

Топливо и энергетика

УДК 621.184.32:662.61.004.15:662.76

Карп И.Н., докт. техн. наук, акад. НАН Украины,
Марцевой Е.П., канд. техн. наук, **Пьяных К.Е.**, канд. техн. наук,
Антощук Т.А., **Пьяных К.К.**

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: ingas@i.com.ua

Исследование и внедрение процессов газификации углей и биомассы с целью замещения природного газа

Разработка методов и технологий замещения природного газа альтернативными энергоносителями является актуальной задачей энергетики Украины и других стран. Наибольшим потенциалом среди альтернативных энергоносителей обладают уголь и биомасса. Из многих технологий газификации предпочтительна технология обращенного процесса со «встречной волной», обеспечивающая минимальные термодинамические потери и образование сравнительно небольшого количества нежелательных включений: пыли, смолы, органических кислот. При газификации бурого угля по обращенному процессу получен генераторный газ с низшей теплотворной способностью 1000–1300 ккал/м³, а при газификации биомассы – 1200–1600 ккал/м³. Такой газ вполне пригоден для энергетических целей в качестве заменителя природного газа в двигателях и топках котлов и промышленных печей. Технология применима для газификации бурых углей и биомасс. Успешная реализация процессов газификации в промышленном масштабе подтвердила правильность научно-технических подходов, положенных в основу работы. *Библ. 11, рис. 5, табл. 4.*

Ключевые слова: природный газ, замещение, газификация, уголь, биомасса.

Введение. Постановка задачи

Международное энергетическое агентство (МЭА) отмечает, что «энергоэффективность повсеместно признана в качестве основного инструмента в энергетических стратегиях» [1]. Отмечается также, что ряд стран-потребителей значительных объемов энергоресурсов (Китай, США, ЕС, Япония) принял новые меры по их снижению. Рассмотрение этих мер показывает, что каждая страна разрабатывает или уточняет свои энергетические стратегии в соответствии с

наиболее чувствительным сектором своей экономики: в США главной проблемой является импорт нефти; в Японии – проблема обеспечения страны электроэнергией после аварии на атомной электростанции Фукусима; Китай и страны ЕС поставили целью общее снижение энергоемкости производства.

В украинской экономике одной из болезненных проблем является значительная доля природного газа в топливно-энергетическом балансе, его высокая стоимость и зависимость поступления от импорта. Поэтому разработка тех-

нологий и оборудования для замещения природного газа альтернативными топливами — углем или биомассой — чрезвычайно актуальна.

Естественным и наиболее доступным заменителем природного газа является уголь. Промышленные запасы угля в Украине составляют десятки миллиардов тонн, хотя в большинстве случаев украинские угли высокозольны и содержат значительное количество серы. Высококачественные угли доступны на международном рынке по конкурентным ценам.

Среди топлив, способных заместить природный газ, особое место занимает биомасса. Ресурсы биомассы в Украине оцениваются более чем в 23 млн т у.т., или в 20 млрд м³ природного газа в тепловом эквиваленте [2]. Для сравнения: в России ресурсная база отходов только древесной и растительной биомассы оценивается в 145 и 80 млн т у.т. соответственно [3], что стимулирует развитие децентрализованного энергоснабжения на основе местных возобновляемых источников энергии. Биомасса как топливо имеет неоспоримые преимущества перед углем с точки зрения негативного влияния на окружающую среду и парниковый эффект. Создание надежных, экономически эффективных объектов промышленных масштабов, использующих уголь или биомассу для замещения природного газа с минимальными сроками окупаемости проектов, является одним из важнейших направлений украинской энергетической науки и промышленности.

Существует два основных типа технологий использования углей и биомассы в энергетических процессах: прямое сжигание и предварительная газификация. Прямое сжигание углей или углей совместно с биомассой применяется как основная технология в «большой» энергетике и крупных установках в промышленности. Известны также примеры прямого сжигания в странах Европы специально подготовленных древесных отходов в когенерационных энергетических установках электрической мощностью в пределах 3–20 МВт [4]. Прямое сжигание топлив в котельных установках или, например, во вращающихся обжиговых печах с термодинамической точки зрения более выгодно, чем газификация, так как любое преобразование энергии всегда сопровождается необратимыми термодинамическими потерями. Однако, при утилизации всех возможных вторичных тепловых ресурсов, сопровождающих технологический процесс газификации, коэффициенты использования тепла топлива в обоих случаях оказываются весьма близкими. Каждая из этих технологий имеет свои преимущества и области

применения. Более подробное сравнение преимуществ и недостатков обеих технологий приведено в [4].

Процесс газификации углеродсодержащих топлив известен человечеству с доисторических времен. В промышленности и в быту процесс газификации в широком масштабе начал использоваться в начале XIX в., максимальное развитие и применение технологии газификации получили в середине XX в. С открытием и освоением мощных месторождений природного газа на всех континентах и развитием инфраструктуры его транспортировки интерес к газификации органических веществ был утрачен, а вместе с ним утрачены научные и научно-технические наработки и соответствующие кадры. Только в последние десятилетия одновременно с осознанием исчерпаемости запасов природного газа, стремлением стран, не обладающих его запасами, к энергетической независимости, а также исходя из необходимости утилизации разнообразных отходов, защиты окружающей среды, предотвращения изменений климата, интерес к газификации проявился вновь как к одному из средств использования альтернативных источников энергии.

Газификация твердого топлива — его высокотемпературное (1200–1500 К) преобразование в газообразные вещества (CO, H₂, CH₄, CO₂, H₂O) при взаимодействии с кислородом (воздухом) и водяным паром при недостатке окислителя. Состав и калорийность газа варьируется в зависимости от вида твердого топлива и характеристик окислителя. Калорийность генераторного газа, получаемого при использовании воздушного дутья, составляет 1000–1400 ккал/м³, а при обогащении дутья кислородом может достигать 2400 ккал/м³.

Процесс газификации чрезвычайно сложный. В обзорной монографии [5] отмечается, что «газификация является сложным гетерогенным физико-химическим процессом, которому присуща сложная кинетика. Этот процесс развивается в полидисперсной и гетерогенной среде в условиях фильтрационного и диффузионного переноса газов. Для процесса характерно наличие одновременного переноса энергии, импульса и массы в весьма сложной и неоднородной геометрической системе, а также присутствие фазовых превращений с тепловой деформацией слоя, явлениями спекания и изменения структуры и свойств минеральной части топлива и зольного остатка. При этом имеют место быть гомогенные и гетерогенные химические превращения, непрерывно протекают последовательные и параллельные прямые и обратные химические реакции».

В [5] приведен практически исчерпывающий библиографический перечень публикаций, насчитывающий более 4300 наименований, в том числе более 1150 иностранных источников, за период с 1811 по 2012 гг. по проблеме газификации органических веществ и по смежным вопросам таким, как использование генераторного газа и других продуктов газификации. Из этого перечня можно выделить основополагающие монографии 1950-х гг. К.Е.Рамбуша, Д.Б. Гинзбурга, А.К.Коллерова, М.В.Канторова, Б.В.Канторовича, З.Ф.Чуханова, В.С.Альтшулера, М.Б.Равича, Б.И.Китаева и более поздние публикации О.Ю.Шейндлина, Е.В.Крейнина, С.Р.Исламова, С.Г.Степанова, В.Е.Мессерле, В.А.Бородули, Р.Ш.Загруднинова.

В Украине работы по этой проблематике находятся в начальной стадии. Данная работа базируется на результатах фундаментальных исследований, выполняющихся в Институте газа НАН Украины, и разработок по конкретным проектам для нужд промышленных и тепло-снабжающих организаций. В работе рассматриваются результаты исследований преимущественно воздушной и воздушно-паровой газификации углей и биомассы и практического использования их результатов. Парокислородная газификация углеродсодержащих веществ, используемая в основном для получения синтез-газа и дальнейшего его использования в качестве химического сырья, здесь рассматривается только с точки зрения оценки состава синтез-газа при изменении исходных концентраций реагирующих веществ в условиях термодинамического равновесия.

Предварительная воздушная и паровоздушная газификация углей и биомассы в большинстве случаев рассчитана на автономную выработку электроэнергии в интервале относительно небольших мощностей (от нескольких киловатт до 2–3 МВт) в составе когенерационных установок и без использования внутренних энерго-ресурсов. Эти технологии используются также в проектах частичного замещения природного газа генераторным при выработке электроэнергии и теплоты на ТЭЦ и крупных котельных. Газификация имеет неоспоримые преимущества в технологиях децентрализованной энергетики, основанных на применении в качестве привода электрогенераторов двигателей внутреннего сгорания, паровых двигателей, реже газовых турбин. Для выбора привода электрогенераторов в указанном интервале мощностей могут быть использованы рекомендации, приведенные в [6]. Из них следует, что при небольших мощностях, характерных для использования генераторного

газа в установках автономной генерации, более высокие значения электрического КПД достигаются при использовании ДВС. Газификация топлива предпочтительна также в технологиях совместного сжигания генераторного и природного газов в котлах и печах.

Для создания эффективных и надежных технологий газификации в очерченной выше области их применения необходимо решение ряда инженерных задач по всей технологической цепочке: от подготовки топлива для его газификации по конкретной выбранной технологии и до конечного этапа — его использования в автономном производстве электроэнергии или сжигания в котле или печи. Выбор технологии газификации определяется видом исходного топлива. Необходимо решать также задачи химико-кинетического характера, обеспечения экологических требований и в самом процессе газификации, и при использовании генераторного газа, газодинамики или перемещения твердой фазы в слое, достижения максимально возможных степеней преобразования исходного топлива в генераторный газ, утилизации твердого коксозольного остатка и вторичной теплоты. Каждая из этих и других возникающих задач может быть предметом отдельного целенаправленного исследования. Так, опыт показывает, что в казалось бы известной и широко апробированной технологии газификации по прямому процессу Лурги существенно различающиеся результаты по глубине процесса получаются при газификации углей одной группы, но полученных из разных шахт, так что для создания надежного промышленного процесса необходимо предварительно изучить процесс в пилотном масштабе. Топливом для газогенераторов могут быть далеко не все виды углей. Есть проблемы и при газификации торфа. Таких примеров можно привести множество. Из сказанного выше становится ясным, что несмотря на обилие публикаций приведенные в них результаты в большинстве случаев или скорее, как правило, не могут быть перенесены непосредственно на проектируемый объект. Из всего объема задач в данном исследовании выделены лишь следующие:

— теоретические исследования состава генераторного газа в зависимости от марки углей или состава биомассы, содержания в дутье влаги и кислорода;

— экспериментальная проверка воздушной и паровоздушной газификации углей и биомассы по прямому или обращенному процессу на пилотных установках;

— определение возможности и глубины газификации ряда углей и широкого спектра биомасс;

— поиск системы очистки генераторного газа от смолистых и других загрязняющих включений;

— исследование образования вредных выбросов в процессе использования генераторного газа;

— промышленная проверка процессов газификации углей и биомассы и накопление объема рекомендаций для реализации технологий и оборудования в зависимости от требований конкретных проектов и направлений использования замещающих природный газ энергоносителей.

Методы исследования

Расчетно-теоретические исследования были направлены на определение состава и теплотворной способности генераторного газа, получаемого воздушной и паровоздушной газификацией углей и биомассы, с целью оценки возможности его энергетического использования. Расчеты выполнялись, исходя из предположения достижения полного термодинамического равновесия реагирующих систем. Такой подход предоставлял возможность в случаях, когда был известен состав топлива и зольной массы, сравнить реальные результаты с теоретическими и определить таким образом уровень термодинамического совершенства процессов. При расчетах паровоздушной газификации углей определяли зависимость состава и энергетических параметров генераторного газа от процент-

ного содержания пара в дутье. Для расчетов использовали программу «Терра», получившую распространение в СНГ [7].

Экспериментальные исследования процесса газификации выполнялись на пилотных установках. Схема установки для исследования газификации углей приведена на рис.1. Диаметр рабочей зоны газогенератора составлял 1,0 м. Изучалась одна из разновидностей обращенного процесса газификации: с подачей дутья снизу и отбором генераторного газа сверху; при этом движение реакционной зоны происходит сверху вниз, так что процесс горения развивается навстречу дутью. Для активации процесса применялся электроразогрев верхнего слоя исходного топлива.

В основу исследуемого процесса положена технология, разработанная компанией «Сибтермо», г. Красноярск (Россия), предназначенная в основном для газификации бурых углей Канско-Ачинского месторождения с целью получения полукочка [8, 9]. В этой технологии используется обращенный процесс газификации, протекающий с очень малыми скоростями, что способствует максимальному приближению реагирующей системы к термодинамическому равновесию и снижению в генераторном газе объема вредных компонентов: пыли, смолы, органических кислот. Недостатком технологии является периодичность процесса, однако этот недостаток перекрывается отсутствием необходимости создания систем глубокой очистки генераторно-

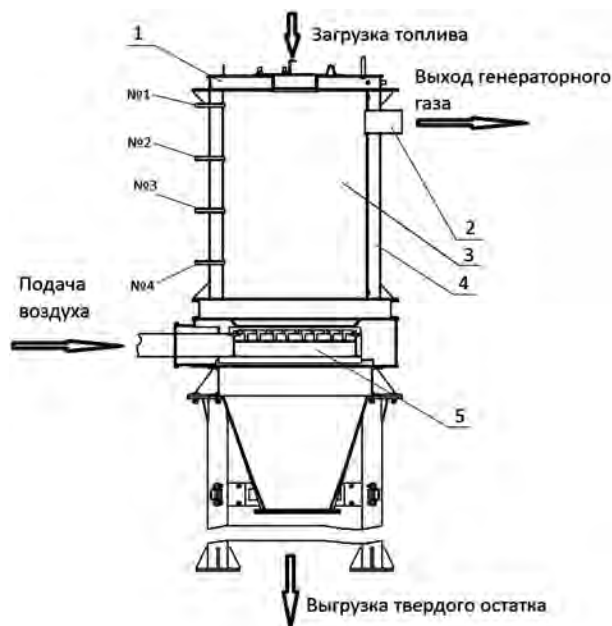


Рис.1. Схема пилотного газогенератора для исследования газификации углей: 1 — крышка с электроразогревом; 2 — труба выдачи газа; 3 — реакционная зона; 4 — охлаждающая рубашка; 5 — колосниковая решетка; №№ 1–4 — термомары.



Рис.2. Общий вид экспериментального газогенератора для газификации биомассы.

го газа и легко устраняется установкой нескольких работающих поочередно генераторов.

В ходе экспериментов определяли зависимость энергетических параметров генераторного газа от режимных характеристик процесса, оптимальные условия его проведения, выполняли все измерения, необходимые для расчета материального и теплового балансов процесса. Температуры в слое измеряли с помощью ХА термопар, анализ генераторного газа проводили на жидкостном хроматографе 6890N фирмы Agilent. Исследовали газификацию бурого угля марки БР Канско-Ачинского месторождения и его смеси с антрацитом в соотношении 70 : 30, а также лигнита Ильницкого месторождения (Черновицкая обл.).

Газификацию разнообразных биомасс — древесной щепы, шелухи подсолнечника и риса, пеллет разного состава, некоторых отходов, в частности, автопокрышек — исследовали на

установке, аналогичной показанной на рис.1, и по той же методике. Общий вид пилотного газогенератора показан на рис.2.

Результаты исследования. Газификация углей

Характеристики бурого угля ЗБР приведены в табл.1, а результаты исследований газификации углей марки ЗБР фракции 25–35 мм — в табл.2.

Средняя удельная производительность генератора при пересчете на природный газ с низкой теплотой сгорания 8000 ккал/м³ при эксплуатации в режимах, близких к номинальным (400 кВт), составила 360 м³/т. Таким образом, для замещения 1000 м³ природного газа необходимо использовать 2,8 т угля марки ЗБР. При этом дополнительно из рубашки охлаждения и теплообменника охлаждения генераторного газа получается 0,5 Гкал горячего теплоносителя для нужд системы отопления, горячего водоснабжения или технологии.

В ходе испытаний работа установки прекращалась по достижению зоной реакции колосниковой решетки. Полученный остаток подвергался мокрому тушению и исследовался. Полученные результаты недостаточны для анализа, поскольку используемый метод мокрого тушения не позволяет качественно оценить характеристики и массу получаемого продукта. Доля остатка составляла около 10 % от загружаемого угля, а калорийность достигала 8000 ккал/кг.

Газогенератор дает возможность работать с полной выработкой угля. При этом после достижения «обратной, или встречной волной» колос-

Таблица 1. Характеристики бурого угля ЗБР

Показатель	Обозначение	Величина
Марка угля с указанием класса крупности, мм	ЗБР	0–300
Высшая теплота сгорания, сухое, беззольное состояние, ккал/кг (МДж/кг)	Q _s ^{daf}	7280 (30,5)
Низшая теплота сгорания, рабочее состояние, ккал/кг (МДж/кг)	Q _i ^d	4330 (18,1)
Зола, сухое состояние, средняя/предельная, %	A ^d	7,3
Массовая доля общей влаги в рабочем состоянии, %	W _t ^r	29,3
Выход летучих веществ, сухое беззольное состояние, %	V ^{daf}	46,8
Содержание серы, сухое состояние, %	S _t ^d	0,31
Содержание углерода, сухое, беззольное состояние, %	C ^{daf}	75,3
Массовая доля хлора, %	Cl ^d	0,0012
Массовая доля мышьяка, %	As ^d	0,00031
Размер кусков, мм	—	0–300
Массовая доля мелочи, %, не более	—	15
Массовая доля минеральных примесей, %, не более	—	2

Таблица 2. Показатели газификации бурого угля ЗБР

Параметр	Дата исследований							
	13.01.12		18.02.12			23.03.12		
Продолжительность работы на 1 загрузке, ч	8	8	8	8	7	7	7	4
Состав сухого газа, % (об.):								
CO	8,6	9,8	9,4	9,8	13,4	12,2	19,0	13,3
CH ₄	11,7	13,0	11,3	13,0	13,0	11,6	7,1	10,3
H ₂	2,7	4,2	4,0	4,6	2,3	3,9	0	0,9
CO ₂	7,6	8,7	7,6	8,6	9,7	7,5	0,9	4,85
N ₂	68,4	63,2	66,6	62,9	60,4	63,7	72,0	69,9
Теплота сгорания сухого газа, ккал/нм ³	797,7	994,4	922,4	1031,7	939,7	1000,8	757,8	749,4
Средний расход воздуха за расчетный период, м ³ /ч	150	140	136	132	286	280	280	359,4
Средняя производительность газогенератора по газу за расчетный период, м ³ /ч	173,2	175	161	165,8	360	357	310	406,2
Мощность газогенератора по произведенному газу, кВт	129,1	161,9	145,9	158,4	411	404	273	354,0

никовой решетки начинается выгорание коксового остатка с выделением низкокалорийного газа (см. табл.2, предпоследняя колонка). Работа установки на коксовом остатке, то есть при реверсе процесса с обращенного на прямой, приводит к резкому снижению содержания углеводородов в газе и снижению концентрации водорода. Для повышения низшей теплоты сгорания получаемого газа в этом случае необходимо увеличение влажности подаваемого воздуха (подача пара, увлажнение в среде подогретой воды), однако периодическая подача увлажнителя в дутье при изменении направления реакционной волны в промышленных условиях конструктивно сложна. Дополнительной задачей, решение которой необходимо обеспечить для эксплуатации установки в режиме полного дожигания, является проблема очистки газа от твердых частиц зольного остатка, которые в этом случае выделяются особенно активно. Решением проблемы, учитывая малые размеры и массу этих частиц, может быть влажный скруббер.

Исследование газификации смесей углей разной морфологии было проведено на примере смеси бурого угля ЗБР с антрацитом в соотношении 70 : 30. Эксперимент показал, что более низкорекреационное топливо, в данном случае антрацит, практически не участвует в процессе, что приводит к снижению калорийности получаемого газа. Теплотворная способность генераторного газа в различных режимах изменялась в среднем от 600 до 900 ккал/м³, то есть была ниже, чем при газификации бурого угля. Масса коксового остатка, который оставался после завершения испытаний, достигала 200 кг, что со-

ставляло до 25 % от исходного количества загружаемого топлива. При этом антрацит даже после дополнительного дробления (фракция 10–30 мм) не полностью прореагировал.

При газификации лигнита теплотворная способность генераторного газа находилась в пределах 620–1130 ккал/м³, однако, производительность газогенератора существенно снижалась по сравнению с газификацией бурого угля. Мощность газогенератора по произведенному газу составляла 216–309 кВт, то есть в среднем на 30 % ниже, чем при газификации бурого угля. Значительно (от 20 до 30 %) увеличились тепловые потери в рубашку охлаждения и в теплообменнике охлаждения генераторного газа.

Результаты исследования. Газификация биомассы

Результаты экспериментального исследования газификации некоторых видов биомассы по обращенному процессу на установке, показанной на рис.2, приведены в табл.3. Для сравнения показаны показатели газификации лигнита и бурого угля.

Из табл.3 видно, что теплотворная способность генераторного газа, полученного из биомассы, существенно выше, чем полученного из углей или лигнита, и в 1,7–1,8 раза выше, чем теплотворная способность доменного газа. Такой газ может быть успешно применен для замещения природного газа в низко- и среднетемпературных печах, котлах и газовых двигателях.

В высокотемпературных процессах следует подогреть и воздух горения, и газ. Около

Таблица 3. Состав газа и показатели замещения при газификация твердого топлива

Параметр	Щепа (W = 15 %)	Шелуха риса	Пеллеты из шелухи под- солнечника	Пеллеты из древеси- ны	Лигнит	Бурый уголь
Генераторный газ, % (об.):						
H ₂	13,35	11,36	16,86	11,3	12,24	20,01
N ₂	48,83	54,8	44,92	49,45	55,24	49,27
CO	16,03	15,69	19,51	12,59	11,88	14,10
CH ₄	5,57	4,72	5,81	6,71	4,24	3,32
CO ₂	12,49	10,55	9,15	15,84	12,87	11,14
C ₂ H ₄	0,77	0,55	0,71	0,95	0,98	0,13
C ₂ H ₂	0,16	0,02	0,0	0,34	0,0	0,0
C ₂ H ₆	0,11	0,07	0,18	0,21	0,0	0,11
C ₃ H ₈	0,07	0,03	0,1	0,13	0,0	0,04
H ₂ O	2,62	2,21	2,69	2,49	2,34	1,88
Всего газа, % (об.)	100	100	100	100	100	100
Показатели замещения и энергетические показатели						
Теплота сгорания низшая, ккал/м ³	1464	1251	1664	1617	1175	1270
Количество твердого топлива для замещения 1 м ³ природного газа, кг	3,7	3,3	2,5	2,6	3,2	2,8

Таблица 4. Сравнение расчетного и экспериментального составов генераторного газа

Полученные данные	H ₂	CO	CH ₄	C _m H _n	N ₂	CO ₂	Остаток (C _{тв} + зола)
Расчет	24,61	21,55	1,22	0,00	41,31	11,32	0,08
Эксперимент (1)	20,70	21,17	3,63	0,28	42,45	11,78	0,08
Эксперимент (2)	20,42	20,52	3,60	0,31	41,79	13,37	0,08

20 % энергии в рассматриваемой технологии газификации расходуется на охлаждение корпуса генератора. Эта энергия может быть использована для подогрева питательной воды котлов, технических и бытовых нужд.

Параллельно с экспериментальными исследованиями рассчитывали равновесный состав генераторного газа, полученного газификацией пеллет из древесины. Сравнительные результаты приведены в табл.4. Из нее видно, что различие между расчетными и экспериментальными данными невелико. Несколько меньшее содержание водорода в генераторном газе, полученном экспериментально, можно объяснить меньшим содержанием влаги в исходном сырье, чем принималось в расчете. Сравнение экспериментальных и расчетных данных, с одной стороны, подтверждает адекватность принятой расчетной модели, с другой — может указывать на несовершенство реального процесса и пути улучшения технологии.

Обсуждение результатов. Реализация технологий

В работе приведены результаты исследований газификации углей и биомассы, относящиеся к одной из разновидностей обращенного процесса. Это лишь часть результатов, полученных при исследовании газификации углей и биомасс по технологиям прямого, обращенного и комбинированного процессов. Выбранный вид процесса, который можно назвать процессом «со встречной волной», отличается от классического обращенного процесса, описанного, в частности, в [10], и привлекателен тем, что получаемый генераторный газ содержит минимум загрязняющих примесей, в связи с чем затраты на его очистку минимальны, а также максимальным приближением состава генераторного газа к равновесному, то есть высоким уровнем термодинамического совершенства. Особенностью процесса является отсутствие возможности использования увлажненного дутья, так как оно подается в нижнюю холодную область слоя, и влага дутья сконденсируется в нем.

Сопутствующей процессу газификации задачей является решение вопроса об использова-

нии коксозольного остатка. При значительных промышленных объемах газификации углей по обращенному процессу остаток представляет собой полукокс, используемый в качестве сорбента для очистки воды [8, 9]. При небольших масштабах производства этот остаток может использоваться как бытовое топливо. Если и это невозможно, то представляет интерес отмеченная выше возможность полной выработки сырья при сочетании обращенного и прямого процессов: когда встречная волна достигает колосниковой решетки, а затем производится переход к прямому процессу. Некоторое снижение при этом энергетических параметров генераторного газа можно компенсировать установкой двух или более одновременно работающих генераторов; в этом случае качество генераторного газа остается в допустимых для энергетического использования пределах.

При газификации биомассы коксозольный остаток получается разного состава в зависимости от вида используемого сырья. При газификации древесной щепы или пеллет на основе древесины этот остаток представляет собой древесный уголь, имеющий высокий спрос на рынке. Коксозольный остаток, получаемый при газификации пеллет из куриного помета, после размола может быть использован в качестве удобрения.

Исследования показали, что газификация по технологии обращенного процесса со «встречной волной» наиболее применима к бурым углям и биомассе. Газификации по этой технологии практически не поддаются высокометаморфизованные топлива такие, как антрацит и, как это ни удивительно, торф. Для таких топлив более приемлема технология газификации по прямому процессу в плотном слое, известному как процесс Лурги. Получаемый при воздушной или паровоздушной газификации угля генераторный газ обладает меньшей теплотворной способностью по сравнению с газом из биомассы и пеллет на ее основе, тем не менее она достаточна для его энергетического использования.

В процессе сравнительной отработки различных технологий газификации весьма непродолжительной оказалась в некоторых случаях задача

очистки генераторного газа от примесей, затрудняющих его транспортировку и использование в энергетическом агрегате — котле или промышленной печи. К таким случаям прежде всего относится газификация сосновой щепы или угля по прямому процессу. При газификации угля основными загрязнителями генераторного газа являются пыль и сероводород. Способы очистки газа от этих примесей хорошо известны, но при небольших мощностях сооружение довольно сложных и громоздких систем очистки от сероводорода нецелесообразно. Выход из положения может заключаться в использовании малосернистых углей или их предварительном обессеривании. При газификации сосновой щепы образуется значительное количество смолы и других органических веществ, конденсирующихся в трубопроводе и каналах газовой горелки, что делает практически невозможным использование такого газа без очистки. В упоминавшихся выше монографиях для газификации древесины строго рекомендуется использовать ее твердые породы.

В дальнейшем установленное оборудование использовалось для очистки газа, производимого из пеллет разного состава по обращенному процессу. Количество примесей, извлекаемых из газа, было незначительным.

Технологический процесс и оборудование для газификации бурого угля по обращенному процессу «со встречной волной» реализуется для зарубежного заказчика в проекте отопления промышленного здания. Перед началом проектирования на пилотной установке были проведены испытания пригодности местных углей для использования по данной технологии и выбраны наиболее отвечающие условиям процесса.



Рис.3. Газогенераторный комплекс мощностью 1,8 МВт на базе газогенераторов обращенного процесса.

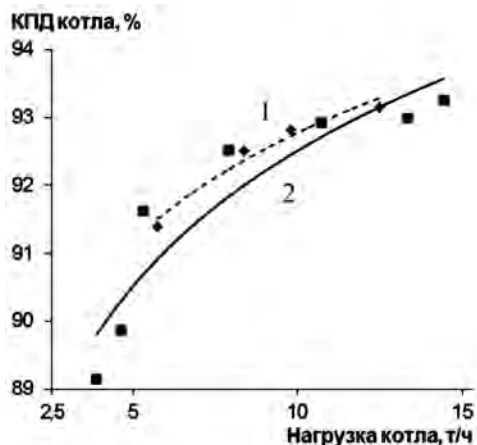


Рис.4. Зависимость КПД котла ДЕ-25 с горелкой ГМП-16ГПГ от нагрузки: 1 — природный + генераторный газ; 2 — природный газ.

Технология газификации биомассы в виде пеллет из отходов древесины реализована в промышленном масштабе в комплексе «газогенератор — паровой котел» на Малинской бумажной фабрике «Вайдман» в Житомирской обл. Ком-

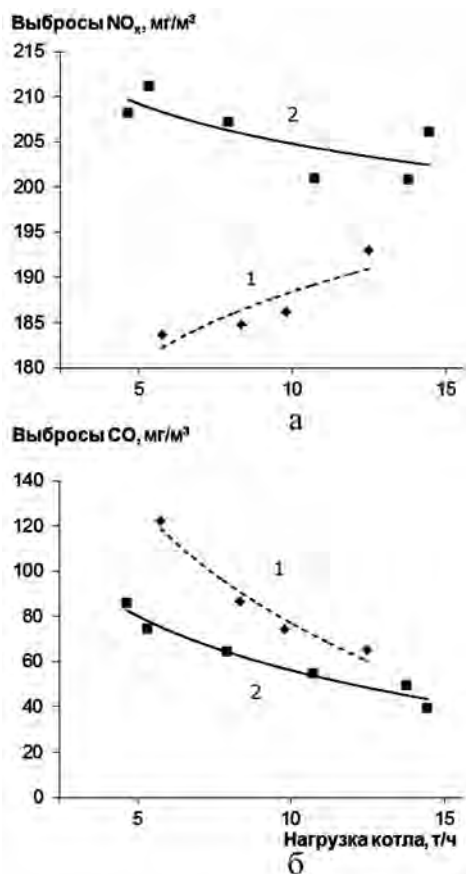


Рис.5. Зависимость выбросов NO_x (а) и CO (б) при работе котла ДЕ-25 с горелкой ГМП-16ГПГ от нагрузки: 1 — природный + генераторный газ; 2 — природный газ.

плекс предназначен для частичного замещения природного газа альтернативным топливом (рис.3). Он включает паровой котел, систему очистки генераторного газа, систему автоматического управления топочным процессом, газогенератор обращенного процесса; его установленная тепловая мощность составила 1,8 МВт, что соответствует в эквиваленте 188 м³/ч природного газа. Комплекс успешно эксплуатируется с января 2010 г.

С учетом потребности в паре основного производства средняя выработка генераторного газа составила в эквиваленте по природному газу 120 м³/ч. Замещение части природного газа генераторным не отразилось на изменении КПД котла (рис.4), а также, что весьма важно, на содержании вредных выбросов в продуктах сгорания. Содержание NO_x в дымовых газах не превышает 190 мг/м³, СО — 120 мг/м³ (рис.5), что значительно ниже нормативных значений. Важным результатом следует считать отработку системы очистки генераторного газа от смолы и других загрязнений. Использование древесных пеллет для газификации и замещения генераторным газом природного газа позволило снизить себестоимость тепловой энергии, производимой котлом, на 30 %. Некоторые другие детали использования биомассы как топлива изложены в [11].

Выводы

Расчетно-теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов газификации угля и биомассы подтверждено, что получаемый таким образом генераторный газ вполне пригоден для энергетических целей в качестве заменителя природного газа.

Из многих технологий газификации предпочтительна технология обращенного процесса со «встречной волной», обеспечивающая минимальные термодинамические потери и образование сравнительно небольшого количества нежелательных включений: пыли, смолы, органических кислот.

Технология применима для бурых углей и биомасс.

Успешная реализация процессов газификации в промышленном масштабе подтвердила правильность научно-технических подходов, положенных в основу работы.

Список литературы

1. World Energy Outlook 2012. Принципы энергоэффективного мира. [Электронный ресурс]. — <http://www.iea.org/publications/publication/Russian.pdf>
2. Давий В. Развитие биоэнергетики — путь к энергетической безопасности и экологической чистоте Украины // Оборудование и инструмент. Деревообработка. — 2012. — № 2. — С. 68–73.
3. Самылин А., Яшин М. Современные конструкции газогенераторных установок // ЛесПромИнформ. — 2009. — № 1. [Электронный ресурс]. — <http://www.LesPromInform.ru>
4. Карп И.Н., Никитин Е.Е., Пьяных К.Е., Зайвый А.Н. Направления замещения природного газа альтернативными видами топлива и энергии в промышленности и коммунальной энергетике // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2009. — № 4. — С. 16–25.
5. Копытов В.В. Газификация конденсированных топлив: Ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития. — М.: Агрорус, 2012. — 509 с.
6. Marriott D. Turbines or engines? Selection depends on users requirements and application // Turbomachinery International. — 2014. — Jan./Feb. — P. 16–17.
7. Трусов Б.Г. Компьютерное моделирование фазовых и химических равновесий // Инженерный вестник. — 2012. — № 10. — С. 1–7. [Электронный ресурс] 77-48211/483186.
8. Степанов С.Г. Тенденции развития и новые инженерные решения в газификации угля // Уголь. — 2002. — № 11.
9. Степанов С.Г., Исламов С.Р., Гроо А.А. Автотермическая технология переработки некоксуемых углей в полукоксы и горючий газ // Вестник ТЭК Кузбасса. — 2004. — № 7.
10. Коллеров Л.К. Газомоторные установки. — М.; Л.: Машгиз, 1951. — С. 13–14.
11. Karp I., Pyanykh K., Yudin A. Biomass: Combustion and Gasification for Substitution of Natural Gas // Industrial Heating. — 2013. — June. — P. 39–42.

Поступила в редакцию 10.10.14

Карп І.М., докт. техн. наук, акад. НАН України,
Марцевий Є.П., канд. техн. наук, **П'яних К.Є.**, канд. техн. наук,
Антощук Т.О., **П'яних К.К.**

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: ingas@i.com.ua

Дослідження та впровадження процесів газифікації вугілля та біомаси з метою заміщення природного газу

Розроблення методів та технологій заміщення природного газу альтернативними енергоносіями є актуальною задачею енергетики України та інших країн. Найбільший потенціал серед альтернативних енергоносіїв мають вугілля та біомаса. З багатьох технологій газифікації переважає технологія оберненого процесу із «зустрічною хвилею», яка забезпечує мінімальні термодинамічні втрати та утворення відносно невеликої кількості небажаних включень: пилу, смоли, органічних кислот. При газифікації бурого вугілля по оберненому процесу отримано генераторний газ з нижчою теплотворною спроможністю 1000–1300 ккал/м³, а при газифікації біомаси — 1200–1600 ккал/м³. Такий газ цілком придатний для енергетичних цілей як замітник природного газу у двигунах та топках котлів та промислових печей. Технологія придатна для газифікації бурого вугілля та біомас. Успішна реалізація процесів газифікації у промисловому масштабі підтвердила правильність науково-технічних підходів, покладених в основу роботи. *Бібл. 11, рис. 5, табл. 4.*

Ключові слова: природний газ, заміщення, газифікація, вугілля, біомаса.

Karp I.N., Doctor of Technical Science, Academician of National Academy of Science of Ukraine, **Martsevov E.P.**, Candidate of Technical Science, **Pyanykh K.E.**, Candidate of Technical Science, **Antoshchuk T.O.**, **Pyanykh K.K.**

The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev

39, Degtjarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: ingas@i.com.ua

Investigation and Implementation of Coal and Biomass Gasification Processes for Natural Gas Substitution

Development of methods and technologies of substitution of natural gas by alternative energy sources is actual for Ukrainian and other countries energy sector. The biggest potential among alternative energy sources have coal and biomass. Among many different gasification technologies the preference has technology of inversed process with «on-coming wave», which provides minimal thermodynamic losses and comparatively low content of undesirable components in producer gas, such as dust and resin. By brown coal gasification under inversed technology producer gas is received with low calorific value 1000–1300 kcal/m³; by biomass gasification LCV of producer gas is 1200–1600 kcal/m³. This gas is absolutely useful for energy purposes as natural gas substitute in engines, boilers and furnaces. Technology could be used for brown coals and biomass. Successful realization gasification processes in industrial scale has confirmed rightness of scientific-technical approaches, taken as a basis of work. *Bibl. 11, Fig.5, Table 4.*

Key words: natural gas, substitution, gasification, coal, biomass.

References

1. World Energy Outlook 2012. Printsipy energoefektivnogo mira. [Websource]. — <http://www.iea.org/publications/publication/Russian.pdf>
2. Davyi V. Razvitye bioenergetiki — put k energeticheskoi bezopasnosti i ekologicheskoi chistote Ukrainy. *Oborudovaniie i instrument. Derevoobrabotka*, 2012, (2), pp. 68–73. (Rus.)
3. Samylin A., Jashin M. Sovremennyye konstruktssii gasogenertornykh ustanovok. *LesPromInform*, 2009, (1). [Websource]. — <http://www.LesPromInform.ru> (Rus.)
4. Karp I.N., Nikitin E.E., Pyanykh K.E., Zayvy A.N. Napravleniia zameshcheniia prirodnogo gasa alternativnymi vidami topliva i energii v promyshlennosti i communalnoi energetike. *Energotehnologii i resursobereheniie [Energy Technologies and Resource Saving]*, 2009, (4), pp. 16–25. (Rus.)
5. Kopytov V.V. Gazifikatsiia kondensirovannykh topliv: retrospektivnyu obzor, sovremennoie sostoyaniie del i perspektivy razvitiia. Moscow : Agrorus, 2012, 509 p. (Rus.)
6. Marriott D. Turbines or engines? Selection depends on users requirements and application. *Turbomachinery International*, 2014, Jan./Feb., pp. 16–17.
7. Trusov B.G. Kompyuternoye modelirovaniye phazovykh i khimicheskikh ravnovesiy. *Inzhenerny Vestnik*, 2012, (10), pp. 1–7. — Electronic resource: 77-48211/483186. (Rus.)
8. Stepanov S.G. Tendentsii razvitiia i novye inzhenernye resheniia v gasifikatsii uglya, *Ugol*, 2002, (11). (Rus.)
9. Stepanov S.G., Islamov S.R., Groo A.A. Avtotermicheskaya tekhnologiya pererabotki nekoksuyushchikhsia ugleyi v polukoks I goryuchiy gas. *Vestnik TEK Kuzbassa*, 2004, (7). (Rus.)
10. Kollerov L.K. Gazomotornyye ustanovki, Moscow; Leningrad : Mashgiz, 1951, pp. 13–14. (Rus.)
11. Karp I., Pyanykh K., Yudin A. Biomass : Combustion and Gasification for Substitution of Natural Gas, *[Industrial Heating]*, June 2013, pp. 39–42.

Received October 10, 2014

УДК 662.67:66.092–977

**Шварцман Л.Я., канд. техн. наук, Троценко Э.А.,
Баженов Е.В., канд. техн. наук**

ООО «ИНФОКОМ ЛТД», Запорожье

бул. Т. Шевченко, 56, 69001 Запорожье, Украина, e-mail: dr@ia.ua

Внутрипластовой ретортинг горючих сланцев. Оценка энергетической эффективности

В связи с расширением спектра источников энергии появилась необходимость сравнения эффективности получения традиционных и нетрадиционных энергоресурсов. В качестве количественной оценки перспективности разработки энергоресурса в практику введен критерий сравнения — энергетическая рентабельность (EROEI). Выполнена оценка энергетической рентабельности внутрипластового ретортинга горючих сланцев применительно к предложенному авторами способу термозонированного резистивно-дугового нагрева пласта ископаемого. Использование температурной зависимости электропроводных свойств горючего сланца в сочетании с технологией горизонтального бурения и накопленным опытом автоматизированного управления электротермическими процессами позволяет реализовать альтернативную схему получения углеводородов. Предложенный способ имеет ряд преимуществ по сравнению с широкоприменяемыми способами добычи сланцевого газа и сланцевой нефти такими, как Фрекинг-процесс и внепластовой ретортинг, обеспечивая экологическую безопасность технологии и существенное сокращение капитальных затрат на освоение энергоресурса. *Библ. 13, рис. 1, табл. 2.*

Ключевые слова: горючие сланцы, сланцевый газ, сланцевая нефть, внутрипластовой ретортинг, нетрадиционные энергоресурсы, энергетическая эффективность, энергетическая рентабельность (EROEI).