

УДК 621.314

Усенко А.Ю. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ
Шевченко Г.Л. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ
Губинский С.М. – студент, НМетАУ
Кремнева Е.В. – ассистент, НМетАУ
Шишко Ю.В. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ
Федоров С.С. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ

На основе показателя удельного снижения выбросов парниковых газов выполнен анализ снижения эмиссии парниковых газов в атмосферу при замене ископаемого топлива продуктами пиролиза биомассы.

Введение

Четвертый доклад «Изменение климата 2007», подготовленный Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГИЕК), показал, что международные меры по снижению выбросов парниковых газов не дали ожидаемых результатов (рис. 1).

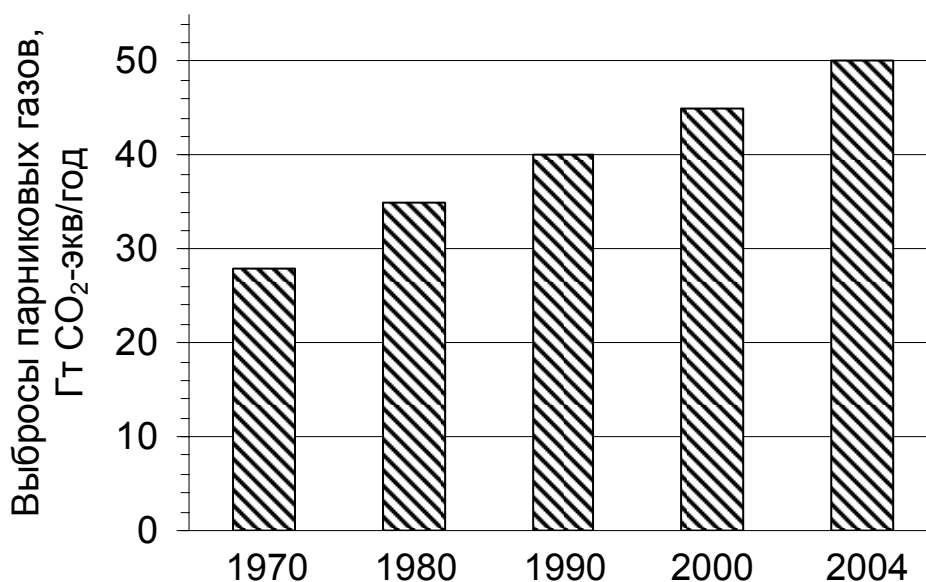


Рис. 1. Глобальные выбросы парниковых газов, взвешенные по потенциалу глобального потепления за 1970 ÷ 2004 годы [1]

С 1990 по 2004 гг. глобальные выбросы парниковых газов возросли на 24 %. Наибольший рост глобальных выбросов парниковых газов в период с 1970 по 2004 гг. происходил в секторе энергоснабжения (увеличение на 145 %) [1].

При этом анализ сценариев развития мирового хозяйства на период до 2030 года показывает сохранение тенденции к росту эмиссии парниковых газов, а темп этого роста может быть значительно снижен за счет реализации рыночных механизмов, направленных на снижение эмиссии. Основные технологии снижения выбросов по отраслям приведены в таблице 1.

Таблица 1
Основные направления снижения выбросов парниковых газов [1]

Отрасль	Основные технологии снижения эмиссии парниковых газов на период до 2030 г
Энергоснабжение	Улавливание и захоронение углерода при работе электростанций, использующих в качестве топлива газ, биомассу и уголь; усовершенствование ядерной энергетики; усовершенствование возобновляемой энергетики (приливная энергия и энергия волн, солнечная энергетика)
Транспорт	Биотопливо второго поколения; летательные аппараты повышенной эффективности; новейшие электрические и гибридные транспортные средства с более мощными и надежными аккумуляторами
Строительство	Комплексное проектирование коммерческих зданий, включая такие технологии, как интеллектуальные счетчики, которые обеспечивают обратную связь и регулирование; солнечные гальванические элементы, встроенные в здания
Промышленность	Повышенная энергоэффективность; улавливание и хранение углерода при производстве цемента, аммиака и железа; инертные электроды для производства алюминия
Сельское хозяйство	Повышение урожайности культур

Из таблицы 1 следует, что совершенствование биоэнергетических технологий остается актуальным направлением энергетики с учетом концепции устойчивого развития общества. При этом на первый план выходят задачи повышения эффективности процессов преобразования энергии, утилизации и захоронения углерода.

Среди предлагаемых методов захоронения углерода и выведения его из круговорота, наиболее часто обсуждаемый и технически реальный – закачка углекислого газа на морское дно на глубину в несколько километров, где он будет оставаться в жидком состоянии, пока не произойдет его биологическое или химическое связывание. По оценкам [2] затраты энергии на такую утилизацию, как минимум, будут соответствовать затратам на добычу топлива. Это значит, что топливной отрасли придется удвоить свои мощности, а цена топлива возрастет в два раза.

Таким образом, развитие технологий извлечения углерода из круговорота и его хранение также актуальны на ближайшую перспективу.

Постановка задачи исследования

Развитие технологий энергетического использования биомассы предполагает получение различных видов энергии (тепловой, электрической, механической), в том числе и при использовании когенерационных технологий, основанных на различных энергетических агрегатах. Экологическая оценка энергетического использования биомассы проведена на основе предложенного авторами показателя удельного снижения выбросов парниковых газов при замене ископаемого топлива биомассой ϵ_{CO_2} [3].

Целью настоящей работы является определение экологической эффективности производства энергии на основе нового процесса окислительного пиролиза отходов биомассы в плотном слое. Эта технология основана на двухстадийном процессе переработки биомассы. На первой стадии сырье проходит термическую обработку – пиролиз в реакторе шахтного типа с использованием процесса фильтрационного горения [4]. Полученные летучие продукты разложения биомассы используются для производства тепловой энергии. Углистый остаток или биоуголь подвергаются газификации, а полученный топливный газ используется для производства тепловой или электрической энергии в двигателях внутреннего сгорания. Такой вариант позволяет надежно исключить попадание смол в двигатель. Газификация биоугля может осуществляться непосредственно в пиролизере с использованием теплоты предыдущего этапа термической обработки или после его охлаждения.

Учитывая интерес к утилизации и хранению углерода, полученный биоуголь может быть использован для внесения в почву, что является известным приемом, способствующим повышению урожайности и снижению вымывания удобрений [5]. Перспективность подобного подхода связана со стабильным состоянием биоугля, что позво-

ляет уменьшить скорость окисления углерода в естественных условиях. Срок консервации биоугля по оценкам [5] составляет от нескольких столетий до нескольких тысячелетий.

Именно исследованию этих вариантов технологий энергетического использования биомассы и посвящена данная статья.

Методика исследований

В таблице 2 представлены исследуемые варианты технологий энергетического использования биомассы, а также производимые энергоресурсы.

Таблица 2

Технологии энергетического использования биомассы на основе окислительного пиролиза в плотном слое (ОППС)

Технология переработки биомассы	Производимые энергоносители и продукты		
	Электроэнергия	Тепловая энергия	Биоуголь
Пиролиз + газификация в одном аппарате	+	+	–
Пиролиз + газификация в одном аппарате	–	+	–
Пиролиз + газификация с охлаждением биоугля	+	+	–
Пиролиз + внесение биоугля в почву	–	+	+

Определение показателя удельного снижения выбросов парниковых газов при замене ископаемого топлива биомассой ϵ_{CO_2} проводили по зависимости [3], с учетом консервации части углерода в виде биоугля:

$$\epsilon_{CO_2} = \frac{E_{CO_2}^{ИСК} - E_{CO_2}^{БМ}}{V_{БМ} \cdot Q_{H,БМ}^P} + \frac{3,67 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{A}{100 \cdot r}\right)}{Q_{H,БМ}^P}, \quad (1)$$

где $E_{CO_2}^{ИСК}$ и $E_{CO_2}^{БМ}$ – абсолютные величины выбросов парниковых газов при работе на ископаемом топливе и биомассе, соответственно, кг CO_2 -экв/ч; $V_{БМ}$ – расход биомассы, кг/ч; $Q_{H,БМ}^P$ – теплота сгорания биомассы, Дж/кг; r – доля биоугля, получаемая в результате окислительного пиролиза, вносимая в почву; A – зольность биомассы, %; 3,67 – коэффициент перевода углерода в CO_2 -эквивалент.

Предполагая, что выработка энергии одинакова до и после замены ископаемого топлива, вид зависимости (1) преобразуется в выражение:

$$\epsilon_{CO_2} = e_{CO_2}^{ИСК} \cdot \left(\frac{\eta_{\Sigma}^{БМ}}{\eta_{\Sigma}^{ИСК}} - \frac{e_{CO_2}^{БМ}}{e_{CO_2}^{ИСК}} \right) + \frac{3.67 \cdot r \cdot \left(1 - \frac{A}{100 \cdot r} \right)}{Q_{H, БМ}^P}, \quad (2)$$

где $e_{CO_2}^{ИСК}$, $e_{CO_2}^{БМ}$ – показатели эмиссии парниковых газов, отнесенные к единице теплоты сгорания топлива, кг CO₂-экв/кг у.т.; $\eta_{\Sigma}^{БМ}$ и $\eta_{\Sigma}^{ИСК}$ – КПД брутто процессов производства энергии при использовании биомассы и ископаемого топлива, соответственно, %.

Для случая полного энергетического использования продуктов пиролиза $r=0$.

Значения показателей эмиссии ископаемого топлива, определенные с использованием системного подхода [3], составляют для условий Украины соответственно:

$$\text{Уголь} - e_{CO_2}^{\text{уголь}} = 3364 \div 4350 \text{ гСО}_2\text{-экв/кг у.т.};$$

$$\text{Мазут} - e_{CO_2}^{\text{мазут}} = 2501 \div 2555 \text{ гСО}_2\text{-экв/кг у.т.};$$

$$\text{Природный газ} - e_{CO_2}^{\text{ПГ}} = 1714 \div 1908 \text{ гСО}_2\text{-экв /кг у.т.}$$

Показатель эмиссии парниковых газов при энергетическом использовании биомассы определяется выбросами при сжигании ископаемого топлива на этапе сбора, переработки и транспортировки биомассы. Учитывая, что биомасса, пригодная для энергетического использования в Украине, относится к отходам производства, выбросы парниковых газов, связанные с заготовкой и сбором биомассы, не учитывались, так как затраты энергии полностью относились к производству основной продукции. В этом случае показатель эмиссии для биомассы $e_{CO_2}^{БМ}$ складывается из двух составляющих:

$$e_{CO_2}^{БМ} = e_{ТР}^{БМ} + e_{ПЕР}^{БМ}, \text{ гСО}_2\text{-экв./ (кг у.т. биомассы)} \quad (3)$$

где $e_{ТР}^{БМ}$ – показатель эмиссии парниковых газов, связанный с транспортировкой биомассы, гСО₂-экв./ (кг у.т. биомассы); $e_{ПЕР}^{БМ}$ – показатель эмиссии парниковых газов, связанный с переработкой и подготовкой биомассы, гСО₂-экв./ (кг у.т. биомассы).

В связи с низкой насыпной плотностью биомассы ($100 \div 400 \text{ кг/м}^3$), ее транспортировка на длительные расстояния является мало эффективной; в связи с этим, в расчетах максимальное расстояние транспортировки принято равным 30 км с использованием автотранспорта. Затраты топлива определялись в соответствии с нормативами расхода топлива Министерства транспорта Украины.

В качестве примера, значения показателей эмиссии для транспортировки гречневой шелухи, отходов грецких орехов и древесной щепы приведены в таблице 3.

Таблица 3

Значения показателей эмиссии при транспортировке биомассы автотранспортом, $\text{гСО}_2\text{-экв/кг у.т. биомассы}$

Вид биомассы	Объем кузова автомобиля	
	8 м ³	52 м ³
Гречневая шелуха	24,6	7,7
Отходы грецких орехов	9,67	3,6
Щепа	20,7	6,8

В связи с ограничением по гранулометрическому составу исходной биомассы для реализации процесса ОППС (максимальный размер частиц не должен превышать $10 \div 20 \text{ мм}$), в качестве переработки отходов рассматривался вариант измельчения биомассы в современных дробилках.

Затраты энергии на измельчение $b_{\text{ЭЭ}}^{\text{ИЗМБМ}}$ в существующих агрегатах (таблица 4) составляют $12 \div 20 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ щепы, а показатель эмиссии парниковых газов, связанный с получением щепы $e_{\text{СО}_2}^{\text{ИЗМБМ}} = 6,8 \div 11,4 \text{ гСО}_2\text{-экв./кг у.т. биомассы}$ при удельной величине выбросов парниковых газов, отнесенных к 1 киловатту выработанной электроэнергии в Украине, равном $E_{\text{ЭЭ}} = 250 \text{ гСО}_2\text{экв/ кВт}\cdot\text{ч}$.

Таблица 4

Характеристика оборудования для измельчения биомассы

Тип оборудования	HJ 200 GT	ДЗН-03	MURENA 1	MP2-20H-1	PM-5
Производительность, т/ч	2,5	1,5	0,5	5,0	2,0
Удельный расход электроэнергии кВт·ч/т	20	20	15	15	12

Таким образом, на основании проведенных расчетов, показатель эмиссии парниковых газов при энергетическом использовании биомассы составляет: $e_{\text{CO}_2}^{\text{БМ}} = 3,6 \div 32,1$ гСО₂-экв /кг у.т.

Приведенная выше методика позволила оценить показатели эмиссии парниковых газов для различных видов ископаемого топлива и биомассы, на основании которых проведено сравнение различных вариантов технологий и оборудования энергетического использования биомассы.

Результаты исследований

Анализ зависимости величины удельного снижения выбросов парниковых газов (2) показывает, что данная зависимость определяется тремя величинами: отношениями показателей эмиссии и КПД энергетических агрегатов, а также абсолютной величиной показателя эмиссии ископаемого топлива.

Отношение показателей эмиссии парниковых газов биомассы и ископаемого топлива для всех исследованных видов биомассы составляет $0,02 \div 0,001$ и, таким образом, мало влияет на величину удельного показателя эмиссии парниковых газов.

Результаты экспериментальных исследований окислительного пиролиза биомассы в плотном слое, проведенные на пилотной установке мощностью 200 кВт [4], и данные математического моделирования производства электроэнергии с использованием двигателей внутреннего сгорания [6] позволили определить коэффициенты полезного действия исследованных вариантов рассматриваемых технологий (см. табл. 2). Численные значения КПД представлены в таблице 5, там же приведен показатель эффективности энергетического использования биомассы традиционным способом – сжигание биомассы с получением тепловой энергии. В расчетах КПД газификации угля принят равным предельному значению – 70 % при воздушной газификации.

При условии, что КПД использования ископаемого топлива в современных тепловых агрегатах составляет порядка 90 %, величина отношения $\eta_{\Sigma}^{\text{БМ}} / \eta_{\Sigma}^{\text{ИСК}}$ может изменяться от 1 – при сжигании биомассы, до 0,41 – при использовании технологии внесения биоугля в почву. То есть эффективность работы энергоагрегатов значительно влияет на результат замены ископаемого топлива биомассой.

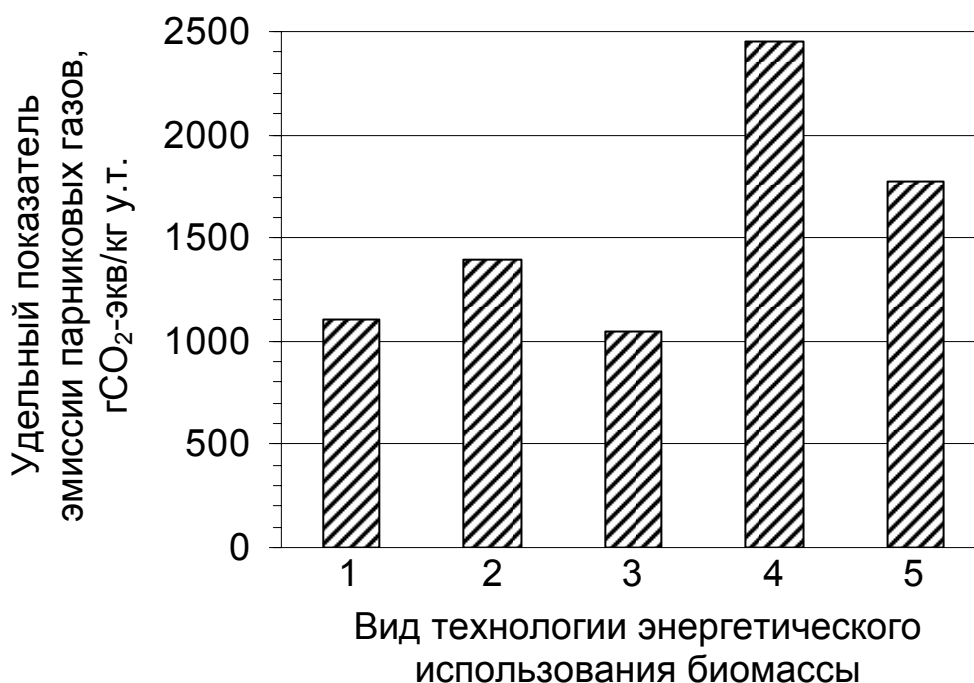
Результаты расчетов удельного показателя эмиссии выбросов парниковых газов e_{CO_2} при замене природного газа биомассой представлены на рисунке 2. Из диаграммы следует, что с экологической точки зрения

наиболее эффективным является технология выработки тепловой энергии из летучих продуктов пиролиза и внесение биоугля в почву, при этом доля замены природного газа в показателе выбросов составляет 28 %. Технологии окислительного пиролиза при энергетическом использовании биомассы уступают традиционной технологии сжигания биомассы, что в основном связано с дополнительными потерями при газификации биоугля.

Таблица 5

Эффективность технологий энергетического использования биомассы на основе окислительного пиролиза в плотном слое (ОППС)

№ технологии	Технология переработки биомассы	КПД производства энергоносителей, %		
		Электроэнергия	Тепловая энергия	Суммарный КПД
1	Пиролиз + газификация в одном аппарате	13	37	50
2	Пиролиз + газификация в одном аппарате	–	71	71
3	Пиролиз + газификация с охлаждением биоугля	11	37	48
4	Пиролиз + внесение биоугля в почву	–	37	37
5	Сжигание биомассы	–	90	90



*Рис. 2. Сравнение экологической эффективности технологий энергетического использования биомассы:
1–5 – номер технологии переработки отходов биомассы (см. табл. 5)*

В то же время, особенности отходов биомассы, как топлива, требуют создания специфических процессов их энергетического использования с учетом как экономических критериев, так и критериев надежности и эффективности работы оборудования во времени.

Выводы

На основании анализа новой технологии процесса переработки биомассы методом окислительного пиролиза в плотном слое показано, что удельное снижение выбросов парниковых газов может достигать до 2,5 кг CO₂-экв/кг у.т. биомассы, при этом более 0,5 кг углерода изымается из круговорота и консервируется в почве. Таким образом, совместное производство тепловой энергии и биоугля, который не окисляется в дальнейшем, является одной из перспективных технологий по борьбе со снижением парникового эффекта.

Использование технологии ОППС для выработки тепловой и электрической энергии с использованием двигателей внутреннего сгорания позволяет снизить выбросы парниковых газов до 1,03 ÷ 1,1 кг CO₂-экв/кг у.т.

Список литературы

1. «Изменение климата, 2007 г.: смягчение последствий изменения климата». Вклад Рабочей группы III в Четвертый доклад МГЭИК издательством Кембриджского университета, 2007 г.
2. Арутюнов В.С. Парниковый эффект: проблема выбора стратегии // Рос. хим. журнал. – 2001. – Т. 45, № 1. – С. 55 – 63.
3. Gubynskyy M., Usenko A., Grek A., Vvedenskaya T. Ecological Analysis of Biomass Utilization as Fuel // Environmental Informatics Archives, Volume 1 (2003), pp. 197 – 203
4. Губинский М.В., Кремнева Е.В., Шишко Ю.В., Шевченко Г.Л., Усенко А.Ю. Исследование процесса термоокислительного пиролиза биомассы в плотном слое // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць НМетАУ. – Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.», 2007. – С. 130 – 137.
5. Johannes Lehmann. A handful of carbon // NATURE, Vol 447, № 10 May 2007, – pp. 143 – 144.
6. Кремнева Е.В., Кремнев В.Е., Губинский М.В. Перспективы использования генераторного газа из биомассы в двигателях внутреннего сгорания // Металлургическая теплотехника: Сб. научн. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: «ПП Грек О.С.», 2006. – С. 187 – 193.

Рукопись поступила 31.03.2008 г.