

6. Бродский, Р. Е. Медленная фрагментация при квадратичном законе дробления [Текст] / Р. Е. Бродский, Ю. П. Вирченко // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2013. – Вып. 2 (47). – С. 63–66.
7. Ziff, R. M. An explicit solutions to a discrete fragmentation model [Text] / R. M. Ziff // Journal of Physics A: Mathematical and General. – 1992. – Vol. 25, Issue 9. – P. 2569–2576. doi: 10.1088/0305-4470/25/9/027.
8. Кутовой, В. А. Термовакuumный метод получения нанодисперсных материалов [Текст] / В. А. Кутовой, Ю. Г. Казаринов, А. С. Луценко, А. А. Николаенко, В. И. Ткаченко // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – Вып. 103, № 2 (90). – С. 153–157.
9. Кошельник, В. М. Энергосберегающая термовакuumная сушка и измельчения бурого угля [Текст] : XXI міжн. наук.-прак. конф. / В. М. Кошельник, В. А. Кутовой, Ю. Г. Казаринов, А. С. Луценко // Наука техніка, технологія, освіта, здоров'я. – Харків, Україна, 2013. – С. 297.
10. Пат. 81138 Україна. МПК F26B9/06. Пристрій для термовакuumного сушіння [Текст] / Кутовий В. О. – №а200507488; заявл. 27.07.2005; опубл. 10.12.07. Бюл. №20. – 5 с.

Розроблена енергозберігаюча технологія двохстадійної газифікації дрібнодисперсної біомаси для когенераційних установок малої потужності на базі ДВЗ. Приведені результати експериментальних досліджень технології двохстадійної газифікації біомаси. Представлені результати оцінки ефективності роботи ДВЗ на різних видах палива. Розроблена технологічна схема когенераційної установки «газогенератор+ДВЗ» та проведена оцінка ефективності роботи на основі ексергетичного і економічного аналізу

Ключові слова: біомаса, двохстадійна газифікація, когенераційна установка, двигун внутрішнього згорання, ексергетичний аналіз

Разработана энергосберегающая технология двухстадийной газификации мелкодисперсной биомассы для когенерационных установок малой мощности на базе ДВС. Приведены результаты экспериментальных исследований технологии двухстадийной газификации биомассы. Представлены результаты оценки эффективности работы ДВС на различных видах топлива. Разработана технологическая схема когенерационной установки «газогенератор+ДВС» и проведена оценка эффективности работы на основе эксергетического и экономического анализа

Ключевые слова: биомасса, двухстадийная газификация, когенерационная установка, двигатель внутреннего сгорания, эксергетический анализ

УДК 621.314:662.76.034:536.72

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30986

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГО- СБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ДВУХСТАДИЙНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ БИОМАССЫ ДЛЯ КОГЕНЕРАЦИОННЫХ УСТАНОВОК

Е. В. Кремнева

Ассистент

Кафедра промышленной теплоэнергетики
Национальная металлургическая
академия Украины
пр. Гагарина, 4, г. Днепропетровск,
Украина, 49005

E-mail: kati-denis@rambler.ru

1. Введение

Необходимость сокращения потребления природного газа в Украине на сегодняшний день является общегосударственной задачей, направленной на повышение энергетической безопасности страны. Решение этой задачи регламентируется на законодательном уровне путем стимулирования развития технологий, использующих возобновляемые источники энергии [1–3]. Среди таких источников доступным является биомасса. Наряду с этим имеется потребность в автономных источниках электрической и тепловой энергии для промышленных и сельскохозяйственных предприятий, которая может быть удовлетворена за счет применения когенерационных установок. Использование биомассы в когенерационных установках

позволяет получать электрическую и тепловую энергию с максимальным энергетическим и экологическим эффектом. Наиболее перспективным является использование когенерационных установок малой мощности (до 1 МВт) на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с предварительной газификацией биомассы. Полученный путем газификации биомассы генераторный газ, содержит значительное количество смол и не может быть использован в качестве топлива для ДВС без дополнительной очистки. Включение в схему когенерационной установки системы очистки от смол значительно повышает капитальные и эксплуатационные затраты, а соответственно увеличивает себестоимость вырабатываемой энергии. Технологии газификации биомассы, ориентированные на получение газа с малым содержанием смол, изучены недостаточно. Практическая реа-

лизация таких технологий носит единичный характер, а данные этих исследований недостоверны, изменяются в широком диапазоне и зависят как от технологии газификации, так и от вида используемой биомассы.

Для широкого внедрения технологий энергетического использования биомассы в когенерационных установках необходимо разработать принципиально новую технологию переработки биомассы, а также соответствующие конструктивные решения для ее реализации.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Основой для развития когенерационной биоэнергетики является наличие сырьевой базы. По состоянию на 2013 год оценка энергетического потенциала биомассы в Украине в соответствии с данными, приведенными в работах [4], представлена в табл. 1.

Таблица 1

Энергетический потенциал биомассы

Вид биомассы	млн. т. у. т./год
Энергетические культуры	9,13
Отходы сельскохозяйственного производства	7,24
Солома	5,38
Газообразное топливо (биогаз)	1,5
Жидкие топлива (биодизель, биоэтанол)	1,46
Древесная биомасса	1,77
Торф	0,4

Значительную часть биомассы составляют отходы сельскохозяйственного производства (шелуха подсолнечника, лузга гречихи и пр.) солома и отходы древесины, энергетический потенциал которых суммарно составляет около 14 млн. т. у. т./год и в настоящее время почти не используется.

Внедрение и развитие в Украине технологий энергетического использования биомассы в когенерационных установках должно учитывать в первую очередь опыт эксплуатации таких установок в странах ЕС, США, Индии и др. [5].

Среди технологий энергетического использования биомассы в когенерационных установках малой мощности на базе ДВС в основном используется газификация биомассы, как в плотном, так и кипящем слое. Выбор технологии газификации в первую очередь связан с содержанием смол в генераторном газе. Содержание смол в генераторном газе в зависимости от технологии газификации приведены в табл. 2.

Производители ДВС указывают различные требования к содержанию смол в генераторном газе приемлемые для работы выпускаемых ими двигателей, которые изменяются в диапазоне 5,0–100,0 мг/м³. Таким образом, в соответствии с данными, приведенными в табл. 2, ни одна из существующих технологий газификации биомассы не удовлетворяет требованиям производителей ДВС к содержанию смол в генераторном газе.

На сегодняшний день существует ряд технологий очистки генераторного газа от содержащихся в нем смол [6]. Технологии, основанные на каталитическом,

термическом и физическом методе удаления смол. Однако применение данных технологий очистки в когенерационных установках малой мощности на базе ДВС значительно удорожает и утяжеляет установку в целом и делает ее неконкурентоспособной.

Таблица 2

Содержание смол в газе в зависимости от технологии газификации

Технология газификации	Содержание смол в газе, г/м ³
Газификация биомассы в плотном слое с восходящим движением газа	6,7–100,0
Газификация биомассы в плотном слое с нисходящим движением газа	0,025–5,0
Газификация биомассы в кипящем слое	0,16–40,0

Наряду с применением традиционных технологий газификации биомассы в когенерационных установках на базе ДВС сегодня активно проводятся исследования по разработке технологии газификации биомассы, ориентированной на получения газа с малым содержанием смол.

В основном такие исследования базируются на модернизации технологии газификации биомассы в плотном слое с нисходящим движением газа. В основу модернизации положена многостадийная технология газификации биомассы, заключающаяся в разделении процесса пиролиза и газификации протекающих в одном или разных реакторах.

В работе [7] предложены газогенераторы основанные на комбинации принципов разделения процесса пиролиза и газификации, а также дифференциации подачи воздуха в слой топлива. Содержание смол в генераторном газе, полученном в установках, работающих по данной технологии, находится в пределах 15±35 мг/м³. Однако существенным техническим недостатком такой схемы является сушка и пиролиз биомассы в шнековых питателях, что ограничивает вид используемой биомассы. Такие виды биомассы как рисовая шелуха, солома, лузга подсолнечника, лузга гречихи, достигая пластинчатого состояния в период пиролиза, образуют на поверхности слоя топлива спекшуюся корку, нарушающую газопроницаемость слоя. Переработка мелкодисперсной биомассы на основе данного способа не возможна.

В качестве ДВС для когенерационных установок могут использоваться:

- газовые ДВС;
- модернизированные дизельные ДВС работающие 100 % на генераторном газе;
- модернизированные дизельные ДВС работающие одновременно на дизельном топливе и на генераторном газе в разных соотношениях;
- модернизированные ДВС работающие одновременно на бензине и на генераторном газе в разных соотношениях.

При переводе газового ДВС с природного газа на генераторный газ, не возникает никаких трудностей кроме потери мощности двигателя до 55,0 % вследствие низкой теплоты сгорания генераторного газа от 4,5±6,5 МДж/м³. В этом случае работы по реконструкции двигателя сводятся к минимуму и связаны лишь с перерегулировкой двигателя.

При переводе дизелей на генераторный газ рабочая смесь воздуха и генераторного газа образуется не в цилиндрах, а в специальном смесительном устройстве, устанавливаемом перед двигателем. Существует два способа перевода дизельных двигателей с жидкого топлива на генераторный газ.

Первый способ предусматривает работу двигателя на топливе двух видов одновременно: генераторном газе и жидком дизельном топливе. При этом на номинальной нагрузке 80,0÷85,0 % мощности вырабатывается на генераторном газе, а 20,0÷15,0 % – на жидком топливе. Второй способ предусматривает использование в качестве топлива для двигателя только генераторного газа. Перевод на чисто газовый режим серийно выпускаемых дизельных двигателей предусматривает: дополнительное оборудование двигателя системами подачи и принудительного зажигания смеси; существенную переделку системы регулирования; увеличение степени сжатия. Степень сжатия может оставаться и без изменения, однако это приведет к снижению к. п. д. двигателя с 45,0 % до 30,0 % и как следствие к снижению мощности двигателя на 20,0÷30,0 %.

При переводе ДВС, работающего на бензине на генераторный газ, возникают проблемы, связанные с падением мощности двигателя, которое составляет 40,0÷50,0 %. Во избежание потерь мощности в конструкцию двигателя вносятся соответствующие изменения: устанавливаются новые головки цилиндров с повышенной степенью сжатия; устраняются подогрев газозооной смеси и увеличиваются сечения впускных трубопроводов. В результате чего падение мощности двигателя не будет превышать 20,0÷35,0 %.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является разработка энергосберегающей и экологически чистой технологии получения электрической и тепловой энергии на основе двухстадийного процесса газификации биомассы.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- разработка двухстадийного процесса газификации мелкодисперсной биомассы и определение эффективных режимов процесса;
- проведение экспериментальных исследований двухстадийного процесса газификации биомассы в плотном слое;
- оценка эффективности работы ДВС на различных видах топлива;
- разработка технологической схемы когенерационной установки «газогенератор+ДВС», реализующей двухстадийный процесс газификации мелкодисперсной биомассы, а также оценка эффективности работы схемы на основе экспериментального и экономического анализа.

4. Методы и результаты экспериментальных исследований технологии двухстадийной газификации биомассы

Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования [8, 9] позволили разработать

двухстадийный процесс газификации мелкодисперсной биомассы, заключающийся в разделении процессов пиролиза мелкодисперсной биомассы и газификации коксового остатка. Образующийся в процессе пиролиза пиролизный газ, содержащий значительное количество тепловой энергии, образующийся в процессе газификации коксового остатка генераторный газ с минимальным содержанием смол без дополнительной очистки используется в качестве топлива в ДВС. При этом первая стадия двухстадийного процесса газификации реализуется в виде процесса окислительного пиролиза в плотном слое в режиме фильтрационного горения.

Источником тепла в данном случае служит тепло выделившееся за счет частичного окисления пиролизных газов. Теплота, выделившаяся от частичного окисления пиролизных газов, расходуется на сушку, нагрев и пиролиз ниже лежащих слоев биомассы.

В качестве окислителя используется воздух. Слой биомассы разжигается со стороны противоположной подачи воздуха. Выделившиеся пиролизные газы содержащие CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂ и значительное количество смол, реагируя с кислородом воздуха, образуют фронт горения, который смещается навстречу потоку воздуха. За фронтом горения образуется раскаленный коксовый остаток. Пиролизные газы и продукты их частичного окисления, двигаясь в одном направлении с потоком воздуха, проходят через слой раскаленного коксового остатка. При этом содержащиеся в пиролизных газах смолы разлагаются по мере продвижения газа в слое за счет действия высоких температур в неконденсирующиеся газы (CO, CO₂, H₂, и др.).

Таким образом, данная организация процесса окислительного пиролиза позволяет реализовать процесс без использования внешнего источника тепла на, а также снизить содержание смол в пиролизных газах. Кроме того, за счет регулирования расхода воздуха, возможно изменять количество теплоты, выделяющейся при частичном окислении пиролизных газов, необходимое для сушки биомассы. Это позволяет использовать биомассу со значительной влажностью.

Для исследования двухстадийного процесса газификации биомассы в плотном слое в лаборатории кафедры «Промышленной теплоэнергетики» Национальной металлургической академии Украины была создана опытная установка тепловой мощностью по исходной биомассе до 100 кВт. Схема опытной установки по исследованию двухстадийного процесса газификации биомассы в плотном слое представлена на рис. 1. В качестве мелкодисперсной биомассы при проведении исследований использовались скорлупа грецкого ореха и лужга подсолнечника.

Реактор (пиролизер/газификатор) представлял собой вертикальный аппарат шахтного типа диаметром 0,550 м и высотой 1 м. В верхней части реактор оборудован люком загрузки биомассы, а в нижней части патрубком для подачи воздуха. Слой биомассы размещался на стальной воздухораспределительной решетке. В качестве тепловой изоляции использовались листы из стекловолокна, экранированные жаростойкой алюминиевой фольгой.

Технологически двухстадийный процесс газификации биомассы был организован следующим об-

разом. Предварительно взвешенная биомасса через герметично закрываемый люк загружалась в камеру реактора.

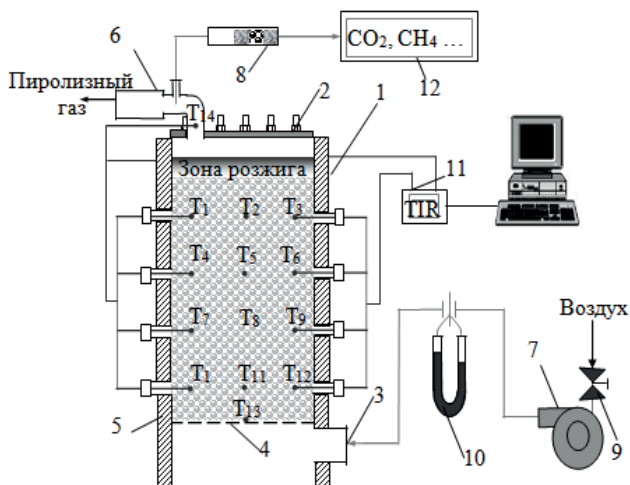


Рис. 1. Схема опытной установки по исследованию двухстадийного процесса газификации биомассы в плотном слое: 1 – реактор; 2 – люк загрузки топлива; 3 – патрубок для подачи воздуха; 4 – воздухораспределительная решетка; 5 – тепловая изоляция; 6 – горелочное устройство; 7 – воздуходувка типа ТГ-0,25; 8 – фильтр для очистки газа от конденсирующихся продуктов; 9 – вентиль для регулирования расхода воздуха; 10 – диафрагма для измерения расхода воздуха и U-образный манометр; 11 – вторичный прибор для измерения температуры; 12 – газовый хроматограф; T₁ – T₁₄ – термоэлектрические термометры

Слой биомассы разжигался в верхней части реактора через люк загрузки при помощи газового запальника. Подача воздуха в слой осуществлялась в нижнюю часть реактора, т. е. со стороны противоположной зоне розжига.

Образовавшиеся в процессе пиролиза газы сжигались в горелочном устройстве. На начальной стадии процесса пиролиза для поддержания горения пиролизных газов использовался газовый запальник.

После окончания процесса пиролиза реализовывалась вторая стадия двухстадийного процесса – газификация раскаленного коксового остатка. Подача воздуха в слой раскаленного кокса, также как и на первой стадии, осуществлялась снизу. Образовавшиеся генераторные газы сжигались в горелочном устройстве.

Расход воздуха определялся по перепаду давления на расходомерной диафрагме. Измерение перепада давления на диафрагме осуществлялось с помощью водяного U-образного манометра.

Измерение температуры в слое осуществлялось в центральной и периферийной части с помощью термоэлектрических термометров типа ТХА с диаметром электродов 0,5 мм. Для изоляции термоэлектродов использовались фарфоровые чехлы. В качестве вторичного прибора, при измерении температуры, использовался программно-аппаратный комплекс, позволяющий в режиме реального времени одновременно

контролировать до 24 входных сигналов от термоэлектрических термометров.

Анализ состава пиролизного и генераторного газов осуществлялся путем отбора проб в герметичные камеры и в дальнейшем производился на газовом хроматографе. В ходе экспериментальных исследований осуществлялся визуальный контроль за цветовой дифференциацией газового факела и его фотографирование. Также выполнялся технический анализ проб коксового остатка, и определялось содержание смол в пиролизном и генераторном газе.

В результате первой серии экспериментов был установлен оптимальный диапазон удельного расхода воздуха с точки зрения устойчивости протекания процесса окислительного пиролиза биомассы в плотном слое, который составил 25,0÷55,0 м³/(м²·ч). Снижение расхода воздуха менее 25,0 м³/(м²·ч) вызывает снижение температуры в слое биомассы (менее 500 °С) и последующее затухание процесса окислительного пиролиза в виду недостатка теплоты для реализации процесса. Увеличение расхода воздуха более 55,0 м³/(м²·ч) приводит к увеличению температуры в слое биомассы (более 800 °С) и переходу процесса пиролиза к процессу газификации.

Результаты экспериментальных исследований двухстадийного процесса газификации биомассы представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспериментальных исследований двухстадийного процесса газификации биомассы

Наименование показателей	Исследованные режимы	
	Скорлупа грецкого ореха	Лузга подсолнечника
Окислительный пиролиз биомассы		
Вес загружаемой биомассы, кг	41	10
Удельный расход воздуха, м ³ /(м ² ·ч)	40,0	
Температура процесса пиролиза, °С	670	630
Состав газа, об. %		
CO	5,6	6,7
H ₂	9,5	9,8
CO ₂	12,7	11,8
CH ₄	6,3	6,4
N ₂	57,3	56,3
O ₂	8,6	9,0
Выход пиролизного газа, м ³ /кг биомассы	1,16	1,07
Теплота сгорания пиролизного газа (с учетом содержания смол), МДж/м ³	8,1	8,3
Содержание смол, г/м ³	141,0	144,0
К.п.д. процесса окислительного пиролиза, %	98,0	97,5
Газификация коксового остатка		
Масса кокса, кг	12,4	2,44
Удельный расход воздуха на газификацию, м ³ /(м ² ·ч)	445,3	403,4
Температура процесса газификации, °С	950–1000	
Состав газа, об. %		
CO	29,4	26,4
H ₂	8,3	11,8
CO ₂	2,6	2,6
CH ₄	1,5	2,5
N ₂	58,1	56,6
O ₂	0,1	0,1
Выход газа, м ³ /кг кокса	4,5	3,8
Теплота сгорания генераторного газа, МДж/м ³	5,2	5,5
Содержание смолы, мг/м ³	6,5	7,1
К.п.д. процесса газификации коксового остатка, %	96,4	96,0

При обработке результатов экспериментальных исследований были составлены материальные элементные и тепловые балансы процессов окислительного пиролиза и газификации. При этом К. П. Д. процесса окислительного пиролиза достигает 98,0 % с учетом утилизации всех тепловых потоков. К. П. Д. процесса газификации коксового остатка без использования физической теплоты генераторного газа составляет в среднем 78,0 %. Использование физической теплоты генераторного газа позволяет повысить К.П.Д. процесса газификации в среднем до 96,4 %.

5. Методы и результаты расчетно-теоретических исследований работы ДВС на различных видах топлива

Необходимо отметить, что полученный на второй стадии процесса генераторный газ имеет сравнительно низкую теплоту сгорания 5,1–5,5 МДж/м³ газа. При переводе газового ДВС на такой генераторный газ снижение номинальной мощности двигателя может достигать 50,0 %.

В связи с этим в работе исследованы возможные варианты повышения теплоты сгорания газа путем применения в качестве окислителя в процессе газификации коксового остатка воздуха и пара в определенных соотношениях с разными температурами. При исследованиях использован термодинамический метод расчета равновесного состава газа по константам равновесия [10–12]. Результаты этих исследований, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетно-теоретических исследований процесса газификации коксового остатка

Наименование параметра	Варианты исследованных режимов		
	Воздух	Воздух + пар	Воздух + пар
Тип окислителя	Воздух	Воздух + пар	Воздух + пар
Температура окислителя, °С			
– воздух	20	20	450
– пар	–	100	100
Расход окислителя, м ³ /кг			
– воздух, м ³ /кг	3,71	2,71	1,94
– пар, кг/кг	–	0,35	0,55
Состав газа, об. %			
CO	29,7	32,7	35,9
H ₂	10,0	19,4	27,6
N ₂	58,4	46,4	35,5
CO ₂	1,90	1,50	0,90
Выход газа, м ³ /кг	4,94	4,70	4,29
Теплота сгорания газа, МДж/м ³	4,9	6,3	7,6

Как видно из табл. 4, использование в качестве окислителя при газификации коксового остатка воздуха и пара в определенных соотношениях позволяет увеличить теплоту сгорания генераторного газа до 7,6 МДж/м³.

В работе проведена комплексная оценка эффективности работы газового ДВС 100 % на генераторном газе, а также на смеси генераторного и природного газа в различных соотношениях. Расчет ДВС производился

с использованием методики изложенной в работе [13]. В основу, которой заложен метод теплового расчета действительного цикла ДВС. В результате выполнения теплового расчета, определяются основные параметры газа в характерных точках индикаторной диаграммы, что позволяет проанализировать особенности работы двигателя при использовании различных видов топлива. В ходе исследований получены зависимости эффективной мощности газового ДВС от вида используемого топлива (рис. 2), а также зависимость эффективной мощности ДВС при работе его на смеси природного и генераторного газов в различных соотношениях (рис. 3).

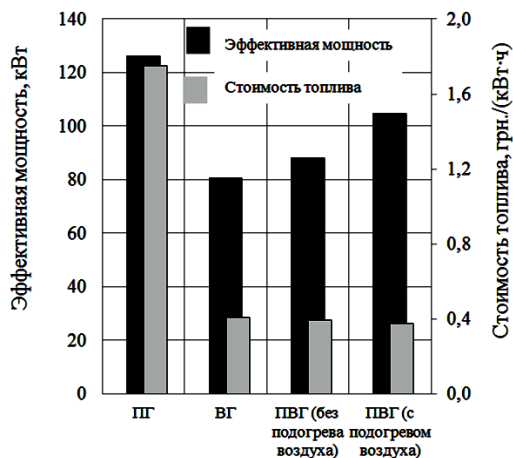


Рис. 2. Эффективная мощность газового ДВС в зависимости от вида используемого топлива: ПГ – природный газ, ВГ и ПВГ – генераторный газ, полученный путем воздушной и паровоздушной газификации коксового остатка

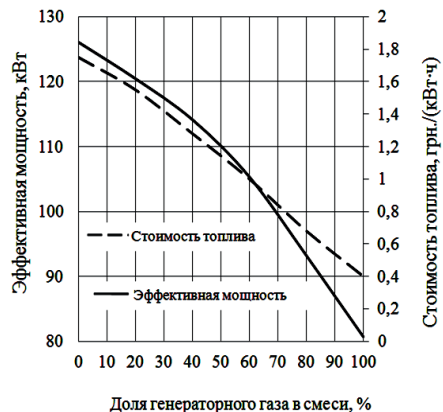


Рис. 3. Эффективная мощность газового ДВС при работе его на смеси природного и генераторного газов

Как видно из рис. 2, при переводе газового ДВС с природного газа на генераторный газ (ВГ) общее падение эффективной мощности двигателя достигает 36,0 %. При этом минимальное падение мощности составляет 16,0 % при работе ДВС на генераторном газе (ПВГ) с теплотой сгорания 7,6 МДж/м³. Стоимость выработки электрической энергии при работе двигателя на данном генераторном газе минимальная и составляет 0,39 грн./кВт· час).

Как показано на рис. 3, увеличение доли природного газа в смеси более 40,0 % приводит к повышению стоимости выработки электрической энергии до 1,04 грн/(кВт· час), т. е. соответствует стоимости электрической энергии из внешней энергосистемы.

6. Разработка схемы когенерационной установки и оценка эффективности ее работы

На основе исследований двухстадийного процесса газификации биомассы разработана технологическая схема когенерационной установки электрической мощностью 80,7 кВт приведенная на рис. 4.

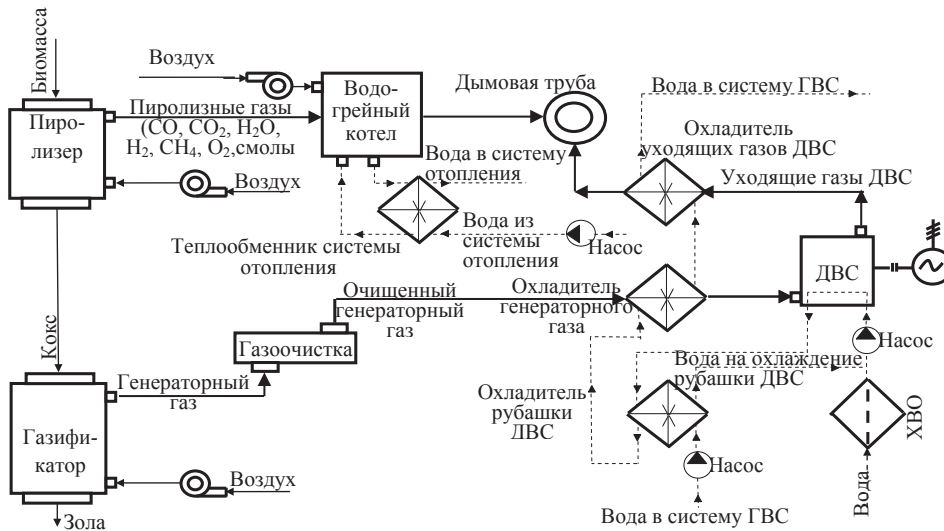


Рис. 4. Схема когенерационной установки электрической мощностью 80,7 кВт, тепловой мощностью 389,2 кВт

Для анализа эффективности работы предложенной схемы когенерационной установки разработана методика эксергетического анализа. В основу методики положено составление эксергетических балансов отдельных элементов оборудования схемы: пиро-

лизер, газификатор, блок «ДВС-электрогенератор», водогрейный котел, теплообменные аппараты.

В качестве биомассы в данной когенерационной установке используется лузга подсолнечника с расходом 1,1 кг₆/(кВт· час). Для выработки тепловой энергии в схеме предусмотрен водогрейный котел, топливом для которого служит пиролизный газ с теплотой сгорания 8,3 МДж/м³, полученный на первой стадии двухстадийного процесса газификации биомассы. Тепловая мощность водогрейного котла – 233 кВт. Суммарная тепловая мощность когенерационной установки при утилизации физической теплоты генераторного газа, продуктов сгорания ДВС и воды в системе охлаждения ДВС составляет – 389,2 кВт. Выработка электрической

энергии осуществляется в блоке «ДВС-электрогенератор». Топливом для ДВС служит генераторный газ с теплотой сгорания 5,1 МДж/м³, полученный на второй стадии двухстадийного процесса газификации биомассы.

В основу методики эксергетического анализа оценки эффективности работы когенерационной установки положено составление эксергетических балансов отдельных элементов оборудования схемы: пиролизер (рис. 5), газификатор (рис. 5), блок «ДВС-электрогенератор» (рис. 6), водогрейный котел (рис. 6), теплообменные аппараты [14].

Эксергетический к.п.д. когенерационной установки составил $\eta_{\Sigma}^{KV} = 45\%$. Себестоимость электрической и тепловой энергии с учетом эксплуатационных затрат и затрат на биомассу составит соответственно 0,55 грн/(кВт· час) и 49,5 грн/ГДж.

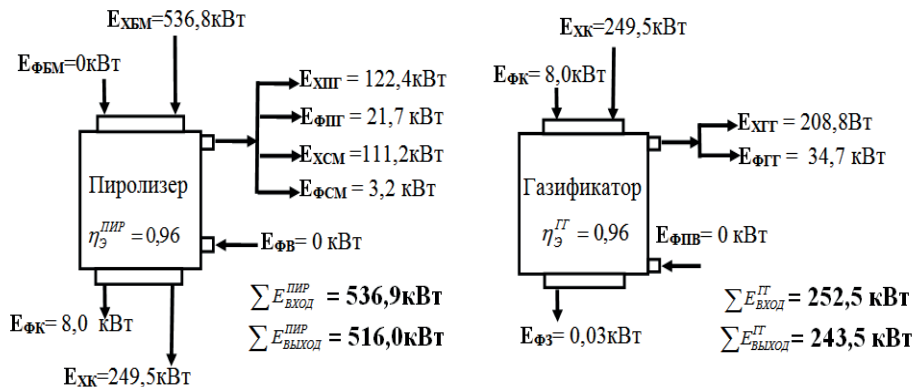


Рис. 5. Эксергетические балансы пиролизера и газификатора: $E_{ХБМ}$ – химическая эксергия биомассы; $E_{ФБМ}$ – физическая эксергия биомассы; $E_{ФВ}$ – физическая эксергия воздуха; $E_{ХК}$ – химическая эксергия кокосового остатка; $E_{ФК}$ – физическая эксергия кокосового остатка; $E_{ХПГ}$ – химическая эксергия пиролизных газов; $E_{ФПГ}$ – физическая эксергия пиролизных газов; $E_{ХСМ}$ – химическая эксергия смолы; $E_{ФСМ}$ – физическая эксергия смолы; $E_{ФВ}$ – физическая эксергия подогретого воздуха; $E_{ХГГ}$ – химическая эксергия генераторного газа; $E_{ФГГ}$ – физическая эксергия генераторного газа; $E_{ФЗ}$ – физическая эксергия золы

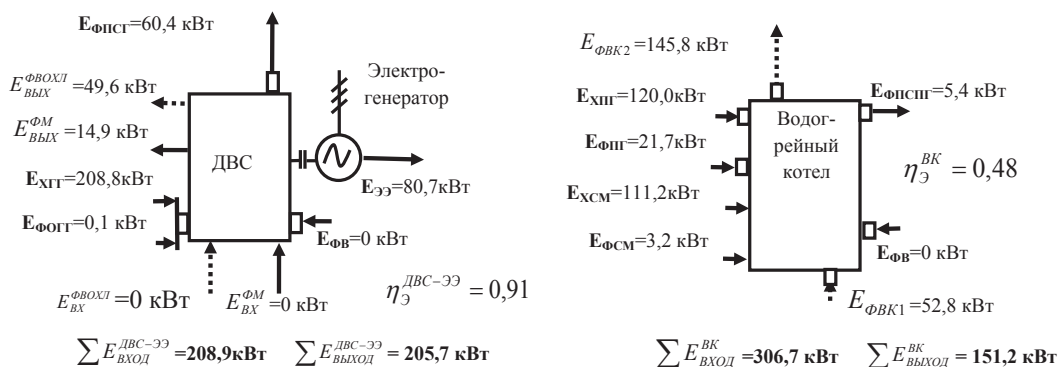


Рис. 6. Эксергетический баланс блока «ДВС-электрогенератор»: $E_{\text{ФОП}}$ – физическая эксергия охлажденного генераторного газа; $E_{\text{ФПСГ}}$ – физическая эксергия продуктов сгорания генераторного газа на выходе из ДВС; $E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ФВОХЛ}}$ – физическая эксергия воды на входе в систему охлаждения (рубашку) ДВС; $E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ФВОХЛ}}$ – физическая эксергия воды на выходе из системы охлаждения (рубашки) ДВС; $E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ФМ}}$ – физическая эксергия масла на выходе из ДВС; $E_{\text{ВЫХ}}^{\text{ФМ}}$ – физическая эксергия масла на выходе из ДВС; $E_{\text{ФПСГ}}$ – физическая эксергия продуктов сгорания пиролизного газа на выходе из водогрейного котла; $E_{\text{ФВК1}}$ – физическая эксергия воды на входе в водогрейный котел; $E_{\text{ФВК2}}$ – физическая эксергия воды на выходе из водогрейного котла.

7. Выводы

Разработан двухстадийный процесс газификации мелкодисперсной биомассы, обеспечивающий содержание смол в генераторном газе не более $7,1 \text{ мг/м}^3$, что соответствует требованиям производителей ДВС. На основе результатов экспериментальных исследований двухстадийного процесса газификации мелкодисперсной биомассы определены эффективные режимы процесса. При этом оптимальный диапазон удельного расхода воздуха, обеспечивающий стабильный процесс окислительного пиролиза биомассы в плотном слое при температуре процесса пиролиза не более $800 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет $25,0 \div 55,0 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

К. П. Д. процесса окислительного пиролиза достигает $98,0 \%$ с учетом утилизации всех тепловых потоков. К. п. д. процесса газификации коксового остатка без использования физической теплоты генераторного газа составляет в среднем $78,0 \%$. Использование физической теплоты генераторного газа позволяет повысить К. П. Д. процесса газификации в среднем до $96,4 \%$.

Выполненные расчетно-теоретические исследования работы газового ДВС показали, что оптимальным является работа газового ДВС на генераторном газе (ПВГ) с теплотой сгорания $7,6 \text{ МДж/м}^3$. При этом падение эффективной мощности ДВС составляет $16,0 \%$, а стоимость выработки электрической энергии составляет $0,39 \text{ грн}/(\text{кВт}\cdot\text{час})$. Результаты исследований показали также, что увеличение доли природного газа в смеси более $40,0 \%$ является не целесообразным, так как приводит к повышению стоимости выработки электрической энергии до $1,04 \text{ грн}/(\text{кВт}\cdot\text{час})$, что соответствует стоимости электрической энергии из внешней энергосистемы.

Проведенный эксергетический анализ работы когенерационной установки показал высокое значение общего эксергетического к. п. д. 45% , при этом эксергетические К. П. Д. отдельных элементов схемы, таких как пиролизер и газификатор достигает 96% , а блока «ДВС-электрогенератор» – 91% . Такие значения К. П. Д. обусловлены глубокой утилизацией всех тепловых потоков в схеме.

Литература

1. Постанова Кабінету Міністрів України від 9 липня 2014 р. № 293 «Про стимулювання заміщення природного газу у сфері теплопостачання» (Із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 451 від 10.09.2014) [Текст] / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К.: Офіційний вісник України, 2014. – № 62. – С. 34.
2. Закон України «Про електроенергетику» від 16 жовтня 1997 р. № 575/97-ВР (Із змінами) [Текст] / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К.: Офіційний вісник України. – 1997. – № 1. – С. 1.
3. Постанова НКРЕ «Про затвердження Порядку встановлення, перегляду та припинення дії «зеленого» тарифу для суб'єктів господарської діяльності» від 22 січня 2009 р. № 32. [Текст] / Верховна Рада України. Офіц. Вид. Офіційний вісник України. – 2009. – № 7. – С. 233.
4. Гелетуха, Г. Г. Сучасний стан та перспективи розвитку біоенергетики в Україні [Електронний ресурс] / Г. Г. Гелетуха, Т. А. Железна, П. П. Кучерук, Є. М. Олійник // Аналітична записка БАУ. – 2014. – № 9. – С. 32. – Режим доступу: <http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-9-ua.pdf>.
5. Kirjavainen, M. Small-scale biomass CHP technologies situation in Finland, Denmark and Sweden [Electronic resource] / M. Kirjavainen, T. Savola. – Espoo, 2004. – Available at: http://www.opet-chp.net/download/wp2/small_scale_biomass_chp_technologies.pdf

6. Devi, L. Catalytic removal of biomass tars; Olivine as prospective in-bed catalyst for fluidized-bed biomass [Text] / L. Devi. – Technische Universiteit Eindhoven, 2005. – 142 p.
7. Ulrik, H. The Design, Construction and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifier [Text] / H. Ulrik // ECOS-2003, Copenhagen, Denmark, 2003.
8. Шевченко, Г. Л. Комплексная технология термической переработки биомассы [Текст] / Г. Л. Шевченко, Ю. В. Шишко, Е. В. Кремнева // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – 2010. – Вип. 2. – С. 217–227.
9. Пат. 41146 Україна, МПК (2009) B01J 20/20. Спосіб газифікації твердого палива [Текст] / Кремнева К. В., Шевченко Г. Л., Шишко Ю. В., Усенко А. Ю., Кремнев В. Е., Губинський С. М. – заявник та власник патенту Національна металургійна академія України. – № u 2008 13136; заявл. 12.11.2008; опубл. 12.05.2009, Бюл. № 9.
10. Корчевой, Ю. П. Экологически чистые угольные энерготехнологии [Текст] / Ю. П. Корчевой, А. Ю. Майстренко, А. И. Топал. – К.: Проект “Наукова думка”, 2004. – 186 с.
11. Канторович, Б. В. Основы теории горения и газификации твердого топлива [Текст] / Б. В. Канторович. – М.: Издательство академии наук СССР, 1958. – 593 с.
12. Кадышев, В. Г. Расчет рабочего процесса поршневых и комбинированных автотракторных двигателей [Текст] / В. Г. Кадышев, С. В. Тиунов. – Набережные челны: КамГПИ, 2002. – 62 с.
13. Кремнева, Е. В. Исследование влияния основных параметров паровоздушной газификации древесного угля на качество генераторного газа [Текст] / Е. В. Кремнева, В. Е. Кремнев // Металлургическая теплотехника. – 2005. – Т. 1. – С. 283–292.
14. Дмитроченкова, Э. И. Эксергетический анализ когенерационной установки на базе реконструированного двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Э. И. Дмитроченкова // Вісн. Донбаської нац.акад. будівн. і архітектури. Інженерні системи та техногенна безпека. –2010. – Вип. 6 (86). – С. 108–116.

УДК 621.311.001.57

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.32043

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДМОВ ПРОТИАВАРІЙНОЇ АВТОМАТИКИ НА РИЗИК ВИНИКНЕННЯ АВАРІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМІ

В. В. Літвінов

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра гідроенергетики
Запорізька державна інженерна академія
пр. Леніна, 226, м. Запоріжжя, Україна, 69006
E-mail: v.v.litvinov1985@mail.ru

В статті розв’язано задачу оцінювання надійності роботи електроенергетичної системи при відмовах силового, комутаційного та вторинного обладнання. В якості показника надійності прийнято ризик виникнення системної аварії, що дозволяє оцінити причини аварії, сценарії її розвитку та наслідки. Для оцінювання ризику запропоновано імовірно-статистичний метод з урахуванням технічного стану електрообладнання системи та стану протиаварійної автоматики

Ключові слова: ризик, імовірність, відмова, системна аварія, системна автоматика, імовірно-статистичний метод

В статье решена задача оценивания надежности работы электроэнергетической системы при отказах силового, коммутационного и вторичного оборудования. В качестве показателя надежности принят риск возникновения системной аварии, что позволяет оценить причины аварии, сценарии её развития и последствия. Для оценивания риска предложен вероятностно-статистический метод с учетом технического состояния электрооборудования системы и состояния протиаварийной автоматики

Ключевые слова: риск, вероятность, отказ, системная авария, системная автоматика, вероятностно-статистический метод

1. Вступ

На сьогоднішній день електроенергетичні системи (ЕЕС) України та інших країн східної Європи пра-

цюють у тяжких умовах, які виникли внаслідок дії наступних факторів:

– до 75 % силового, комутаційного та вторинного обладнання повністю відпрацювало свій ресурс;