

# НЕФТЕХИМИЧЕСКИЕ БИОТЕХНОЛОГИИ: ВЫЗОВЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ РОССИИ



Декабрь 2014

Исследование подготовлено коллективом авторов под общей редакцией А. Костина

Цитирование материалов допускается исключительно с указанием ссылки на источник.  
Цитирование на интернет-ресурсах допускается с использованием активной гиперссылки на [www.rupec.ru](http://www.rupec.ru)

© Информационно-аналитический центр RUPEC, 2014

<b>Введение .....</b>	<b>2</b>
<b>Основные выводы .....</b>	<b>3</b>
<b>Ключевые идеи биотехнологий .....</b>	<b>4</b>
<b>Как это работает.....</b>	<b>6</b>
<b>Генеалогия .....</b>	<b>8</b>
<b>Метан из возобновляемого сырья .....</b>	<b>9</b>
Биогаз в России .....	11
<b>Биоэтанол.....</b>	<b>12</b>
Топливо .....	12
Этил-трет-бутиловый эфир.....	14
Биоэтилен .....	16
Экономика биоэтилена .....	18
Биобутадиен.....	20
Системные проблемы индустрии биоэтанола .....	21
Технологии второго и третьего поколения .....	24
<b>Биоэтанол и биоэтилен в России.....</b>	<b>27</b>
<b>Другие продукты из биомассы.....</b>	<b>33</b>
Спирты C4.....	33
Мономеры для синтетических каучуков.....	34
<b>Влияние биотехнологий на нефтехимию .....</b>	<b>36</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие химических биотехнологий, то есть процессов получения из возобновляемого сырья известных или новых химических продуктов в соответствии с принципами, свойственными живой природе, стало одним из ключевых трендов мировой химической индустрии в конце XX и начале XXI века. Получаемый из растительного сырья биоэтанол буквально перевернул топливные рынки Северной Америки и Бразилии, активное внедрение технологий получения биодизеля сформировало новую реальность на мировом рынке глицерина, который получают как побочный продукт переэтерификации природных жирных кислот. Все увереннее о себе заявляют биопластики, с каждым годом дешевея и приближаясь по стоимости к традиционным нефтехимическим полимерам. Пока, конечно, подавляющее большинство традиционных химических продуктов, получаемых биохимическими методами из возобновляемого сырья, оказывается дороже традиционных аналогов из ископаемых углеводородов. Но это соревнование стимулирует активнейшую разработку и совершенствование процессов, а скорость коммерциализации новых технологий и их промышленного внедрения поражает. Инвестиции в научные и прикладные поиски в области ферментативных процессов, метаболизма бактерий и генной модификации микроорганизмов по своему объему являются рекордными среди всех прочих направлений в химической технологии.

Идея поставить на управляемые промышленные рельсы те же процессы и материалы, которые реализуются естественным образом в природной среде, владели человечеством всегда. В последние годы мощным катализатором научного поиска в этом направлении стала стремительно растущая озабоченность вопросами экологии и ресурсосбережения. Кроме того, активная государственная поддержка развития биотехнологий на основе растительного сырья в странах с постиндустриальной экономикой стала новым и достаточно эффективным способом поддержки сельского хозяйства с вытекающими отсюда важными социальными и демографическими результатами.

Россия по традиции пока остается в стороне от этой глобальной тенденции. Поскольку страна богата запасами традиционного химического сырья, экономические и экологические резоны, связанные с возобновляемостью ресурсов, в нашей стране пока не очень актуальны. Однако возможность вовлечь в оборот новые посевные площади, которые сейчас бездействуют, и поддержать тем самым или даже вдохнуть новую жизнь в балансирующую на грани выживания сельскохозяйственную отрасль, сохранить заселенность регионов с традиционно сельским населением — вот те позитивные результаты развития индустрии химических биотехнологий, которыми Россия может и должна воспользоваться.

В данном исследовании информационно-аналитический центр RUPEC делает обзор ключевых технологических и производственных тенденций в области химических технологий и анализирует предпосылки для активного развития таковых в России.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

- Полномасштабное развитие индустрии химических биотехнологий, в частности биоэтанола, возможно лишь при благоприятных климатических и агротехнических условиях и/или при значительной господдержке как самой промышленности и исследований, так и соответствующих сельхозпроизводителей.
- Такая господдержка провоцирует переток отраслевых инвестиций из сфер традиционного «пищевого» агробизнеса в субсидируемое техническое растениеводство, что создает риски с точки зрения продуктообеспечения.
- Существует устойчивая корреляция между размером господдержки производителей кукурузы в США и приростом мощностей по биоэтанолу.
- Масштабное внедрение технологий второго и третьего поколения, вероятно, позволит как снизить стоимость биоэтанола, так и привлечь в эту индустрию страны с невыгодными климатическими условиями, но большими ресурсами целлюлозного сырья (древесины, сена, отходов растениеводства), однако за горизонтом 10 лет.
- В обозримой перспективе при сохранении текущего статус-кво по углеводородам биоэтилен может стать конкурентоспособным лишь в отдельных регионах мира. Переход на целлюлозное сырье усилит конкурентоспособность также после 2025 года.
- Преимущества биоэтилена как возобновляемого химического продукта находятся под сильным давлением со стороны других развивающихся технологий производства олефинов, предполагающих использование природного газа и угля.
- Влияние новых химических биотехнологий на мировую нефтехимию в целом будет незначительным до тех пор, пока не удастся кардинально снизить издержки на сахаросодержащее сырье (после 2030 года).
- Единственным продуктом, который уже в ближайшей перспективе может выиграть по издержкам у традиционной нефтехимии, может стать 1,4-бутандиол.
- В России развитие индустрии биоэтанола сдерживается системой регулирования оборота спирта и недифференцированными акцизами, фактическим отсутствием рынка сбыта и фактором цены сырья, которое в пересчете на тонну биоэтанола по итогам 2013 году примерно на 19% дороже, чем в США.
- У биоэтанола как топлива в России даже в случае изменения законодательства останутся очень серьезные и труднопреодолимые проблемы. Поэтому при поддержке развития индустрии биоэтанола стоит предусмотреть также поддержку инвестициям в его более глубокие переделы. Химическая переработка биоэтанола может стать основным направлением спроса на него на внутреннем рынке.
- Главной целью, которой стоит задаваться, поддерживая развитие химических биотехнологий в России, следует считать развитие производства технических сельхозкультур и создание собственной научной базы в этой сфере.

## КЛЮЧЕВЫЕ ИДЕИ БИОТЕХНОЛОГИЙ

Анализируя возможные предпосылки заинтересованности глобального химического бизнеса и регуляторов темой химических биотехнологий, можно выделить три основные идеи.

Во-первых, подавляющее большинство крупнотоннажных промышленных процессов в мировой химической индустрии реализует реакции и процессы, которые или вообще не протекают в нормальных условиях (то есть при обычных температуре окружающей среды, атмосферном давлении и без катализаторов), либо протекают с ничтожной скоростью. Это заставляет в промышленном производстве прибегать к повышенным температурам и давлениям, использовать сложные и подчас очень дорогие каталитические системы. Отсюда автоматически следует потребность в более дорогостоящем оборудовании с более высокими прочностными и теплотехническими характеристиками, в динамических агрегатах для управления давлением и направлениями потоков, в теплообменниках и холодильниках, призванных реализовывать перепады температур. В то же время абсолютное большинство химических реакций, протекающих в живых организмах, идут при температуре окружающей среды и без избыточного давления. Естественное, что перспектива отказа от этих факторов влияния на равновесие химических реакций манит к себе как магнит, ведь это позволило бы кратно сократить капитальные затраты и эксплуатационные расходы при промышленном химическом производстве.

Во-вторых, современная химическая промышленность в качестве сырья использует в основном ископаемые ресурсы, будь то углеводороды, металлы или минеральные руды. Оставляя за скобками достаточно спорный, на наш взгляд, момент с прогнозированием сроков исчерпания того или иного вида ресурсов, нельзя не отметить, что с течением времени добыча ископаемых видов сырья становится все более и более затратной. И обратить этот процесс вспять, увы, невозможно, потому что во все времена сначала в разработку вовлекаются более «простые» источники, и лишь по мере их исчерпания начинается добыча все более «сложных», а потому «дорогих» запасов. С этой точки зрения возможность получить источник сырья для химического (и не только) производства, стоимость добычи которого оставалась бы примерно постоянной, также является очень притягательной. Биологическое и, в более узком смысле, растительное сырье, а тем более генетически модифицированное, практически полностью этому требованию отвечает. Кроме того, в терминах набирающей популярность концепции устойчивого развития растительное сырье является почти в полной мере возобновляемым, в отличие от ископаемого.

Наконец, в-третьих, бросается в глаза драматическая разница между жизненным циклом любого рукотворного полимера и вещества биологического происхождения, которые, надо сказать, в массе тоже являются полимерами (белки, нуклеиновые кислоты,

углеводы и т. п.). Первый, будучи помещен в природную среду, десятки и сотни лет останется без изменений. Второй в кратчайшие сроки разложится на составляющие элементы, которые посредством биосферных и пищевых циклов вновь окажутся вовлечены в производство новых веществ. Эта идея тесно смыкается с предыдущей — о возобновлении ресурсов, — но она же и отвечает все растущим экологическим запросам общества, которое начинает осознавать потенциальные риски того, что мы каждый год извлекаем из-под земли сотни миллионов тонн сырья, существенную часть этой массы в виде отходов оставляем затем на поверхности Земли, а оставшуюся часть отправляем в атмосферу.

Из этих трех идей складываются и три основных направления как чисто фундаментальных, так и прикладных, и даже опытно-промышленных поисков в химических биотехнологиях:

- химические технологии, использующие принципы живой природы, но традиционное сырье (с дешевым процессингом);
- химические технологии, использующие растительное сырье;
- материалы, деградирующие в природной среде.

Каждое из этих направлений в свою очередь разбивается на более узкие темы.

Сразу следует сделать оговорку насчет первого направления. Конечно, заменить дорогие и громоздкие металлические реакторы и колонны колониями клеток и водорослей, «поедающих» нефть или газ, — голубая мечта химических компаний. Но, к сожалению, традиционное углеводородное сырье представляет собой довольно тяжело вовлекаемые в химические превращения вещества. Собственно, для преодоления их химической инертности в промышленности и используются экстремальные условия и катализаторы. И как бы ни были сильны и эффективны ферменты в живых организмах, углеводороды нефти и газа им пока не по зубам. Да, отдельные примеры живых организмов, способных питаться нефтью из тонких пленок, известны и находят применение, например при биологической очистке стоков нефтехимических производств и при ликвидации разливов нефти в водоемах. Однако ничего полезного на выходе такие организмы не дают. В этом направлении будущее — в глубокой генной модификации подобных организмов. Но пока перспективы этого пути очень расплывчаты и можно, пожалуй, утверждать, что при жизни текущего поколения людей не удастся научить бактерии, скажем, «дышать» этаном с получением этилена. Поэтому данное направление нами рассматриваться не будет.

Что касается темы биоразлагаемых пластиков, то ей посвящено отдельное исследование центра RUPEC. В данном обзоре мы сконцентрируем внимание на тех химических биотехнологиях, которые уже реализуются промышленно или близки к коммерциализации.



## КАК ЭТО РАБОТАЕТ

Основным комплексным химическим процессом, который реализуется в живых организмах, является питание, то есть получение энергии в той или иной форме из пищи для поддержания жизнедеятельности. Наиболее универсальным видом пищи для организмов различного уровня сложности и организации являются углеводы (сахара), главным образом глюкоза. Миллиарды лет эволюции живых организмов породили всего три типа катаболизма глюкозы, встречающихся в живых клетках. Общим смыслом этих процессов является сложное постадийное расщепление сахаров, которое в итоге приводит к образованию молекулы, носящей название пируват (пировиноградная кислота). Ее дальнейший путь у различных организмов отличается.

В условиях, когда организм использует кислород, пируват вовлекается в процессы клеточного дыхания (или аэробного дыхания). Это сложная совокупность биохимических процессов, смыслом которой является накопление клеткой энергии в легкодоступной и транспортабельной форме. Для клеточного дыхания нужен кислород, который выступает окислителем.

В условиях, когда кислорода недостаточно либо организм в принципе его не использует, пируват вовлекается в процессы, известные под общим названием брожение (или анаэробное дыхание). У растений оно чаще всего приводит к расщеплению пирувата до этанола, у животных — до молочной кислоты. Соответственно, существуют и микроорганизмы, реализующие в анаэробных условиях переработку пирувата либо до этанола (спиртовое брожение), либо до молочной кислоты (молочно-кислое брожение, или квашение). Вообще, брожение — эволюционно более древний процесс, нежели аэробное дыхание, потому что на ранних этапах геологической истории Земли концентрация кислорода в атмосфере была не столь велика, как сейчас, поэтому все живые клетки умели метаболизировать питательные вещества в условиях недостатка кислорода. Считается, что к тому или иному типу брожения способны все живые клетки. У человека анаэробное дыхание реализуется, например, при интенсивных физических нагрузках в клетках скелетной мускулатуры и проявляется в виде ноющих болей, соответствующих накоплению молочной кислоты. Существуют и более редкие виды брожения: уксуснокислое, ацетонобутиловое, маслянокислое и т. п.

Соответственно, процессы спиртового брожения и молочно-кислого брожения хорошо известны человеку с древнейших времен и были приспособлены к производству продуктов питания. Так, алкогольные напитки являются продуктом спиртового брожения такого сырья, как виноградный сок, сахарный сироп и т. п., то есть питательной среды, обогащенной простыми углеводами. Молочнокислое брожение используется в получении творога, сметаны, кефира и т. п. Выпечка хлеба с



использованием дрожжей также использует процесс брожения, потому что вторым его продуктом является углекислый газ. В качестве организмов, реализующих процесс, выступают дрожжи — одноклеточные грибы.

Собственно, основная идея реализованных и реализуемых крупнотоннажных химических биотехнологий заключается в том, чтобы использовать аналогичные принципы в промышленности и заставить живые организмы существовать в управляемой среде и производить нужные человеку продукты своей жизнедеятельности.

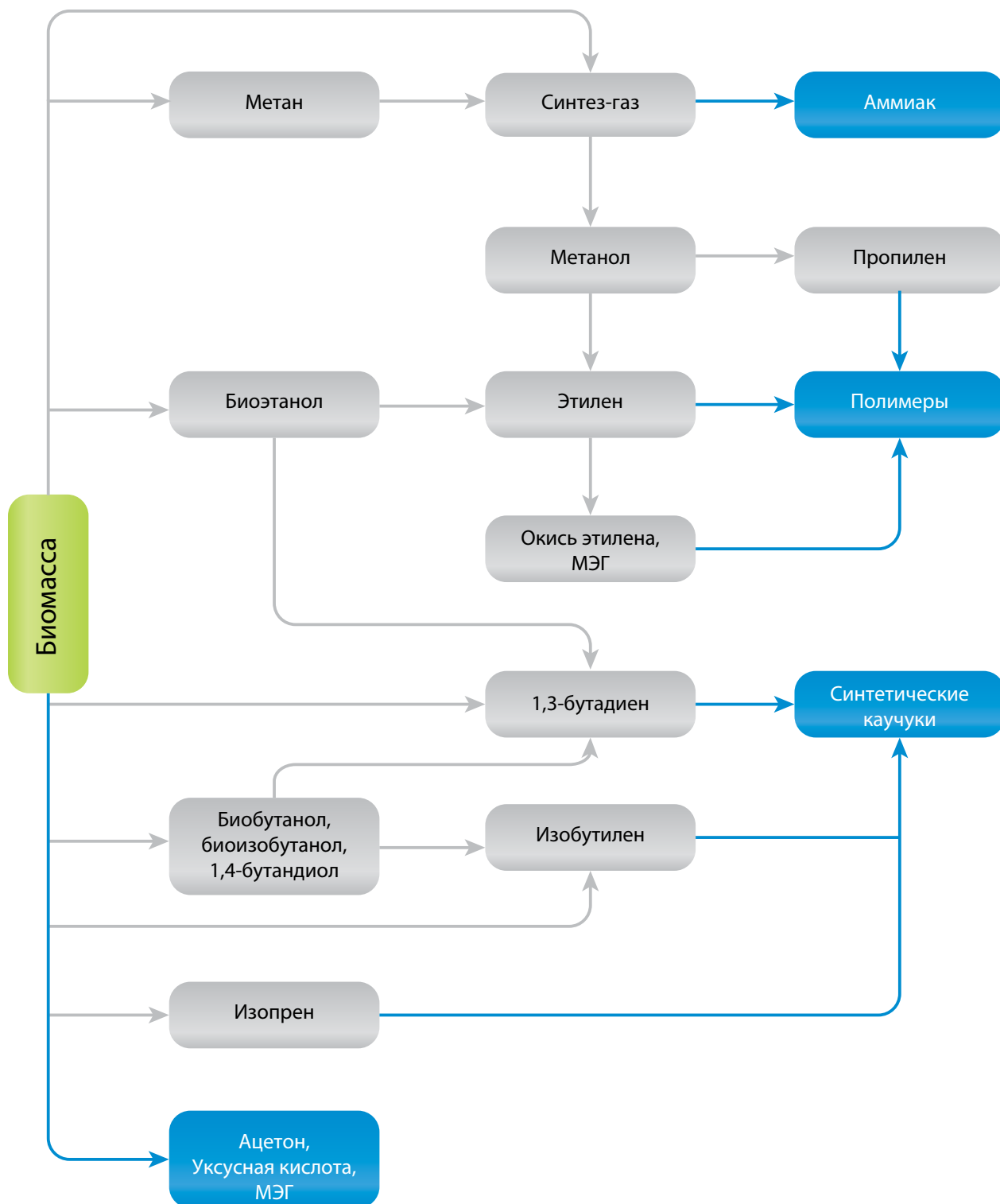
Поэтому можно выделить характерные черты химических биотехнологий. Во-первых, они используют питательное сырье (растительного или животного происхождения), богатое либо простыми углеводами, либо полисахаридами. В последнем случае требуется более или менее сложная стадия перевода полисахаридов в более доступную для усвоения форму. Во-вторых, биотехнологии используют либо непосредственно живые организмы, питающиеся сырьем в анаэробных условиях, либо реконструируют те биохимические процессы, которые протекают в живых клетках за счет применения синтетических или природных ферментативных систем. Одним из вариантов является применение генетически-модифицированных живых организмов, у которых скорректированы естественные метаболические пути в пользу нужных продуктов.

Имея в виду эти характерные особенности, в данном исследовании мы не рассматриваем, например, получение биодизеля и глицерина, поскольку здесь отсутствует стадия собственно биохимического превращения сырья. Ведь в технологии биодизеля растительное масло подвергается традиционной химической обработке. Не стоит, однако забывать, что получающаяся в таком процессе дизельная фракция теоретически может быть подвергнута традиционному паровому пиролизу с получением классических нефтехимических продуктов: этилена, пропилена, ароматических соединений и т.п.

Кроме того, мы сконцентрируемся только на той группе технологий, которые конечным своим продуктом имеют вещества, хорошо известные в «традиционной» нефтехимической промышленности. Соответственно, для этой группы мы будем применять название «нефтехимические биотехнологии».

## ГЕНЕАЛОГИЯ

*Существующие, близкие к коммерциализации и перспективные крупнотоннажные нефтехимические биотехнологии*



## МЕТАН ИЗ ВОЗОБНОВЛЯЕМОГО СЫРЬЯ

Первое направление промышленных нефтехимических биотехнологий, наиболее простое и логичное, — использование совершенно естественного процесса гибели и разложения биологических материалов с выделением различных газов, главным образом метана. Этот процесс реализуется определенным классом микроорганизмов, относящихся к группе так называемых строгих анаэробов. Для их жизнедеятельности вообще не нужен кислород ни на одном этапе метаболизма питательных веществ. Эти организмы «работают» на поздних стадиях биоразложения биомассы, используя в качестве пищи водород, углекислый и угарный газы, низшие спирты и кислоты, которые образуются в ходе жизнедеятельности других микроорганизмов, осуществляющих первичную переработку биомассы (например, через брожение).

На долю метана в типичном процессе разложения смешанных растительных отходов приходится 50–70%, остальное — это углекислый газ, сероводород, аммиак, водород и т. п. Таким образом, по теплообразующей способности 1 м<sup>3</sup> условного обобщенного биогаза эквивалентен 0,6 м<sup>3</sup> природного газа. Это обстоятельство наводит на очевидную мысль применения биогаза в качестве энергетической альтернативы.

Собственно, индустрия биогаза как топлива, по сути, уже создана. Пока она реализуется главным образом в виде огромного количества маломощных установок индивидуального и коллективного пользования. Так, по некоторым данным, в Китае функционируют более 10 млн установок емкостью 10–15 м<sup>3</sup>, что составляет около 7 млрд м<sup>3</sup> биогаза в год. Еще около 4 млн установок работает в Индии. В Европе в 2012 году было получено 14 млрд м<sup>3</sup> биогаза. В Дании 18% энергии производится на основе биогаза, в Германии биогаз обеспечивает 11% потребностей в газообразном топливе. В целом, по оценке OIES, к 2020 году в Европе может производиться 28 млрд м<sup>3</sup> биогаза, то есть этот ресурс выглядит даже более значимым, чем широко обсуждаемые проекты по добыче сланцевого газа в Старом Свете.

Биогаз как топливо имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, в качестве сырья теоретически можно использовать биомассу совершенно различного происхождения. Это могут быть отходы животноводческого и птицеводческого производств, отходы рыбного производства, бытовые пищевые отходы, отходы зернообрабатывающей промышленности, спиртовой промышленности и т. п. Все это создает колоссальную сырьевую вариативность для малых биогазовых установок, особенно в центрах сельскохозяйственного производства. Во-вторых, само по себе оборудование для производства биогаза не является чем-то уникальным и часто доступно для самостоятельного изготовления. По сути, это цилиндрическая емкость больших или меньших размеров, в которой поддерживается незначительное избыточное давление к атмосферному (чаще всего это достигается за счет гибкой «крыши» и срабатывающего клапана), снабженная контуром для поддержания постоянной температуры и перемешивающим устройством. В зависимости от

типов сырья часто требуется еще оборудование типа дробилок и транспортеров для подачи в емкость свежих отходов. Вот, в принципе, и все.

По идее, выход на метаносодержащий газ, получаемый столь примитивным способом из фактически любого биологического сырья, должен открывать радужные перспективы его использования в химической индустрии, то есть для получения таких традиционных газохимических продуктов, как метанол, аммиак, карбамид и т. п. Кроме того, биогаз вполне может применяться для получения синтез-газа с выходом на процесс типа Фишера—Тропша, который выводит на производство синтетических топлив, ароматических соединений и т.д.

Однако на пути вовлечения биогаза в химическую переработку существуют серьезные препятствия.

Экономика строительства новых предприятий по производству метанола или аммиака такова, что единичные установки мощностью менее 1 млн тонн в год не являются особо привлекательными по причине довольно высоких удельных капитальных затрат. В случае аммиака, например, это означает потребность в метане на уровне 0,9 млрд м<sup>3</sup> в год, а в пересчете на условный биогаз — порядка 1,5 млрд м<sup>3</sup>. Если использовать в качестве сырья, например, отходы переработки зерна, для получения такого количества биогаза (даже с условием, что «отходы» будут составлять 60% от общей массы собираемой с полей продукции, хотя на практике обычно существенно меньше) потребуется сельскохозяйственное производство с мощностью около 12,5 млн тонн в год, что вполне сопоставимо с объемом экспорта зерновых из России в 2013 году (19 млн тонн). Кроме того, из производимого 1 млн тонн аммиака около половины в той или иной форме уйдет на внесение в качестве азотных удобрений для поддержания урожайности таких колоссальных посевных площадей. Но даже если не брать в расчет этот фактор, открытым остается вопрос, как собрать в одном месте такой объем отходов производства зерновых.

Аналогична ситуация и с другими видами сырья для биогаза: ни одно сельскохозяйственное или пищевое производство не в состоянии сконцентрировать нужные объемы отходов, чтобы их хватило для обеспечения биогазом сколько-нибудь эффективного единичного газохимического предприятия.

Получается, что для традиционной газохимии биогаз сырьем пока быть не может как из-за несопоставимости масштабов, так и с точки зрения экономики. То же самое касается, вероятно, и процессов GTL типа Фишера—Тропша, ведь пока эффективность в их промышленной реализации достигается как раз за счет очень больших производственных мощностей для снижения удельных затрат и размеров инвестиций.

С темой биогаза как потенциального сырья для получения синтез-газа смыкается и направление непосредственного вовлечения биомассы в этот процесс, без промежуточной стадии с разложением до газообразного углеводорода, то есть получение синтез-газа по аналогии с углем и другими твердыми углеродсодержащими топливами. Здесь также имеется проблема масштабов сырьевой

потребности более или менее эффективных предприятий. Но есть и еще одно обстоятельство: для реализации процесса типа Фишера—Тропша на синтетические углеводороды требуется получение синтез-газа  $\text{CO} + \text{H}_2$  состава 1:2, 1:3. В случае с конверсией природного газа или даже нефти это достигается. А вот в случае с биосырьем — как правило, нет, поскольку даже в идеальном случае получается лишь пропорция 1:1–1:1,2. Однако такие проекты разрабатываются и реализуются на опытно-промышленном уровне.

### Биогаз в России

Что касается России, то все изложенные выше ограничения имеют место и у нас, тем более что традиционное углеводородное сырье для химической промышленности пока остается относительно дешевым. А вот в своем топливном применении биогаз вполне мог бы найти свое место пусть как не полная альтернатива, но дополнение к углеводородным энергоресурсам для улучшения экономики сельскохозяйственных производителей и регионов с низким уровнем газификации. Существенной проблемой на этом пути является, как ни странно это в наш век информационных технологий, низкая информированность потенциальных потребителей. По сути дела, пока единственным успешным реализованным примером комплексной генерации на биогазе можно назвать теплоэлектростанцию «Лучки» в Белгородской области с установленной мощностью 2,4 МВт. Она перерабатывает более 70 тыс. тонн биомассы в год, основу которой составляют отходы животноводческого и мясоперерабатывающих производств. Функционирует также ряд малых биогазовых установок, использующих биогаз для нужд отопления или как топливо для мобильных электрогенераторов.

Кроме того, значимым ограничением на пути внедрения биогазовых установок малой мощности является практически полное отсутствие нормативно-технической документации на подобные объекты, стандартов и требований к продукции. Декларируя развитие биотехнологий как одного из приоритетов инновационного развития, государство должно озаботиться разработкой современной нормативной базы, отвечающей технологической реальности сегодняшнего дня. Кроме того, опыт стран, где энергетика на биогазе активно развивается, показывает, что эта индустрия требует и прямой поддержки государства через предоставление различного рода преференций инвесторам и эксплуатантам подобных энергообъектов. Ключевой здесь является проблема балансировки производимой и потребляемой мощности в соответствии с суточными и сезонными циклами, то есть интеграции малой биогазовой энергетики в центрально-диспетчируемую энергосистему. На этом пути проблемами является как отсутствие нормативной базы, так и высокая стоимость процесса интеграции с магистральными сетями, которая лишает экономического смысла многие (не только биогазовые) малые проекты в области альтернативной энергетики. Именно в этом государство может помочь биогазовой энергетике. В настоящее время Минсельхоз при участии экспертов и участников рынка разрабатывает проект федерального закона, который нацелен на создание благоприятной среды для инвестиций в энергетику на основе биомассы.

## БИОЭТАНОЛ

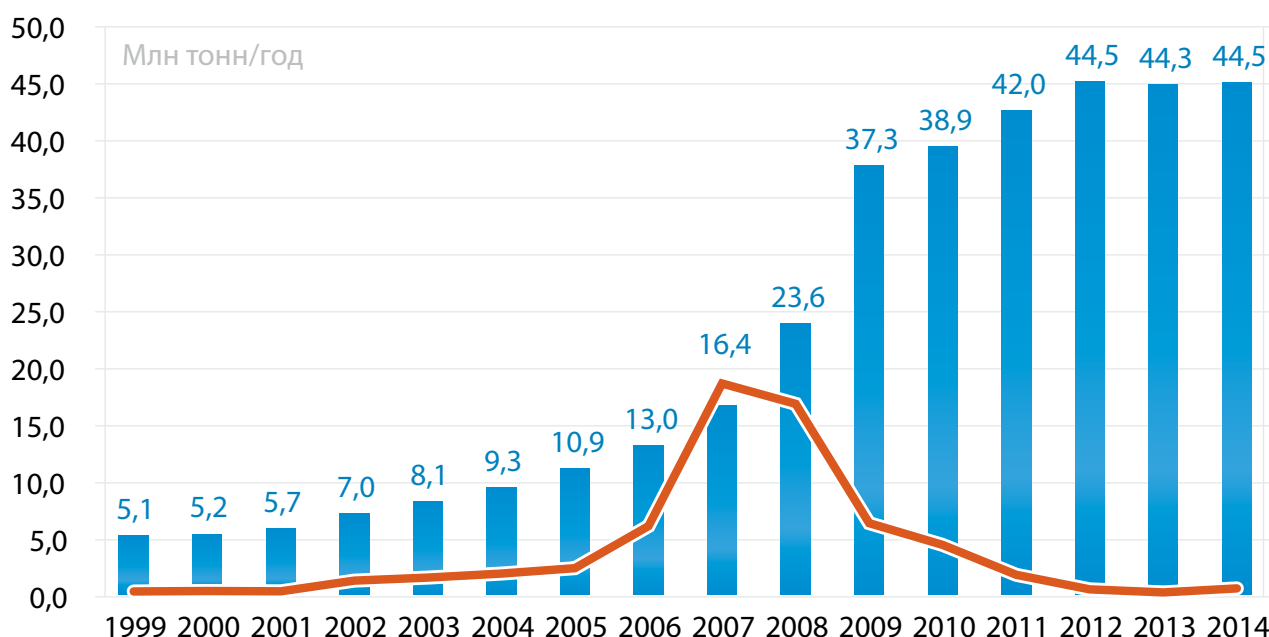
На сегодняшний день единственной крупнотоннажной химической биотехнологией, прочно вставшей на промышленные рельсы, можно считать технологию получения из растительного сырья этилового спирта — биоэтанола. Хотя, как и в случае с биогазом, последующее его применение в качестве сырья для химической промышленности неизмеримо скромнее, чем прямое использование биоэтанола как топлива.

### Топливо

Катализатором инвестиций в научные поиски и промышленные процессы получения биоэтанола стал нефтяной кризис начала 1970-х годов, когда ископаемые жидкие углеводороды в короткие сроки многократно выросли в цене. В итоге в период с 1975 по 1985 год мировое производство биоэтанола топливного назначения увеличилось с практически нулевого до 8 млн тонн в год, то есть среднегодовой темп роста составил около 47%.

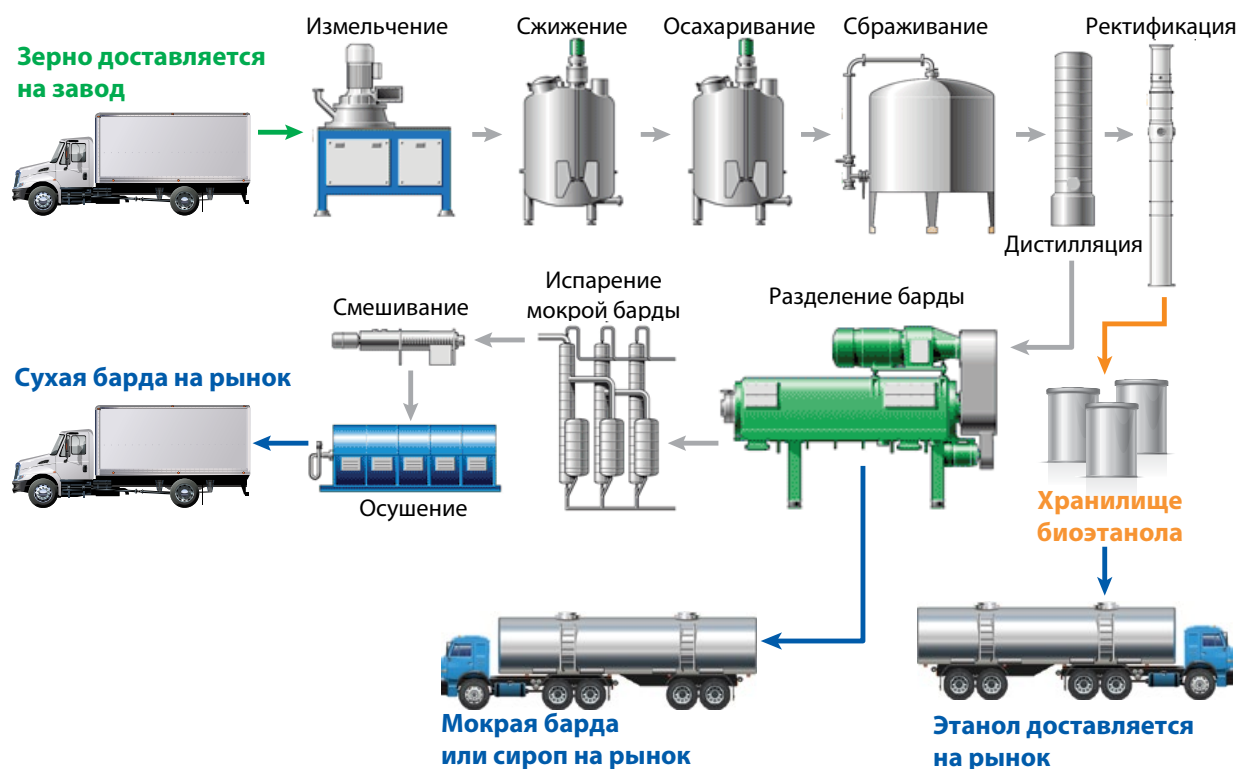
Стремительный рост нефтяных цен, начавшийся в начале 2000-х годов, вновь подтолкнул инвестиции в новые заводы топливно-го биоэтанола. Эта корреляция хорошо видна по величине мощностей, находящихся в стадии строительства (Рис. 1). Пик приходится на 2007–2008 годы, когда цены на нефть достигли своего исторического максимума.

**Рисунок 1.** Развитие мировых мощностей по топливному биоэтанолу (левая шкала) и мощности, находящиеся в стадии строительства (правая шкала)\*



Источник: RFA

\* — в обоих случаях по состоянию на январь соответствующего года

**Рисунок 2.** Схема производства биоэтанола

Источник: RFA

Производство топливного биоэтанола не является чем-то технически сложным, однако состоит из большого количества разнородных стадий.

Технология производства биоэтанола начинается со сбора сырьевых растительных культур, их предварительной подготовки (резка, дробление и т. п.) и превращения содержащихся полисахаридов или дисахаридов в простые углеводы (часто этот процесс не совсем верно называют предварительной ферментацией). Далее следует собственно процесс брожения, отделение твердых отходов от получившейся спиртосодержащей жидкости, ее очистка. На заключительном этапе биоэтанол отделяется дистилляцией или иными методами, после чего абсолютизируется. Существенным технологическим прорывом в производстве биоэтанола стал отказ от сложных и дорогостоящих каскадных установок ректификации этанола в пользу мембранных технологий, что позволило существенно снизить капитальные вложения (Рис. 2).

Потенциальная «производительность» различных культур и сельскохозяйственных полуфабрикатов по биоэтанолу существенно варьируется (Рис. 3)

С точки зрения экономики производства биоэтанола значение имеет не чистая теоретическая производительность по спирту тех или иных культур, а скорректированная с учетом урожайности на единицу посевных площадей. Ведь практически во всех химических биотехнологиях главным ресурсным ограничением является именно этот параметр. С этой точки зрения абсолютными мировыми лидерами в качестве сырья для биоэтанола высту-



пают кукуруза и сахарный тростник, поскольку обеспечивают как высокий выход спирта при ферментации, так и высокую урожайность. Некоторое преимущество с точки зрения скорости оборота земель есть у кукурузы, поскольку это однолетнее растение.

С учетом сложившихся географических традиций землепользования неудивительно, что мировыми лидерами в производстве биоэтанола выступают США (основой является кукуруза) и Бразилия (преимущественно сахарный тростник). Однако структура мирового производства биоэтанола в последние годы стремительно меняется, все сильнее заявляют о себе страны Южной Азии (Рис. 4).

Этанол как химическое сырье представляет значительную ценность, поскольку позволяет получать большое количество разнообразной продукции.

### Этил-трет-бутиловый эфир

Одно из самых простых направлений использования биоэтанола, расширяющего его роль как топливного компонента, — производство этил-трет-бутилового эфира (ЭТБЭ). Это вещество используется как высокооктановая добавка к автомобильным бензинам. ЭТБЭ получается в ходе очень простого процесса при взаимодействии этанола с изобутиленом или изобутилен-содержащими смесями вроде газов каталитического крекинга или бутилен-бутадиеновой фракции пиролиза. «Традиционным» нефтехимическим аналогом ЭТБЭ на базе биоэтанола является метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ), который в мире исторически является основным высокооктановым компонентом благодаря относительной дешевизне метанола. Перепрофилирование мощностей МТБЭ на выпуск ЭТБЭ не составляет никаких проблем, с точки зрения потребительских качеств у этих двух эфиров также почти нет различий.

До начала стремительного развития индустрии биоэтанола мощности ЭТБЭ в мире были мало распространены из-за более высокой стоимости этилового спирта по сравнению с получающимся

**Рисунок 3.** Расход природного сырья на производство 1 тонны биоэтанола

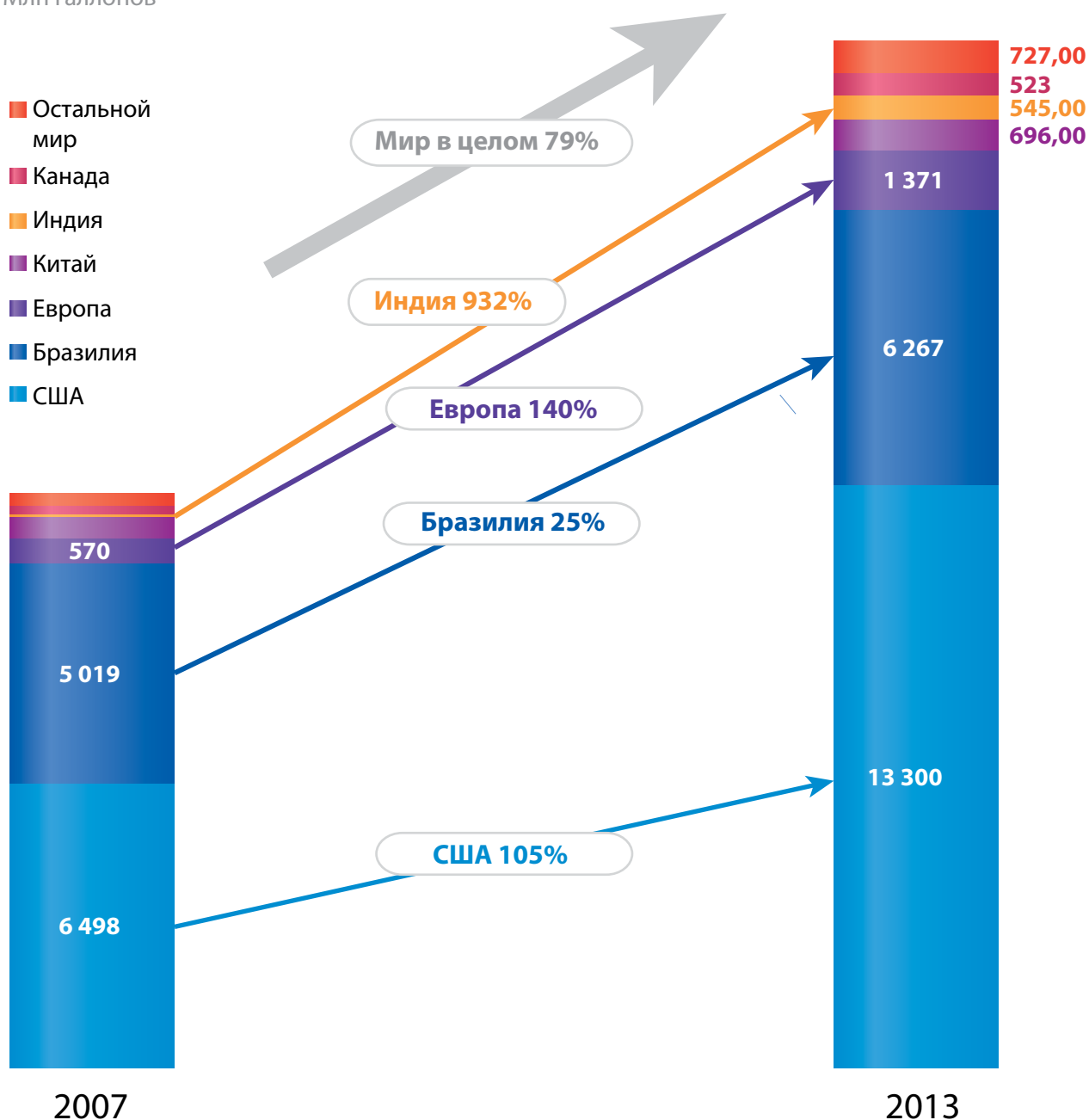


Тонны  
Источник: Linde

из природного газа метиловым. С развитием производства биоэтанола и снижением цен на него из-за постоянно растущего предложения производство ЭТБЭ стало конкурентоспособным. Так, в Европе мощности по производству ЭТБЭ в 2002 году составляли всего 600 тыс. тонн в год. К настоящему времени они увеличились более чем в шесть раз. Сегодня более 60% высокооктановых эфиров, потребляемых в Европе, составляет ЭТБЭ. Фактически с нуля индустрия ЭТБЭ возникла благодаря биоэтанола во Франции и Испании. На Европу приходится 77% мирового потребления ЭТБЭ (правда, где-то с 2005 года мощности в Европе не растут, а часть установок даже переводится обратно на МТБЭ).

**Рисунок 4.** Динамика производства топливного биоэтанола по регионам мира в 2007–2013 гг.

Млн галлонов



Источник: USDA-FAS, RFA, F.O. Lichts

В Северной Америке, где развитие отрасли биоэтанола было еще более стремительным, чем в Европе, ЭТБЭ тем не менее не смог существенно потеснить традиционные высокооктановые эфиры на базе углеводородного сырья: спирт традиционно напрямую blendируется в бензины, также оказывая небольшое октаноповышающее действие, а падение цен на сланцевый газ сделало метанол недостижимо более дешевым компонентом в реакции с изобутиленом. В ряде штатов США, однако, отраслевое лобби добилось фактического запрета на применение МТБЭ, что открыло определенную нишу для ЭТБЭ.

Сегодня около 25% мировых мощностей ЭТБЭ сосредоточено в Северной Америке, однако он остается во многом экспортным продуктом. Около 18% мирового спроса на ЭТБЭ формируется в Азии, в основном в Японии, где действуют жесткие законодательные ограничения на эмиссию парниковых газов автотранспортом. Считается, что использование ЭТБЭ в качестве модификатора октанового числа приводит к определенному сокращению вредных выбросов по сравнению с традиционными бензиновыми рецептурами. Япония импортирует ЭТБЭ, в том числе из США и Бразилии.

### Биоэтилен

Еще одной хорошо проработанной и доведенной до практического внедрения технологией является получение этилена дегидратацией топливного этанола. Сам по себе процесс дегидратации этилового спирта до этилена открыт и изучен очень давно, однако не нашел широкого практического применения именно из-за экономических аспектов. С точки зрения технологии в мире существует большое количество лицензиаров, предлагающих процессы превращения этанола в этилен.

В сентябре 2010 году в Бразилии компанией Braskem было запущено первое крупномасштабное промышленное производство этилена из биоэтанола мощностью 200 тыс. тонн в год. Мощность предприятия, конечно, не поражает воображение, особенно тех, кто знаком с основными трендами в олефиновой индустрии, где «золотым стандартом» этиленовой мощности стал 1 млн тонн в год. Но в том-то и прелесть цепочки биоэтилена, что это не пиролиз, где колоссальная мощность призвана размыивать удельные капитальные затраты. Сами по себе установки дегидратации относительно дешевы. А 200 тыс. тонн в год — стандартная мощность по сырью для полимеризационной линии, поскольку из биоэтилена Braskem изготавливает полиэтилен. Тот факт, что установки дегидратации достаточно просты и дешевы, косвенно подтверждается тем, что от анонсирования проекта до его запуска у Braskem ушло всего три года — недостижимый темп для традиционных олефиновых производств.

Растительной основой этой цепочки является сахарный тростник, которого на производство 1 тонны этилена расходуется в среднем 26 тонн, собранных с 0,33 Га посевных площадей.

Справедливости ради надо сказать, что установка Braskem оказалась все-таки не первой в мире. К моменту ее пуска суммарные мировые мощности по биоэтилену составляли около 150 тыс. тонн в год, в основном это были многочисленные большие пилотные и опытно-про-

мышленные производства. Так что историческая роль Braskem — в масштабировании технологии.

В мае 2012 года в индустрии биоэтилена состоялся еще один знаковый пуск: компания Greencol Taiwan Corp. официально запустила установку дегидратации биоэтанола мощностью 100 тыс. тонн в год. Растительная основа — та же, что и Braskem, сахарный тростник, хотя частично спирт завозится из той же Бразилии. Однако в отличие от бразильской компании биоэтилен направляется на производство моноэтиленгликоля — компонента в производстве полиэтилентерефталата. На проектную мощность завод из-за проблем с технологией смог выйти только весной 2013 года.

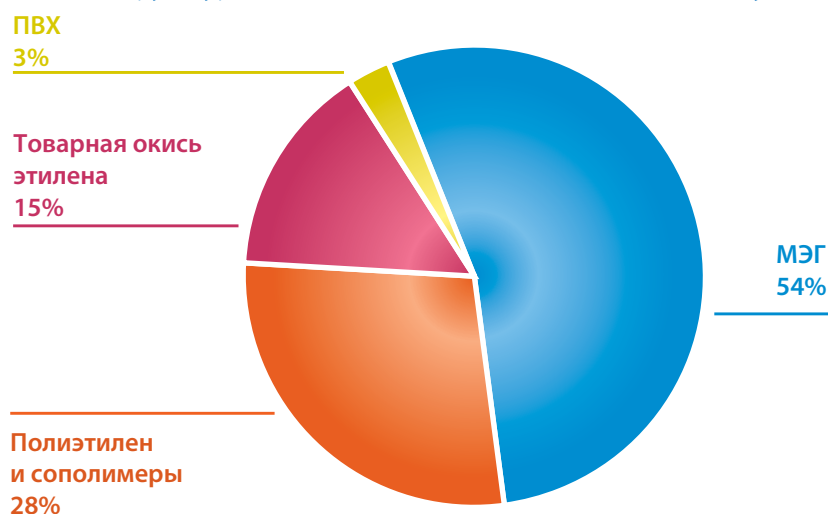
Еще одним интересным проектом является проект производства биоэтилена для выпуска поливинилхлорида. Этот проект был инициирован также в Бразилии компанией Solvay Indupa, специализирующейся на выпуске ПВХ и каустической соды из традиционного сырья. Любопытно, что в конце 2013 года Braskem сообщила о приобретении 70,6% капитала этой компании вместе с проектом био-ПВХ. Мощность завода по этилену должна составить 60 тыс. тонн в год.

Интерес к биоэтилену проявила и крупнейшая в мире химическая компания Dow. В 2007 году она анонсировала старт проекта Santa Vitória Açúcar e Alcool (SVAA) по производству биоэтилена в Бразилии мощностью 350 тыс. тонн в год. В 2011 году к проекту на паритетных началах подключилась японская Mitsui, выкупив 50% в SVAA. Запуск производства ожидался в 2013 году, однако в начале года стало известно, что партнеры отложили реализацию второго этапа проекта — собственно этиленового и полиэтиленового заводов, сохранив неизменным график по первому этапу — сельскохозяйственному производству сахарного тростника и заводу биоэтанола. Первый урожай SVAA собрала в 2014 году.

Ожидается, что уже к 2019 году общая мировая мощность установок, использующих дегидратацию биоэтанола, составит около 2 млн тонн по этилену. Любопытна прогнозируемая структура использования биоэтилена. Если в углеводородной нефтехимии большая часть этилена идет на получение полиэтилена и сополимеров, то в случае с биоэтиленом акцент ожидается на моноэтиленгликоле (Рис. 5)

Подобные прогнозы связаны с тем, что пока основную заинтересованность в производных биоэтилена проявляют компании, специализирующиеся на пищевой и бытовой упаковке, главным образом на бутылках из полиэтилентерефталата. Знаковым стал контракт между Coca-Cola, крупным игроком в отрасли ПЭТ-тары, и Greencol Taiwan Corp. на поставку био-МЭГ как компонента в производстве бутылочного полиэтилентерефталата. Для Coca-Cola, как и для подавляющего большинства потенциальных потребителей пластиков, выработанных на основе растительного сырья, самым важным здесь является имиджевая составляющая, подчеркивающая экологическую озабоченность компании. Подобные вещи важны на высококонкурентном рынке пищевых продуктов и упаковки. При этом за рамками остается тот факт, что какого бы происхождения ни был используемый моноэтиленгликоль, бутылочный полиэтилентерефталат остается одинаковым в том числе и с точки зрения скорости его разложения в виде полимерного мусора. В этом — основа мифологизации всей

**Рисунок 5.** Ожидаемая структура использования биоэтилена в 2018 году



Источник: СИБУР

темы, связанной с производными этилена, выработанными из биологического сырья. Тут уместно отметить, что с точки зрения экологии преимущества, например, полиэтилена на основе биоэтилена от традиционного только в том, что в технологической цепочке первого потребляется примерно на 60% меньше так называемой «невозобновляемой энергии» (традиционно заводы биоэтанола и биоэтилена оснащаются энергетическими установками, использующими растительные отходы типа соломы, — это приносит определенный вклад в экономику), а эмиссия парниковых газов в эквивалентах CO<sub>2</sub> ниже примерно на 40%.

#### Экономика биоэтилена

Собственно, само существование в промышленном исполнении технологии получения этилена дегидратацией биоэтанола с точки зрения экономики во многом объясняется именно наличием определенной ниши потребления его производных, где потребитель готов переплачивать за совершенно аналогичный «традиционному» полимер/полуфабрикат только потому, что он имеет косвенное «экологическое» происхождение. Ведь расчеты показывают, что пока не существует такого региона мира, в котором этилен из биоэтанола по издержкам производства оказывался бы дешевле, чем традиционный нефтехимический этилен (Рис. 6).

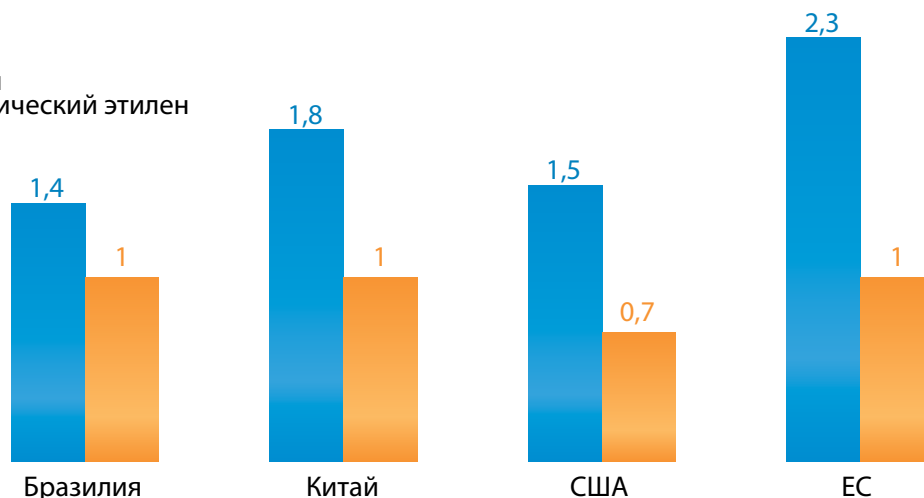
Кроме того, уже сегодня совершенно ясно, что биоэтилен, производимый из биоэтанола, имеет шансы стать конкурентоспособным по отношению к нефтехимическому этилену только в отдельных географических регионах, где климатические и агротехнические условия способствуют наивысшей урожайности наиболее перспективной на этанол культуры — сахарного тростника. Это в первую очередь Бразилия и Южная Азия, главным образом Индия, где доступность дешевой рабочей силы обуславливает и низкие издержки в сельскохозяйственной части процесса производства (Рис. 7).

Впрочем, экономика производства как биоэтанола, так и биоэтилена в очень большой мере зависит от наличия или отсутствия, а также

**Рисунок 6.** Издержки на производство биоэтилена в ценах 2012 года

\$ тыс./тонна

■ Биоэтилен  
■ Нефтехимический этилен

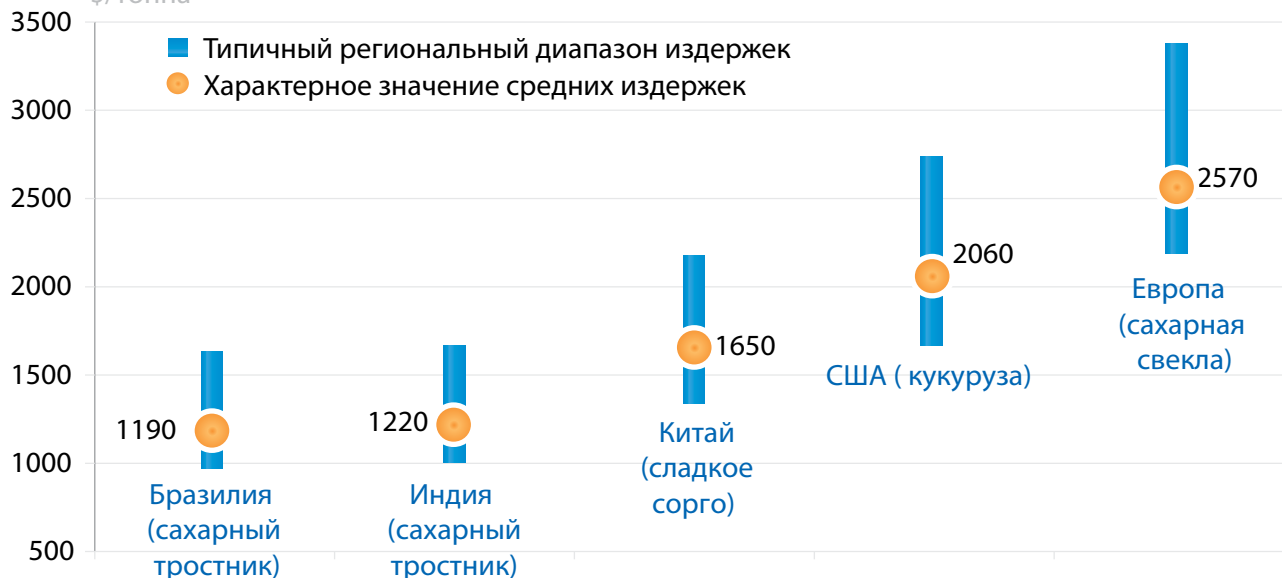


Источник: СИБУР

характера государственной поддержки, оказываемой соответствующим производителям. Яркий пример тому США, где удалось создать самую мощную в мире индустрию биоэтанола, имея не худшие в мире, но и не лучшие сельскохозяйственные предпосылки для этого. Помимо достижения своей прямой цели — поиск альтернативных способов получения важнейшего нефтехимического продукта из возобновляемого сырья, господдержка преследует и косвенные цели, главные из которых — поддержка сельского хозяйства как значимой отрасли экономики и занятости для населения, особенно в индустриально-депрессивных районах. Подобная же политика проводится в настоящее время в Европейском Союзе, где применение биоэтанола в бензинах стало обязательным.

**Рисунок 7.** Диапазон издержек при производстве биоэтилена по регионам в ценах 2009 года

\$ /тонна



Источник: IRENA

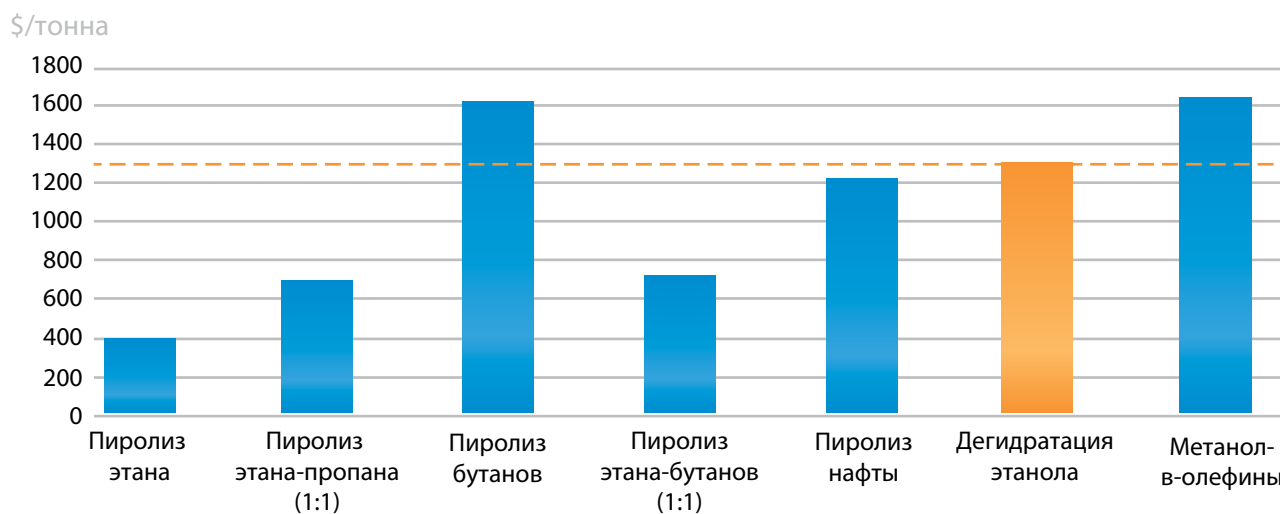
Однако не стоит забывать, что в перспективе биоэтилен будет не только пытаться отвоевать свою нишу у традиционного пиролизного этилена, но и конкурировать с большим количеством альтернативных процессов его получения из других видов углеводородного сырья. Особенно это обстоятельство рискованно для перспектив биоэтилена в таких регионах, как США, где наличие дешевых газовых ресурсов уже перевернуло олефиновую реальность, а также Китай, где активно развивается производство этилена на базе метанола и диметилового эфира, получаемых из угля (Рис. 8). Кроме того, в ближайшие десятилетия все же стоит ожидать развития технологии окислительной димеризации метана, которая в теории позволит вовлечь колоссальные ресурсы природного и сланцевого газа в прямое получение этилена. И нет абсолютно никаких гарантий, что со временем биоэтилен не проиграет в конкурентной борьбе с этими процессами даже при стремительном подорожании «традиционных» ископаемых углеводородов.

### Биобутадиен

Наряду с этиленом другим ценнейшим продуктом традиционной нефтехимии, который может быть получен из биоэтанола, является 1,3-бутадиен — важнейший мономер при производстве синтетических каучуков.

Примечательно, что первое промышленно-значимое производство бутадиена и синтетических каучуков на его основе было создано в СССР в 1932 году по технологии Сергея Лебедева, которая позволяла получать бутадиен именно из этилового спирта. С 1932 года и до начала войны еще три завода появились в Ефремове, Воронеже и Казани. Такая география была связана с необходимостью размещать предприятия вблизи мест производства спирта, который в те годы получали брожением картофельной ботвы и различного рода сельскохозяйственных отходов. После войны было принято решение построить еще пять мощных заводов, где сырьем для бутадиена был уже не биоэтанол, а синтетический этанол (вырабатываемый из углеводородного сырья).

**Рисунок 8.** Издержки при производстве этилена различными методами в США в ценах 2013 года



Источник: Linde



Со временем развитие нефтегазовой промышленности и появление больших количеств н-бутана и пиролизной фракции C4 привели к тому, что бутадиен из этанола потерпел поражение в конкурентной борьбе. Однако не будет преувеличением сказать, что именно технология производства бутадиена из биоэтанола позволила индустрии синтетических каучуков состояться, как крупнотоннажной отрасли промышленности.

Пока возврат к проверенной технологии рассматривается мировыми химическими компаниями лишь как теоретическая возможность. Текущая ценовая ситуация на рынке углеводородного сырья для получения бутадиена не дает шанса стать конкурентоспособными технологиям его получения из растительного сырья. Однако ситуация неизбежно будет меняться. Это связано с двумя факторами. Во-первых, активное развитие добычи сланцевого газа в США привело к появлению на внутреннем рынке больших объемов относительно дешевого этана, что спровоцировало появление целой волны проектов по созданию новых пиролизных мощностей на этане, которые по мере их запуска в эксплуатацию будут неизбежно вытеснять с рынка старые пиролизы, работающие на жидком сырье, — основных продуцентов сырья для экстракции бутадиена в США. Тенденция к облегчению сырья для пиролиза имеет глобальный характер. Это видно и по тем проектам, которые реализуются или намечены к реализации в России: большинство из них ориентируется на сжиженные газы, отдельные — на тот же этан. Во-вторых, на рынке синтетических каучуков не просматривается фундаментальных предпосылок для сокращения спроса или темпов роста спроса на бутадиеновые и сополимерные каучуки. В ближайшее десятилетие это приведет к тому, что спрос на бутадиен вырастет на фоне либо сокращения его предложения, либо как минимум стагнации. Все это обещает рост цен на него. Поэтому в области традиционной нефтехимии уже прогнозируется на горизонте ближайших 10 лет возврат в широкую эксплуатацию процессов целевого дегидрирования н-бутана в 1,3-бутадиен — технологии, в большинстве стран мира проигравшей в свое время конкуренцию пиролизному способу. Не исключено, что если при этом произойдет системное подорожание ископаемых углеводородов (вследствие, например, опережающего роста на сланцевые легкие углеводороды со стороны новых пиролиз в США), то технология получения бутадиена из биоэтанола окажется конкурентоспособной. Тем более что со времен Лебедева ее совершенствование, по крайней мере на лабораторном уровне, не останавливалось, и в последние годы были найдены перспективные каталитические системы на современных носителях, которые позволяют решить проблему коксообразования, а также существенно нарастить конверсию и селективность процесса с подавлением конкурирующих реакций.

### Системные проблемы индустрии биоэтанола

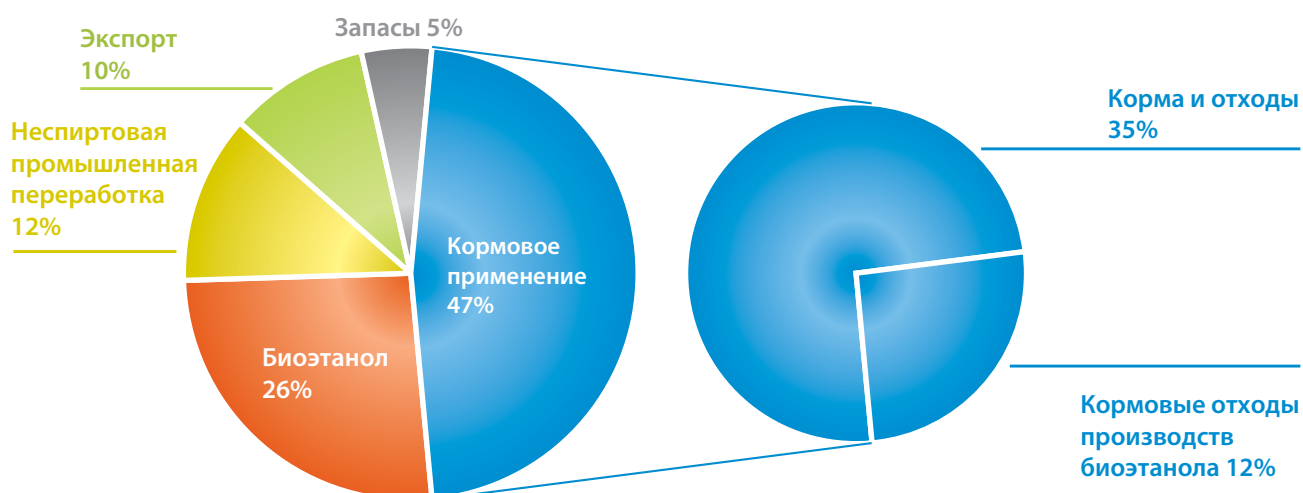
Так или иначе, использование биоэтанола как химического сырья для крупномасштабного получения химической продукции типа этилена и бутадиена встречает на своем пути не только проблемы технологий и экономической эффективности. Как уже отмечалось, в этом бизнесе, где сырье может возобновляться, лимитирующим фактором

является доступная для посевов площадь. Совершенно очевидно, что эффект масштаба имеет место и в этой отрасли: чем больше посевных площадей имеется в распоряжении производителя, тем ниже его удельные операционные затраты и выше удельная маржа при производстве биоэтанола. Именно в этом заключается одна из главных системных проблем темы крупномасштабного химического производства на базе биоэтанола. Как следует из данных по продуктивности на этанол тех или иных растительных культур, а также данных об издержках производства в разных странах, экономически привлекательным производство биоэтанола является лишь для отдельных регионов мира, расположенных преимущественно в тропическом и субтропическом климатических поясах. Однако именно в этих регионах сконцентрирована и большая часть сельскохозяйственного производства продуктов питания. Собственно, одна из главных угроз интенсивного развития индустрии биоэтанола заключается в вероятности конкуренции за посевные площади между культурами для спиртового производства и пищевыми культурами (в том числе выращиваемыми для корма скота в животноводстве).

Данные, которые есть на текущий момент, уже демонстрируют существенное перераспределение урожая в главных центрах производства биоэтанола — США и Бразилии — в пользу спиртового производства. Так, по итогам сезона 2012/2013 годов в США на производство топливного биоэтанола ушло 26% урожая технических сортов кукурузы, еще 12% было возвращено в сельскохозяйственный оборот (корма для животных) в виде зерновой барды — остатка спиртовой ферментации (Рис. 9).

В Бразилии в сезоне 2009/2010 на производство биоэтанола было направлено 63% урожая сахарного тростника. Правда, здесь имеет место тенденция к снижению этой доли: в сезоне 2012/2013 на биоэтанол ушло уже 56% урожая тростника на фоне роста посевных площадей, но и снижения производства сахара (сказалась своя роль сильная засуха в некоторых штатах). По мнению ряда наблюдателей (которое, впрочем, невозможно проверить), интенсивное развитие индустрии биоэтанола в Бразилии нанесло значительный ущерб

**Рисунок 9.** Структура использования урожая технической кукурузы в США в сезоне 2012/2013



Источник: USDA|OCE

уникальным дождевым лесам, естественные ареалы которых были сокращены для высвобождения площадей под сахарный тростник.

Проблема возможной конкуренции за посевные площади с пищевым сельским хозяйством усугубляется еще и той политикой, которая реализуется в основных странах — производителях топливного биоэтанола. Так, в США выращивание технической кукурузы для целей спиртового брожения рассматривается как возможность сохранить в хозяйственном обороте земли, использование которых для пищевых культур нерентабельно, сохранить рабочие места и сдержать отток населения из сельскохозяйственных регионов. То есть поддержка индустрии биоэтанола используется как поддержка сельского хозяйства в целом в структуре национальной экономики. Разумеется, другие сельхозпроизводители, в том числе пищевой продукции, также получают государственные субсидии, однако акцент с большим отрывом делается именно на кукурузу. Это создает неравные условия конкуренции в сельскохозяйственном сегменте и провоцирует переток инвестиций в пользу технической кукурузы. То есть индустрия биоэтанола начинает конкурировать с пищевым сельским хозяйством уже не за посевные площади, а за инвестиции. Нами была установлена достаточно четкая корреляция между размером государственных субсидий производителям кукурузы в США и величиной прироста новых мощностей по топливному биоэтанолу с лагом в четыре года (Рис. 10).

Аналогичная ситуация складывается в Европе. Традиционное сельское хозяйство с фокусом на пищевые продукты теряет свою

**Рисунок 10.** Корреляция между размером государственных субсидий производителям кукурузы и абсолютными значениями прироста мощностей по топливному биоэтанолу в США в 2002–2012 гг.



Источник: RFA, Environmental Working Group, анализ RUPEC

конкурентоспособность на фоне дешевых производителей из других регионов мира. Потеря отрасли недопустима для Евросоюза в первую очередь с точки зрения ее социально-демографической роли, а также значимости для отдельных национальных экономик Еврозоны. Поэтому, как и в США, индустрия биоэтанола получает поддержку для того, чтобы она породила достаточно платежеспособный спрос на техническую продукцию сельского хозяйства. Меры такой поддержки разнообразны, но главным является административное создание рынка сбыта для производителей биоэтанола. Уже сейчас стандарты качества и безопасности автомобильных бензинов в ЕС ограничивают минимальное содержание биоэтанола на уровне 5%. Ожидается, что в ближайшие четыре-пять лет эта нижняя обязательная планка вовлечения биоэтанола в автомобильные бензины достигнет отметки в 10%.

Таким образом, на наш взгляд, системный риск для отрасли биоэтанола заключается в том, что, ее полноценное развитие невозможно без прямого или косвенного государственного субсидирования соответствующего сельскохозяйственного производства, а наличие такого субсидирования провоцирует переток отраслевых инвестиций из сферы пищевого агробизнеса в производство технических культур для биоэтанола.

Это не означает, что власти должны прекратить поддерживать выращивание культур для нужд индустрии биоэтанола. На определенном этапе это необходимо и действительно оказывает существенную поддержку сельскому хозяйству. Так, с 1993 по 2003 год в США площадь вовлеченных в оборот земель для выращивания кукурузы увеличилась на 30%, до 95,4 млн акров, а урожайность кукурузы (по зерну) выросла за тот же период на 58%, до 159 бушелей/акр (Рис. 11). Это указывает как на экстенсивный, так и интенсивный рост отрасли.

### Технологии второго и третьего поколения

Возможность преодоления рисков из-за конкуренции с пищевыми культурами, в настоящее время связывается с широким внедрением в производстве биоэтанола так называемых технологий второго поколения. Если технологии первого поколения используют в качестве сырья в основном продукцию, богатую первичными углеводами (сахарный тростник) или простыми полимерами глюкозы (кукуруза) и, следовательно, не требующую существенной предварительной обработки, то в технологиях второго поколения предполагается вовлекать в производство биоэтанола биомассу, состоящую преимущественно из полисахаридов биомассы одревесневшего сырья, таких как целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин. Эти вещества являются структурными элементами, например, стеблей многих пищевых культур (которые, следовательно, используются для приготовления перегноя и силоса, но не идут на пищевое производство), ботвы, соломы и, самое главное, древесины. Возможность экономически эффективного выхода на древесное сырье для спиртовой ферментации позволит подключить к производству биоэтанола регионы, где по климатическим условиям затруднено масштабное выращивание сельскохозяйственных культур, но где развита лесная промышленность, генерирующая колоссальное количество побочной продукции

**Рисунок 11.** Площадь земель в обороте под выращивание кукурузы и урожайность по зерну в США в 2002–2012 годах

Источник: USDA/NASS

и отходов, которые зачастую просто сжигаются. Таким образом, технологии второго поколения должны развести по различным сырьевым нишам пищевое сельское хозяйство и производство биоэтанола.

Конечно, история с вовлечением древесины в производство спирта совершенно не нова. Так, в России прекрасно известен термин «гидролизный спирт», который получался как раз из древесного сырья при помощи промежуточного гидролиза лигнина и целлюлозы с применением в основном серной кислоты. Так что принципиально различных направлений предварительной подготовки сырья такого рода перед брожением довольно много, в том числе термических и термохимических. Но в концепции технологий второго поколения наибольшие надежды связываются именно с биохимической обработкой, при которой гидролиз лигнина и гемицеллюлоз осуществлялся бы под действием ферментов и/или специальных природных или генномодифицированных микроорганизмов (бактерий, простейших, грибов, водорослей и т. п.). Собственно, направление, связанное с деятельностью микроорганизмов, уже называют технологиями третьего поколения в индустрии биоэтанола. Сюда же относят технологии, предполагающие предварительную газификацию древесного сырья в синтез-газ, углеродный компонент которого (CO) является питательным веществом для микроорганизмов, осуществляющих спиртовое брожение.

Первые промышленные внедрения уже осуществлены. В 2013 году состоялся запуск в эксплуатацию проекта KiOR в США, предусма-

тривающего ежегодное производство 31 тыс. тонн биоэтанола из 183 тыс. тонн древесины сосны через гидролиз. В октябре 2014 года испанская Abengoa Bioenergy запустила в Канзасе проект Abengoa Bioenergy Biomass of Kansas мощностью 25 млн галлонов биоэтанола из растительных отходов кукурузы. Этот проект также относится к технологиям второго поколения, то есть помощь в гидролизе сложных углеводных полимеров оказывают вводимые в процесс ферменты. Причем, по информации компании, экономику этого проекта уже удалось сделать паритетной к экономике биоэтанола первого поколения. Стоит обратить внимание, насколько велика доля стоимости ферментов (Рис. 12).

Промышленная реализация технологий третьего поколения тоже уже началась. В 2013 году INEOS запустила завод по производству биоэтанола мощностью 24 тыс. тонн в год по технологии бактериального метаболизма синтез-газа, получаемого газификацией древесного сырья.

На наш взгляд, переход на непищевое сырье в производстве биоэтанола состоится неизбежно, однако это случится не так быстро, как может казаться сейчас. Вероятнее всего, доминирование биоэтанола, получаемого из пищевых культур типа кукурузы и сахарного тростника, а также сорго, сохранится в ближайшее десятилетие. Проблема заключается в том, что переход на технологии второго и третьего поколения по сути требует реализации того же инвестиционного цикла, что и внедрение и распространение технологий первого поколения. Пока непростая экономика работы на целлюлозном сырье и отсутствие как такового рынка специальных ферментов для этих процессов требует существенной государственной поддержки. Один из уже внедренных вариантов — законодательное требование по использованию биоэтанола из древесного/травяного сырья в бензинах (в США). В ЕС биоэтанол, полученный по технологиям второго и третьего поколения при блендировании с бензинами, учитывается в двойном объеме, то есть его расход на исполнение нормативного содержания в топливе в два раза ниже. Кроме того, примеры

**Рисунок 12.** Издержки производства биоэтанола из целлюлозного сырья в США



Источник: Abengoa Bioenergía



реализованных и реализуемых проектов показывают их высокую зависимость от финансирования по типу предоставления грантов и государственных гарантий при привлечении кредитов. По-видимому, подобная сильная зависимость будущего технологий второго и третьего поколения от государственной поддержки будет иметь место не только в США, но и во многих других странах, которые в силу своих климатических и экономических особенностей могут рассматривать производство биоэтанола из целлюлозного сырья как перспективное направление.

## БИОЭТАНОЛ И БИОЭТИЛЕН В РОССИИ

Россия пока отстает от мирового увлечения топливным биоэтанолом. При этом производство собственно биоэтанола существует. По данным Росстата, в 2013 году брожением пищевого сырья было произведено 476 млн литров этилового спирта. Еще 7,5 млн литров было получено на гидролизных производствах из древесного сырья. Конечно, по мировым меркам это ничтожные объемы: в 106 раз меньше производства топливного биоэтанола в США в 2013 году, в 50 раз меньше, чем в Бразилии, и в 11 раз меньше, чем в Европе.

Впрочем, данное сравнение не вполне корректно: в России получаемый из пищевого сырья этанол практически полностью используется в пищевой промышленности. И в этом смысле объемы производства пищевого спирта соизмеримы с таковыми в других регионах мира. Проблема в том, что у нас в стране просто нет столь же мощной отрасли промышленного потребления биоэтанола в виде топлива или химического сырья. Соответственно, нет и предложения.

Основная проблема заключается, очевидно, в той системе регулирования производства и оборота этанола, которая сложилась в России. Исторически считается, что основное направление использования спирта — производство алкогольной продукции, с чрезмерным употреблением которой, понятно, нужно бороться. Что и достигается тем, что этанол во всех формах и из всех видов сырья за единичными исключениями является подакцизным товаром. Управляя величиной акциза, государство косвенно управляет и минимальными розничными ценами на алкогольную продукцию, а с недавнего времени и прямо ее устанавливает. А поскольку уплата акциза фактически перекладывается на кошелек конечного потребителя, который, по данным статистики, как-то игнорирует рост акцизов и пьет стабильно много, отрасль с пищевым применением этанола существует относительно комфортно. Понятно, что высокий акциз при высоких же ценах розничной реализации вытесняет часть производителей в теневой сектор, но это другая история.



Что касается непищевого применения этанола, то здесь ценовыми ориентирами для производителей являются, понятно, экспортно-импортные паритеты. А поскольку величина акцизов сейчас равна и часто превосходит себестоимость производства, выпуск этанола для промышленных целей оказывается просто нерентабельным.

Вообще, сопоставление ключевых факторов, влияющих на развитие индустрии биоэтанола, с успешным опытом США и стран Европы — не в пользу развития таковой в России (Табл. 1).

**Таблица 1.**

*Сравнение факторов, влияющих на развитие индустрии биоэтанола в США/ЕС и России*

Фактор	США, ЕС	Россия
<b>Рынок сбыта</b>	Очень емкий и развитый рынок в качестве компонента топлива	Емкий внутренний спрос в непищевом секторе отсутствует
<b>Наличие сырья</b>	США: доступное и эффективное сырье для технологий первого поколения (кукуруза) ЕС: менее эффективное и более дорогое сырье (свекла, злаковые)	Отсутствие масштабного производства высокоэффективных культур Относительно высокие внутренние цены на зерно Большая площадь земель, не вовлеченных в с/х Неустойчивый и в целом неблагоприятный климат Большие ресурсы дешевого целлюлозного сырья (для технологий второго и третьего поколений)
<b>Технологии и материалы</b>	Большое количество поставщиков технологий и расходных материалов, высокая конкуренция	Современные технологии не разрабатываются, внутреннего производства ферментов нового поколения нет
<b>Транспорт и каналы реализации</b>	Сеть этанолопроводов Развитая дистрибуция, базы хранения	Высокая стоимость ж/д перевозок Как таковой дистрибуции нет
<b>Госрегулирование</b>	Требования по содержанию биоэтанола в топливе Субсидии, гранты и гарантии на промышленное внедрение новых технологий	Подакцизный продукт, величина акциза сопоставима с себестоимостью Меры поддержки с/х не носят масштабного характера и малоэффективны Биотехнологии специальной поддержки не имеют
<b>Капитальные затраты</b>	Широкий пул опытных в технологии биоэтанола проектных и строительных организаций, высокая конкуренция Оптимальные нормы проектирования и безопасности	Опыт отсутствует, низкая конкуренция на рынке, высокие цены Устаревшие нормы проектирования и безопасности Как следствие, CAPEX выше на 40–60%
<b>Доступность финансирования</b>	Проекты биоэтанола расцениваются финансовыми институтами как низкорисковые Низкие ставки и большие сроки кредитования	Высокие базовые ставки, короткие периоды кредитования Для финансовых институтов такие проекты незнакомы и представляются высокорисковыми

Источник: Анализ RUPEC

Стоит остановиться на ценовом моменте. Согласно данным USDA/NASS, среднегодовая цена зерна кукурузы в США в 2013 году составила \$6,15 за бушель. В пересчете на тонну биоэтанола с учетом «производительности» кукурузного зерна (Рис. 3) издержки на сырье можно оценить максимум в \$632. Как максимум, потому что в обработку на выделение сахаров вовлекается не только зерно, но и богатые крахмалом стебли. В России, по данным «АБ-Центр», среднегодовая цена пшеницы четвертого класса составляла 8860 руб./тонна. В пересчете на доллар США по среднегодовому курсу (31,8 руб./\$) это составляет \$279 за тонну пшеницы, а при переходе к тонне биоэтанола — \$753 на тонну, что на 19% выше, чем в США. При этом бензин, с которым конкурирует топливный биоэтанол, в России несколько дешевле, чем в США, поэтому отечественному биоэтанолу соперничать с традиционным топливом будет сложнее. Выходом может стать только масштабная поддержка сельского хозяйства с тем, чтобы ростом предложения добиться снижения цен на сырье.

Несмотря на все проблемы, развитие биотехнологий в России и в частности направления топливного биоэтанола декларировано в правовых документах, исходящих от властей самого высокого уровня. В частности, утвержденная в июле 2013 года распоряжением правительства РФ дорожная карта «Развитие биотехнологий и генной инженерии» ставит перед отраслью весьма амбициозные и, признаться, вряд ли достижимые в указанные сроки цели (Табл. 2).

**Таблица 2.**

*Отдельные контрольные показатели дорожной карты «Развитие биотехнологий и генной инженерии» в части химических биотехнологий*

Показатель	2012	2015	2017
Удельный вес отходов сельскохозяйственного производства, переработанных методами биотехнологии	5%	30%	50%
Доля отходов пищевой и перерабатывающей промышленности, переработанных методами биотехнологии	1%	10%	15%
Доля биоразлагаемых материалов в общем объеме потребляемых полимерных изделий — всего	—	3%	8%
в т. ч. в упаковочной отрасли	—	10%	25%
Доля биомассы в общем объеме сырья, перерабатываемого в химической и нефтехимической промышленности	—	5%	12%
Доля моторного биотоплива и его компонентов в общем объеме потребления топлива	—	3%	8%

*Источник: План мероприятий «Развитие биотехнологий и генной инженерии»*

Эти же документы предусматривают изменение законодательного поля в пользу стимулирования отрасли. Стоит отметить, что указанные в дорожной карте мероприятия в части топливного биоэтанола охватывают почти все проблемные вопросы (Табл. 3).

**Таблица 3.**

*Меры по развитию индустрии биоэтанола в РФ*

Фактор развития	Меры согласно «дорожной карте»	Срок реализации
<b>Рынок сбыта</b>	Корректировка технического регламента по моторным топливам с учетом биоэтанола	2015, II квартал
<b>Наличие сырья</b>	Анализ загрузки существующих спиртовых заводов на предмет возможности перепрофилирования на топливный биоэтанол	2013, III квартал
	Перепрофилирование простаивающих спиртовых заводов	2015, IV квартал
<b>Технологии и материалы</b>	Разработка предложений по ввозным пошлинам на оборудование и материалы для биотехнологий	2014, III квартал
<b>Транспорт и каналы реализации</b>	—	
<b>Госрегулирование</b>	Разработка проектов технических регламентов на продукцию биотехнологий	2014
	Разработка стандартов и сводов правил	2014, январь
	Корректировка ФЗ «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта...» с учетом биоэтанола	2015, I квартал
	Обнуление акцизов на топливный биоэтанол	2015, I квартал
<b>Капитальные затраты</b>	—	
<b>Доступность финансирования</b>	—	

*Источник: План мероприятий «Развитие биотехнологий и геномной инженерии»*

Если предположить, что судьба ожидаемых изменений в Налоговый кодекс относительно акцизов и в законодательство об обороте биоэтанола сложится самым благоприятным образом, это может существенно улучшить инвестиционные параметры потенциальных проектов в области топливного биоэтанола и окажет очень большую поддержку отрасли.

Однако самым главным, на наш взгляд, вопросом остается возможный рынок сбыта топливного биоэтанола. Проблема в том, что уже в ближайшие годы в России ожидается перепроизводство традиционного автомобильного бензина. Так что не очень ясно, какую нишу займет биоэтанол. Кроме того, большой вопрос, в какой форме он будет вводиться в Технический регламент по моторным топливам: в качестве ли самостоятельного вида, в качестве ли добавки к бензинам, в качестве ли отдельно рассматриваемых смесей с различными пропорциями биоэтанол—бензин и т. п.

Одно из наиболее радикальных предложений — по примеру Европы ввести в России нормативно закрепленное требование к минимальному содержанию биоэтанола в автомобильных бензинах на уровне, скажем, 5%.

Эта идея сталкивается с двумя существенными проблемами. Первая связана с тем, что для обеспечения производства автобензинов в объеме около 40 млн тонн в год (что соответствует объему внутреннего спроса на перспективу четыре-пять лет), но с 5%-ным содержанием этилового спирта потребуется примерно 2700 млн литров этанола. Это примерно в 4,4 раза больше, чем всего производится в России сейчас из всех видов сырья, и примерно в 20 раз больше, чем производится синтетического и гидролизного спирта. Такой объем потребления всего в два раза ниже, чем выпуск топливного биоэтанола в Европе в 2013 году. На его производство потребуется примерно 9 млн тонн, скажем, пшеницы, что составляет 18% от ее валового сбора в 2013 году и в пересчете на посевные площади соответствует примерно 16% от этого показателя в том же году.

То есть речь идет о создании в России фактически с нуля новой огромной отрасли промышленности, что, разумеется, невозможно в короткие сроки даже при всем комплексе благоприятствующих факторов.

Вторая проблема далеко не так очевидна. Дело в том, что введение в бензины 5% по объему этанола, как это допускает Технический регламент Таможенного союза о моторных топливах, соответствует содержанию кислорода (при итоговой плотности смеси 0,75 тонн/м<sup>3</sup>) 1,83% об. Тот же Технический регламент для класса 5 ограничивает массовую долю кислорода на уровне 2,7%. То есть после введения биоэтанола, у производителя остается всего 0,87% масс кислорода для применения других кислородсодержащих компонентов. Таковым может быть МТБЭ — самый широко применяемый модификатор октанового числа. Резерв по кислороду соответствует максимальной объемной доли МТБЭ в бензине 4,8% (регламент допускает 15%). С учетом октановых чисел этанола и МТБЭ получается, что при производстве бензина класса 5 с октановой характеристикой 95 октановое число той бензиновой базы, куда вводится 5% этанола и 4,8% МТБЭ, должно составлять 93,2 пункта по исследовательскому методу. По прогнозу RUPEC, который представлен в нашем исследовании «Высокооктановые компоненты 2014–2020», такое октановое число базы для бензинового бендинга в 2020 году смогут обеспечить лишь 10 российских НПЗ. Таким образом, введение требования на обязательное 5%-ное содержание биоэтанола в автобензинах без синхронного изменения требований технического регламента может лишить две трети российских НПЗ возможности производить высокооктановые марки топлив.

Еще одна проблема «Плана мероприятий» — фактическое отсутствие увязки между биотехнологиями и теми отраслями, которые обеспечивают их сырьем. Как видно из приведенного выше примера, создание индустрии топливного биоэтанола — при сохранении, конечно, текущей структуры сельского хозяйства, потребует введения в оборот огромных дополнительных посевных площадей, что сопряжено с дополнительными инвестициями и требует акцентированной государственной поддержки. В идеале отрасль биоэтанола должна строиться по дезинтегрированному принципу, когда вся цепочка производ-

ства от обработки земли до получения конечного спирта может эффективно работать, даже если каждый отдельный технологический передел находится в руках различных хозяйствующих субъектов. Это означает специальные благоприятствующие режимы для инвесторов в техническое растениеводство для нужд спиртовой промышленности, собственно производителей биоэтанола, производителей и поставщиков высокоэффективных ферментов, дистрибуторов и т. п. Причем все меры господдержки по различным уровням передела должны быть синхронизированы, чего пока не наблюдается. Собственно, развитие химических биотехнологий в широком смысле в России должно ставить своей главной целью именно перекрестную поддержку сельского хозяйства.

Однако биоэтанол для топливного применения по большому счету не представляет особого интереса в контексте именно химической промышленности. К сожалению, обсуждаемая «дорожная карта» как бы «не видит» его дальнейших переделов в качестве химического сырья. А между тем было бы весьма полезно предусмотреть хотя бы вчерне меры по стимулированию инвестиций в химическую переработку биоэтанола. Скажем, в ЭТБЭ, этилен или (почему бы и нет) бутадиен.

Пока в России существует в состоянии глубокой проработки только один проект по получению и дальнейшей химической переработке биоэтанола. Его инициатор, инвестор и популяризатор — омская группа компаний «Титан», в нефтехимии известная такими своими активами, как «Омский каучук», завод полипропилена «Полиом» и предприятие по производству МТБЭ «Экоойл».

Проект является частью более масштабной комплексной инициативы создания интегрированного зернового, животноводческого и биотехнического кластера. Его общая производительность по зерновым должна составить около 1 млн тонн в год, из которых порядка 590 тыс. тонн в год (главным образом это пшеница 4 и 5 классов) отведено под глубокую переработку с ежегодным получением 150 тыс. тонн технического биоэтанола, 250 тыс. тонн сухой барды для нужд комбикормового производства и 25 тыс. тонн пищевого спирта, а также небольших объемов побочных продуктов и около 150 тыс. тонн CO<sub>2</sub>. За счет глубокой переработки барды и выпуска маржинального пищевого спирта, а также масштабного зернового блока ГК «Титан» рассчитывает иметь низкие издержки при производстве технического биоэтанола.

Под переработку биоэтанола в высокооктановый эфир предполагается переориентировать существующую мощность по выпуску МТБЭ. Сейчас ее достигнутая выработка по эфиру составляет 264 тыс. тонн в год, достигнутая мощность — 325 тыс. тонн в пересчете на год работы. К 2018 году «Титан» рассчитывает расширить и модернизировать сопутствующие установки по непердельным сжиженным газам и выйти на производство 330 тыс. тонн МТБЭ с переводом мощности на выпуск ЭТБЭ. В дальнейших планах компании — увеличение мощностей по эфиру до 500 тыс. тонн в год.

## ДРУГИЕ ПРОДУКТЫ ИЗ БИОМАССЫ

Биоэтанол — уже свершившаяся реальность в мире промышленных биотехнологий. Впрочем, достижения в этой области, по сути, очень мало что привнесли в совершенно естественные процессы спиртового брожения. Однако человечество существенно продвинулось в генных технологиях и уже сегодня способно создавать живые организмы, которые ведут себя не так, как это заложено в них природой. Речь идет об идее модифицировать живые организмы (бактерии, водоросли, простейшие, грибы и т. п.) таким образом, чтобы побочным продуктом анаэробного метаболизма питательных веществ были не естественные этиловый спирт и молочная кислота, а нужные человеку химические вещества. Таким образом, эта мысль оказывается на стыке двух ключевых идей химических биотехнологий: использовать живой организм как химический реактор для снижения процессинговых затрат и использовать возобновляемые ресурсы в качестве сырья. Подобный симбиоз на лабораторном уровне уже достигнут и открывает широчайшие перспективы. С коммерциализацией подобных технологий пока все не так радужно. Но основные направления следующие.

### Спирты C4

Самое очевидное, что сразу привлекло внимание исследователей, это возможность получать в результате ферментативных процессов не традиционный этанол, а другие спирты. Главными из них является бутанол и изобутанол, а также 1,4-бутандиол. Все эти вещества являются мостиком между возобновляемым сырьем и «традиционной» нефтехимией углеводов C4: бутенов, бутадиена, эфиров карбоновых кислот (акрилатов, например).

Любопытно, что до внедрения нефтехимических технологий получения бутанола-1 он производился брожением растительного сырья. Этот процесс, носящий название ацетонобутилового брожения, был открыт в Германии в 1916 году в ходе поисков дешевого метода получения ацетона, необходимого ведущей масштабную войну стране для изготовления взрывчатки. Сырьем для этого процесса служат те же растительные культуры, богатые простыми углеводами, что и в случае с биоэтанолом, а собственно сам процесс осуществляется благодаря жизнедеятельности бактерий с говорящим названием *Clostridium acetobutylicum* и ряда родственных организмов. В ходе брожения в зависимости от условий образуется в разном соотношении смесь таких ценных химических продуктов, как ацетон, бутанол, этанол, уксусная и масляная кислоты. В лабораторных условиях показана также возможность направить процесс в сторону образования значимых количеств молочной кислоты.

Биологический способ получения бутанола оставался основным до 40-х годов XX века, когда вслед за глобальным снижением цен на нефть он был вытеснен значительно более



удобным для масштабирования нефтехимическим способом производства из пропилена.

В наше время на волне успехов биоэтанола и в контексте ресурсосберегающих научных поисков ацетонобутиловое брожение опять стало предметом детального изучения. Готовится к коммерциализации технология брожения с получением изобутанола. А летом 2013 года мировой каучуковый концерн Lanxess сообщил, что начал опытно-промышленное производство полибутилентерефталата (ПБТ), где спиртовым компонентом выступает 1,4-бутандиол, получаемым прямым брожением биомассы. Данная технология была разработана американской компанией Genomatica. Мощность завода ПБТ в Хамм-Уентропе (Германия), где Lanxess выступает паритетным собственником, составляет 80 тыс. тонн. И пока не очень ясно, собирается ли компания полностью перейти на его обеспечение 1,4-бутандиолом биологического происхождения.

Собственно, тот факт, что партнером Genomatica в этом проекте выступила именно каучуковая компания, наводит на мысль о том, что конечной целью разработки является экономически эффективная комплексная технология получения био-1,4-бутандиола с последующей его дегидратацией в 1,3-бутадиен. Пока открытым остается и вопрос о конкурентоспособности такой цепочки по отношению к описанной выше цепочке производства 1,3-бутадиена из биоэтанола по улучшенной реакции Лебедева.

### Мономеры для синтетических каучуков

Итак, 1,3-бутадиен из растительного сырья теоретически может быть получен через промежуточное производство биоэтанола или био-1,4-бутандиола, либо, что сложнее, по цепочке через биобутанол и бутилен (эта технология до стадии бутилена близка к коммерциализации). Однако в компании Genomatica смотрят еще дальше и в настоящее время занимаются исследованиями в области генной модификации микроорганизмов и комплексных колоний различных видов с тем, чтобы 1,3-бутадиен был прямым продуктом их жизнедеятельности.

Аналогичные разработки в направлении изопрена ведут американские компании DuPont (который поглотил биотехнологическую компанию Genencor, стоявшей у истоков исследования), Amyris (в партнерстве с Braskem и шинным гигантом Michelin), японский пищевой концерн Ajinomoto. Поиски ведутся по двум независимым направлениям, но их общий смысл один: ученые пытаются «перехватить» в нужный момент две различные естественные метаболические цепочки в живых организмах на стадии промежуточных C5-молекул со скелетом, соответствующим скелету изопрена. А дальше под действием специальных ферментов осуществить превращение этих метаболитов в изопрен.

Здесь перспектива коммерциализации просматривается уже в ближайшие год-два. Построена опытно-промышленная



установка, из опытной партии биоизопрена получен каучук и демонстрационная шина.

По оценке IHS, произведенной в ценах 2011 года, для модельного производства мощностью 100 тыс. тонн в год, локализованного в США, при эквивалентной цене глюкозы в 15 центов за фунт изопрен по технологии DuPont получается в полтора раза ниже рыночной цены (\$1970 за тонну). При цене 30 центов за фунтпродуктоказывается на верхней границе рыночного ценового диапазона (\$3420). Однако в сравнении с издержками при производстве изопрена нефтехимическим путем биоизопрен существенно проигрывает таковым для ситуации в США и сопоставим с оценкой для России.

Существенно улучшить экономику процесса биоизопрена могло бы внедрение технологий ферментативного гидролиза высших углеводных полимеров типа целлюлозы (по аналогии с технологиями второго поколения в биоэтаноле), что теоретически привело бы к системному снижению цен на низшие углеводы для целей биосинтеза (глюкоза).

Любопытно, что сами по себе изопреновые каучуки были изобретены в свое время для замены натурального каучука, который является полноценным возобновляемым сырьем. И тут небезынтересен вопрос: а зачем нужна технология производства биоаменителя биопродукта? Очевидно, ответ кроется в экономике: возможности по производству натурального каучука все же ограничены (гевею удастся эффективно культивировать только в очень географически ограниченных регионах), а разработки в области биоизопрена все же нацелены на то, чтобы конкурировать по издержкам с «нефтяным» изопреном. Тем более что, как и в случае с бутадиеном, облегчение сырья пиролиза и выбытие традиционных установок на жидком сырье приведет со временем к стагнации предложения «традиционного» изопрена и роста цен на него.

Похожие поиски ведутся (например, французской компанией GlobalBioenergies) и в области прямого получения из биологического сырья изобутилена — мономера для бутылкаучуков и полиизобутилена, а также компонента в производстве топливных присадок (вторым компонентом может выступать биоэтанол). По заявлениям разработчиков и заказчиков, технология может быть коммерциализирована уже в ближайшие четыре-пять лет.

## ВЛИЯНИЕ БИОТЕХНОЛОГИЙ НА НЕФТЕХИМИЮ

Сводная качественная оценка влияния химических биотехнологий на рынки и конкурентоспособность традиционной нефтехимии

Продукт	Степень влияния	Горизонт	Характер влияния	Комментарий
Биоэтанол	умеренная	2025	Применяется в основном в топливном сегменте; как химическое сырье используется главным образом для производства ЭТБЭ	Усиление конкурентоспособности как химического сырья связано с технологиями второго и третьего поколений, масштабирование и снижение издержек которых ожидается за горизонтом 2025 года
Биобутанолы	низкая	2030	Технологии на стадии коммерциализации, традиционные бутанолы имеют низкую цену	Биоспирты C4 как прямой продукт имеют низкие шансы конкурировать с традиционными
1,4-бутандиол	высокая	2018	«Углеводородный» 1,4-бутандиол дорог и сложен в производстве, «био» — хорошая альтернатива, особенно при снижении цен на сахаросодержащее сырье	Технология коммерциализирована и реализована в промышленности; принципиально возможна ее быстрая доработка для снижения издержек и тиражирование
Биоэтилен и производные	умеренная	2025	Пока биоэтилен может быть конкурентоспособен к традиционному этилену лишь в единичных географиях, биопластики (ПЭТФ, ПЭ) могут отвоевать нишу за счет имиджа	Конкурентоспособность биоэтилена связана с перспективами либо кратного удешевления биоэтанола (возможно после 2025 года), либо сильного подорожания углеводородов (маловероятно). В среднесрочной перспективе может оказать умеренное влияние на цены появление новых объемов био-МЭГ на рынках Азии. Возможен сильный рост производства на его основе био-ПЭТФ
1,3-бутадиины из биоэтанола	низкая	2030	Низкая степень влияния, технологии находятся на ранней стадии коммерциализации, экономика процесса не ясна до конца	Технология получит свою нишу или при сильном снижении цен на биосырье (вероятно после 2025 года на целлюлозном сырье), или при системном росте цен на углеводороды (маловероятно), или при отрыве цен на C4 от нефти (возможно)
Биоизобутилен		2025	Промышленное внедрение возможно к 2020 году	Конкурентоспособность биоизобутилена будет зависеть от экономики традиционных процессов, что связано с ценами на C4: если отрыв от корреляции с нефтью будет быстрым и стремительным, шансы у технологии есть, но для нишевых применений (БК с имиджевым «довеском»)
Биобутадиен		2030	Коммерциализация — за горизонтом 2025 года	Экономика процесса пока не ясна
Биоизопрен	умеренная	2020	Коммерциализация возможна уже в ближайшее время	Оценка экономики уже в границах существующих мощностей по традиционному изопрену в странах с дорогим сырьем/процессингом; успех технологии будет зависеть от состояния рынков натурального каучука — цен и объема предложения к спросу

