

## ЭНЕРГИЯ БИОМАССЫ

А.А. Мирошниченко, Я.Р. Мужагитов, Е.Е. Соломин

Южно-Уральский государственный университет  
д. 76, пр. Ленина, г. Челябинск, 454080, Россия  
тел/факс: +7(912)317-18-05; e-mail: denis\_vk@inbox.ru

## 1. Введение

Данное сообщение содержит сведения об основных видах биомассы, транспортных биотопливных рынках, а также о перспективах развития данного вида энергии [1]. До недавнего времени в качестве основных источников энергии в данной области выступали биодизель и этанол. Однако актуальной является потребность в новых видах транспортного биотоплива. Согласно научным исследованиям, топливо, полученное на основе растительной биомассы, является экономически выгодной альтернативой [2]. Так, в 2012 г. была разработана новая технология в синтетической биологии. Ученые изобрели динамический датчик – регулятор системы, который позволяет обнаруживать метаболические изменения в микроорганизмах. Основным упор данного открытия был сделан на жирных кислотах в качестве основного сырья для биодизеля. Преимуществом жирных кислот является их продуктивность в выработке энергии, датчик же позволяет регулировать процессы синтеза жирных кислот метаболическими путями.

Биомасса относится к локальным возобновляемым источникам энергии. Под термином биомасса обычно подразумевают углеродсодержащие органи-

ческие вещества растительного и животного происхождения (древесина, солома, навоз и т.п.).

В настоящее время актуальным является процесс анаэробного сбраживания органических отходов с целью получения биогаза. Это позволяет одновременно решать многие проблемы: энергетические, экономические и экологические. Например, биогаз представляет собой смесь газов, которая содержит 50 ÷ 80 % метана и 20 ÷ 50 % углекислого газа со следами сероводорода, аммиака и других веществ. Содержимое метана в биогазе колеблется, что существенно образом влияет на теплоту сгорания этого вида топлива. При сгорании 1 м<sup>3</sup> биогаза с пятидесятипроцентным содержанием метана получают 17,8 МДж энергии, при семидесятипроцентном содержании – 25 МДж. При сгорании 1 м<sup>3</sup> природного газа получают 34 МДж.

Биогаз используют для отопления и приготовления пищи, для сушки сельскохозяйственных и лекарственных растений, в стационарных газовых двигателях. Одним из важных направлений использования биогаза является получение электроэнергии. [3]

В табл. 1 приведены производственные мощности биотоплива ведущих стран мира.

Таблица 1

Мощности, производимые при сжигании биотоплива

Страна	Биоэтанол (млн галлонов)	Биодизель (млн галлонов)
Бразилия	4967	64,1
Канада	264,2	25,4
Китай	423	29,9
ЕС	608,4	1732
Индия	105,7	12
Индонезия	–	108
Малайзия	–	87
Таиланд	79,3	68,8
США	6499	444,5

США и Бразилия являются лидерами по переработке биотоплива. В ближайшей перспективе догнать их может только ЕС и Китай.

## 2. Энергия биомассы

Существует много способов, с помощью которых сырье для биомассы может быть преобразовано в

полезную возобновляемую энергию. Широкий спектр энергетических культур может использоваться непосредственно – в качестве топлива для отопления и охлаждения, для производства электроэнергии, а также они могут быть преобразованы в газообразное или жидкое топливо для транспортировки или в качестве заменителей для нефтехимии [4]. Многие биоэнергетические технологии и процессы преобра-

зования хорошо зарекомендовали себя и являются полностью коммерческими. В 2016 г. увеличение спроса на энергию и требования энергетической безопасности продолжали стимулировать рост производства и использования биоэнергии. Потребление биоэнергии и инвестиции в новые возможности поддерживаются правительствами многих странах, однако, в некоторых странах низкие цены на ископаемое топливо в течение 2016 г. препятствовали инвестициям в теплоснабжение на основе биоэнергии. Кроме того, усиление конкуренции с другими недорогими возобновляемыми источниками электроэнергии стало препятствием для производства биоэнергии [5].

Существует несколько методов получения водорода из биомассы:

1. При *термохимическом* методе биомассу нагревают без доступа кислорода до температуры  $500 \div 800$  °С (для отходов древесины), что намного ниже температуры процесса газификации угля. В результате выделяются  $H_2$ , CO и  $CH_4$ . Себестоимость процесса составляет  $\$5 \div 7$  за килограмм водорода. В будущем возможно снижение до  $\$1,0 \div 3,0$ .

2. В *биохимическом* процессе водород вырабатывают различные бактерии, например, *Rhodobacter sphaeroides*, *Enterobacter cloacae*. Возможно применение различных ферментов для ускорения производства водорода из полисахаридов (крахмал, целлюлоза), содержащихся в биомассе. Процесс проходит при температуре 30 °С и нормальном давлении, при этом себестоимость водорода составляет около  $\$2$  за кг.

3. Учёные Калифорнийского университета в Беркли в 1999 г. обнаружили, что если водорослям не хватает кислорода и серы, то процессы фотосинтеза у них резко ослабевают, и начинается бурная выработка водорода (*биофотоллиз*). Водород может производить группа зелёных водорослей, например *Chlamydomonas reinhardtii*, из морской воды или канализационных стоков.

4. Водород может производиться риформингом *биогаза* или лэндфилл-газа.

### 3. Биоэнергетика для теплоснабжения

Для получения тепла можно использовать биомассу во многих формах: в виде твердых веществ, жидкостей или газов. Твердая биомасса сжигается непосредственно с использованием традиционных печей и более современных приборов для получения тепла, приготовления пищи и обогрева помещений, нагрева воды в жилом секторе. Метод также может применяться в более широких масштабах для обеспечения теплом производственных, коммерческих помещений и в промышленности, где он может дать либо низкотемпературное тепло для нагрева и сушки, либо высокотемпературную тепловую энергию. Тепло также может генерироваться совместно с электричеством через комбинированные тепловые и энергетические системы и распределяться из более

крупных производственных объектов в районные энергетические системы для отопления (а в некоторых случаях и охлаждения) жилых, коммерческих и промышленных потребителей [6].

Традиционное использование биомассы для теплоснабжения включает сжигание древесной биомассы или древесного угля, а также навоза и других сельскохозяйственных отходов в простых и неэффективных устройствах (в 2016 г. в мире оценивалось в 9 150 ТВт·ч). Потребление топливной древесины для традиционных видов использования энергии остается стабильным с 2010 г. – 1,9 млрд  $m^3$ , что эквивалентно примерно 4 150 ТВт·ч. Самые большие доли топливной древесины, а также навоза и сельскохозяйственных отходов, потребляются в Азии, Южной Америке и Африке. Производство топливного угля для приготовления пищи, которое наиболее часто встречается в городских районах, увеличилось в среднем на 2 % в год с 2010 г., хотя темпы роста в последние годы замедлились [7]. Производство сократилось незначительно в 2015 г. – до 52 млн тонн. Аналогичное количество было произведено в 2016 г.

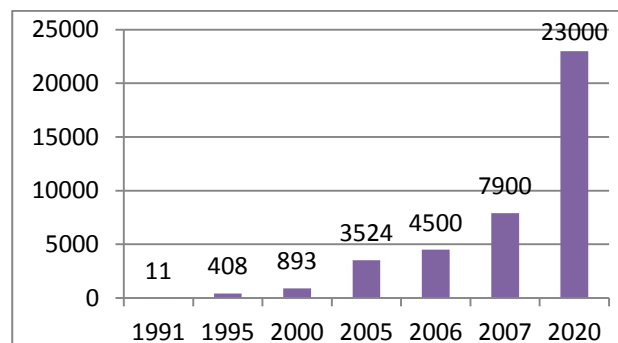


Рис. 1 – Динамика производства биодизеля в тоннах

Как видно на рис. 1, производство биодизеля идет нарастающим темпом, и по прогнозам к 2020 г. общие объемы биодизеля должны будут увеличиться до 23 000 тонн.

В последние годы рост использования современной биоэнергии для отопления также замедлился примерно до 1 % в год. В 2016 г. современные биоэнергетические установки обеспечили 3 860 ТВт·ч энергии, из которых 2 500 ТВт·ч были предназначены для промышленности, и 1 360 ТВт·ч – для жилого и коммерческого секторов, главным образом для отопления зданий и приготовления пищи. По этим данным современная теплопроизводительность биомассы в 2016 г. увеличилась до 311 ГВт. Биоэнергетика (в основном из твердой биомассы) составляет около 7 % от общего объема потребления в промышленности, и эта цифра за последние годы не увеличилась [8]. В основном биоэнергия из твердой биомассы используется в целлюлозно-бумажном секторе, в производстве продуктов питания и табака. Кроме того, в 2016 г. цементная промышленность ис-

пользовала более крупные объемы топливных отходов [9].

Ведущими регионами по промышленному биотеплу являются Азия (например, рисовая шелуха, солома и хлопковые стебли в Индии) и Южная Америка (особенно Бразилия, где биоэнергия из сельскохозяйственных и древесных отходов используется для производства пищевых продуктов, в целлюлозно-бумажной промышленности, а биоэнергия из отходов сахарного тростника – в сахарной и алкогольной промышленности) [10]. Северная Америка является следующим крупнейшим потребителем: в Канаде 22 % промышленного тепла было обеспечено биоэнергетикой в 2016 г., главным образом в целлюлозно-бумажной

промышленности. Существуют признаки сокращения объемов использования биоэнергии в Северной Америке с более сильным ростом в Азии, что отражает изменения в структуре производства в ключевых отраслях промышленности, особенно в целлюлозно-бумажной. При этом Соединенные Штаты являются крупнейшим потребителем биомассы для отопления. Несмотря на низкие цены на нефть, американский рынок древесной биомассы и котлов на пеллетах оставался стабильным в 2016 г.

В табл. 2 приведены различные сельскохозяйственные культуры, применяемые в производстве биотоплива в разных странах.

Таблица 2

Сельскохозяйственные культуры для производства биотоплива

Страна	Биоэтанол	Биодизель
Бразилия	Сахарный тростник, соевые бобы, пальмовое масло	Касторовое масло
Канада	Кукуруза, пшеница, солома	Животные жиры, растительные масла
Китай	Кукуруза, пшеница, солома	Растительные масла
ЕС	Пшеница, другие зерновые культуры, вино, спирт, сахарная свекла	Рапс, соя, подсолнечник
Индонезия	Маниока, сахарный тростник	Пальмовое масло
Индия	Сахарный тростник	Пальмовое масло
Малайзия	–	Пальмовое масло
Таиланд	Маниока, сахарный тростник	Пальмовое масло, растительное масло
США	Кукуруза	Соя, масличные культуры, животные жиры, рециркуляция жиров и масла

Согласно данным таблицы, для производства биодизеля почти все страны используют различные масла. Это обусловлено простотой добычи масла. Страны Южной Азии, такие как Таиланд, Индия, Малайзия, Индонезия, например, используют пальмовое масло. В большинстве стран для производства биоэтанола используют сахарный тростник [11]. Наиболее доступной культурой является пшеница и другие зерновые культуры, так как выращивать пшеницу, рожь можно практически в любых странах, начиная с Канады и заканчивая Индонезией. Самой экономически выгодной культурой для производства биодизеля является рапс (высокоэнергетическая культура). Рапсовое масло – самое дешевое из всех видов растительных масел, однако высокая урожайность рапса наблюдается не везде. Главными экспортёрами рапса являются Канада, Германия и Австралия, а главными импортёрами – страны с преимущественно теплым климатом, такие как Мексика, Бангладеш, Китай [12].

#### 4. Рынки биоэнергии

Ведущей страной по производству электроэнергии из биомассы в 2016 г. стали США (68 ТВт·ч), далее Китай (54 ТВт·ч), Германия (52 ТВт·ч), Бразилия (51 ТВт·ч), Япония (38 ТВт·ч), Индия и Великобритания (по 30 ТВт·ч).

На рис. 2 показаны мощности электроэнергии, получаемой странами-лидерами при помощи энергии биомассы.

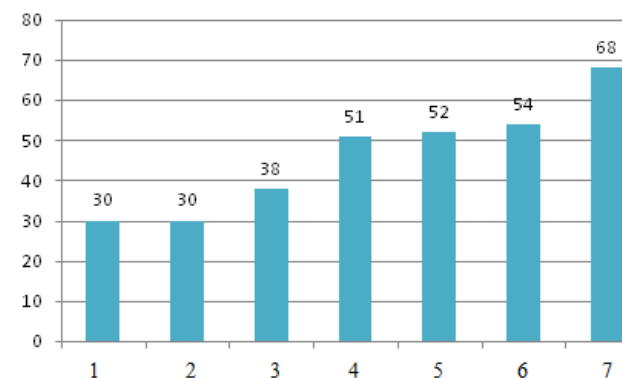


Рис. 2 – Ведущие страны по производству энергии из биомассы (ТВт·ч)

1 – Индия; 2 – Великобритания; 3 – Япония; 4 – Бразилия; 5 – Германия; 6 – Китай; 7 – США

Несмотря на то, что Соединенные Штаты по-прежнему являются крупнейшим производителем электроэнергии из биомассы, в 2016 г. производство сократилось на 2 % – до 68 ТВт·ч по сравнению с уровнем 2015 г. в 69 ТВт·ч, ввиду конкуренции с традиционной энергетикой. Однако мощность биоэнергетики в США увеличилась на 197 МВт (0,5 %)

до 16,8 ГВт за счет установки 51 мелкосерийной установки [13].

В Европе рост производства электроэнергии из твердой биомассы и биогаза продолжился в 2016 г., что было обусловлено директивой по возобновляемым источникам энергии. В Германии, которая является крупнейшим в Европе производителем электроэнергии из биомассы, общая биоэнергетическая мощность увеличилась на 2 %, до 7,6 ГВт, и генерация выросла на 2,5 % – до 52 ТВт·час. Биоэнергетический потенциал Великобритании увеличился на 6 %, до 5,6 ГВт, главным образом в результате крупномасштабного производства и продолжающегося роста производства биогаза для выработки электроэнергии. Однако генерация выросла только на 1 %, поскольку увеличение объема производства из твердой биомассы и анаэробного сбраживания было компенсировано сокращением выработки из свалочного газа. В Польше схемы аукционов мощности с выделенными траншами для муниципальных твердых отходов (ТБО) и для биогаза стимулировали развертывание новых мощностей по биоэнергетике. В результате биоэнергетическая мощность по производству тепла выросла с 1,27 ГВт до 1,34 ГВт, а генерация электроэнергии увеличилась на 50 % (с 10ТВт·ч до 15 ТВт·ч) в 2016 г. [14].

В Китае, в соответствии с пересмотренными целями в 13-й, пятилетке биоэнергетические мощности выросли примерно на 13 % в 2016 г. – до 12 ГВт, а производство увеличилось до 54 ТВт·ч. Сжигание ТБО и сельскохозяйственные отходы составляли большую часть этой генерации [15].

## 5. Биоэнергетическая отрасль в России

Практически все федеральные округа России полагают основными возобновляемыми источниками энергии (энергия солнца и ветра, малая гидроэнергетика, энергия биомассы) и имеют возможности для создания интегрированных энергетических комплексов для производства тепловой и электрической энергии и моторного топлива для полного обеспечения населения (быт и производство) любым видом топлива и энергии. Эти источники составляют примерно 30 % от объема потребления топливно-энергетических ресурсов в России, который составляет 916 млн т у.т. в год, что создает благоприятные перспективы для решения энергетических, социальных и экологических проблем в будущем.

В России потенциальные объемы производства биотоплив из биомассы в ближайшие десятилетия могут составить около 1 500 млн т у.т./год и не будут уступать объемам ежегодной добычи нефти, угля или природного газа (годовой энергобаланс России более 1 600 млн т у.т.). Потенциальные энергетические возможности России в области биоэнергетики, как и в случае ископаемых углеводородов, превосходят таковые многих стран мира. При интенсивном

развитии этой отрасли страна может стать крупнейшим экспортером отдельных видов биоэнергии.

В России основными источниками энергетической биомассы являются [16]:

- органические отходы агропромышленного комплекса с энергосодержанием до 80 млн т у.т./год;
- органические отходы лесопромышленного комплекса (при условии применения современных технологий лесопроизводства и деревообработки) с энергосодержанием до 1 млрд т у.т./год (весь лесной запас 20 млрд т у.т.);
- отходы городов: сточные воды и твердые бытовые отходы (всего 60 млрд т у.т. 10,7 млрд т у.т. промышленный фонд, 100 млн т у.т./год);
- энергетические плантации (минимум 270,9 млн т у.т./год, 19,5 млн га – 20 %, биогаз – 228,5 млн т у.т., этанол – 41,9 млн т у.т.);
- биогазификация остаточной нефти [17].

## 6. Транспортные биотопливные рынки

В 2016 г. мировое производство биотоплива увеличилось примерно на 2 % по сравнению с 2015 г. и достигло 135 млрд литров. Это увеличение было вызвано главным образом отскоком в производстве биодизеля после снижения в 2015 г. [18]. На сегодняшний день Соединенные Штаты и Бразилия остаются крупнейшими производителями биотоплива, на долю которых приходится 70 % всего биотоплива, затем следуют Германия, Аргентина, Китай и Индонезия. По оценкам, мировое производство биотоплива (в энергетическом выражении) распределено следующим образом: топливный этанол – 72 %, биодизель – 23 % и гидроочищенное растительное масло – 4 % [19].

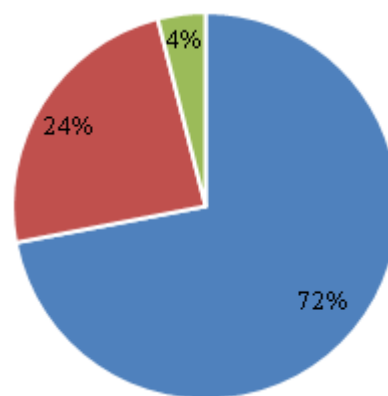


Рис. 3 – Производство биотоплива в процентном соотношении

Производство и потребление биометана в качестве транспортного топлива также продолжало расти в течение 2016 г. Например, в Соединенных Штатах потребление увеличилось почти в шесть раз в период между 2014 г. и 2016 г., когда биометан обеспечил эквивалент этанольного топлива в 188 млн галлонов

(712 млн литров). В 2014 г. преобразование биомассы в биометан стимулировалось Федеральным агентством по охране окружающей среды, основанное на международном стандарте RFS2, что стимулировало производство биометана, продвинув его к передовой категории целлюлозного биотоплива. В результате существенного роста в 2016 г. США обогнали другие рынки биометана на транспортных средствах – в Швеции и Германии, которые вместе потребляли на транспорте 1 777 МВт·ч биометанового топлива [20].

## 7. Производство твердой биомассы

Весьма разнообразный комплекс отраслей промышленности занимается поставкой, переработкой и использованием твердой биомассы для производства тепла и электроэнергии. В Европе продолжается тенденция конвертации мощных электростанций с угля на древесные гранулы. Например, в Дании в г. Орхус блок мощностью 360 МВт был переведен с угля на древесные гранулы. Этот блок будет обеспечивать теплом на основе биомассы более чем 100 000 домов и электричеством примерно до 230 000 домов. В Великобритании электростанция Драг получила разрешение Европейской комиссии на то, чтобы перевести работу третьей части своего угольного завода на древесные гранулы [21].

В течение года 2016 г. в Японии увеличился импорт древесных гранул. Япония импортирует 300 000 тонн в год промышленных пеллет, из которых 70 % поступает из Канады, а также 600 000 тонн раковин из пальмового ядра из Вьетнама и других стран Юго-Восточной Азии [22].

Глобальный рынок древесных гранул для промышленного использования (в основном электростанции) и отопления продолжает расширяться. В 2016 г. спрос в промышленном секторе достиг приблизительно 13,8 млн тонн. Аналогичное количество гранул (около 14 млн тонн) поступало на рынки отопления (отдельные дома и централизованное теплоснабжение), особенно в Италии, Германии и Швеции. Количество древесных гранул, используемых для отопления, увеличивалось со скоростью почти 1 млн тонн в год за 10-летний период [23].

Соединенные Штаты являются крупнейшим экспортером древесных гранул. В 2016 г. американские производители произвели около 6,9 млн тонн древесных гранул и экспортировали 4,8 млн тонн. В течение первой половины 2016 г. 85 % экспортированных гранул были проданы британской электростанции Драг. Экспорт Канады также увеличился на 47 % в 2016 г. – до 2,5 млн тонн. Латвия, крупнейший европейский производитель, экспортировала 1,9 млн тонн, главным образом в Данию и Великобританию, а также в Швецию и Италию [24].

Наряду с некоторыми крупными заводами, предназначенными для обеспечения безопасности цепочки поставок для конкретных пользователей (таких как Драг), индустрия древесных гранул в основном

состоит из независимых производителей и базируется на лесопильном производстве. Например, 142 завода по производству гранул работают в Соединенных Штатах и 58 в Канаде. Однако есть признаки консолидации отрасли. Так, компания Gaaanul (Эстония) стала крупнейшим производителем в 2016 г. с 11 заводами по производству древесных гранул по всей Эстонии, Латвии и Литве [25].

Устойчивость биоэнергетики продолжает оставаться спорным вопросом. Европейская Комиссия в своих предложениях по новой Директиве по возобновляемым источникам энергии, введенной в ноябре 2016 г., заявила о своем намерении усилить обязательные критерии устойчивости биоэнергетики путем расширения сферы охвата твердой биомассы и биогаза для отопления, охлаждения и выработки электроэнергии. В 2016 г. такие обязательные критерии применяются только к биотопливу [26].

Следует отметить, что торрефикация древесины позволяет производить гранулы с более высокой плотностью энергии, поэтому получаемый продукт совместим с системами, предназначенными для угля. Несмотря на то что коммерциализация технологии происходила медленнее, чем ожидалось, некоторые перспективные разработки появились в 2016 г. Например, компания AigexEnergy (Канада) начала производство торрефицированных гранул на своем заводе Вёсансу производительностью 15 000 тонн в год. Финская компания Bioower вложила около 80 млн долларов в строительство завода по производству биоугля в Миккели, который будет ежегодно выпускать 200 тыс. тонн биоугольных гранул и должен начать работу в 2017 г. или 2018 г [27].

## 8. Производство жидкого биотоплива

Производство жидкого биотоплива сосредоточено в небольшом числе крупных промышленных компаний с доминирующими долями на рынке. К таким компаниям относятся производители этанола Арчер Дэниелс Мидленд (ADM), ПОЭТ и Валеро в Соединенных Штатах, а также Copersucar, Oderbrecht (ETH Bioenergia) и Raizen в Бразилии. Ряд крупных компаний, которые традиционно занимаются ископаемыми видами топлива (например, Shell, Neste и Honeywell UOP), а также из биоиндустриальных отраслей (UPM из целлюлозно-бумажного сектора) начали разработку и производство новых видов топлива на основе биомассы [28].

Развиваются новые модели торговли этанолом, особенно с ростом спроса и производства в Китае. В 2015 г. Китай стал крупным импортером этанола из Соединенных Штатов; в 2016 г. экспорт увеличился в 2,4 раза. Китайское производство также увеличилось благодаря высоким запасам зерна. Недавно Китай ввел налог на импорт этанола для поддержки внутреннего производства, а с 2016 г. страна экспортировала этанол на некоторые азиатские рынки [29].





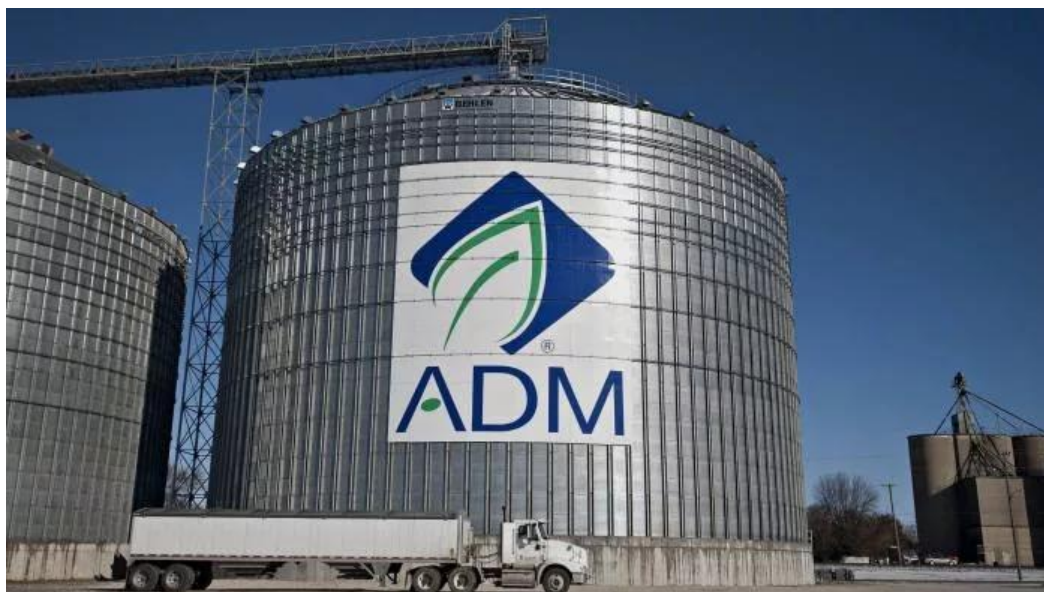


Рис. 4 – Один из цехов завода ADM по производству этанола

В 2016 г. были расширены усилия по производству и использованию передового биотоплива. Цели разработки и коммерциализации передового биотоплива заключаются в следующем: во-первых, обеспечить более экономичное использование энергии на протяжении всего жизненного цикла, чем некоторые виды биотоплива, полученные из сахара, крахмала и масел; во-вторых, добиться меньшего воздействия на землепользование (например, от отходов и остатков), а также снизить конкуренцию из-за продуктов питания или продуктивных сельскохозяйственных угодьев; и, наконец, добиться таких свойств, которые позволят новому биотопливу напрямую заменять ископаемые виды топлива в передовых транспортных системах, таких как авиационные двигатели, или смешиваться в больших пропорциях с обычными видами топлива [30]. В настоящее время разрабатывается ряд маршрутов для производства передовых видов биотоплива в форме этанола, бутанола, дизельного реактивного топлива, бензина, метанола и смешанных высших спиртов из массива сырья [31].

### 9. Заключение

Энергия, получаемая из биомассы, является достойным конкурентом традиционным видам топлива. Современные технологии получения сырья для биодизеля при помощи синтеза, а также повсеместность большинства энергетических культур, создают благоприятные условия для развития и использования данного вида энергии. Получение энергии из биомассы – связывающее звено между локальной энергетикой, охраной окружающей среды и агропромышленным производством. Органические отходы агропромышленного комплекса, городов и лесопереработки являются сырьевой базой для получения энергии, а также несут большой энергетический по-

тенциал и стимулируют развитие этой отрасли. По имеющимся данным, использование энергии биомассы является одной из самых перспективных отраслей энергетики. Так, страны ЕС вырабатывают более половины всей энергии, произведенной на основе биотоплива. Португалия, Испания, Франция, Германия, Дания, Италия достигли наибольших результатов в этой сфере. Суммарная мощность электростанций в США, использующих биомассу, составляет более 9 000 МВт, что эквивалентно суммарной мощности атомных электростанций. А для многих развивающихся стран Азии и Африки биотопливо на сегодняшний день является основным источником энергии.

### Список литературы

- [1] BP / Statistical Review of World Energy 2015 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> – (Дата обращения: 25.12.2017).
- [2] Биодизель будущего [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cleandex.ru/articles> – (Дата обращения: 24.11.2017 г.).
- [3] Renewables 2016 Global Status Report [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ren21.net> – (Дата обращения: 12.12.2017).
- [4] Барехов А.Г. Использование возобновляемого энергетического сырья и развитие биотопливных технологий // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2014. – Т. 2. – № 28. – 46–51.
- [5] Перспективы использования энергии из биомассы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://applied-research.ru/bioenergy> – (Дата обращения: 17.12.2017).



- [6] Christiansen R. Combustion of Bio-fuels for the Production of Heat and Power // Proc. of the Europ. Seminar BIOWATT, Milan, Italy.
- [7] Аблаев А. Биотопливо // Нефтегаз. вертикаль. – 2011. – № 22(273). – С. 16–20.
- [8] Whalen, J., Xu, C., Shen, F., Kumar, A., Eklund, M., Yan, J. Sustainable biofuel production from forestry, agricultural and waste biomass feedstocks // Appl. Energy. – 2017. – 198. – 281–283.
- [9] Биотопливо второго поколения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.bioethanol.ru/second\\_generation/#2](http://www.bioethanol.ru/second_generation/#2) – (Дата обращения: 25.12.2017).
- [10] ЕВА / European Biogas Association [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2016/01/Graph-1-Biogas-plants.png> – (Дата обращения: 23.12.2017).
- [11] IEA Statistics / Renewables Information, 2016 – P. II.3.
- [12] Анализ развития биоэнергетики в мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alternativenergy.ru/bioenergetika/349-razvitiye-bioenergetiki> – (Дата обращения: 29.11.2017).
- [13] Мировой опыт [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bioethanol.ru/bioethanol/world/> – (Дата обращения: 23.12.2017).
- [14] UNCTAD / The State of Biofuel Market: Regulatory, Trade and Development Perspectives, 2014. United Nations Publication. – P. 89.
- [15] Nikolaisen L., Nielsen C., Larsen M.G. Straw for Energy Production. Technology – Environment – Economy – Aarhus: EN-TRYK, 1992. – 48 с.
- [16] UNCTAD / The State of Biofuel Market: Regulatory, Trade and Development Perspectives, 2014. United Nations Publication. – P. 89.
- [17] Биоэнергетика в России в 21 веке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.infobio.ru/sites/default/files/bioenergy.pdf> – (Дата обращения: 25.12.2017)
- [18] Bridgwater A.V. The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification for Power Generation // Fuel. – 1995. – Vol. 74. – No. 5. – P. 631–653.
- [19] Исследование рынка биотоплива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://maxrise-consulting.com/issledovanie-rynka-biotopliva/> – (Дата обращения: 27.11.2017).
- [20] WBA Global Bioenergy Statistics 2015 – P. 18.
- [21] Алхасов А.Б. Возобновляемые источники энергии. – МЭИ. – 2011. – Т. 23(17). – 272 с.
- [22] Азиатский рынок древесных топливных гранул. Настоящее и будущее [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.wood.ru/ru/nlari01.html> – (Дата обращения: 21.12.2017).
- [23] Систер В.Г., Иванникова Е.М., Гехман А.Е. Возможность получения биодизеля в сверхкритических условиях. Международный научный журнал «Альтернативная энергия и экология» (ISJAE). – 2011. – № 11. – С. 46–48.
- [24] Видные деятели бизнеса и науки США о биотопливе // Нефтегазовые технологии. – 2007. – Т. 6. – № 8. С. 64–70.
- [25] Васильев Р.Г. Перспективы развития производства биотоплива в мире // Экологический вестник России. – 2009. – Т. 5. – № 7. С. 34–36
- [26] Биоэнергетика в России в 21 веке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.infobio.ru/sites/default/files/bioenergy.pdf> – (Дата обращения: 25.12.2017)
- [27] Doorn J. van, Bruyn P., Vermeij P. Combined, Combustion of Biomass, Municipal Sewage Sludge and Coal in an Atmospheric Fluidised Bed Installation // Proc. of the 9th Europ. Bioenergy Conf., Copenhagen, Denmark, 24–27 June, 1996. – Pergamon, 1996. – Vol. 2(11). – P. 1007–1012.
- [28] Булаткин Г. Биотопливо второго поколения // Энергополис. – 2010. – Т. 9. – № 37. – С. 44–45.
- [29] Благутина В.В. Еще одна надежда человечества // Химия и жизнь – XXI век. – 2012. – Т. 2. – № 22. – 28–31.
- [30] Obernberger I. Decentralized Biomass Combustion. State of the Art and Future Development // Biomass and Bioenergy. – 2016. – Vol. 14. – No. 1. – P. 10–76.
- [31] IEA Statistics / Energy Statistics of Non-OECD Countries, 2016 – P. II.121.