

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 336.2

С. П. Высоцкий, д-р техн. наук¹, В. А. Иванченко¹, А. В. Мурга²

1 – ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, 2 – Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Повышение температуры окружающей среды, растущие угрозы изменения климата, а также исчерпание традиционных ископаемых энергетических ресурсов вызывают необходимость увеличения использования возобновляемых энергетических ресурсов. Наряду с экологическими преимуществами их использования, усложняются процессы доставки, хранения и сжигания биологического топлива, являющегося основным возобновляемым ресурсом.

Ключевые слова: биотопливо, теплотворная способность, сжигание, лигноцеллюлоза, солома, генерация энергии

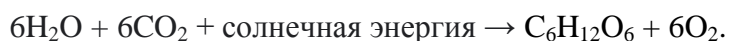
Постановка проблемы

В настоящее время основными источниками энергии являются исчерпаемые ресурсы: уголь, нефть и природный газ. Они обеспечивают в год свыше 400 ЕДж энергии. Однако по прогнозным оценкам в ближайшие 40–50 лет эти источники будут исчерпаны. Следует отметить также большой ущерб, нанесенный окружающей среде, обусловленный использованием традиционных энергоресурсов. Ущерб включает глобальное потепление, кислотные дожди, использование и загрязнение водных ресурсов, большие объемы золоотвалов, обуславливающие отчуждение территорий плодородных земель и т. д.

В современных условиях возобновляемые источники энергии в виде биомассы обеспечивают получение 10–15 % от общего спроса на энергию в развитых странах и 20–30 % в развивающихся странах. В соответствии с прогнозами Всемирного энергетического совета в ближайшее десятилетие до 60 % мировых поставок энергии будут обеспечены за счет возобновляемых источников энергии [1]. Все крупные промышленные потребители энергии используют большие объемы ископаемого топлива, в основном для получения пара, используемого в технологических процессах: в пищевой промышленности – 57 %, при производстве целлюлозы и бумаги – 81 %, при производстве химических веществ – 42 %, при перегонке нефти – 23 % и т. д. [2].

Исчерпание природных ресурсов и причиненный вред окружающей среде при их использовании служит основанием для оценки биомассы как основного безальтернативного источника энергоснабжения. Биомасса представляет собой любое органическое вещество, которое получают из растений. Это могут быть растительные и животные материалы, древесина лесов, сельскохозяйственные культуры, а также их отходы, водоросли, органические отходы промышленных производств, человека и животных. В растениях солнечная энергия преобразуется в процессе фотосинтеза в химическую энергию, которая является накопленной энергией и может сохраняться в наземной и водной растительности в виде углеводов. Биомасса представляет собой универсальное топливо, из которого можно получать более «удобные» виды топлива, такие как биогаз, жидкое топливо или электроэнергию.

Удивительным свойством растительной биомассы является то, что из двух негорючих веществ: воды и углекислого газа под действием солнечной радиации образуется два полезных вещества: глюкоза и кислород по схеме:



Доля использования биомассы, как источника энергии, в различных регионах мира существенно различается, как видно из таблицы 1 [3].

Таблица 1 – Доля использования биомассы в различных регионах мира в качестве источника энергии

Регион	Доля биомассы в качестве источника конечного потребления энергии
Африка	60,0
Южная Азия	56,3
Восточная Азия	25,1
Китай	23,5
Латинская Америка	18,2
Европа	3,5
Северная Америка	2,7
Средний Восток	0,3

Несмотря на ряд, прежде всего, экологических преимуществ использования биомассы в качестве источника энергии, существует ряд проблем, которые необходимо решить в каждом конкретном случае при выборе данного вида энергоресурса.

Задачей исследования является определение технологических показателей и сложности проблем использования различных видов биомассы, а также интегральных показателей, позволяющих оценить положительные и отрицательные стороны использования различных топлив.

Изложение основного материала исследования

При использовании различных топлив для сжигания в котлах основными показателями являются:

- стоимость МДж энергии при сжигании данного вида топлива;
- экологические показатели горения топлива: эмиссия диоксида серы, оксидов азота, выход золы и возможность ее использования или безопасного хранения;
- наличие данного вида топлива при любой политической обстановке и любой погоде;
- сложность транспортировки топлива;
- сложность оборудования для предподготовки топлива к сжиганию;
- необходимость решения проблем с хранением топлива.

При использовании энергетических культур в качестве топлива важным фактором является выход или урожайность биомассы в т/га, а также расстояние от территорий выращивания до потребителя. Урожайность зависит от таких факторов: расположение, климатическая зона и погода, природа почвы, запасы воды и питательных веществ, тип растений [4].

В биомассе содержатся различные количества целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина и относительно небольшое количество липидов, белков, простых сахаров и крахмалов. Три первых компонента являются основными составляющими и называются лигноцеллюлозой. Содержание отдельных компонентов в различных растениях представлено в таблице 2. Содержание и состав золы в биотопливе оказывает значительное влияние на процесс горения и прежде всего воспламенение топлива. По составу золы биомассу подразделяют на три группы. Зола с высоким содержанием кальция и калия получается после сжигания древесной биомассы. При сжигании травянистых видов биотоплива получается зола с высоким содержанием кремния и относительно низким содержанием кальция и калия. Наряду с этим, при сжигании соломы злаковых культур получается зола с относительно высоким содержанием

калия и хлора. Это создает ряд проблем с коррозией поверхностей нагрева. Третий тип золы с высоким содержанием кальция, калия и фосфора получается при сжигании стеблей подсолнечника и рапсовой соломы.

Таблица 2 – Лигноцеллюлозные составляющие отдельных видов биомассы

Лигноцеллюлозные остатки	Гемицеллюлоза (%)	Целлюлоза (%)	Лигнин (%)	Зола (%)
Початки кукурузы	35	45	15	1,36
Бумага	0	85–99	0–15	1,1–3,9
Рисовая солома	24	32,1	18	Данные отсутствуют (ДО)
Ячменная солома	24–29	31–34	14–15	5–7
Овсяная солома	27–38	31–37	16–19	6–8
Солома ржи	27–30	33–35	16–19	2–5
Садовая трава (средней зрелости)	40	32	4,7	ДО
Слоновая трава	24	22	23,9	6
Древесина хвойных деревьев	20,7	49,8	27,0	ДО
Солома кукурузная	30,88	51,53	17,59	ДО
Свиные отходы	28	6,0	ДО	ДО
Твердый навоз крупного рогатого скота	1,4–3,3	1,6–4,7	2,7–5,7	ДО
Злаки	35–50	25–40	10–30	ДО
Мягкая древесина	24,4	45,80	28,00	1,7
Твердая древесина	31,30	45,30	21,70	2,7
Кора древесины	29,80	24,80	43,80	1,60
Солома пшеницы	39,10	28,80	18,60	13,50
Древесина бука	31,80	45,80	21,90	0,4
Просо	32,10	37,10	17,20	ДО
Березовая древесина	25,70	40,00	15,70	ДО

Важным показателем при сжигании биотоплива является температура плавления золы (ТПЗ). При низкой ТПЗ происходит зашлакованность поверхностей нагрева, что усложняет эксплуатацию котлов.

Существует несколько вариантов превращения биотоплива в полезную форму энергии. Относительно простым методом является сжигание биомассы в слое на колосниковой решетке. Этот метод применим для котлов относительно невысокой производительности. Следующим вариантом является пиролиз биотоплива. При пиролизе получается более удобное в использовании в различных технологических процессах и в коммунальном хозяйстве газообразное топливо. Пиролиз представляет собой относительно медленную химическую реакцию, происходящую при низких температурах. Состав продуктов пиролиза биомассы зависит от температуры и скорости нагрева биомассы, типа и размеров используемых катализаторов. Основными компонентами пиролиза древесной биомассы являются: окись и двуокись углерода, метан и водород.

Более быстрым процессом по сравнению с пиролизом является газификация – термохимическая конверсия биомассы путем частичного ее окисления при высоких температурах.

В процессе газификации биомассы получается газ с теплотворной способностью $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 11,2\text{--}14,1 \text{ МДж/м}^3$ со следующим составом: водород – 30–40 %, окись углерода 20–30 %, метан 10–15 %, диоксид углерода 15–20 %, этилен – 1 %, вода – 6 %, азот – 1 % [5].

Следующим направлением утилизации энергетического потенциала биомассы является анаэробное сбраживание. В этом процессе биомасса преобразуется в анаэробной среде в биогаз в отсутствие кислорода. Эта технология широко используется для переработки влажных растительных отходов [6].

Важной характеристикой товарной биомассы является ее теплотворная способность. Взаимосвязь между содержанием лигнина в биомассе и теплотворной способностью приведена в таблице 3.

Таблица 3 – Взаимосвязь между содержанием лигнина в биомассе и ее теплотворной способностью [7]

Тип биомассы	Содержание лигнина, %	Теплотворная способность, МДж/кг
Кукурузные початки	15,19	17,97
Кукурузная солома	17,39	18,20
Пшеничная солома	20,98	18,51
Твердая древесина	21,89	18,59
Мягкая древесина	32,55	19,53
Хвойная древесина	31,58	19,45
Древесная кора	44,13	20,57
Древесина ясеня китайского	25,75	18,93

Увеличение содержания в биотопливе углерода и водорода повышает его теплотворную способность, а кислород ее снижает. При сравнении физико-химических характеристик угля и биомассы последняя содержит меньше углерода, больше кислорода и более высокий выход летучих веществ. В таблице 4 представлены данные физико-химических и энергетических свойств биомассы и угля.

Таблица 4 – Усредненные физико-химические свойства биомассы и угля [8]

Свойства	Единица измерения	Биомасса	Уголь
Плотность топлива	кг/м ³	500	1300
Размер частиц	мм	3	100
Содержание углерода	%	43–54	65–85
Содержание кислорода	%	35–45	2–15
Содержание серы	%	max 0,5	0,5–7,5
Содержание SiO ₂	%	23–49	40–60
Содержание K ₂ O	%	4–48	2–6
Содержание Al ₂ O ₃	%	2,4–9,5	15–25
Содержание Fe ₂ O ₃	%	1,5–8,5	8–18
Температура возгорания	°C	418–426	490–595
Теплотворная способность	МДж/кг	17–21	23–28

Отрицательной характеристикой биомассы является относительно высокая влажность, которая может изменяться от малых значений до почти 60 % для зеленой массы. Высушенная биомасса является гидрофильным материалом, имеющим тенденцию абсорбировать влагу из атмосферы даже при ее хранении в закрытых помещениях. Длительное хранение биомассы является проблематичным, так как при содержании влаги более 20 % возникает разогрев кип вследствие ускорения микробиологической респираторной активности и существенного ухудшения физических свойств топлива.

Для снижения биологической активности бактерий при длительном хранении биомассы применяют четыре метода:

- хранение биомассы в брикетах, позволяющее уменьшить поверхность контакта и

снизить уровень биологической активности;

- использование фунгицидов или других химических веществ, подавляющих биологические процессы;
- предварительная сушка биотоплива;
- охлаждение хранящегося биотоплива до низких температур также обеспечивает снижение активности биологических процессов деградации топлива.

Все указанные факторы приводят к увеличению затрат на получение энергии с использованием биотоплива.

При использовании биомассы в качестве топлива для получения электрической энергии придется менять практику генерации энергии – вместо тепловых электростанций большой мощности с доставкой твердого топлива железнодорожным транспортом сооружать относительно небольшие тепловые электростанции, доставка топлива к которым будет осуществляться в основном автомобильным транспортом. Альтернативным решением является применение газификации биотоплива и генерация энергии на тепловых электростанциях с комбинированным циклом генерации с существенным повышением коэффициента полезного действия генерации, что позволяет значительно уменьшить дополнительные затраты на доставку и хранение биотоплива.

Интегральным показателем использования энергоносителей является топливная составляющая стоимости энергии. Кроме стоимости топлива она зависит от технологических характеристик оборудования, на котором осуществляется генерация. В таблице 5 приведены сравнительные характеристики использования различных энергоносителей для генерации энергии.

Таблица 5 – Сравнительная характеристика генерации электроэнергии с использованием различных энергоносителей и ископаемого топлива [8]

Тип топлива	Калорийность, МДж/кг (м ³)	Удельный расход условного топлива, г/МДж	Удельный расход реального топлива, г/МДж	Цена топлива, руб/кг*	Топливная составляющая стоимости энергии, руб/МДж
Традиционный парогазовый цикл ($\eta = 0,37$)**					
Солома	17	91,67	157,9	3,5	0,55
Рапсовое масло	37,1	91,67	72,4	21,0	1,52
Антрацит	30,0–35,0	91,67	82,7	2,0	0,29
Биогаз	22,0	91,67	121,5	0,2 долл/м ³	1,55
Природный газ	31,7	91,67	84,7	0,26 долл/м ³	1,41
				0,35 долл/м ³	1,90
Комбинированный цикл генерации энергии ($\eta = 0,57$)					
Солома	17	60	103,4	3,5	0,36
Рапсовое масло	37,1	60	47,4	21,0	0,99
Антрацит	30,0–35,0	60	54,0	2,0	0,189
Биогаз	22,0	60	79,8	0,2 долл/м ³	1,02
Природный газ	31,7	60	55,2	0,26 долл/м ³	0,92
				0,35 долл/м ³	1,24
Котельные устройства для генерации энергии ($\eta = 0,92$)					
Солома	17	36,1	62	3,5	0,22
Рапсовое масло	37,1	36,1	28,52	21,0	0,60
Антрацит	30,0–35,0	36,1	32,5	2,0	0,11
Биогаз	22,0	36,1	48,0	0,2 долл/м ³	0,61
Природный газ	31,7	36,1	33,2	0,26 долл/м ³	0,55
				0,35 долл/м ³	0,74

*курс доллара принят 64 руб/долл; ** η – КПД генерации энергии

Выводы

1. Биомасса является перспективной формой получения возобновляемой энергии, позволяющей заменить традиционные ископаемые энергоресурсы и обеспечить снижение рисков глобального изменения климата.

2. Теплотворная способность биомассы (в расчете на сухую массу) находится в пределах 17–21 МДж/кг. Критерием выбора типа растений в качестве биологического сырья является скорость роста и присущие данному растению свойства: влажность, зольность, содержание щелочных компонентов. Последние свойства влияют на эксплуатационные характеристики процесса сжигания топлива.

3. Разные типы биомассы могут использоваться путем их сжигания в котельных установках для генерации пара и получения электрической энергии в турбогенераторах. Некоторые типы биомассы предпочтительно подвергать биохимическому сбраживанию или газификации для получения газообразного топлива, использование которого позволяет увеличить коэффициент полезного действия при генерации электрической энергии в комбинированном цикле: газовая турбина – котел утилизатор – паровой турбогенератор.

4. Учитывая урожайность энергетических культур и температурные условия в районе Донбасса, предпочтительными энергетическими культурами в регионе являются древесина ивы и тополя, а также растительные культуры: мискантус и просо.

5. Уменьшение энергетического потенциала биомассы, изменение условий ее доставки и хранения вызывает необходимость сокращения расстояния от района выращивания до потребителя и снижения установленной мощности энергетических предприятий.

Список литературы

1. Abbasi, T. Biomass Energy and the Environmental Impacts Associated With Its Production and Utilization / T. Abbasi, S. A. Abbasi // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. – 2010 ; 14:919 – 37.
2. A Review on Biomass As a Fuel For Boilers / R. Saidur, E. A. Abdelaziz, A. Demirbas [et all.] // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – June 2011. – Vol. 15, Issue 5. – P. 2262–2289.
3. Demirbas, A. Potential Applications of Renewable Energy Sources, Biomass Combustion Problems in Boiler Power Systems and Combustion Related Environmental Issues / A. Demirbas // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2005. – Vol. 31. – P. 171–92.
4. Высоцкий, С. П. Экологические показатели использования возобновляемых ресурсов для генерации электрической и тепловой энергии / С. П. Высоцкий, В. С. Титкова // *Вести автомобильно-дорожного института = Bulletin of The Automobile And Highway Institute*. – 2019. – № 3. – С. 26–34.
5. Combustion properties of biomass / B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. Miles, JRTR Miles // *Fuel Process Technol.* – 1998. – Vol. 54. – P. 17–46.
6. Sheng, C. Estimating the Higher Heating Value of Biomass Fuels From Basic Analysis Data / C. Sheng, JLT Azevedo // *Biomass Bioenergy*. – 2005. – Vol. 28. – P. 499–507.
7. Demirbas, A. Relationships Between Lignin Contents and Fixed Carbon Contents of Biomass Samples. *Energy Convers Manage.* – 2003;44:1481–6.
8. Высоцкий, С. П. Перспективы использования энергоносителей для производства тепловой и электрической энергии / С. П. Высоцкий, А. В. Кондрыкинская // *Вестник Луганского национального университета им. В. Даля*. – 2019. – № 10 (28). – С. 194–201.

С. П. Высоцкий¹, В. А. Иванченко¹, А. В. Мурга²

1 – ГОУВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», г. Макеевка, 2 – Автомобильно-дорожный институт ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Горловка
Особенности использования возобновляемых энергоресурсов

Альтернативным энергоресурсом по отношению к ископаемым видам топлива является биомасса. Биомасса является одним из давно используемых источников энергии, обладающих специфическими свойствами. Биомасса имеет несколько проблем накопления энергии. Она является универсальным топливом, позволяющим производить биогаз, жидкое топливо, тепловую и электрическую энергию.

Для получения из биомассы наиболее удобного для использования в промышленности и коммунальном хозяйстве газообразного топлива могут применяться пиролиз, газификация и анаэробное сбраживание. Рас-

смотрены краткие характеристики этих процессов. Интегральными характеристиками биомассы являются: стоимость энергии в МДж/кг при использовании биомассы в качестве энергетического сырья, наличие биомассы при любой погоде и любой политической обстановке, урожайность при выращивании растительной биомассы, проблемы, связанные с хранением топлива, выбросы в результате сжигания, доставка топлива и рациональная мощность энергетического оборудования. Изменение средств доставки биотоплива, а также технологии его хранения вызывают необходимость изменения единичной мощности энергетического оборудования.

Биомасса содержит целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин и небольшое количество липидов, белков, простых сахаров и крахмалов. Важными компонентами являются также содержание неорганических соединений, от которых зависит температура плавления золы, ее коррозионные свойства и возможность использования золы в народнохозяйственных целях. По сравнению с углем биомасса имеет меньше углерода, больше кислорода, более высокое содержание водорода и большее содержание летучих компонентов. По сравнению с золой, получаемой при сжигании угля, прилипчивость и прочность отложений после сгорания биомассы больше. Увеличиваются также выбросы твердых частиц после сжигания биомассы.

При горении биомассы в котельных установках небольшой и средней мощности предпочтительно сжигание на колосниковых решетках, а также сжигание в кипящем слое. Применение биомассы в качестве топлива позволяет значительно снизить выбросы загрязнений в атмосферу, таких как диоксид серы и окислы азота.

Приведены значения топливной составляющей затрат на генерацию тепловой энергии при текущих ценах на различные виды энергетических топлив.

БИОТОПЛИВО, ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ, СЖИГАНИЕ, ЛИГНОЦЕЛЛЮЛОЗА, СОЛОМА, ГЕНЕРАЦИЯ ЭНЕРГИИ

S. P. Vysotskiy¹, V. A. Ivanchenko¹, A. V. Murga²

1 – Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, Makeevka

2 – Automobile and Road Institute of Donetsk National Technical University, Gorlovka

Features of Renewable Energy Resources Use

An alternative energy resource to fossil fuels is biomass. Biomass is one of the long-used sources of energy with specific properties. Biomass has several energy storage problems. It is a universal fuel allowing to produce biogas, liquid fuel, thermal and electric energy.

To obtain gaseous fuel most suitable for use in industry and municipal services from biomass, pyrolysis, gasification, and anaerobic digestion can be used. Brief characteristics of these processes are considered. The integral characteristics of biomass are: the cost of energy in MJ/kg when using biomass as energy raw materials, the presence of biomass in any weather and any political situation, the yield when growing plant biomass, problems associated with fuel storage, emissions from combustion, fuel delivery and rational power of energy equipment. Changes in the delivery of biofuels, as well as storage technologies, necessitate changes in the unit capacity of energy equipment.

Biomass contains cellulose, hemicellulose, lignin and a small amount of lipids, proteins, simple sugars and starches. Important components are also the content of inorganic compounds, on which the melting temperature of the ash, its corrosive properties and the possibility of using the ash for economic purposes depend. Compared to coal, biomass has less carbon, more oxygen, a higher hydrogen content and a higher content of volatile components. Compared to the ash obtained by burning coal, the adherence and strength of deposits after the combustion of biomass is greater. Particulate matter emissions also increase after biomass burning.

When burning biomass in boiler plants of small and medium power, it is preferable to burn on grates, as well as combustion in a fluidized bed. The use of biomass as a fuel can significantly reduce atmospheric pollution, such as sulfur dioxide and nitrogen oxides.

The values of the fuel component of the cost of generating thermal energy are given at current prices for various types of energy fuels.

BIOFUEL, HEAT CAPACITY, BURNING, LIGNOCELLULOSE, STRAW, ENERGY GENERATION

Сведения об авторах:

С. П. Высоцкий

SPIN-код: 7497-0100
Scopus Author ID: 7004891012
ORCID ID: 0000-0002-2988-7245
Телефон: +38 (071) 391-35-97
Эл. почта: sp.vysotsky@gmail.com

А. В. Мурга

Телефон: +38 (071) 391-35-97

В. А. Иванченко

Телефон: +38 (071) 391-35-97

Статья поступила 15.01.2020

© С. П. Высоцкий, В. А. Иванченко, А. В. Мурга, 2020

Рецензент: М. В. Коновальчик, канд. техн. наук, АДИ ГОУВПО «ДОННТУ»