

5. Кизилов, В. У. К вопросу о физическом смысле реактивного тока и реактивной мощности [Текст] / В. У. Кизилов // Вестник НТУ ХПИ. Сборник научных трудов. Тем. выпуск. Энергетика и преобразовательная техника. – 2002. – Вып. 9, Т. 3. – С. 44–50.
6. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов [Текст] / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 459 с.
7. Akagi, H. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components [Text] / H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1984. – Vol. 20. – P. 625–630.
8. Kim, H. S. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory [Text] / H. S. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, L. Choi // IEEE Trans. Power Electronics. – 2002. – Vol. 17, № 5. – P. 701–710.
9. Сербиненко, Д. В. Качество электрической энергии и степень взаимного влияния тяговых подстанций железных дорог постоянного тока и системы внешнего электроснабжения [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Д. В. Сербиненко. – М.: РГБ, 2006. – 195 с.
10. Барковский, Б. С. Обобщение теории мостовых схем выпрямления и выбор оптимальной [Текст]: сб. науч. тр. / Б. С. Барковский, Е. Ю. Салита // Повышение качества электрической энергии на тяговых подстанциях. – ОмИИТ, 1983. – С. 15–21.
11. Глинтерник, С. Р. Электромагнитная совместимость мощных вентиляльных преобразователи и электрических сетей [Текст] / С. Р. Глинтерник // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 1–4.
12. Барковский, Б. С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко и др.; под ред. М. Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
13. Руденко, В. С. Анализ электромагнитных процессов в статических преобразователях методом эквивалентного источника [Текст] / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. Я. Жуйков // Проблемы технической электродинамики. – 1973. – Вып. 41. – С. 10–14.
14. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст]. – К.: Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

**Обґрунтовано використання біомаси для вироблення теплової та електричної енергії. Експериментальним шляхом досліджено придатність різних видів рослинної біомаси (лушпиння соняшника, гречки і вівса) з метою подальшої термохімічної конверсії для отримання альтернативного виду палива. Наведені результати технічного аналізу (вологість, зольність, теплота згоряння) ряду аналітичних проб сільськогосподарських відходів**

**Ключові слова: термохімічна конверсія, рослинна біомаса, альтернативне паливо, сільськогосподарські відходи, газифікація**

**Обосновано использование биомассы для выработки тепловой и электрической энергии. Экспериментальным путем исследована пригодность различных видов растительной биомассы (лузги подсолнечника, шелуха гречки и овса) с целью дальнейшей термохимической конверсии для получения альтернативного вида топлива. Приведены результаты технического анализа (влажность, зольность, теплота сгорания) ряда аналитических проб сельскохозяйственных отходов**

**Ключевые слова: термохимическая конверсия, растительная биомасса, альтернативное топливо, сельскохозяйственные отходы, газификация**

УДК 633.002.68:620.9

## РАСТИТЕЛЬНАЯ БИОМАССА КАК ОРГАНИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО

**А. А. Осьмак**  
Ассистент\*

E-mail: ingmex@ukr.net

**А. А. Серёгин**

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой\*

E-mail: seryoginoo@ukr.net

\*Кафедра теоретической механики и  
ресурсосберегающих технологий  
Национальный университет  
пищевых технологий  
ул. Владимирская, 68,  
г. Киев, Украина, 01601

### 1. Введение

Биомасса – возобновляемый источник энергии. Понятие «биомасса» относится ко всем материалам растительного происхождения, которые могут быть использоваться для получения энергии, включая: древесину, травы, растительные и древесные отходы, навоз крупного рогатого скота и свиней, и многое другое [1].

Энергия биомассы, имеет существенные преимущества по сравнению с ископаемыми видами топлива и рядом других возобновляемых источников энергии,

обеспечивая энергоснабжение, повышение уровня жизни, повышение благосостояния. Энергетические системы на основе биомассы представляют собой потенциальный механизм, способствующий устойчивому развитию и охране окружающей среды. Среди основных причин подобного внимания стоит отметить:

- повсеместную доступность, даже в отдаленных областях: топливо из биомассы доступно везде, где растут деревья и сельскохозяйственные культуры, а также перерабатываются продовольственные продукты и волокна;

- ресурс, используемый при необходимости: биомасса представляет собой подлежащий хранению источник топливной энергии, который в любой момент можно использовать в целях энергоснабжения, в отличие от других возобновляемых источников энергии, характеризующихся нерегулярностью и/или сезонностью;

- универсальность: биомасса является потенциальным источником всех основных энергоносителей – жидкости, газа, тепла и электроэнергии;

- отсутствие влияния на климат: при условии экологически рационального получения и сгорания, энергия биомассы не вызывает климатических изменений и парниковых газов.

---

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

---

В последние годы в мире возникла большая заинтересованность в использовании биомассы для выработки тепловой и электрической энергии, ее вовлечение в топливно-энергетический баланс страны. Об этом говорят многочисленные исследования в странах Европейского союза и США, направленные на выявление оптимальных путей использования биомассы в энергетике [2, 3].

Интерес к широкому использованию биомассы определен следующими основными обстоятельствами:

1. Экологическими, связанными с необходимостью решения, в том числе, глобальных климатологических задач.

2. Необходимостью снижения потребления не возобновляемых источников энергии (газ, нефть, уголь), активно истощаемых в обозримом будущем, и заменой их возобновляемыми источниками.

Развитие промышленного применения энергии, получаемой из биомассы, в государствах-участниках ЕС происходит далеко не однородно. Многие страны только начинают использовать свой потенциал, в то время как другие, такие как Финляндия и Швеция, уже создали высокотехнологичный промышленный сектор (в частности, системы производства комбинированной тепло- и электроэнергии – ТЭЦ), и уже в значительной степени задействовали свой потенциал. В качестве топлива в установках центрального отопления используются, как правило, щепы, являющиеся побочным продуктом лесного хозяйства и деревообрабатывающей промышленности; помимо этого, в Дании широко используется солома, а в Швеции ивы, выращенные в качестве энергетических культур. Центральное отопление дает возможность для использования энергии биомассы, поскольку тепловые сети уже существуют, есть потенциал для экономии за счет масштаба, и упрощенная логистика поставок топлива (по сравнению с системами бытового масштаба), теплоснабжение региона с использованием биомассы может быть экономически конкурентоспособным [2, 3]. Таким образом, высокая степень централизованного теплоснабжения является показателем потенциала биомассы.

Недавно вступившие в ЕС страны, как, например, Польша, Чешская Республика, Словацкая Республика, Словения и страны Балтии, обладают значитель-

ными сырьевыми запасами, равно как и Болгария, Румыния и страны, расположенные к востоку от них, в том числе Украина, Беларусь и Россия. Однако этот потенциал остается в значительной степени неиспользованным или используется неэффективно ввиду отсутствия инвестиций в развитие современные, эффективные технологии [2, 4].

Поэтому растительная биомасса в силу таких своих основных качеств, как возобновляемость данного вида топлива, его экологическая чистота в сравнении с другими видами топлив, отсутствие воздействия на баланс свободного углерода в атмосфере, ведущего к развитию «парникового» эффекта, считается одним из наиболее «благородных» видов топлива и рассматривается во многих странах как перспективный источник энергии на ближайшее будущее.

---

## 3. Цель и задачи исследования

---

Цель работы – исследовать физико-технические характеристики различных видов биомассы с целью ее использования в качестве компонента газификации твердого топлива.

Задачи исследования:

1. Обосновать выбор растительной биомассы – сельскохозяйственных отходов с целью ее дальнейшей термохимической конверсии.

2. Установить элементарный состав растительной биомассы.

3. Определить физико-технические свойства органических отходов.

---

## 4. Методы определения физико-технических свойств растительной биомассы

---

В лабораторных условиях исследовали пригодность различных видов растительной биомассы с целью дальнейшей термохимической конверсии для получения альтернативного вида топлива.

Учитывая технические характеристики растительной биомассы, для дальнейшей работы была выбрана лузга подсолнечника, шелуха гречки и овса, отходы древесины (стружка), а также торф.

Зольность топлива определялась по ГОСТ 1.1.022-90, влажность по ГОСТ 27314-91, выход летучих веществ по ГОСТ 6382-91, углерод и водород по ГОСТ 24081-88, сера по ГОСТ 8606-93, а кислород по разнице 100 % – сумма компонентов. Теплота сгорания определялась по ГОСТ 147-95.

---

## 5. Технический анализ свойств органического топлива

---

Состав растительной биомассы, а, следовательно, и ее физико-технические характеристики зависят от происхождения [5, 6]. Существенное влияние на процесс газификации оказывают такие характеристики биомассы как влажность и зольность [7, 8].

Влага может быть конденсированной и абсорбированной, причем количество последней зависит от влажности окружающей среды. В древесине содержание влаги может достигать 50 % [5, 7]. Сельскохозяй-

ственные отходы, такие как солома, содержат около 10...12 % воды [5, 7]. Влага снижает эффективность и экономичность при использовании растительной биомассы в качестве топлива, также увеличиваются затраты на транспортировку.

Содержание минеральных веществ в растительной биомассе меняется в широком диапазоне. В древесине содержится порядка 0,5 % золы, состоящей в основном из карбонатов, солей карбоновых кислот и небольшого количества кремния, а в лузге подсолнечника до 30 % [5]. Нерастворимые в воде неорганические соединения уменьшают теплосодержание биомассы.

При обобщении физико-технических характеристик различных видов биомассы использованы результаты исследований ряда сельскохозяйственных отходов (лузга семян подсолнечника, шелуха гречки, шелуха овса), а также данные зарубежных авторов [7–10].

Результаты анализов в расчете на рабочую массу представлены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Средние значения физико-технических характеристик органической биомассы

Наименование	Показатель
Влажность, %	45,5
Зольность, %	1,35
Углерод, %	30,5
Водород, %	1,8
Сера, %	0,05
Азот, %	0,3
Кислород, %	10,1
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	8770

Таблица 2

Элементный состав золы топлива

Соединение	Количество, %
SiO <sub>2</sub>	25,74
TiO <sub>2</sub>	0,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,38
CaO	43,81
MgO	6,43
SO <sub>3</sub>	0,15

Состав топлива и золы по данным зарубежных исследователей на сухую массу несущественно отличается от приведенного выше. Влажность может меняться от 45 % до 60 %.

Отходы деревообрабатывающих комбинатов, как правило, представляют собой сухие опилки, стружку и кусковые отходы. Исключение представляет мелкодисперсная пыль от шлифовки ДСП, содержащая абразивные материалы и смолы. Влажность отобранной пробы отходов с пункта сбора на открытом воздухе составила около 25 %, а рабочая теплота сгорания около 17,35 МДж/кг.

Удельный вес отобранной пробы составляет всего 150 кг/м<sup>3</sup>. Около половины отходов являются «мягкими» с размерами частиц порядка 0,2...1 мм; осталь-

ные – стружка и щепа с максимальным размером до 50 мм.

В табл. 3 приведены результаты технического анализа ряда аналитических проб сельскохозяйственных отходов. В реальных условиях сельскохозяйственных производств влажность может быть несколько выше (на 2...4 %), а теплота сгорания, соответственно, ниже. Различие в зольности определяется наличием посторонних неорганических включений.

Таблица 3

Физико-технические характеристики сельскохозяйственных отходов

Показатель	Вид отходов		
	Лузга подсолнечника	Шелуха овса	Шелуха гречки
Влажность, W, %	8,4	9,87	6,5
Зольность, A, %	2,7	4,78	7,95
Теплота сгорания, Q, МДж/кг	16,89	14,4	15,82

В [7] приводятся следующие данные по низшей теплоте сгорания ряда аналогичных материалов: лузга рисовая – 13, 3 МДж/кг, лузга подсолнуха – 15,4 МДж/кг, солома – 15, 7 МДж/кг.

Таким образом, теплота сгорания сельскохозяйственных отходов меняется в узких пределах, от 13,3 до 17,0 МДж/кг, и является довольно высокой. Влажность естественных отходов находится на уровне 10 %, а зольность не превышает 8 %.

Элементный состав некоторых видов отходов приведен в табл. 4. Результаты анализа пересчитаны на влажную беззольную массу.

Таблица 4

Элементный состав сельскохозяйственных отходов

Показатель	Вид отходов		
	Шелуха гречки	Лузга подсолнечника	Шелуха овса
Углерод, %	48,3	50,1	42,7
Сера, %	0,21	0,14	0,23
Водород, %	6,57	6,3	5,8
Азот, %*	0,7	1,7	50,34
Кислород, %	42,65	41,4	52,7

\* в связи с высоким содержанием щелочных элементов в золе возможно некоторое занижение доли азота.

Отходы имеют близкий элементный состав с содержанием углерода около 50 % и кислорода – 42 %. Низкое содержание серы и умеренное содержание азота свидетельствуют о том, что выбросы оксидов серы и азота при любой технологии сжигания вряд ли превысят 600 мг/м<sup>3</sup>. Также следует отметить, что указанные сельскохозяйственные отходы представляют собой высокорекреационное топливо с большим (порядка 80 %) выходом летучих веществ.

Элементарный состав золы приведен в табл. 5.

В отличие от органической части состав минеральной части колеблется в весьма широких пределах. Особенно это относится к оксиду кремния (40...87 %), железа (0,2...7,7 %), кальция (0,6...30,6 %) и калия (6,2...20 %). Все элементы, кроме щелочных,

существенного влияния на загрязнение поверхностей нагрева оказать не могут.

Таблица 5

Состав золы сельскохозяйственных отходов

Состав золы, %	Лузга подсолнечника	Шелуха овса	Шелуха гречки
SiO <sub>2</sub>	-	74,5	85,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	0,1
CaO	-	2,8	0,55
MgO	-	8,6	1,9
K <sub>2</sub> O	19,9	9,9	6,4
Na <sub>2</sub> O	0,45	2,2	2,1
SO <sub>3</sub>	-	-	1,7

Температура размягчения золы (после озоления в муфеле) составляет около 1300 °С (от 1200 °С до 1400 °С).

Торф представляет собой продукты разложения растительных остатков и не успевших разложиться элементов растений, степень разложения растёт с увеличением глубины залегания торфа. Различают верховой, низинный и смешанный виды торфа.

В естественном состоянии торф является сильно обводненным, поэтому требуется его предварительная сушка. В воздушно-сухом состоянии влажность торфа составляет 15...25 % [11].

Также следует отметить, что в торфе содержится достаточно значительное количество (до 36 %) минеральных веществ. Это объясняется как наносами, так и остатками минеральных солей растений. Состав минеральной части торфа оказывает существенное влияние на процесс газификации.

Элементный состав торфа в среднем представляет собой: 3,4...9,4 % водорода, 54...60 % углерода, 0,5...3,0 % азота, 28,5...39,5 % кислорода, 0,1...1,5 % серы. Теплотворная способность горючей массы торфа колеблется в довольно широком диапазоне и составляет 19,7...25,1 МДж/кг [11].

Процесс пирогенетического разложения торфа аналогичен процессу разложения древесины. Молодой торф по составу продуктов перегонки приближается к древесине, а старый – к бурым углям. При нагреве торфа до температуры 100 °С проходит процесс сушки. Далее процесс переходит в стадию пиролиза, где сначала происходит выделение CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Наиболее интенсивное разложение на газообразные составляющие начинается со 150 °С. В табл. 6 представлены данные о составе продуктов разложения торфа при различных температурах.

Данные по составу древесины приведены в табл. 7. В качестве проб были приняты две породы: хвойная и твердолиственная древесина [5].

Необходимо отметить, что древесина по своим различным пространственным осям имеет различные коэффициенты расширения. Например, сосновая древесина расширяется вдоль волокон в 20 раз больше, чем поперек волокон. Поэтому при нагреве до температуры пиролиза в структуре древесины возникают напряжения, приводящие к образованию макро- и микроскопических трещин. За счет этих трещин идет быстрое выравнивание температуры и процесс сушки интен-

сифицируется благодаря увеличению реакционной поверхности куска древесины. При этом выделяются летучие газы и пары, которые также состоят из углеводородных соединений, окиси углерода, водяного пара, смолы и бензола. Остается твердый остаточный углерод.

Таблица 6

Продукты разложения торфа при различных температурах

Выход продукта (на сухое вещество)	Температура, °С			
	350	400	450	520
Смола, %	6,82	17,45	20,80	21,10
H <sub>2</sub> O, %	8,07	14,00	15,86	17,0
Газ, %				
CO <sub>2</sub>	82,0	77,9	72,3	63,4
C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	-	0,6	1,6	2,62
CO	-	40,6	15,4	16,54
Полукок	76,3	54,0	46,35	41,30

Таблица 7

Состав древесины

Порода древесины	Зола, %	Содержание, %			
		Вещества, не растворимые в воде	Лигнин	Гемиллюлоза	Целлюлоза
Хвойная	0,41	2,2	27,6	24,3	41,1
Твердолиственная	0,33	3,15	19,55	35,37	39,41

Доля образовавшихся летучих компонентов имеет решающее значение для режима горения твердого топлива. В специальной литературе по этому вопросу можно найти очень разные данные. Величины колеблются в широком диапазоне от 65 до 87 % [7, 9]. Причиной их разброса могут быть различные методы исследований: отличия температуры пиролиза, время нахождения частиц, и др.

## 6. Выводы

1. На основании теоретических и экспериментальных исследований обоснован выбор растительной биомассы (лузги подсолнечника, шелухи гречки и овса) с целью ее дальнейшей термохимической конверсии.

2. Выявлено, что элементарный состав растительной биомассы, а именно низкое содержание серы и умеренное содержание азота, при сжигании обуславливает выбросы оксидов серы и азота, которые не превышают 600 мг/м<sup>3</sup>.

3. Экспериментальным путем установлены физико-технические свойства биомассы: теплота сгорания 13,3...17 МДж/кг, влажность – 10 %, зольность – не более 8 %.

4. Установлено, что сельскохозяйственные отходы представляют собой высокорекреационное топливо с большим выходом летучих веществ (более 80 %).

5. Получены новые обобщенные зависимости физико-технических характеристик сельскохозяйственных отходов и их фракционного состава, которые легли в основу разработки процессов термохимической конверсии растительной биомассы.

Литература

1. Богданович, В. П. Перспективы использования альтернативного топлива в сельском хозяйстве [Текст] / В. П. Богданович, Н. В. Шевченко // Техника в сельском хозяйстве. – 2012. – № 5. – С. 38–40.
2. Каныгин, П. Альтернативная энергетика в ЕС: возможности и пределы [Текст] / П. Каныгин // Экономист. – 2010. – № 1. – С. 49–57.
3. Перспективы мировой энергетики [Текст]: WEO 2009 // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2010. – № 6. – С. 71–85.
4. Colechin, M. Best Practice Brochure: Co-Firing of biomass [Text] / M. Colechin, A. Malmgren. – Report No: Coal R 287 DTI/Pub, 2005. – 91 p.
5. Dubrovin, V. Agricultural & environmental engineering for Bioenergy Production [Text] / V. Dubrovin, M. Melnychuk // Proceedings of the 33TH CIOSTA & 5TH cigr Conference. – Reggio Colabria. – 2009. – Vol. 2. – P. 1121–1123.
6. Demirbas, A. Combustion characteristics of different biomass fuels [Text] / A. Demirbas // Progress in Energy and Combustion Science. – 2004. – № 30. – P. 219–230.
7. Koppejan, I. Results from Biomass combustion [Text] / I. Koppejan. – SUPERGEN meeting. – Birmingham, 2007. – 35 p.
8. Harding, S. Biomass as a rebuming fuel: a specialized cofiring applications [Text] / S. Harding, B. Adams // Biomass and Bioenergy. – 2000. – № 19. – P. 429–445.
9. Tillman, D. A. Biomass co-firing: the technology, the experience, the combustion consequences [Text] / D. A. Tillman // Biomass and Bioenergy. – 2000. – № 19. – P. 365–384.
10. Baxter-Potential, L. Contributions of biomass towards Sustainable Energy [Text]: GCEP Conference / L. Baxter-Potential. – Beijing, China, 2005. – 56 p.
11. Sami, M., Annamalai, K., Wooldridge, M. Co-firing of coal and Biomass Fuel blends [Text] / M. Sami, K. Annamalai, M. Wooldridge. – Progress in Energy and Combustion Science 27, 2001. – 214 p.