полученного быстрым пиролизом из биомассы, может быть недостаточным для его использования в коммерческих целях (в первую очередь, в двигателях внутреннего сгорания).

Для улучшения качества этого вида пиротоплива применяют различные технологии на основе физических и химических методов. Физические заключаются в фильтрации жидкости/паров для удаления углистого вещества, формировании эмульсий с углеводородами и добавлении растворителей. К химическим методам относят реакцию со спиртами, каталитическое дезоксигенирование (удаление кислорода), гидрогенизацию и каталитический крекинг в паровой фазе.

Дезоксигенирование осуществляют различными методами, при этом часть целевого продукта теряется вследствие образования легких жидких и газообразных углеводородов.

Гидрооблагораживание пиромасел, полученных быстрым пиролизом, требует больших объемов водорода, а жесткие технологические условия делают его неэкономичным. Протекающие при этом реакции являются неравновесными. Кроме того, реакторы гидрооблагораживания зачастую забиваются, что обусловлено наличием предшественников кокса, присутствующих в пиромасле, или кокса, полученного при проведении катализа.

В последние годы большое внимание привлекает процесс гидропиролиза или гидрогенизации [8]. Основы этих процессов были заложены столетия назад в Германии при разработке технологии прямого ожижения бурых углей, однако как способ переработки биомассы этот метод стал рассматриваться недавно. Гидропиролиз проводится, как и термический пиролиз, при повышенных температуре ($>500^{\circ}\text{C}$), давлении (>10 МПа) и времени контакта от нескольких секунд до одной минуты, но в среде водорода. При гидрогенизации происходит ожижение исходного продукта и насыщение его водородом. При осуществлении

процесса протекают разнообразные реакции, в том числе гидрирование с присоединением водорода, расщепление гидрированных высокомолекулярных веществ, изомеризация, отщепление гетероатомов с образованием воды, сероводорода, аммиака. В результате гидрогенизации высокомолекулярные органические вещества превращаются в смесь низкомолекулярных соединений, насыщенных водородом. Образующийся продукт по своим свойствам очень близок к сырой нефти.

Недостатками процессов быстрого пиролиза и гидропиролиза биомассы являются высокие температуры, необходимость тщательной подготовки сырья (измельчение и предварительная сушка до относительной влажности ниже 5%), а также высокое давление (в случае гидрогенизации).

1.4. Синтетические топлива

Синтетические топлива (бензин, керосин и дизельное топливо) могут быть получены из любых видов биомассы каталитической конверсией синтез-газа (смеси оксида углерода и водорода), произведенного газификацией биомассы. Этот процесс получил название ВТЛ (“биомасса в жидкость” от англ. Biomass-To-Liquid). Для получения синтез-газа могут быть использованы любые виды биомассы.

Технология ВТЛ может быть реализована в двух вариантах:

- прямое получение углеводородов из синтез-газа (синтез Фишера–Тропша от англ. Fischer–Tropsch Process);

- синтез бензина конверсией метанола, получаемого из синтез-газа (“метанол в бензин” или процесс МТГ от англ. Methanol-To-Gasoline).

Синтез Фишера–Тропша – каталитический процесс, позволяющий осуществлять превращение смеси оксида углеводорода и водорода в углеводороды (“синтетическую нефть”). Как и гидрогенизация, технология синтеза Фишера–Тропша была разработана в Германии в начале прошлого века как способ непрямого (через синтез-газ) ожижения бурых углей. Существенным достоинством синтетической нефти, полученной этим методом, по сравнению с природной нефтью является отсутствие в продуктах серо-, азотсодержащих, а в ряде случаев и ароматических соединений, что заметно повышает его экологическую ценность.

В синтезе углеводородов из монооксида углерода (СО) и водорода (H_2) образуется смесь газообразных, жидких и твердых углеводородов. С учетом особенностей этого полимеризационного процесса была разработана технология, предназначенная для получения дизельного топлива и реактивного керосина (“синтез средних дистиллятов”) [9]. Процесс осуществляют в две

стадии: селективный синтез высокомолекулярных парафинов и их последующий гидрокрекинг с получением средних дистиллятов (дизельно-керосиновой фракции). Процесс впервые был реализован в промышленности компанией Шелл (Shell) в 1993 г. на заводе по синтезу углеводородов мощностью 500 тыс. т в год (г. Бинтулу, Малайзия). Синтез средних дистиллятов позволяет превращать в жидкие продукты до 80% углерода, содержащегося в синтез-газе. Однако доля целевых продуктов (т.е. средних дистиллятов) в жидких продуктах составляет 80%, а остальное приходится на долю нефти (широкой бензиновой фракции), которая не находит пока квалифицированного применения.

В настоящее время синтез средних дистиллятов реализован на восьми предприятиях в ЮАР, каждое мощностью более 1 млн т в год, Малайзии, Катаре и Нигерии. Процесс позволяет получать высокочистое топливо. Тем не менее керосин и дизельное топливо рекомендуется смешивать с нефтяными аналогами в отношении 1:1 для нивелирования неблагоприятного воздействия синтетического топлива на двигателя при длительной эксплуатации.

Синтез метанола из синтез-газа широко используется во всем мире для производства этого соединения. Учитывая возможность получения метанола низкой стоимости, все больше внимания уделяется процессам его переработки в моторные топлива: синтетический бензин, получаемый по методу Mobil, и диметилловый эфир.

Процесс MTG основан на использовании цеолитных катализаторов, разработанных компанией Мобил (Mobil) в 1970-е гг. Состав синтетического бензина близок к составу соответствующего нефтепродукта: в него входят сильно разветвленные парафины и ароматические углеводороды, а также небольшое количество олефинов и нафтенов. Октановое число бензина 92–94. Энергетический баланс процесса MTG является чрезвычайно благоприятным: 95% термической энергии сырья сохраняется в углеводородных продуктах, оставшиеся 5% выделяются как тепло реакции. Тем не менее развитие процесса протекает недостаточно эффективно вследствие высокой себестоимости продукции.

Отметим, что технологии получения синтетических углеводородных топлив основаны на использовании сложных каталитических процессов, они непросты в эксплуатации и с высокой эффективностью могут быть реализованы в больших масштабах только с привлечением высококвалифицированных кадров. Во всех случаях требуется тщательная подготовка сырья перед его использованием. Этот метод может представлять реальную альтернативу существующим процессам переработки нефти только в регионах ее от-

сутствия или в условиях ограниченного доступа к нефтяному рынку (например, в случае Германии 1930-х гг. или ЮАР 1950-х гг.).

2. ЖИДКИЕ МОТОРНЫЕ БИОТОПЛИВА: ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДЛЯ РОССИИ

Приведенный выше краткий анализ существующих методов производства биотоплив позволяет сделать вывод, что в настоящее время в масштабах всей России биотопливо не может представлять реальную альтернативу нефтяному топливу, т.е. служить его полным заменителем. Однако биотопливо может и должно быть востребовано для решения вполне конкретных задач, к которым можно отнести следующие:

– утилизация сельскохозяйственных отходов (учитывая сезонную необходимость увеличения закупок топлива в период посевной и уборочной кампаний, возможно создание производственных предприятий малой мощности, нарабатывающих топливо в остальное время года);

– утилизация бытовых отходов и иловых осадков (для улучшения экологической обстановки в городах возможен одновременный перевод части городского транспортного парка на биотопливо или смесь биотоплива с нефтяным топливом);

– обеспечение нужд распределенной энергетики в отдаленных районах, включая Арктическую зону, отказ от северного завоза в Якутию (при отсутствии или недостаточном количестве местного сырья целесообразно использование микроводорослей и/или иловых осадков очистных сооружений);

– обеспечение моторным топливом и электричеством районов, находящихся в зоне чрезвычайных ситуаций (использование любых местных сырьевых ресурсов или микроводорослей при отсутствии требуемых количеств местного сырья).

В настоящее время Россия имеет значительный потенциал производства биотоплив из разнообразных отходов. Так, по оценке министерства сельского хозяйства РФ в промышленности образуется более 390 млн т отходов в год (по сухому веществу), в секторе лесо- и деревообработки – 700 млн т, в ЖКХ (твердые бытовые отходы) – 70 млн т (из них 10 млн т приходится на коммунальные стоки). По данным ФГНУ “Росинформ-агротех” потенциал агропромышленного комплекса страны оценивается в 773 млн т отходов. Эффективное использование и переработка в биотопливо растительных и древесных отходов позволят сократить зависимость предприятий от централизованного энергоснабжения.

В то же время реализация крупнотоннажного производства, например синтетических углеводородов из биомассы через стадию газификации,

представляется весьма проблематичной в некоторых регионах из-за отсутствия требуемого количества сырья на постоянной основе. Более вероятной в таком случае может быть организация производства этих продуктов из природного газа или угля, однако большие капитальные затраты на создание производства и высокая себестоимость товарной продукции по сравнению с нефтяными аналогами не позволяют дать благоприятный прогноз по широкомасштабному внедрению этого метода в ближайшей перспективе.

Наибольший интерес в плане получения моторных топлив из местного сырья представляют биодизель и пиромасло, однако, как было отмечено выше, эти виды топлив не лишены недостатков. Так, высокая вязкость ограничивает их использование в холодное время. Содержащиеся в биотопливе кислоты могут вызвать коррозию материалов энергогенерирующего оборудования. Оба эти вида топлива нуждаются в облагораживании.

Вместе с тем даже беглое сравнение технологий производства биодизеля и пиролизного масла показывает, что ассортимент сырья, используемого во втором случае, значительно шире, что делает этот способ получения биотоплива более перспективным, хотя, как уже упоминалось, данный процесс энергозатратен, а высокое содержание кислорода ухудшает качество этого топлива и требует дезоксигенирования с некоторой потерей конечного продукта.

Таким образом, актуальной задачей является разработка технологий производства из биомассы жидких моторных топлив высокого качества, лишенных указанных недостатков. Если исходить из предположения, что основные недостатки биодизеля и пиронефти связаны с наличием в них кислорода, то очевидно, что эта задача может быть решена путем применения дезоксигенирования. Этот тип каталитических реакций обычно используется для удаления кислорода из продуктов (индивидуальных органических соединений или их смесей) чаще всего в виде воды, оксида или диоксида углерода. Гораздо реже предлагается применять дезоксигенирование не к конечному продукту (т.е. моторному топливу), а к сырью. Вместе с тем улучшение качества сырья может привести не только к улучшению характеристик готового продукта, но и повлиять на сам процесс его получения и на общую экономику процесса. Например, если для дезоксигенирования биомассы использовать гидротермальную карбонизацию [10], то можно решить сразу несколько проблем, возникающих при получении биотоплива.

Гидротермальная карбонизация или “холодное обугливание” – процесс образования биоугля при температуре около 200°C в присутствии воды без доступа воздуха. При этом можно использо-

вать любой вид биомассы, даже с высокой влажностью. Во время проведения процесса (обычно ~16 ч) биомасса теряет кислород, обезвоживается и карбонизируется до CO₂-нейтрального биоугля. При гидротермальной карбонизации практически весь углерод биомассы переходит в биоуголь, т.е. процесс имеет почти 100%-ную углеродную эффективность. По завершении процесса в реакторе образуется густая водо-угольная суспензия. По существу, гидротермальная карбонизация позволяет унифицировать сырье, приводя его к некоторому “стандартизованному” состоянию – биоуглю. Полученный продукт имеет кристаллическую структуру, аналогичную природному углю, однако биоуголь чище, содержит больше углерода, легко отделяется от воды и отличается высокой реакционной способностью. Таким образом, последующий пиролиз биоугля может протекать в более мягких условиях, чем пиролиз биомассы. Минимальное количество кислорода в сырье, безусловно, окажет положительное влияние на качество готового продукта.

Обычно для проведения гидрогенизации рекомендуют использовать материалы, в которых отношение углерода к водороду (C:H) колеблется в диапазоне от 8 до 16, а выход летучих веществ на горючую массу не ниже 35–36%. Наибольший выход жидких продуктов достигается при гидрогенизации углей невысокой стадии метаморфизма (бурых, газовых, длиннопламенных). Биоуголь полностью соответствует этим параметрам. Использование на данной стадии катализаторов и/или доноров водорода (например, декалина или других полициклических соединений), позволяющих вводить в реакционную зону водород, обладающий повышенной активностью в момент выделения, даст возможность еще больше смягчить условия протекания реакции и значительно улучшить экономику процесса.

Перспективным направлением получения водорода для осуществления гидрогенизации продуктов гидротермальной карбонизации является использование водорода, получаемого при термической конверсии биомассы по технологии Объединенного института высоких температур РАН (ОИВТ РАН). Разрабатываемая технология в отличие от существующих процессов газификации и пиролиза позволяет получать из биомассы газ, состоящий из ~90% водорода и оксида углерода. При этом отношение H₂/CO в зависимости от природы биомассы и параметров процесса может составлять 1–2 [11].

Таким образом, весьма перспективно получение моторных топлив из биомассы по двухстадийной технологии, включающей в себя гидротермальную карбонизацию с получением стандартизованного биоугля и гидропиролиз биоугля с производством аналога природной нефти – гид-

рированного пиромасла, разделение которого на фракции позволит выделить качественное моторное топливо. Этот способ дает возможность наиболее эффективно использовать широкий ассортимент сырья (любую биомассу) и производить моторные топлива, не отличающиеся по качеству от соответствующих нефтепродуктов.

Предлагаемая технология представляется наиболее перспективным, но далеко не единственным методом получения биотоплив, который следует развивать. Внедрение разработанной технологии – это “краткосрочная” задача, т.е. задача, которая может быть реализована в короткие сроки при относительно небольшом финансировании. Вместе с тем уже сейчас возникает необходимость реализации крупномасштабных проектов по производству “зеленых” топлив из биомассы. Как известно, в ЕС готовилось решение об использовании биоавиакеросина в качестве авиационного топлива. Предлагалось к 2020 г. довести использование биотоплива до уровня 4% от общего количества потребляемого авиацией горючего. В настоящее время планы ЕС по использованию так называемого устойчивого авиационного топлива SAF (Sustainable Aviation Biofuel) предусматривают, что все самолеты, приземляющиеся в европейских аэропортах, должны будут использовать топливо с долей SAF на уровне 2% к 2025 г., 5% к 2030 г. и 63% к 2050 г. [12]. Кроме того, потребление синтетического авиатоплива небиогенного происхождения (получаемого из CO₂ и “зеленого” водорода) должно увеличиться с 0.7% в 2030 г. до 28% в 2050 г. Судя по приведенным цифрам, к 2050 г. в международной авиации использование обычного авиакеросина из нефти будет сведено к минимуму [13]. Таким образом, сегодня речь идет о практическом использовании жидких моторных топлив из биомассы в различных типах двигателей. У России есть отрицательный опыт, когда своевременно не были приняты меры, направленные на изменение условий эксплуатации самолетного парка (в соответствии с ограничениями по снижению шума от самолетных двигателей). Следствием этого явились запрет на допуск российских самолетов в аэропорты Европы и полная замена парка отечественных самолетов на импортные. Решение об обязательном использовании биоавиакеросина, если уже сейчас не приступить к созданию технологий его производства, подобным образом может привести к достаточно неприятным последствиям.

Аналитический центр ТЭК (АЦ ТЭК) при Минэнерго России недавно провел анализ текущего статуса развития сегмента авиационного биотоплива, и были сделаны следующие основные выводы.

SAF можно рассматривать как компонент авиатоплива, керосиновую фракцию, получен-

ную ректификацией из широкой фракции биодизеля. На текущий момент доля SAF в совокупном спросе на авиатопливо составляет ~0.1%. Крупнейшим игроком на рынке производства SAF является финская компания Neste с долей 95% и мощностью производства 100 тыс. т/год.

Одна из ключевых проблем в развитии сегмента SAF связана с тем, что, учитывая вопросы безопасности и технико-технологические факторы, его допустимая доля как компонента традиционного авиатоплива не превышает 50% и зависит от способа производства [14]. Однако тестовые полеты с использованием SAF производства компании Royal Dutch Shell, выполненные на самолетах, оснащенных двигателем Rolls-Royce, показали, что полеты на чистом биотопливе возможны.

Существуют два подхода к производству биокеросина, используемые в промышленном масштабе: этерификация (образование сложных эфиров при взаимодействии кислот и спиртов) растительного сырья с получением биотоплива в виде масел и жиров (Hydrotreated Esters and Fatty Acids, HEFA) и газификация биосырья в синтезгаз с дальнейшим производством жидкого биотоплива на основе процесса Фишера–Тропша (gasification-FT).

Этерификация растительного масла – самый распространенный способ получения биодизеля и SAF, хотя у данного метода имеются ограничения по стоимости и доступности сырья.

Газификация биосырья с последующим получением синтетической нефти при помощи процесса Фишера–Тропша – второй по популярности метод. Данный способ, как отмечалось, характеризуется более высокими затратами, но меньшими ограничениями по стоимости и доступности сырья.

Иные методы получения SAF включают такие пути конверсии, как “спирты-в-керосин” (Alcohol-To-Jet, ATJ), “сахара-в-изопарафины” (Sugar-To-Isoparaffins, SPI), каталитический гидротермолиз (Catalytic Hydrothermolysis Jet, CHJ), и на данный момент, находясь в стадии пилотных работ, не применяются в промышленности.

Наиболее рентабельной технологией производства SAF является этерификация растительных масел. При этом стоимость получаемого биокеросина остается высокой и в 2–3 раза превышает стоимость традиционного авиатоплива.

В России первой авиакомпанией, объявившей о применении биотоплива, стал “Аэрофлот”. Авиаперевозчик планирует создать производство SAF совместно с компанией “Газпром нефть”.

На реальность планов по внедрению биотоплива может повлиять рост цен на продовольственные культуры и общий рост цен на сырьевые товары, удорожающие любые производства, особенно новые и не доведенные до уровня

широкомасштабного производства. Биотопливо, за исключением давно применяемого этанола из продовольственных культур и дизеля из рапсового масла, служит пока в основном рекламным целям компаний. Например, атакуемая “зелеными” компания Exxon Mobil Corp. объявила о планах производства биотоплива из водорослей. В начале прошлого десятилетия инвестиции в это направление дали ничтожные результаты, но сегодня Exxon, активно рекламируя свою экологическую направленность, демонстрирует пруды с зелеными водорослями [13].

В западных странах получение авиационного биотоплива базируется на использовании растительного сырья. Можно предположить, что для России этот путь не будет единственным. Сельскохозяйственная продукция, в особенности зерновые культуры, в настоящее время является предметом экспорта, и объемы экспортных поставок каждый год увеличиваются. Отчуждение сельскохозяйственных угодий под получение сырья для жидких топлив в нашей стране вряд ли можно считать целесообразным, однако речь может идти об утилизации растительных отходов. Кроме того, Россия обладает значительными ресурсами других видов биомассы: например, в нашей стране сосредоточено более 45% мировых запасов торфа. К безусловно перспективным видам сырья относятся также микроводоросли, осадки сточных вод, растительные сельскохозяйственные отходы и отходы птицеводства и животноводства. На них следует обратить внимание в первую очередь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор в пользу опережающего развития альтернативных источников энергии, который был сделан в последние десятилетия многими зарубежными странами прежде всего с целью ухода от импортозависимости от ископаемых энергоносителей, привел к значительному глобальному росту возобновляемой энергогенерации, которая по своим объемам уже превышает мощности традиционной энергетики. Быстро растущим сегментом мирового рынка энергоносителей являются жидкие моторные биотоплива, что поддерживается и современной экологической политикой.

В России, несмотря на высокий потенциал развития данного направления, с точки зрения доступности различных видов биомассы технологии производства биотоплив не получили широкого распространения. Учитывая большие запасы ископаемых энергоносителей, на перспективу развертывание крупнотоннажного отечественного производства жидких биотоплив можно прогнозировать, в первую очередь, в связи с реальной перспективой ужесточения международных экологических норм. Вместе с тем о потребности в

поддержке этого направления, начиная с этапа разработки и внедрения наиболее эффективных технологий, свидетельствует необходимость решения ряда экономических и социально значимых задач, таких как утилизация бытовых и сельскохозяйственных отходов, иловых осадков, развитие распределенной энергетики в отдаленных регионах, включая Арктическую зону, и локальной энергогенерации из местных возобновляемых ресурсов в условиях чрезвычайных ситуаций и др.

Несмотря на наличие в настоящее время широкого спектра технологий производства жидких биотоплив, все они имеют определенные недостатки, препятствующие их широкомасштабному внедрению: в одних случаях – это высокая энергозатратность, в других – отсутствие стабильной сырьевой базы, многостадийность производственного процесса или необходимость предпроизводственной подготовки биомассы и др. Анализ наиболее известных технологий в этой области позволяет сделать вывод о наибольших коммерческих перспективах двухстадийной технологии термической конверсии биомассы, включающей в себя гидротермальную карбонизацию с получением биоугля и гидропиролиз биоугля с выделением моторных биотоплив. К преимуществам технологии относятся возможность использования для переработки любых видов биомассы и достижение высокого качества целевых топливных продуктов, которые по своим характеристикам не отличаются от соответствующих традиционных нефтепродуктов.

Работа выполнена частично в рамках тематического плана НИОКР НИЦ “Курчатовский институт” на 2022 год “Прикладные междисциплинарные исследования в нано-, био-, инфо- и когнитивных технологиях” по п. 1.12 “Разработка научно-технических основ для создания автономных систем жизнеобеспечения для использования в условиях Крайнего Севера, Арктики и космоса”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Передерий С.* // ЛесПромИнформ. 2013. № 6 (96). С. 152.
2. *Матвеев И.Е.* Производство жидкого биотоплива в мире и РФ. Всероссийский научно-исследовательский конъюнктурный институт (ВНИКИ). <http://www.vniki.ru/site/LSP7A37A6>
3. *Вильданов Ф.Ш., Латыпова Ф.Н., Чанышев Р.Р., Николаева С.В.* // Башкирский химический журнал. 2011. Т. 18. № 2. С. 128.
4. *Миронова Г.Ф.* Дис. “Повышение эффективности процесса получения биоэтанола из шелухи овса”. ... к. т. н. 03.01.06. Ин-т проблем химико-энергетических технологий СО РАН. Москва, 2020. 117 с. Диссертация_Мироновой_Г.Ф.pdf (muctr.ru)

5. Биоконверсия лигноцеллюлозных объектов. http://www.biotechnolog.ru/prombt/prombt2_7.htm
6. Ким С. // Chem. J. 2007. Ноябрь. С. 27. http://tcj.ru/wp-content/uploads/2014/02/2007_11_27-29_biodisel.pdf
7. Железная Т.А., Гелетуха Г.Г. // Пром. теплотехника. 2005. Т. 27. № 5. С. 79.
8. Гидропиролиз. Справочник химика 21. Химия и химическая технология. <http://chem21.info/info/882942/>
9. Leckel D. // Energy Fuels. 2009. V. 23 (5). P. 2342.
10. Передерий С. // ЛесПромИнформ. 2014. № 3 (101). С. 158 <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=3675>
11. Kosov V.V., Kosov V.F., Zaichenko V.M. // Chem. Eng. Trans. 2015. V. 43. P. 457.
12. Impact Assessment Accompanying the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on ensuring a level playing field for sustainable air transport. European Commission Working Document. 14.07.2021. Brussel. 2021. P. 6.
13. До полетов на биотопливе авиации еще далеко. <https://nangs.org/news/subscription> Биотопливо
14. Самойленко В.М., Грядунов К.И., Тимошенко А.Н., Ардешири Ш. // Научный вестник МГТУ. 2020. Т. 23. № 3. С. 17. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-3-17-28>