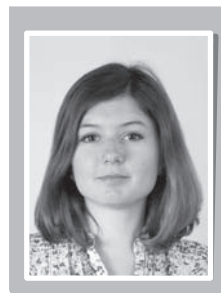




Георгий Гелетука,
председатель правления
Биоэнергетической
ассоциации Украины



Татьяна Железная,
член экспертного совета
Биоэнергетической
ассоциации Украины



Ольга Дроздова,
эксперт
Биоэнергетической
ассоциации Украины

Энергетический и экологический

анализ технологий производства энергии из биомассы

(Окончание. Начало в № 7/2014)

ПРОИЗВОДСТВО БИОЭТАНОЛА И БИОДИЗЕЛЯ

Обычно много споров вызывает вопрос целесообразности производства биотоплив первого поколения, в частности биоэтанола. Существует мнение, что затраты энергии на производство биоэтанола превышают энергетическое содержание полученного биотоплива. Рассмотрим несколько весомых исследований, посвященных этому вопросу.

В работе Дж. Малка (J. Malca) и Ф. Фрейре (F. Freire) «Энергетический анализ жизненного цикла для биоэтанола: методы распределения и последствия для энергоэффективности и возобновляемости» оценено энергетическую эффективность различных технологий производства биоэтанола (для условий Франции). Проанализировано



три случая: I — производство биоэтанола из сахарной свеклы с побочным продуктом — бардой, II — производство биоэтанола из сахарной свеклы с сахаром как «побочным» продуктом, III — производство биоэтанола из зерна пшеницы с побочным продуктом — сухой дробинкой с растворимыми веществами. Для каждого случая были рассмотрены несколько вариантов распределения затраченной энергии (т. е. энергии «на входе») между основным и побочными продуктами производства: по их массе, по содержанию энергии, по рыночной стоимости, по энергии, необходимой для производства заменителя побочного продукта (энергия «замещения»). На сегодня не существует единого мнения специалистов относительно того, какой метод распределения энергозатрат является наилучшим. Но чаще всего применяют метод распределения по массе конечных продуктов.

Результаты расчета показывают, что коэффициент выхода энергии EYC_{NR} существенно отличается для различных технологий получения биоэтанола и зависит также от способа распределения «входящих» энергозатрат по конечным продуктам (Таблица 4).

Табл. 4

Энергетическая эффективность технологий производства биоэтанола

Метод распределения энергозатрат по конечным продуктам	Биоэтанол из сахарной свеклы**			Биоэтанол из пшеницы
	Вариант I	Вариант 50 % I / 50 % II	Вариант II	Вариант III
	EYC_{NR}	EYC_{NR}	EYC_{NR}	EYC_{NR}
Без распределения — все отнесено на биоэтанол	1,42	0,54	0,33	0,83
По массе*	1,59	1,28	1,02	2,23
По содержанию энергии	1,51	1,13	0,89	1,52
По рыночной стоимости	1,47	1,22	0,98	1,77
По энергии, необходимой для производства заменителя побочного продукта	1,48	1,12	0,88	0,96

* Наиболее распространённый вариант распределения.

** Варианты производства биоэтанола: I — из сахарной свеклы с бардой как побочным продуктом, II — из сахарной свеклы с сахаром как побочным продуктом, III — из зерна пшеницы с сухой дробинкой с растворимыми веществами как побочным продуктом.

При производстве биотоплива из сахарной свеклы для всех рассмотренных вариантов $EYC_{NR} < 2$, а при методах распределения энергозатрат не по массе конечных продуктов — даже < 1 . Это свидетельствует об очень низкой энергетической эффективности получения биоэтанола или вообще об ее отсутствии. Единственный положительный результат дает вариант производства биотоплива из пшеницы с распределением «входящих» энергозатрат по массе конечных продуктов — биоэтанола и сухой дробины. В этом случае коэффициент выхода энергии $EYC_{NR} > 2$, что удовлетворяет минимальным требованиям по энергетической эффективности биоэнергетических технологий.

Представляет значительный интерес исследование В. Д. Белододе и П. В. Тарасенко «Некоторые расчеты относительно энергетической эффективности биотоплив», в котором проведен детальный анализ полной энергоемкости производства биоэтанола и биодизеля по существующим технологиям для условий Украины. Рассмотрены варианты получения биоэтанола из озимой пшеницы, ярового ячменя и сахарной свеклы. Результаты оценки показывают, что при использовании технологии вакуумной ректификации, энергозатраты на производство биоэтанола из всех рассмотренных видов сырья практически равны энергосодержанию полученного биотоплива ($EYC_{NR} \approx 1$) (Таблица 5). При использовании же технологии атмосферной ректификации затраты энергии на производство биоэтанола превышают его энергосодержание ($EYC_{NR} < 1$).

В работе также приведены данные о том, что в США полные энергетические затраты на производство биоэтанола составляют от 18 МДж/л до 38,2 МДж/л. С учетом этих показателей коэффициент выхода энергии EYC_{NR} составляет 0,59–1,25, то есть является недопустимо низким.

Авторы делают вывод, что данное направление получения биотоплива нельзя считать энергетически целесообразным. Оно может иметь только локальное значение в случае, когда сырье для производства биоэтанола является отходом, подлежащим утилизации или уничтожению. Или другими словами, когда затраты энергии на транспортировку и подготовку сырья незначительны и не превышают 4–5 МДж/л.



Табл. 5

Энергетические показатели технологий производства биоэтанола

Сырье	Полные энергозатраты*, МДж/л		Коэффициент выхода энергии EYCN ^{NR} **	
	Атмосферная ректификация	Вакуумная ректификация	Атмосферная ректификация	Вакуумная ректификация
	CED 1	CED 2	$Q_{BE} / CED 1$	$Q_{BE} / CED 2$
Озимая пшеница	28,58	22,88	0,8	1,0
Ярый ячмень	25,58	19,88	0,9	1,1
Кукуруза	27,39	21,69	0,8	1,0
Сахарная свекла	29,7	24,3	0,8	0,9

* Учтены все технологические (физические) затраты. Не учтены энергозатраты, связанные с работой людей, амортизацией оборудования и т. п.

**Здесь и далее EYCN^{NR} рассчитан авторами по данным работы. Теплотворная способность биоэтанола QBE = 22,5 МДж/л.

Относительно биодизельного топлива в исследовании рассматривается случай его производства из рапсового масла путем переэтерификации масла метиловым спиртом. Оценено, что полная энергоемкость производства биотоплива составляет 23,5–29,3 МДж/кг. Исходя из энергетической емкости биодизеля 40 МДж/кг, эти показатели соответствуют коэффициенту выхода энергии $EYCN_{NR} = 1,36–1,70$, что значительно ниже минимальных значений, рекомендованных в рекомендациях, разработанных в рамках выполнения Задания 32 Международного энергетического агентства ($EYCN_{NR} > 2$). Авторы отмечают, что с учетом энергетического эквивалента факторов, вызванных физическим трудом людей, амортизацией оборудования и сооружений, финансовыми и другими затратами, полная энергоемкость производства биодизеля из рапсового масла составит →

**ОТРИМУЙТЕ
ПРОФЕСІЙНІ НОВИНИ
ЩЕ ОПЕРАТИВНІШЕ!**

Актуальна, вивірена
робоча інформація в розсилці
на електронну пошту!

Реєструйтеся — www.OPPB.com.ua



хочу дізнаватися про
новини першим

- 40–50 МДж/кг ($EUC_{NR} = 0,8–1,0$). Это означает, что производство биодизеля также является нецелесообразным с энергетической точки зрения.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Снижение выбросов парниковых газов является одним из наиболее весомых показателей при оценке влияния биоэнергетических технологий на окружающую среду. И хотя биомасса считается CO_2 -нейтральным топливом, при операциях ее заготовки, складирования, транспортировки, предварительной обработки и использования происходит потребление энергии ископаемого топлива, что в свою очередь приводит к выбросам парниковых газов. Основными парниковыми газами, выбросы которых имеют место при работе энергетических систем являются диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O). Величина выбросов всех парниковых газов приводится к эквивалентному показателю выбросов CO_2 через соответствующие коэффициенты.

Ниже рассмотрим величину сокращения выбросов парниковых газов для различных биоэнергетических технологий по сравнению с установками на ископаемых топливах и соответствует ли она требованиям Директивы 2009/28/ЕС. Напомним, что согласно этой Директиве снижение выбросов парниковых газов при внедрении технологий возобновляемой энергетики должно быть не менее 35 % по сравнению с аналогичным использованием ископаемых топлив.

С 1 января 2017 г. минимальное требование увеличивается до 50 %, а с 1 января 2018 г. — до 60 % для установок, введенных в эксплуатацию с 1 января 2017 г.

В Таблице 6 представлены результаты исследования Нила Бёрда (Neil Bird), Аннет Коуи (Annette Cowie), Франческо Керубини (Francesco Cherubini) и Герфрида Юнгмайера (Gerfried Jungmeier) «Использование метода оценки жизненного цикла для оценки чистых выбросов парниковых газов биоэнергетики», проведенного в рамках Задачи 38 Международного энергетического агентства, собственные результаты авторов и данные по типичным выбросам парниковых газов при производстве биотоплив согласно Директиве 2009/28/ЕС.



Табл. 6

Удельные выбросы парниковых газов для различных технологий производства энергии из биомассы

Виды технологий	Удельные выбросы ПГ	Сокращение выбросов ПГ	
Производство тепловой энергии	г CO _{2-экв} /кВт·ч _т	г CO _{2-экв} /кВт·ч _т	%
Котел на отходах древесины (150 кВт _т) [16]	52	327	86 % ¹⁾
Котел на мискантусе (70 кВт _т) [16]	101	295	75 % ¹⁾
Котел на древесной щепе (500 кВт _т) ⁴⁾	39	185	83 %
Котел на древесной щепе из энергетической вербы (300 кВт _т) ⁴⁾	39	185	83 %
Котел на тюках соломы (500 кВт _т) ⁴⁾	14	211	94 %
Котел на гранулах из древесины (100 кВт _т) ⁴⁾	33	194	85 %
Котел на гранулах из соломы (100 кВт _т) ⁴⁾	60	165	72 %
Производство электроэнергии	г CO _{2-экв} /кВт·ч _э	г CO _{2-экв} /кВт·ч _э	
ТЭС на древесной щепе (2 МВт _э) ⁴⁾	213	909	81 %
ТЭС на тюках соломы (2 МВт _э) ⁴⁾	217	905	80 %
ТЭС на тюках соломы (25 МВт _э) [19] ⁹⁾	178 ¹⁰⁾	нет данных	65 %
ТЭС на отходах древесины (30 МВт _э) [16]	71	950	93 % ²⁾
ТЭС 500 МВт _э : совместное сжигание отходов древесины с углем [16]	128	881	87 % ²⁾
Совместное производство тепловой и электрической энергии	г CO _{2-экв} /кВт·ч _{об.}	г CO _{2-экв} /кВт·ч _{об.}	
БГУ с совместным сбраживанием навоза и силоса кукурузы (годовое производство э/э 4 ГВт·ч, тепловой энергии 7,2 ГВт·ч) [16]	266	207	56 % ³⁾
ТЭЦ на древесной щепе (2 МВт _э + 10 МВт _т) ⁴⁾	35	152	81 %
ТЭЦ на тюках соломы (2 МВт _э + 10 МВт _т) ⁴⁾	37	150	80 %
Моторные биотоплива [1] ⁵⁾	г CO _{2-экв} /МДж		
Биогаз из навоза ⁸⁾	12-13		84–86 %
Биогаз с полигонов ТБО ⁸⁾	17		80 %
Биотоплива I поколения			
Биоэтанол из сахарной свеклы	33		61 %
Биоэтанол из пшеницы	57		32 %
Биоэтанол из кукурузы	37		56 %
Биодизель из рапса	46		45 %
Биодизель из рапса [16]	111 г CO _{2-экв} /км	80 г CO _{2-экв} /км	58 % ⁶⁾
	157 г CO _{2-экв} /км	34 г CO _{2-экв} /км	18 % ⁷⁾



Биодизель из подсолнечника	35		58 %
Биодизель из сои	50		40 %
Биотоплива II поколения			
Биоэтанол из соломы пшеницы	11		87 %
Биоэтанол из древесных отходов	17		80 %
Биодизель ФТ	4–6		93–95 %

1) По сравнению с мазутным котлом

2) По сравнению с угольной электростанцией

3) По сравнению с газовой ТЭЦ

4) Результаты авторов аналитической записки для условий Украины (расстояние транспортировки биомассы — 50 км). Сравнение с вариантом сжигания природного газа

5) Типичные значения согласно Приложению 5 Директивы 2009/28/ЕС

6) Побочный продукт глицерин используется в качестве материала в пищевой или фармацевтической промышленности

7) Побочный продукт глицерин используется как топливо

8) В виде сжатого метана

9) Данные для случая урожайности зерновых культур порядка 7 сух. т/га. Сравнение с вариантом сжигания природного газа

10) Пересчет авторов аналитической записки по данным соответствующей работы

Из данных таблицы видно, что все установки на твердой биомассе и большинство установок на биогазе соответствуют текущим и будущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС — сокращение выбросов парниковых газов, обусловленное их работой, составляет > 60 %.

Что касается жидких моторных биотоплив, то большинство показателей биодизеля и биоэтанола первого поколения соответствуют текущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС, некоторые соответствуют требованию, которое вступит в силу с 2017 года (мин. 50 %), и практически все показатели выходят за пределы требования, которое будет применяться с 2018 года (мин. 60 %). Для биотоплив второго поколения результаты намного лучше — сокращение эмиссии парниковых газов составляет 80–95 %. Хорошие показатели имеет также биогаз как моторное топливо — более 80 %.

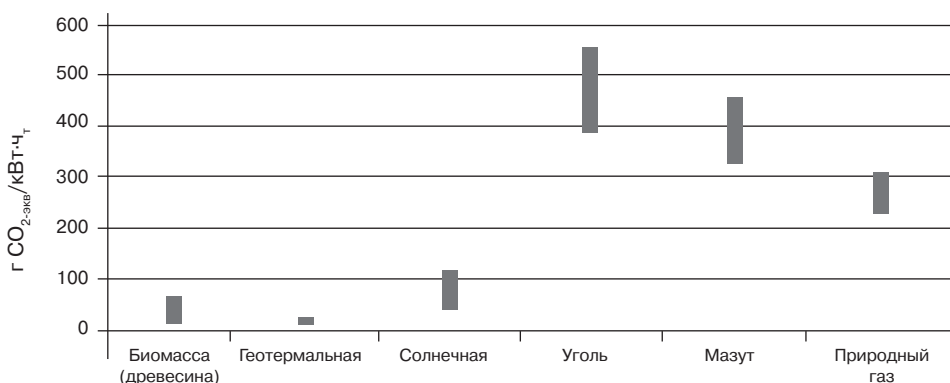
Эти результаты хорошо согласуются с данными других авторов, собранными и представленными в исследовании «Использование метода оценки жизненного цикла для оценки чистых выбросов парниковых газов биоэнергетики» (Рис. 5–8). При производстве энергии из биомассы сни-



жение выбросов парниковых газов составляет 70–90 % по сравнению с энергоустановками на ископаемых топливах. При применении моторных биотоплив первого поколения сокращение эмиссии ПГ незначительное. Наилучшие показатели имеют биоэтанол и биодизель второго поколения — для них уменьшение выбросов ПГ может достигать более 90 %. Достаточно хороший показатель соответствует также случаю применения биогаза в качестве моторного топлива — в среднем около 65 %.

Рис. 5

Удельные выбросы парниковых газов при производстве тепловой энергии



* 5–15 % по энергии

Рис. 6

Удельные выбросы парниковых газов при производстве электроэнергии

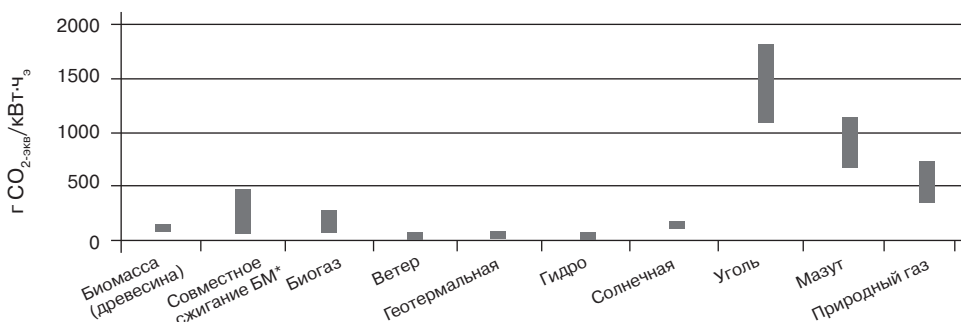




Рис. 7

Удельные выбросы парниковых газов при комбинированном производстве тепловой и электрической энергии

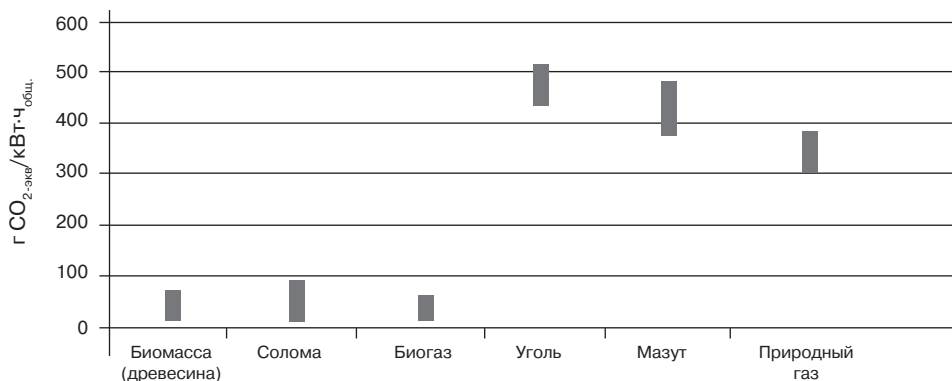
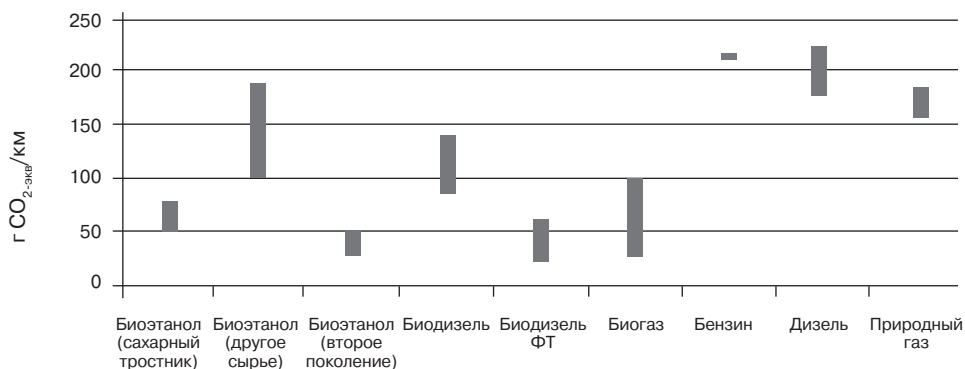


Рис. 8

Удельные выбросы парниковых газов при производстве моторных топлив



**ВЛИЯНИЕ РАССТОЯНИЯ
ТРАНСПОРТИРОВКИ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ
БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Как было отмечено ранее, одним из параметров, существенно влияющих на энергетическую эффективность внед-



рения биоэнергетических технологий, является расстояние транспортировки биомассы к месту ее обработки, конечного потребления и т. п. Обычно считается, что биомассу (кроме биомассы в виде гранул/брикетов) целесообразно перевозить на расстояние до 50–100 км (здесь и далее речь идет об автотранспорте), однако конкретные литературные данные по этому вопросу являются очень ограниченными.

Согласно данным рекомендаций, разработанных в рамках выполнения Задания 32 Международного энергетического агентства, для сохранения энергетической эффективности биоэнергетической установки на минимально необходимом уровне ($EYC_{NR} > 2$) древесную щепу можно перевозить на расстояние до 200–300 км, а древесные гранулы практически не имеют ограничения по расстоянию транспортировки. Если же энергоустановка на гранулах должна соответствовать критерию высокой энергетической эффективности ($EYC_{NR} > 5$), то расстояние перевозки ограничивается радиусом порядка 1200 км.

Для получения более детальной информации мы исследовали влияние расстояния транспортировки биомассы/биотоплива на коэффициент выхода энергии EYC_{NR} для условий Украины. Результаты расчетов для типичных установок показали, что тюкованную солому, древесную щепу и гранулы из биомассы можно перевозить на расстояние до 300 км с сохранением достаточно высокого коэффициента выхода энергии ($EYC_{NR} > 2$) (Рис. 9).

Предельные значения расстояния перевозки, соответствующие $EYC_{NR} = 1$, $EYC_{NR} = 2$ и $EYC_{NR} = 5$, представлены в Таблице 7. Если коэффициент выхода энергии равен 1, это означает, что расходы (невозобновляемой) энергии, необходимые для создания и обеспечения работы биоэнергетической установки, эквивалентны энергии, полученной «на выходе». $EYC_{NR} = 2$ соответствует минимально допустимой энергетической эффективности работы установки, а $EYC_{NR} = 5$ и больше соответствует наиболее рекомендуемым значениям (по данным рекомендаций, разработанных в рамках выполнения Задания 32 Международного энергетического агентства).

В таблице представлены только несколько наиболее типичных примеров, однако они наглядно отражают общую картину. Для варианта работы биоэнергетической установки

Зависимость коэффициента выхода энергии от расстояния транспортировки биотоплива

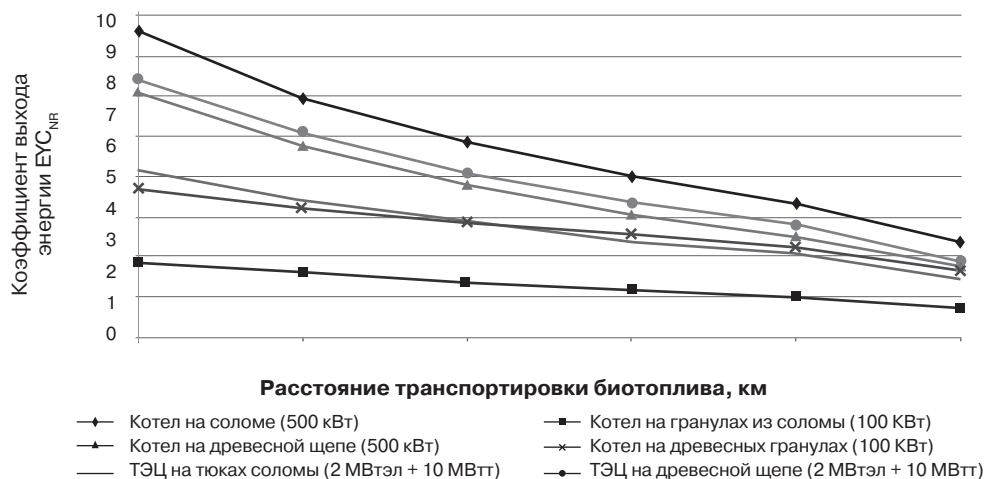


Табл. 7

Максимально целесообразное расстояние транспортировки биотоплива автотранспортом

Тип энергетической установки	Предельное расстояние транспортировки, км		
	$EYC_{NR}=1$ энергия «на входе» равна энергии «на выходе»	$EYC_{NR}=2$ минимально допустимое значение	$EYC_{NR}=5$ рекомендуемое значение
Котел на древесной щепе (500 кВт)	1800	800	170
Котел на древесной щепе из энергетической вербы (300 кВт)	2100	900	120
Котел на гранулах из древесины (100 кВт)	2800	1100	80
ТЭЦ на древесной щепе (2 МВт _{эл} +10 МВт _т)	1900	850	170
ТЭС на древесной щепе (2 МВт _э)	250	0	—*
Котел на соломе (500 кВт)	1800	800	200
Котел на гранулах из соломы (100 кВт)	1800	500	—*
ТЭЦ на тюках соломы (2 МВт _э +10 МВт _т)	1500	800	80
ТЭС на тюках соломы (2 МВт _э)	150	—**	—*

* Даже при нулевом расстоянии перевозки биотоплива $EYC_{NR} < 5$.

** Даже при нулевом расстоянии перевозки биотоплива $EYC_{NR} < 2$.



(кроме ТЭС) на уровне энергоэффективности не ниже минимально рекомендованного ($EYC_{NR} > 2$) расстояние перевозки биотоплива может быть довольно большим — 500–1000 км в зависимости от вида биотоплива и типа установки. Если же необходимо обеспечить более высокий уровень энергоэффективности ($EYC_{NR} > 5$), то расстояние транспортировки следует ограничить до 100–200 км, а в некоторых случаях — и до минимального значения.

Следует отметить, что сделанные выводы носят общий характер, а в каждом конкретном случае необходимо выполнять детальные расчеты с тщательным учетом местных особенностей.

ВЫВОДЫ

Внедрение технологий производства энергии из биомассы предлагает широкие возможности для замещения ископаемых топлив.

Определение целесообразности и приоритетности внедрения определенных технологий в конкретных условиях может основываться на результатах расчета энергетического баланса и баланса парниковых газов — основных элементов оценки жизненного цикла технологий.

Анализ литературных данных и собственных результатов свидетельствует о высокой энергетической эффективности технологий производства тепловой энергии из твердой биомассы. Для всех рассмотренных котельных установок коэффициент выхода энергии $EYC_{NR} > 2$ (т. е. больше минимально допустимого значения), а большинство из них имеет $EYC_{NR} > 5$, что соответствует наиболее рекомендуемому диапазону. ТЭС на твердой биомассе также имеют высокие энергетические показатели — для всех рассмотренных случаев $EYC_{NR} > 5$.

Производство отдельно электроэнергии из твердой биомассы имеет заметно более низкую энергетическую эффективность по сравнению с комбинированным производством тепловой и электрической энергии. Для большинства рассмотренных ТЭС величина коэффициента выхода энергии составляет менее или около 2 в зависимости от вида биомассы и других условий.

Энергетическая эффективность работы биогазовых установок зависит от вида сырья, применяемой технологии и других условий.

Согласно литературным данным, для БГУ коэффициент выхода энергии может колебаться от 1,8 до > 6.

Ситуация с производством моторных биотоплив (биодизеля и биоэтанола) неоднозначная. По большинству имеющихся данных коэффициент выхода энергии для них существенно ниже 2, тогда как некоторые авторы показывают $EYC_{NR} > 2$. Представляется, что положительного с энергетической точки зрения результата можно достичь лишь в отдельных случаях при определенных условиях, например, при использовании сырья в виде отходов, подлежащих утилизации.

По вопросу экологической эффективности биоэнергетических технологий можно отметить, что все установки на твердой биомассе и большинство установок на биогазе соответствуют текущим и будущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС — сокращение выбросов парниковых газов, обусловленное их работой, составляет > 60 %.

Что касается жидких моторных биотоплив, то большинство показателей биодизеля и биоэтанола первого поколения соответствуют текущим требованиям Директивы 2009/28/ЕС, некоторые соответствуют требованию, которое вступит в силу с 2017 года (мин. 50 %), и практически все показатели выходят за пределы требований, которые будут применяться с 2018 года (мин. 60 %). Для биотоплива второго поколения результаты намного лучше — сокращение эмиссии парниковых газов составляет 80–95 %. Хорошие показатели имеет также биогаз как моторное топливо — более 80 %. 🌱