

УДК 662.65: 662.763: 621.387.14

В.А.Жовтянский, чл.-корр. НАНУ, И.О.Невзгляд, М.В.Якимович (Институт газа НАН Украины, Киев)

## Конверсия возобновляемого углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий

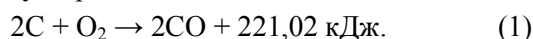
*Обсуждаются вопросы эффективности процессов производства альтернативных газовых топлив на основе конверсии биомассы и углеродсодержащих отходов с применением плазменных технологий. Анализируются свойства отдельных видов этого сырья – древесины, твердых бытовых и медицинских отходов, отходов птицеводства и животноводства, отходов производства кукурузы на зерно и водорослей – с точки зрения технологий их газификации. Показано, что она может быть сопряжена с риском экологических загрязнений окружающей среды. Кратко представлена установка для плазменно-паровой переработки отходов, позволяющая исключить риск образования диоксинов и фуранов в процессе их газификации. Показано, что, вопреки бытующему мнению, плазменно-паровая технология отличается более высокими показателями энергетической эффективности по сравнению с наиболее близкой конкурентной технологией парокислородной газификации.*

**Ключевые слова:** альтернативные газовые топлива, плазменно-паровая газификация, синтез-газ, отходы птицеводства и животноводства, твердые бытовые отходы, медицинские отходы, диоксины и фураны.

*Обговорюються питання ефективності процесів виробництва альтернативних газових палив на основі конверсії біомаси та вуглецевмісних відходів із застосуванням плазмових технологій. Аналізуються властивості окремих видів цієї сировини – деревини, твердих побутових і медичних відходів, відходів птахівництва і тваринництва, відходів виробництва кукурудзи на зерно і водоростей – з точки зору технологій їх газифікації. Показано, що вона може бути пов'язаною з ризиком екологічного забруднення довкілля. Коротко представлена установка для плазмово-парової переробки відходів, що дозволяє виключити ризик утворення діоксинів і фуранів у процесі їх газифікації. Показано, що, всупереч існуючій думці, плазмово-парова технологія має вищі показники енергетичної ефективності, ніж технологія парокисневої газифікації.*

**Ключові слова:** альтернативні газові палива, плазмово-парова газифікація, синтез-газ, відходи птахівництва і тваринництва, тверді побутові відходи, медичні відходи, діоксини та фурани.

Технологии конверсии возобновляемого углеродсодержащего сырья – на примере газификации древесной биомассы – относятся к категории "хорошо забытых" для наших современников. Тем не менее, во многих европейских странах первой половины XX века, включая СССР, активно развивалось транспортное и автомобилестроение на основе применения искусственного газового топлива, получаемого в специальных газогенераторах путем неполного сжигания древесины [1]. При этом углерод окисляется до монооксида СО:



Получаемая на основе этого процесса газовая смесь имеет относительно невысокую теплоту сгорания (до 4 МДж/м<sup>3</sup>) вследствие значительного содержания балластного азота N<sub>2</sub> с атмосферного воздуха, однако он является технологически простейшим.

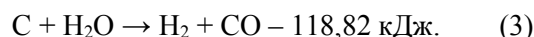
Еще ранее, на протяжении XIX века технологии газификации твердых топлив активно исполь-

зовались для освещения городов "светильным" газом (первоначальное название генераторного газа), в том числе – в Российской империи, в том числе – в Киеве.

В Германии довоенного и военного периода конверсия топлив была представлена в огромных масштабах – как газификацией бурых углей, так и производством из его продуктов синтетических жидких топлив (СЖТ) на основе процесса Фишера-Тропша, реализуемого с использованием железного катализатора:



(для бензинов  $n$  составляет 5-12, для дизельных топлив – 13-18). Для обеспечения значительного содержания водорода в продуктах газификации применяют те или иные технологии пароводяной газификации:



Их применение обусловлено в конечном итоге тем, что твердые топлива, в отличие от нефти,

имеют небольшое содержание  $H_2$  (5-6% по сравнению с 20-22% для нефти).

Оптимальная температура проведения процесса (3), являющегося эндотермическим, около  $1000^\circ C$ ; она должна поддерживаться за счет дополнительных источников энергии. Получаемый продукт – так называемый синтез-газ – имеет довольно высокую теплоту сгорания – до  $11,1 \text{ МДж/м}^3$  (для сравнения: природный газ –  $33,5\text{-}35,6 \text{ МДж/м}^3$ ).

Собственно, Институт газа НАН Украины, который представляют авторы, был создан в 1949 г. именно для решения проблем газификации твердых топлив, а его основатель и первый директор академик Н.Н.Доброхотов был выдающимся специалистом в этой области, как и в металлургии.

Однако уже во второй половине 50-х годов XX века технологии газификации твердых топлив и производства СЖТ преимущественно потеряли свою значимость вследствие дешевизны и доступности нефтегазовых ресурсов, что обусловило постепенное замещение использования угля природным газом.

После первого и второго мировых энергетических кризисов 70-х годов неотъемлемым элементом культуры современного энергопотребления стало рациональное использование энергетических ресурсов [2]. В его арсенале представлены также технологии газификации твердых топлив. Отражением этого утверждения является всплеск количества патентов, заявленных на оборудование газификации твердых топлив в середине 80-х, а затем – к 2004 году, до рекордных показателей 60-летней давности [1]. Это же касается основной темы этой публикации – производства альтернативных газовых топлив на основе переработки углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий. О динамике развития этого направления свидетельствует статистика патентования в США: количество получаемых патентов примерно удваивается каждые пять лет, начиная с 1981 г., а в 2001-2006 гг. было выдано около четырехсот патентов [3].

**Общая характеристика некоторых видов возобновляемого углеродсодержащего сырья с точки зрения технологий их конверсии.** В гло-

бальном масштабе применение возобновляемых источников энергии является альтернативой безудержному возрастанию потребления традиционных топлив и перспективы их исчерпания. Для Украины – это также важный фактор ослабления ее энергетической зависимости от импорта газа и нефти. Первым национальным нормативно-правовым документом, определившим важность развития технологий в этой сфере, стала Программа государственной поддержки развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии и малой гидро- и теплоэнергетики (ПНВИЭ), одобренная распоряжением Кабинета Министров Украины в 1997 году. В ней, в частности, подчеркнута важность расширения включения в топливный баланс страны таких ресурсов биомассы как отходы древесины, твердые бытовые отходы (ТБО) и сельскохозяйственные отходы, в том числе отходы животноводства и птицеводства. В качестве основных направлений их применения рассматривались прямое сжигание, получение биогаза и генераторных газов. Перспективы замещения ими традиционных топлив или объемов производства по оценкам тех лет составляли: по прямому сжиганию – 6,5 млн т условного топлива (у.т.), по биогазу – 4,3 млн т у.т. или 5 млрд  $\text{м}^3$ ; по генераторному газу – 0,82 млн т у.т. или 4,8 млрд  $\text{м}^3$ .

Следует подчеркнуть, что различие этих направлений использования биомассы связано с качеством получаемой энергии. Наименее ликвидной обычно представляется тепловая энергия, которая требует оперативного использования; тем не менее, потребители такой энергии в условиях отдельно располагаемых установок обычно отсутствуют. В этом отношении некоторыми преимуществами обладают продукты газификации, однако вследствие их значительных объемов возникают проблемы хранения. В настоящее время их используют обычно для производства электрической энергии с применением газопоршневых электростанций [4]; однако последняя также требует немедленного потребления. В отсутствие локальной нагрузки наиболее целесообразной является передача избытка энергии в общие электрические сети [5], однако это требует значительных организационных усилий. Поэтому в настоя-

щее время значительный интерес начинает вызывать возврат к технологиям производства СЖТ на основе усовершенствованных процессов Фишера-Тропша (2).

Среди отмеченных ресурсов биомассы древесина представляет собой наиболее привычный для наших климатических условий топливный ресурс. Сложнее выглядит ситуация с технологиями ее газификации в связи с сопутствующим загрязнением получаемых продуктов такими балластными компонентами, как смолы и сажа. Их концентрация в прямых процессах газификации (в которых газифицируемое сырье движется навстречу продуктам газификации) может достигать 10-100 г/м<sup>3</sup>. Для эксплуатировавшихся ранее газогенераторных двигателей с так называемым обращенным процессом газификации (в нем твердое топливо, газифицирующий агент и генераторный газ перемещаются в одном направлении, а отбор последнего осуществляется из горячей зоны газогенератора) нормальным считалось содержание смол 400-500 мг/м<sup>3</sup>, обеспечивающее ресурс работы 1000-3000 часов. Однако сегодня в мировой практике к качеству силового генераторного газа предъявляются более жесткие требования. Для обеспечения срока службы стационарных двигателей 50000-60000 ч концентрация смол в газе не должна превышать 10-100 мг/м<sup>3</sup>, а твердых частиц – 10-50 мг/м<sup>3</sup> [6].

Одна из наиболее современных разработок в этой области Европейского центра возобновляемой энергии (Австрия) для газификации древесной щепы лиственных пород (около 60 т/сутки) [7] позволяет получать синтетический газ примерно состава: Н<sub>2</sub> – 40%, СО – 24%, СН<sub>4</sub> – 10%, СО<sub>2</sub> – 23%, N<sub>2</sub> – 3% с такими вариантами его использования: 1) для привода газопоршневых электростанций установленной мощностью 2 МВт по электрической энергии и производства до 4,5 МВт тепловой энергии в когенерационном режиме; 2) конверсией в метан с содержанием последнего до 98% (и закачки его в газопровод); 3) конверсией в биодизель на основе процесса Фишера-Тропша. В ней предусмотрена специальная промывка газа с использованием в качестве промывающего вещества дизельного топлива. Тем не менее, установка имеет ресурс непрерывной ра-

боты от 4-6 недель. Затем она останавливается для проведения регламентных работ длительностью около 2-х суток.

В одной из современных разработок Института газа НАН Украины для газификации щепы хвойных пород дерева производительностью до 1200 м<sup>3</sup>/ч генераторного газа (тепловая мощность 1,5 МВт) приняты специальные меры для максимального снижения смол в генераторном газе за счет последовательного движения топлива через две зоны газификации. Причем в первой из них реализован обращенный процесс, обеспечивающий расщепление большей части смол до уровня 3 г/м<sup>3</sup> [8]. Для дальнейшего отделения смолы разработан дезинтегратор, обеспечивающий снижение содержания смол с температурой конденсации выше 80°C до 0,1 г/м<sup>3</sup>. Однако после каждых 700 часов ее функционирования также предусмотрено проведение регламентных работ.

Особо выглядит проблема использования в качестве энергоресурса ТБО. Потенциал ТБО в Украине составляет около 2 млн т у.т. [9]. Ранее практиковавшееся использование ТБО в качестве топлива в процессах прямого сжигания в современных технологиях вообще не используется вследствие опасности образования диоксинов и фуранов в случае переработки хлорсодержащего сырья. Они относятся к наиболее токсичным веществам, предельная допустимая эмиссия которых в атмосферу в продуктах переработки не может превышать 10<sup>-10</sup> г/м<sup>3</sup> [10].

Особо опасна с точки зрения образования этих токсинов область температур 200-650°C; считается, что наиболее активное их образование происходит при 200-450°C, с пиковыми показателями при температуре около 300°C [11]. В соответствии с Директивой 2000/76/ЕС при сжигании отходов с содержанием более 1% масс. галогенсодержащих органических веществ в пересчете на хлориды температура должна поддерживаться на уровне 1100°C, причем каждый локальный объем получаемых при переработке газов должен содержаться при этой температуре  $\geq 2$  с [10]. В этих условиях упомянутые токсины полностью разлагаются, а хлор присутствует в соединении HCl, легко образующем соли в дальнейших процессах очищения; кроме того, гарантированно обезвре-

живается биологическая компонента отходов. Указанный температурный режим близок к оптимальному для проведения пароводяной газификации углерода.

В дальнейшем осуществляется быстрое захлаживание продуктов газификации, чтобы избежать образования диоксинов и фуранов в их составе при промежуточных температурах. Процесс охлаждения завершается пропусканием их через известковое молоко либо раствор соды, в которых хлор связывается в устойчивое химическое соединение.

В условиях Украины, как и СНГ в целом, где уровень содержания хлора в отходах заранее неизвестен, другие технологии, строго говоря, кроме удовлетворяющих вышеприведенной норме Директивы 2000/76/ЕС о сжигании опасных отходов неприменимы вовсе. В развитых странах Европы в настоящее время широко распространено двухстадийное сжигание отходов в так называемых инсинераторах (на первой стадии – газификация, на второй – сжигание с получением тепловой энергии продуктов полного окисления). В развитых странах восточной Азии, например, в Японии, преимущественное применение нашли плазменные технологии переработки отходов.

Сложные проблемы выдвигают в настоящее время технологии конверсии отходов животноводства и птицеводства. Дело в том, что в связи со значительной интенсификацией этих производств получаемые отходы как по их объему (более 50 тыс. т/год), так и по уровню кислотности и загрязнению химическими препаратами не могут здуха. Первичный (поз. 24) в количестве 32-40% от общего расхода воздуха  $V_{air\Sigma}$  подается через ть согласно данным потенциальных заказчиков в Украине на примере отходов птицеводства (таблица 1).

Здесь плазменные технологии представляются вообще наиболее приемлемыми. Дело в том, что при использовании последних после переработки сырья образуется минимальное количество твердого остатка – на уровне нескольких процентов от начальной массы. Более того, будучи оплавленным в стеклоподобной массе (другими словами, витрифицированным), он представляет собой фактически нейтральный субстрат, безо-

пасный для окружающей среды. Для сравнения: на функционирующем в Киеве мусоросжигательном заводе "Энергия" чехословацкого производства, построенном еще в советский период, выход твердого остатка (золы), предполагающего дальнейшее захоронение на полигонах ТБО, составляет около 30-35% в массовом выражении. В свою очередь, из этого остатка извлекается всего 30% металла, да и то только обладающего магнитными свойствами. Не обеспечивают надлежащей безопасности твердого остатка продуктов конверсии также технологии двухстадийного сжигания (инсинераторы).

**Таблица 1. Некоторые физико-химические показатели отходов птицеводства**

Показатель, единица измерения	Значение
Влажность, %	65-75
Сухая масса, %	25-35
Зола на сухую массу (с.м.), %	20-35
Азот (N) на сухую массу, %	5-7
Аммонийный азот ( $NH_4-N$ ) на с.м., %	0,5-1,5
Фосфаты ( $P_2O_5$ ) на с.м., %	4-5
Калий ( $K_2O$ ) на с.м., %	2-3
Сера (S) на с.м., %	5-6
pH, единицы pH	6,5

Исходя из специфических свойств представленного выше возобновляемого ресурса, мы, собственно, применяем в этой публикации термин "углеродсодержащее сырье" вместо "топливо" в его общепринятом смысле. Тем не менее, можно привести примеры наиболее удачного сочетания преимуществ использования биомассы. Один из них – отходы производства кукурузы на зерно. В масштабах Украины их экономически целесообразный энергетический потенциал составляет 2,8 млн т у.т. [12]. Наиболее щадящими по отношению к условиям землепользования представляются технологии силосования зеленой массы кукурузы, в результате которого производятся корма для животных (или твердое биоудобрение), жидкие органические удобрения и биогаз. Последний может непосредственно использоваться в качестве топлива для газопоршневых электростанций, обеспечивая хозяйства дешевой электроэнергией. Продолжением этой тенденции является интерес к производству моторных топлив. Если исторический опыт получения СЖТ в Германии был ограничен крупнотоннажным производством,

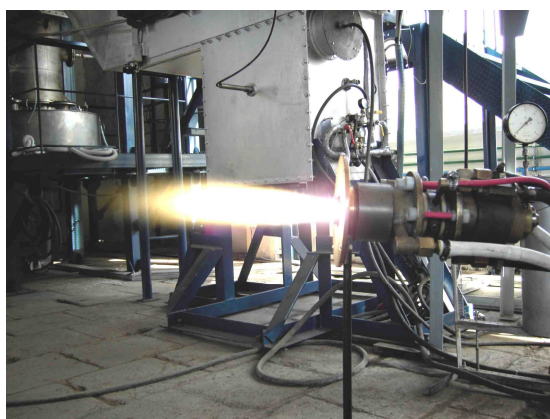
то в настоящее время активно развиваются технологии небольшой производительности [13]. Ниже мы обсудим вопрос эффективности плазменной конверсии биогаза в синтез-газ для дальнейшей реализации процесса Фишера-Тропша (2).

Весьма перспективным представляется использование в качестве сырья для газификации биомассы водорослей [14]. В настоящее время Институт ботаники им. Н.Г.Холодного НАН Украины и Институт газа НАН Украины исследуют эффективность такого рода технологий.

**Установка для плазменно-паровой газификации опасных отходов.** Такая установка (рис. 1) создана совместно Институтом газа НАНУ и Институтом электросварки им. Е.О.Патона НАНУ [15]. Ее принципиальное преимущество состоит в использовании в качестве газифицирующего



а



б

**Рис. 1. Опытно-промышленная установка для переработки медицинских отходов производительностью 50 кг/ч (а) и пароводяной плазматрон в процессе наладки оборудования (б).**

агента плазмы водяного пара – он позволяет получать продукты газификации максимальной теплотворной способности. Организация работы ус-

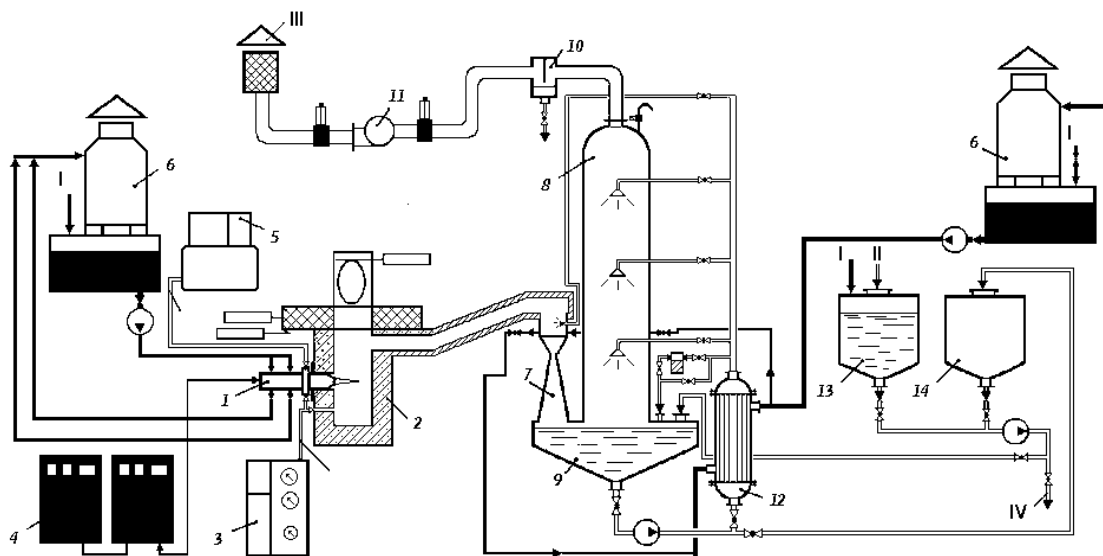
тановки полностью отвечает упомянутым выше требованиям Директивы 2000/76/ЕС [11] и, таким образом, она является экологически безопасной с точки зрения образования диоксинов при обработке отходов, содержащих хлориды. Отсутствие азота в составе газифицирующего агента решает проблему исключения попадания в продукты газификации оксидов азота – неизбежного атрибута плазменно-воздушных технологий [16].

Наличие водяного пара и высокая температура процесса позволяют также надежно исключить саже- и смолообразование в процессе газификации и обеспечить наиболее жесткие требования к силовому генераторному газу [6]. Это также является дополнительным фактором борьбы с образованием диоксинов, т.к. оно происходит наиболее активно именно на твердых частицах в результате гетерогенных каталитических процессов [17].

Таким образом, при утилизации опасных отходов (например, медицинских), содержащих углерод, последние в этой установке конвертируются в альтернативное газовое топливо. Оно может использоваться для энергетического самообеспечения с помощью газопоршневой электростанции [4], либо в качестве самостоятельного топлива, повышая в целом энергетическую эффективность процесса.

Технологически процесс конверсии осуществляется в условиях отсутствия или дефицита свободного кислорода в закрытом реакторе, общий вид которого представлен на рис. 1а. Он выполнен в металлическом корпусе, футерованном изнутри слоем огнеупорных теплоизоляционных материалов.

Принцип работы установки иллюстрирует рис. 2. Ее ключевым элементом является электродуговой плазматрон 1 мощностью до 160 кВт. Разогрев плазматрона осуществляется на воздухе с переходом на пар в качестве плазмообразующего газа. Плотная плазма с высокой температурой истекает через полый анод-сопло плазматрона в виде струи (см. рис. 1б) во внутренний объем реактора. В результате смешивания с другими ингредиентами процесса газификации все они принимают в конечном итоге температуру рабочего объема реактора.



**Рис. 2. Технологическая схема плазменно-паровой установки:** 1 – плазмотрон; 2 – реактор плазменно-паровой; 3 – парогенератор; 4 – последовательно соединенные источники питания "Плазма-2"; 5 – компрессор; 6 – градирня; 7 – скруббер Вентури; 8 – система заделки газов; 9 – подскрубберная емкость; 10 – фильтр-каплеуловитель; 11 – вентилятор (дымосос); 12 – теплообменник; 13 – бак содового раствора; 14 – бак со шламом; I – подача воды; II – сода; III – синтез-газ; IV – на утилизацию.

**Таблица 2. Состав основных продуктов газификации, получаемых из медицинских отходов**

Компоненты	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	iC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	nC <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	H <sub>2</sub> O
%, об.	49,89	1,99	35,25	2,52	3,37	3,92	0,13	0,13	0,45	0,20	0,23	1,92

В верхней части реактора расположена шлюзовая камера для периодической загрузки пакетированных медицинских отходов. Работа установки организована таким образом, что над перерабатываемыми отходами имеется свободное пространство, объем которого обеспечивает пребывание в нем продуктов газификации не менее 2 с для выполнения требований Директивы 2000/76/ЕС [11].

Принципиально важным элементом установки является дымосос 11, обеспечивающий отбор продуктов газификации и создающий разрежение в реакторе по отношению к атмосфере, чтобы исключить попадание этих продуктов в окружающее пространство. Узел очистки продуктов газификации включает скруббер Вентури 7 с системой заделки газов 8 и емкость с технологическим раствором 9 для промывки продуктов газификации.

Состав основных продуктов газификации, получаемых в установке для плазменно-паровой газификации из медицинских отходов, представлен в таблице 2 [18].

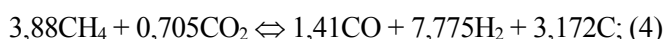
**Сопоставительный анализ плазменно-паровой и парокислородной технологий газификации**

**углеродсодержащего сырья.** Плазменные технологии, используя электрическую энергию для получения собственно плазмы как рабочего тела в обсуждаемых технологических процессах, легко позволяют достигать экстремальных состояний вещества и/или процесса, если сравнивать их с возможностями технологий, использующих первичные топлива, и достигать высоких технологических параметров процесса. Вложенная энергия не исчезает из процесса, однако следует иметь в виду, что в конечном итоге коэффициент преобразования первичного топлива для электроэнергии составляет всего около 0,25 с учетом эффективности генерации электрической энергии и потерь на ее транспортировку потребителям. Указанные рамки предопределяют, в конечном итоге, целесообразность применения плазменных технологий [19].

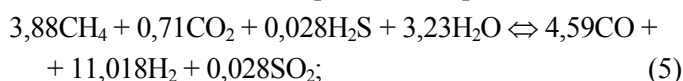
Для сокращения доли электрической энергии, используемой в процессе плазменной газификации, в состав газифицирующего пароводяного агента может дополнительно вводиться технический кислород. Однако практикуемое иногда противопоставление плазменных технологий газифи-

кации и технологий с использованием кислорода в пользу последних не является обоснованным, учитывая, что кислород не является природной субстанцией и его производство также требует затрат энергии. Это можно проиллюстрировать на примере конверсии биогаза в синтез-газ, о смысле которого говорилось выше. Ниже сопоставлены три возможные технологии конверсии биогаза (приблизительный состав:  $\text{CH}_4$  – 66%,  $\text{CO}_2$  – 33%,  $\text{H}_2\text{S}$  – 1%):

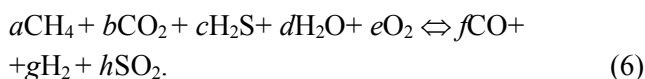
- пиролиз биогаза (с учетом предварительной очистки от  $\text{H}_2\text{S}$ ):



- плазменно-паровая конверсия:



- парокислородная конверсия:



Последняя реакция записана в общем виде, имея в виду возможность варьирования отношения  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$  и замещения недостатка тепловой энергии

джоулевым нагревом. В таблице 3 представлены варианты расчетов реакции (6) с убывающими отношениями  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ .

Для количественного анализа процессов конверсии с учетом также сопутствующих им реакций применено специальное программное обеспечение – система термодинамических расчетов "ТЕРРА" [20]. Оно же позволяет определить энергетические затраты, необходимые для проведения всех этих реакций в области температур от 1000 до 2000 К: для реакций (4) и (5) – только на джоулев нагрев и компенсацию их эндотермического характера, а для реакций (6) – также на производство кислорода, требуемого для их проведения (см. рис. 3). Для оценки последних приняты наиболее оптимистичные перспективные оценки на его производство по данным публикации [21], которые составляют  $0,35 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3$  (для реально же применяемых в настоящее время установок для получения кислорода этот показатель превышает  $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{нм}^3$ ).

Таблица 3. Варианты расчета реакции парокислородной конверсии с различными стехиометрическими отношениями содержания компонент  $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$

Вариант	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	<i>h</i>
1	3,88	0,71	0,028	0,5	1,363	4,59	8,29	0,028
2	3,88	0,71	0,028	1	1,113	4,59	8,79	0,028
3	3,88	0,71	0,028	2	0,613	4,59	9,79	0,028
4	3,88	0,71	0,028	3	0,113	4,59	10,79	0,028

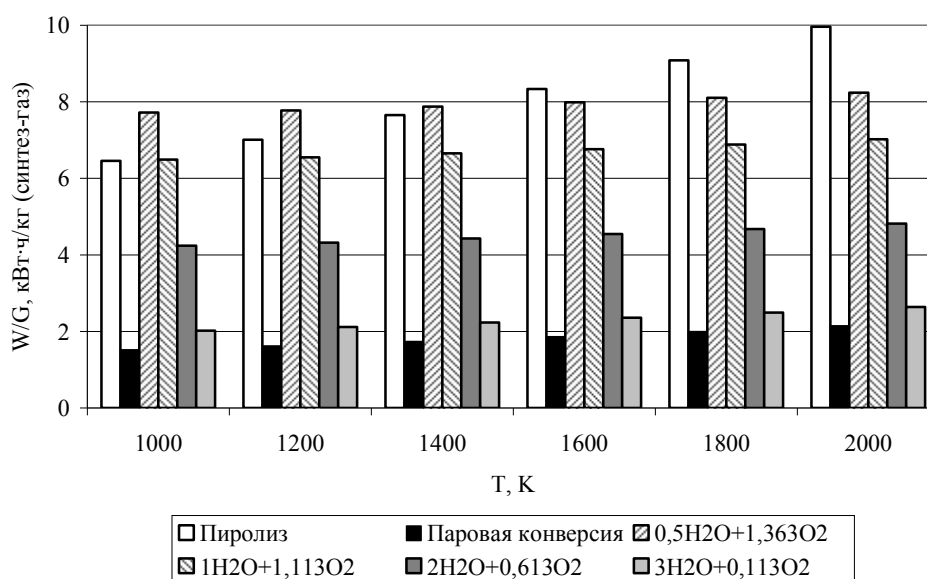


Рис. 3. Диаграммы энергетической эффективности отдельных вариантов конверсии биогаза при различных температурах.

Эти данные свидетельствуют, что пиролиз биогаза (4) (т.е., фактически, углекислотная конверсия метана) энергетически является достаточно затратным. Кроме того, при рабочих температурах этого процесса возможен существенный выход побочного продукта – конденсированного углерода (сажи). С такой примесью синтез-газ интереса не представляет. Более предпочтительной, как по показателям выхода синтез-газа, так и по энергетическим затратам, является плазменно-паровая конверсия биогаза (5). Добавление кислорода увеличивает общие энергетические затраты, а сопутствующее уменьшение количества водяного пара уменьшает выход синтез-газа. Таким образом, парокислородная конверсия (6) обладает более скромными показателями энергетической эффективности.

**Заключение.** Из материалов работы следует, что для отдельных видов возобновляемого углеродсодержащего сырья, таких как медицинские отходы, ТБО, отходы современных технологий животноводства и птицеводства, предпочтительно применение плазменных технологий их газификации. Показано, что такого рода технологии обладают наивысшими показателями энергетической эффективности, в том числе, вопреки бытующему мнению, по сравнению с парокислородными технологиями.

Представленная в работе установка для плазменно-паровой газификации медицинских отходов выполнена в полном соответствии с требованиями Директивы 2000/76/ЕС и представляет собой пример для развития технологий конверсии возобновляемого углеродсодержащего сырья, переработка которого сопряжена с риском загрязнения окружающей среды.

Выполнение этой работы поддержано Национальной академией наук Украины (проект 12-13 НАНУ).

1. *Копытов В.В.* Газификация твердых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2012. – №6 (98). – С. 29–78.

2. *Жовтянский В.А.* Энергосбережение. Энергетика: история, настоящее и будущее. – К.: 2010, Т.4. – С. 269–312, 481–484.

3. *Планковский С.И.* Плазменные технологии утилизации ТБО. Современное состояние и перспективы // *Материалы 4-й междунар. конф. "Сотрудничество для решения проблемы отходов"* (31 января -1 февраля 2007 г., Харьков). – Харьков: ЭкоИнформ, 2007. – С. 208–210.

4. *Вербовский В.С.* Возможности применения газодизельных электростанций в Украине // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 2003. – № 1. – С. 13–18.

5. *Жук Г.В., Пятничко А.И., Баннов В.Е., Кубенко С.Б.* Разработка системы переработки свалочного газа в электроэнергию // *Компрессорное и энергетическое машиностроение*. – 2012. – №2. – С. 11–14.

6. *Попов А.В., Рыжков А.Ф.* Управляемый процесс газификации биомассы // *Промышленная энергетика*. – 2008. – №1. – С. 27–31.

7. The European Centre for Renewable Energy – <http://www.eee-info.net>.

8. *Пьяных К.Е., Антошук Т.А.* Производство и использование генераторного газа для обеспечения работы парового котла // *Тез. докл. междунар. научно-техн. конф. "Энергоэффективность-2012"* (Санкт-Петербург, 29 мая – 1 июня 2012 г.). – СПб.: Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН, 2012. – С. 75–77.

9. *Бондаренко Б.І., Жовтянський В.А.* Проблема утилізації твердих побутових відходів і знешкодження небезпечних відходів в Україні: від проекту концепції – до державної науково-технічної програми // *Енерготехнології та ресурсозбереження*. – 2008. – №4. – С. 63–69.

10. Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration waste // *Official Journal of the European Communities L 332*, 28/12/2000. – P. 91–111.

11. *Руководящие принципы по наилучшим имеющимся методам и предварительные указания по наилучшим видам природоохранной деятельности применительно к статье 5 и Приложению С Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях* // UNEP/POPS/COP.1/INF/7. – 2005. – 371 p. (<http://chm.pops.int/Programmes/BAT/BEP/Guidelines/tabid/187/language/en-US/Default.aspx>).

12. *Переосмислення ступеня відповідальності перед майбутнім: Національна доповідь з питань реалізації державної політики у сфері енергоефективності за 2009 рік*. – К.: НАЕР-НАУ, 2010. – 254 с.

13. *Якубович М.Н., Стружко В.Л., Стрижак П.Е.* Влияние условий ведения процесса и состава катализатора на его производительность в синтезе Фишера-Тропша // *Катализ в промышленности*. – 2008. – №1. – С. 14–19.

14. *Золотарьова О.К., Шнюкова Є.І.* Куди прямує біопаливна індустрія? // *Вісн. НАН України*. – 2010. – № 4. – С. 10–20.

15. *Жовтянський В.А., Петров С.В., Коржик В.Н., Маринський Г.С., Чернец А.В.* Установка для конверсии углеродсодержащих материалов // *Тез. докл. междунар. научно-практ. конф. "Энергоэффективность"* (Киев, 6–8 октября 2008 г.). – К.: Ин-т газа НАНУ, 2008. – С. 114–116.



16. *Жовтянский В.А., Петров С.В., Колесник В.В., Орлик В.Н., Лелюх Ю.И., Невзгляд И.О., Гончарук Ю.А., Якимович М.В.* Конверсия углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2012. – № 5. – С. 15–32.

17. *Колесник В.В., Орлик В.Н., Олейник С. Ю., Россоха А.В.* Термодинамический анализ процессов образования диоксинов // Украинский химический журнал. – 2008. – Т.74. – №12. – С.78–82.

18. *Жовтянский В.А., Петров С.В.* Паро-плазменная технология переработки органических отходов в альтернативное топливо // Новини енергетики. – 2011. – №6. – С. 9 – 15.

19. *Жовтянский В.А.* Электрическая дуга – основа теплотехнических применений плазмы. Часть I. Общие свойства электродуговой плазмы и особенности процессов теплопереноса // Пром. теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 4. – С. 13–22.

20. *Ватолин Н. А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г.* Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. – М.: Металлургия, 1994. – 353 с.

21. *Лавренченко Г.К.* Современные технологии получения кислорода из воздуха // Сб. тез. докл. межд. научно-техн. конф. "Энергоэффективность-2010" (Киев, 19–21 октября 2010 г.). – К.: Ин-т газа НАНУ, 2010. – С. 54–55.