



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

Членство Украины в Энергетическом сообществе (с 2011 г.) требует обязательного выполнения ряда европейских директив. По мере постепенного подписания разделов Соглашения об ассоциации с ЕС объем обязательств Украины, в том числе в энергетическом секторе, будет продолжаться расти.

Одним из главных документов ЕС в секторе возобновляемых источников энергии является Директива 2009/28/ЕС о стимулировании использования энергии, произведенной из возобновляемых источников, которой вносятся изменения, а в дальнейшем упраздняются Директивы 2001/77/ЕС и 2003/30/ЕС, которую Украина согласно своим обязательствам в рамках Энергетического сообщества должна была имплементировать до 1 января 2014 г. (распоряжение КМУ «Об утверждении плана мероприятий по вы-



полнению в 2013 году Общегосударственной программы адаптации законодательства Украины к законодательству Европейского Союза» от 25 марта 2013 г. № 157-р). Важным положением этой Директивы является требование по уровню снижения выбросов парниковых газов при внедрении биоэнергетических технологий — не менее 35 % по сравнению с аналогичным использованием ископаемых топлив. При этом с 1 января 2017 г. это минимальное требование увеличивается до 50 %, а с 1 января 2018 г. — до 60 % для установок, введенных в эксплуатацию с 1 января 2017 г.

Другим важным аспектом возможности и целесообразности внедрения технологий производства энергии из биомассы является их энергетическая эффективность, определяемая путем сопоставления объема полученной энергии с энергией, затраченной на создание и обеспечение работы определенной биоэнергетической установки. На сегодня в ЕС и вообще в мире нет каких-либо обязательных для выполнения требований по энергетической эффективности биоэнергетических технологий, но определенные рекомендации были разработаны в рамках выполнения Задания 32 Международного энергетического агентства. Считаем эти рекомендации целесообразными для практического применения как в Европе, так и в Украине.

Важность показателя энергетической эффективности заключается в том, что он дает объективную оценку определенной биоэнергетической технологии. Эта оценка не зависит от текущей политики государства в отношении данной технологии, которая может быть направлена на стимулирование или сдерживание развития через, например, «зеленые» тарифы, субсидии, налоговые льготы и другие механизмы.

Зарубежными специалистами для оценки энергоэффективности технологий возобновляемой энергетики и сравнения их между собой предложен коэффициент выхода энергии — EYC_{NR} . Этот коэффициент представляет собой отношение величины совокупного производства энергии определенной установкой (т. е. энергии «на выходе») к полным затратам первичной невозобновляемой энергии, необходимой для создания энергоустановки, обеспечения ее работы в течение всего времени существования и утилизации установки после завершения срока ее эксплуатации (невозобновляемая энергия «на входе»).

Важность показателя энергетической эффективности заключается в том, что он дает объективную оценку определенной биоэнергетической технологии. Эта оценка не зависит от текущей политики государства в отношении данной технологии, которая может быть направлена на стимулирование или сдерживание развития

**Энергетическая
эффективность ра-
боты биогазовых
установок суще-
ственно зависит
от вида сырья и
других условий.
Этот вопрос требу-
ет дополнительных
исследований**

Особенностью показателя EYC_{NR} является то, что «на входе» учитываются расходы только невозобновляемой энергии, а возобновляемый источник, например биомасса, как энергоноситель в общую сумму не входит. Очевидно, что при таком подходе EYC_{NR} для энергоустановок на ВИЭ должен быть > 1 , а для установок на ископаемых топливах всегда будет < 1 . Согласно рекомендациям этих ученых, для обеспечения высокой энергетической эффективности коэффициент выхода энергии EYC_{NR} для энергоустановок на ВИЭ должен составлять как минимум > 2 , а наиболее рекомендуемое значение — более 5.

Следует отметить, что кроме коэффициента выхода энергии EYC_{NR} в литературе можно найти и другие показатели энергоэффективности технологий. По сути, все они также оперируют понятиями «энергия на выходе» и «энергия на входе» и отличаются от EYC_{NR} только способами сопоставления этих величин.

Определение энергетической эффективности процессов и расчет выбросов парниковых газов является составной частью т. н. оценки жизненного цикла технологий. ОЖЦ — это комплексный анализ воздействия на окружающую среду от внедрения и использования определенной технологии. Надо отметить, что полная оценка жизненного цикла включает определение достаточно широкого спектра параметров, но наиболее значимыми являются энергетический баланс и баланс парниковых газов.

Такой подход хорошо согласуется с результатами исследования, проведенного Франческо Керубини (Francesco Cherubini) и Андерсом Хаммером Стромманом (Anders Hammer Stromman), в котором было детально проанализировано почти 100 работ по ОЖЦ биоэнергетических технологий, выполненных в течение последних 15 лет для условий различных частей мира, в том числе для Европы. В работах изучались технологии производства тепловой и электрической энергии и биотоплива из различных видов биомассы. Большинство работ посвящено технологиям получения биоэтанола и биодизеля (Рис. 1). В исследовании показано, что половина всех рассмотренных работ включает только оценку энергетического баланса и/или баланса парниковых газов, а другая половина содержит полный анализ жизненного цикла биоэнергетических технологий (Рис. 2).

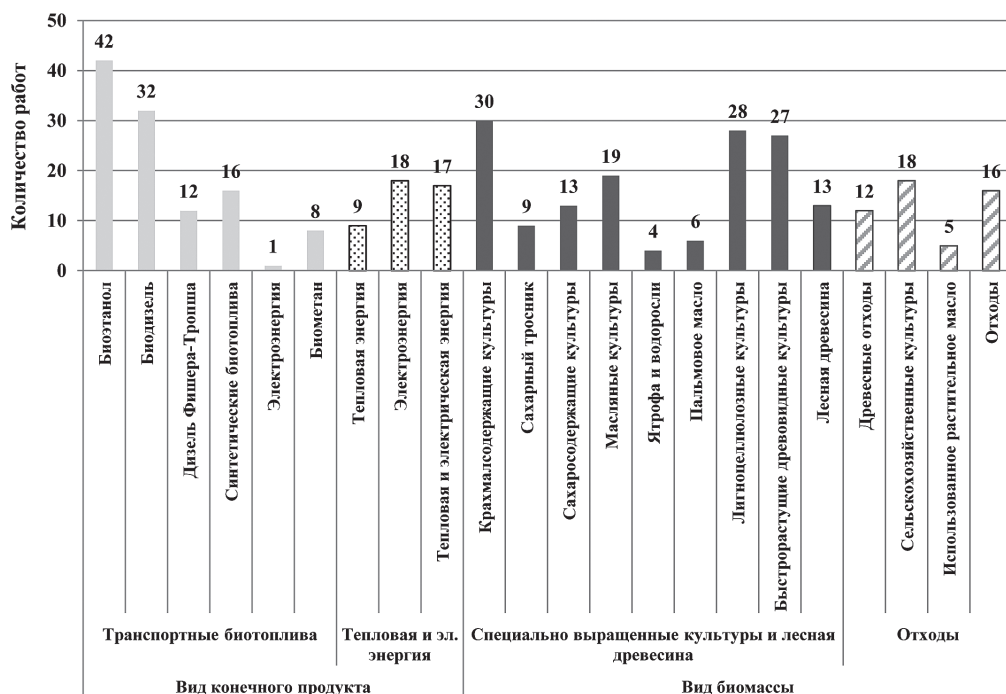


ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

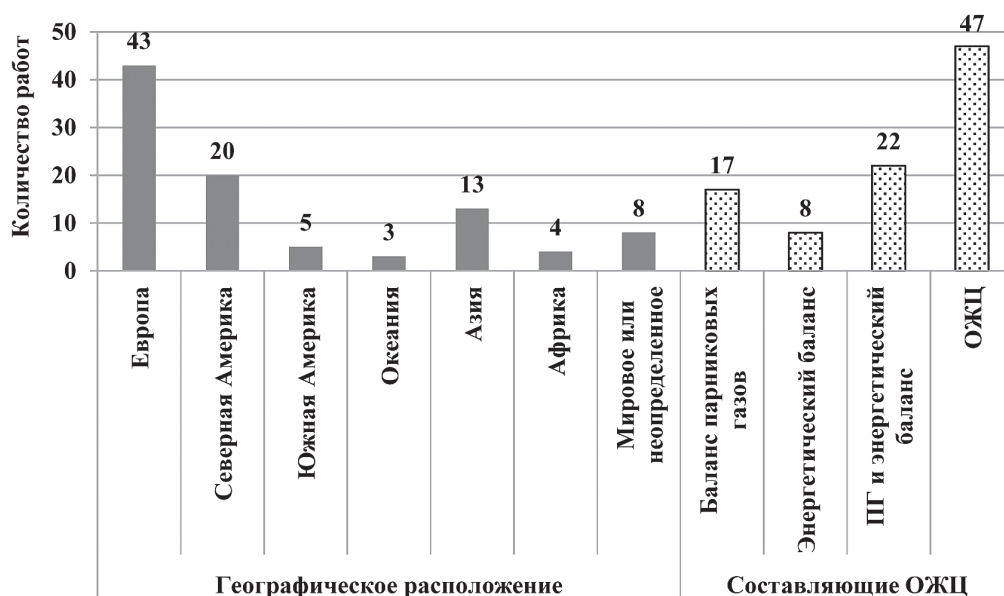
В этом разделе собраны результаты доступных исследований, в том числе выполненные нами для условий Украины, в которых был проведен энергетический анализ технологий производства энергии или биотоплива из биомассы с использованием коэффициента выхода энергии — EYC_{NR} (Таблица 1). Для информации в таблице также приведены величины EYC_{NR} для некоторых установок с использованием ископаемых топлив. Следует отметить, что сравнение результатов различных авторов можно провести только на принципиальном уровне, поскольку для зарубежных данных часто отсутствуют детали выполненных расчетов (мощность и КПД установок, расстояние перевозки биомассы и др.).

Рис. 1

Распределение работ по ОЖЦ по видам биомассы и конечного продукта



Распределение работ по ОЖЦ по географическому расположению и содержанию



Из приведенных данных видно, что все энергетические установки на твердой биомассе (древесине, соломе), предназначенные для производства тепловой энергии и комбинированного производства тепловой и электрической энергии, имеют коэффициент выхода энергии $E_{YC_{NR}} > 2$ (т. е. больше минимально необходимого значения), а некоторые из них и > 5 , что соответствует наиболее рекомендуемому диапазону. Конкретное значение $E_{YC_{NR}}$ зависит от сочетания многих факторов (вид биомассы/биотоплива, мощность и КПД энергоустановки, расстояние и способ транспортировки биомассы и др.). ТЭС на биомассе имеют более низкие показатели — $E_{YC_{NR}} < 5$ или даже < 2 в зависимости от вида биомассы и других условий. Это означает, что производство только электроэнергии из биомассы является менее энергоэффективным, чем производство тепловой энергии или комбинированное производство тепловой и электрической энергии.


Табл. 1
Коэффициент выхода энергии для различных энергоустановок¹

Вид энергоустановки	ЕУС_{NR}
Установки на древесной биомассе	
Котел на дровах	4,2–12,1
Котел на древесных отходах (150 кВт)	8,3
Котел на древесной щепе	4,8–12,1
Котел на древесной щепе (500 кВт) (Украина) ²	6,8
Котел на щепе из энергетической вербы (300 кВт) (Украина) ²	6,1
Котел на древесных гранулах (100 кВт) (Украина) ²	2,4
Небольшая система ЦТ на древесине	4,0
Крупная система ЦТ на древесине	4,2
Крупная система ЦТ на древесине с пиковым котлом на мазуте	2,2
Котел на древесных гранулах с дополнительным солнечным коллектором	3,3
Система ЦТ на биомассе с дополнительным солнечным коллектором	4,0
ТЭЦ на древесной щепе (2 МВт _э + 10 МВт _т) (Украина) ²	7,1
ТЭС на древесной щепе (2 МВт _э) (Украина) ²	1,7
ТЭС на отходах древесины (30 МВт _э)	4
ТЭС (500 МВт _э): совместное сжигание древесных отходов (5 % мас.) и угля	2,2
Установки на соломе (Украина)²	
Котел на тюках соломы (500 кВт)	8,0
Котел на гранулах из соломы (100 кВт)	3,6
Крупная система ЦТ на соломе с пиковым котлом на мазуте (Европа)	1,8
ТЭЦ на тюках соломы (2 МВт _э + 10 МВт _т)	5,4
ТЭС на тюках соломы (2 МВт _э)	1,3
ТЭС на тюках соломы (25 МВт _э) (Испания)	2,1⁴
Биогазовые установки	
Биогаз из куриного помета	1,8–1,9
Биогаз из навоза	2,6–3,0³
Биогаз из энергетических культур	2,4³
Биогаз из силоса кукурузы	1,8–2,2
Биогаз из жировых осадков	6,2³
Установки по производству моторных биотоплив	
Биодизель ⁶ (РМЭ) и побочные продукты	2,4
Биодизель (РМЭ) и побочные продукты	2,6

Вид энергоустановки	EYC_{NR}
Биодизель (РМЭ)	1,5–4,0
Биодизель (РМЭ)	1,9
Биодизель (РМЭ)(Украина)	1,36–1,7³
Биодизель из сои (США)	3,21
Биоэтанол из сахарной свеклы	2,1
Биоэтанол из сахарной свеклы	1,0–1,59^{3,5}
Биоэтанол из пшеницы	2,23^{3,5}
Биоэтанол из пшеницы	1,93^{3,5}
Биоэтанол (ЭТБЭ) из пшеницы, сахарной свеклы	0,9–1,05^{3,5}
Биоэтанол из пшеницы, ячменя, кукурузы, сахарной свеклы (Украина)	0,8–1,1³
Биоэтанол из кукурузы (США)	0,59–1,25³
Другие установки на ВИЭ	
Солнечная система отопления	4,0
Установки с использованием ископаемых топлив	
Конденсационный котел на легком дистиллятном топливе	0,7–0,76
Котел на легком дистиллятном топливе	0,67–0,72
Система отопления на легком дистиллятном топливе	0,66
Конденсационный газовый котел	0,74–0,81
Газовый котел	0,7–0,74
Газовый котел с дополнительным солнечным коллектором	0,85
Крупная система ЦТ на природном газе и геотермальной энергии	1,18
Котел на мазуте с дополнительным солнечным коллектором	0,75
Тепловой насос с горизонтальным коллектором в почве	1,04
Тепловой насос с вертикальным коллектором в почве	0,99

¹ Для условий Европы, если не указано иное.

² Результаты авторов Аналитической записки (расстояние транспортировки биомассы 50 км).

³ Пересчет авторов Аналитической записки по данным соответствующей работы.

⁴ Для случая урожайности зерновых культур порядка 7 сух.т/га. При более низкой урожайности $EYC_{NR} < 2$.

⁵ Метод распределения энергозатрат — по массе конечных продуктов.

⁶ Здесь и далее в таблице — биодизель из рапса, если не указано иное.

Ситуация с производством биодизеля и биоэтанола неоднозначна. По одним данным коэффициент выхода энергии для них больше 2, по другим — существенно ниже. По-видимому, результат зависит от исходного сырья, приме-



няемой технологии и других условий. Этот вопрос будет подробнее рассмотрен ниже.

Энергетическая эффективность работы биогазовых установок существенно зависит от вида сырья и других условий. Этот вопрос требует дополнительных исследований и может быть предметом одной из следующих публикаций.

Все энергоустановки с использованием ископаемых топлив имеют коэффициент выхода энергии < 1 (как и должно быть), кроме случая комбинированного использования ВИЭ.

ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ БИОМАССЫ

Как было показано выше, все котельные установки, предназначенные для производства тепловой энергии из биомассы, имеют высокую энергетическую эффективность. Поэтому представляет интерес сравнение прямого сжигания биомассы с другими технологиями термохимической конверсии. Такое исследование было выполнено Джоанной Пакер (Johanna Pucker), Робинот Звартом (Robin Zwart) и Герфридом Янгмайером (Gerfried Jungmeier). Ученые провели сопоставление энергетической эффективности работы котла на твердой биомассе (щепе) и газификации биомассы с последующим сжиганием полученного генераторного газа в котле.

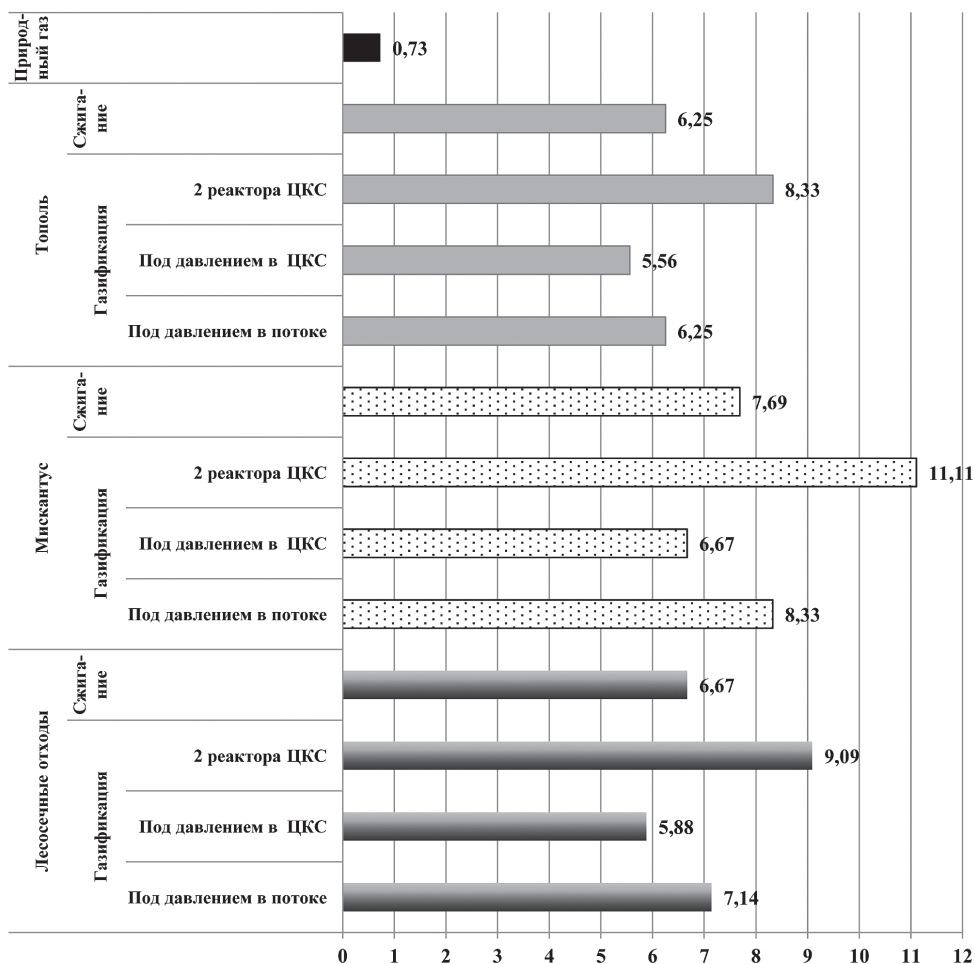
В исследовании рассмотрено три вида биомассы — отходы лесозаготовки, мискантус, тополь с быстрорастущей плантации — и три вида технологии газификации — газификация в потоке с кислородным дутьем, газификация в циркулирующем кипящем слое с кислородным дутьем и газификация с паровым дутьем в двух реакторах циркулирующего кипящего слоя. Дополнительно биоэнергетические технологии сравниваются с работой газового котла. Для всех исследованных технологий рассчитан коэффициент выхода энергии $EY_{C_{NR}}$.

Результаты исследования показали, что прямое сжигание, газификация в потоке и газификация в ЦКС имеют высокие, близкие по значению показатели энергетической эффективности — $EY_{C_{NR}} = 5,5–8$ (Рис. 3). Для газификации в

двух реакторах ЦКС коэффициент выхода энергии даже выше — 9–11. Если сравнивать между собой различные виды биомассы, то видно, что для всех технологий самый высокий EY_{NR} соответствует мискантусу как топливу, а на втором месте находятся лесосечные отходы. Для газового котла (базовой системы для сравнения) $EY_{NR} = 0,73$, что полностью совпадает с оценками, приведенными ранее в Таблице 1.

Рис. 3

Коэффициент выхода энергии EY_{NR} для технологий прямого сжигания и газификации биомассы





ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ИЗ БИОМАССЫ

Вопросы энергетической эффективности и влияния на баланс парниковых газов при производстве электроэнергии из соломы подробно исследованы в работе С. М. Састре (С. М. Sastre), Е. Малетта (Е. Maletta), Ю. Гонсалес-Аречавала (Y. Gonzalez-Arechavala) и др. «Централизованное производство электроэнергии из озимых зерновых биомассы, выращенной в условиях центрально-северной Испании: Глобальное потепление и оценки энергетического выхода» для условий Испании. Рассмотрен пример ТЭС мощностью 25 МВт_э, топливом для которой является тюкованная солома злаковых культур (ржи, тритикале (искусственный гибрид ржи и пшеницы), овса). В данном случае считается, что эти культуры специально выращиваются для использования соломы в качестве топлива.

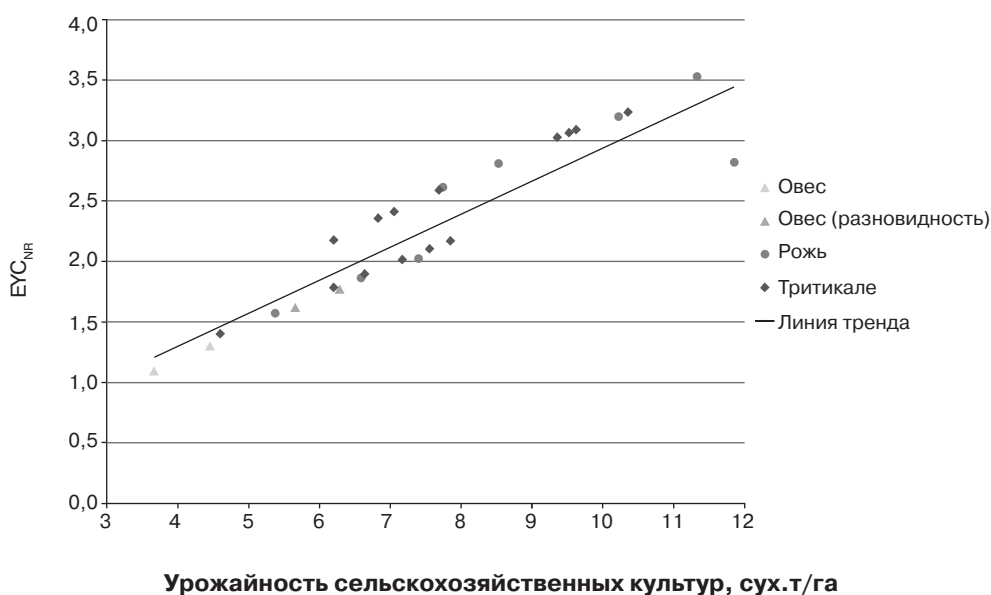
Установлено, что урожайность используемых культур, которая в исследовании колебалась в диапазоне 3–11 сух.т/га, имеет большое влияние на энергетические и экологические показатели работы ТЭС. Это объясняется тем, что расход топлива на выполнение ряда операций по сбору биомассы (например, скашивание, тюкование) зависит от урожайности сельскохозяйственной культуры на данном земельном участке. Так, для двух участков, исследованных в работе, расход дизельного топлива на скашивание растений колебался в диапазоне 12,2–18,4 л/га и 11,6–18,6 л/га, а на тюкование — в диапазоне 7,8–10,6 л/га и 9,2–14,9 л/га, соответственно.

Расход ископаемого топлива на сбор и подготовку биомассы является важной составляющей энергии «на входе» в установку и, соответственно, влияет на расчет коэффициента выхода энергии EYC_{NR} . Для технологий производства электроэнергии из биомассы это особенно важно, поскольку, как было показано в Таблице 1, их энергоэффективность является сравнительно небольшой, и необходимо знать факторы, от которых она зависит в наибольшей степени. По данным работы, доля затрат дизельного топлива на сельскохозяйственные операции в общем объеме энергии «на входе» ТЭС составляет 25–30 %.

Установлено, что в рассматриваемом диапазоне урожайности сельскохозяйственных культур коэффициент выхода энергии EYC_{NR} для ТЭС 25 МВт_э может колебаться от 1,1 до 3,5 (Рис. 4). Это означает, что в зависимости от затрат энергии на сбор и подготовку биомассы работа ТЭС может быть как достаточно эффективной с точки зрения энергетического баланса ($EYC_{NR} > 2$), так и энергетически неэффективной ($EYC_{NR} < 2$). Граница соответствует урожайности сельскохозяйственных культур порядка 7 сух.т/га.

Рис. 4

Зависимость коэффициента выхода энергии для ТЭС 25 МВт_э на соломе от урожайности используемых сельскохозяйственных культур



ПРОИЗВОДСТВО БИОГАЗА

Оценка жизненного цикла технологий производства биогаза выполнена Даниэлой Дресслер (Daniela Dressler), Ачимом Лоуэном (Achim Loewen) и Майклом Нильсом (Michael Nelles) в работе «Оценка жизненного цикла поставок и использования биоэнергии: Влияние региональных факторов на производство биогаза» для условий Герма-



нии. Авторы рассматривают получение биогаза из силоса кукурузы с последующим производством электрической энергии двигателем мощностью 255 кВт_э. Для трех районов Нижней Саксонии проанализировано влияние местных условий, в первую очередь качества почвы, климатических условий, применяемой технологии выращивания и, соответственно, урожайности кукурузы на энергетические и экологические показатели биогазовых технологий. Другим важным фактором, который влиял на результаты исследования, была доля полезно утилизированной тепловой энергии, которая считалась побочным продуктом работы БГУ.

Проведенные расчеты показали, что энергетическая эффективность исследованных технологий производства биогаза с последующим получением электроэнергии находится на грани допустимых значений. Величина коэффициента выхода энергии EYC_{NR} для всех рассмотренных вариантов колеблется в районе 2 (меньше рекомендуемого значения для биоэнергетических технологий) (Таблица 2). Самый высокий показатель (2,2) получен для биогазовой установки в Göttingen, где затраты невозобновляемой энергии на выращивание кукурузы наименьшие, а доля полезной утилизации тепловой энергии наибольшая.

Табл. 2

Характеристики исследуемых вариантов производства электроэнергии из биогаза

Показатели	Вариант I (район Göttingen)	Вариант II (район Celle)	Вариант III (район Hildesheim)
Потребление ископаемых топлив на выращивание кукурузы, кг у. т./т силоса*	5,8	8,2	6,2
Потребление э/э на собственные нужды БГУ, % произведенной э/э	7 %	7 %	7 %
Потребление тепловой энергии на собственные нужды БГУ, кВт·час/м ³ биогаза	0,256	0,256	0,256
Доля полезно утилизированной тепловой энергии	60 %	30 %	40 %
EYC_{NR}^*	2,2	1,84	2,1

* Пересчет авторов по данным работы

Для БГУ, работающих на кукурузе, установлено, что из общего объема ископаемой энергии «на входе» наибольшая доля (до 70 %) тратится собственно на выращивание кукурузы. Еще часть ископаемой энергии (до 30 %) расходуется на транспортировку биомассы к месту хранения (силосные кагаты) и загрузку в биореактор (принятое в исследовании среднее расстояние перевозки — 20 км). Собственные нужды биогазовых установок (электроэнергия на привод мешалок, насосов и т. д., а также тепловая энергия для обогрева биореакторов) обычно в полной мере обеспечиваются за счет части энергии производимого биогаза (до 15–25 %). Эта информация может быть полезной при оптимизации энергозатрат «на входе» БГУ для обеспечения более высокого коэффициента выхода энергии.

Можно ожидать, что для биогазовых установок $E_{YC_{NR}}$ будет выше 2 для случаев использования в качестве сырья большей доли отходов сельского хозяйства или других видов отходов. Этот вывод подтверждается данными исследования

Табл. 3
Характеристики биогазовых установок, работающих на разных видах сырья

Вид сырья	Содержание сухого вещества, %	Выход БГ ГДж/сух. т	Затраты энергии «на входе», ГДж/сух. т			$E_{YC_{NR}}^*$
			Подготовка сырья	Транспортировка сырья	Доставка сброженного остатка на поля	
Коровий навоз	8	6,2	0	0,19	0,15	2,6
Свиной навоз	8	7	0	0,19	0,15	3,0
Жировые осадки	4	22	0	1,2	0,24	6,2
Энергетические культуры	23	10,6	1,9	0,07	0,24	2,4
Органическая часть ТБО	30	12,4	0,8	0,24	0,24	3,6
Отходы скотобойни	17	9,4	0	0,14	0,24	3,6
Ботва сахарной свеклы	19	10,6	0,54	0,09	0,24	3,5
Солома	82	7,1	0,28	0,05	0,24	2,7

* Пересчет авторов по данным работы для базового метода оценки энергетических затрат «на входе».



М. Берглунда (М. Berglund) и П. Борсона (Р. Börjesson) «Энергия анализ биогазовых систем», где была рассмотрена энергетическая эффективность БГУ, работающих на разных видах сырья для условий Швеции. Наилучший результат ($E_{C_{NR}} = 6,2$) получен для случая производства биогаза из жировых осадков (Таблица 3). Этому виду сырья соответствует наивысший удельный выход биогаза — 22 ГДж/сух. т и нулевые затраты на подготовку биомассы. Самый низкий коэффициент выхода энергии (2,4) приходится на энергетические культуры как сырье для получения биогаза. Этот вариант имеет наибольшие затраты энергии на подготовку сырья, поскольку включает этап выращивания культур, и средний выход биогаза — 10,6 ГДж/сух. т. 🌱

(Продолжение следует)

ПЕРЕДПЛАТИТЬ ЖУРНАЛ

«ЕКОЛОГІЯ ПРЕДПРИЯТТЯ»

НА II ПІВРІЧЧЯ 2014 РОКУ



Видається за інформаційної підтримки
МІНІСТЕРСТВА ЕКОЛОГІЇ
ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ



ЄДИНЕ В УКРАЇНІ
видання з практичної екології



У 2014 році в журналі –
«ЗАОЧНА АКАДЕМІЯ
ЕКОЛОГІЧНИХ ЗНАНЬ»:

- курс лекцій на сторінках журналу;
- запитання для самоперевірки знань;
- конкурсне тестування з отриманням сертифіката та цінними подарунками для переможців!

ПРИЄДНУЙТЕСЬ!

Передплатити за індексом: **89880**

З ПИТАНЬ ПРИДБАННЯ:

тел. (044) 568-5138, podpiska@mediapro.com.ua



www.ECOLOG-UA.com

