

**Жовтянский В.А.<sup>1</sup>, Петров С.В.<sup>1</sup>, Колесник В.В.<sup>2</sup>, Орлик В.Н.<sup>1</sup>,  
Лелюх Ю.И.<sup>1</sup>, Невзгляд И.О.<sup>1</sup>, Гончарук Ю.А.<sup>2</sup>, Якимович М.В.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Институт газа НАН Украины, Киев

<sup>2</sup> Национальный технический университет Украины «КПИ», Киев

<sup>3</sup> Национальный авиационный университет, Киев

## **Конверсия углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий**

Рассмотрены оптимизация производства альтернативных газовых топлив на основе конверсии углеродсодержащего сырья в процессах газификации некондиционных топлив и биомассы, утилизация твердых бытовых отходов, обезвреживание опасных отходов (например, медицинских) с применением плазменных технологий. На основе термодинамически равновесного приближения моделируется процесс плазменно-паровой газификации углеродсодержащего сырья в реакторе, внутренний объем которого разогревается с помощью плазмотрона, работающего на воздухе (в том числе обогащенного кислородом), парах воды или их смесей, используемых также в качестве газифицирующего агента. Описана установка для обезвреживания опасных отходов. При выборе режима ее работы учтены требования, связанные с исключением образования супертоксикантов и сажи. На основе кинетического подхода анализируются условия образования оксида и диоксида азота в случае применения воздушной плазмы. Приведены оценки термодинамически равновесных составов продуктов конверсии углеродсодержащего сырья на примере отходов.

**Ключевые слова:** альтернативные газовые топлива, плазменно-паровая газификация, плазмотрон, некондиционные топлива, твердые бытовые отходы, медицинские отходы, супертоксиканты, оксиды азота, синтез-газ.

Розглянуто оптимізацію виробництва альтернативних газових палив на основі конверсії вуглецевмісної сировини у процесах газифікації некондиційних палив та біомаси, утилізацію твердих побутових відходів, знешкодження небезпечних відходів (наприклад, медичних) із застосуванням плазмових технологій. На основі термодинамічно рівноважного наближення моделюється процес плазмово-парової газифікації вуглецевмісної сировини у реакторі, внутрішній об'єм якого розігрівается за допомогою плазмотрона, що працює на повітрі (у тому числі збагаченому киснем), водяній парі або їх сумішах, які використовуються також як газифікуючий агент. Описано установку для знешкодження небезпечних відходів. При виборі режиму її роботи враховано вимоги, пов'язані з виключенням утворення супертоксикантів та сажі. На основі кінетичного підходу аналізуються умови утворення оксиду та діоксиду азоту у випадку використання повітряної плазми. Наведено оцінки термодинамічно рівноважних складів продуктів конверсії вуглецевмісної сировини на прикладі відходів.

**Ключові слова:** альтернативні газові палива, плазмово-парова газифікація, плазмотрон, некондиційні палива, тверді побутові відходи, медичні відходи, супертоксиканти, оксиди азоту, синтез-газ.

### **Особенности и сопоставительный анализ эффективности плазменных технологий конверсии углеродсодержащего сырья**

В последние годы в научной литературе активно обсуждаются взаимосвязанные вопросы производства альтернативных газовых топлив на основе переработки углеродсодержащего сы-

рья и обезвреживания опасных отходов (например, медицинских) с применением плазменных технологий [1–17]. С 1981 г. количество патентов в этом направлении в США удваивается каждые 5 лет, а в 2001–2006 гг. было выдано около 400 патентов [18]. При утилизации твердых бытовых отходов (ТБО) или обезвреживании опасных отходов, содержащих углерод, по-

следний тоже конвертируется в альтернативное газовое топливо. Оно может использоваться для энергетического самообеспечения установки газификации, например, с применением газопоршневых электростанций (технологии их переоборудования для этих целей развиты в Институте газа НАНУ [19]) либо в качестве самостоятельного топлива, повышая в целом энергетическую эффективность процесса.

**Общие преимущества плазменно-паровых технологий газификации.** Принципиальные преимущества в качестве газифицирующего агента имеет водяной пар: он позволяет получать продукты газификации максимальной теплотворной способности [20], оптимально решать проблему исключения попадания в эти продукты оксидов азота — неизбежного атрибута плазменно-воздушных технологий [21], а также диоксинов и фуранов в случае переработки хлорсодержащего сырья [22, 23].

В соответствии с Директивой 2000/76/ЕС, при сжигании опасных отходов с содержанием более 1 % (мас.) галогенсодержащих органических веществ в пересчете на хлориды температура должна поддерживаться на уровне 1100 °С, причем каждый локальный объем получаемых при переработке газов должен выдерживаться при этой температуре не менее 2 с [24]. В этих условиях упомянутые супертоксиканты полностью разлагаются, а хлор присутствует в соединении HCl, легко образующем соли в дальнейших процессах очищения; кроме того, гарантированно обезвреживается биологическая компонента отходов. Указанный температурный режим близок к оптимальному для проведения пароводяной газификации углерода. При этом автоматически обеспечивается высокая скорость протекания реакций газификации в установке, что важно для справедливости принятой в этой работе равновесной модели процесса.

Далее осуществляется быстрое охлаждение продуктов газификации, чтобы избежать образования супертоксикантов в их составе. Особо опасна с этой точки зрения область температур 200–650 °С. Считается, что наиболее активное их образование происходит при 200–450 °С с пиковыми показателями при температуре около 300 °С [25]. Процесс охлаждения завершается пропуском этих продуктов через известковое молоко либо раствор соды, в которых хлор связывается в устойчивое химическое соединение.

Как показали наши исследования, оба эти фактора (наличие водяного пара и высокая температура процесса) позволяют надежно исключить саже- и смолообразование в процессе газификации. Эта задача, представляющаяся второ-

степенной при проектировании установок газификации, оказывается важнейшей в процессе их эксплуатации; именно она стала причиной неработоспособности множества реализованных «в металле» конструкций. Вследствие принципиальных проблем при ее решении даже серийно выпускавшиеся газогенераторные автомобили и трактора до- и военного периода имели ограниченный ресурс работы и требовали регулярной разборки и очистки систем газогенератора и двигателя от сажи и смол [26].

Одна из наиболее современных разработок Европейского центра возобновляемой энергии (Австрия) для газификации древесной щепы листовых пород (около 60 т/сут) [27] позволяет получать синтетический газ примерно такого состава, %: H<sub>2</sub> — 40; CO — 24; CH<sub>4</sub> — 10; CO<sub>2</sub> — 23; N<sub>2</sub> — 3. Он может использоваться для привода газопоршневых электростанций установленной мощностью 2 МВт по электрической энергии и для производства до 4,5 МВт тепловой энергии в когенерационном режиме, для конверсии в метан с содержанием последнего до 98 % (и закачки его в газопровод) и для конверсии в биоцидзель на основе процесса Фишера-Тропша.

В этой разработке предусмотрена специальная промывка газа с использованием в качестве промывающего вещества дизельного топлива (около 30 кг/ч); после отстаивания и отделения смол оно используется повторно. Установка имеет ресурс непрерывной работы 4–6 недель. После этого необходима ее остановка и проведение регламентных работ длительностью около 2 сут.

В одной из разработок Института газа НАНУ для газификации щепы хвойных пород дерева (производительность 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 3 г/м<sup>3</sup> [28]. Для дальнейшего отделения смол разработан дезинтегратор, обеспечивающий снижение содержания смол с температурой конденсации выше 80 °С до 0,1 г/м<sup>3</sup>. Однако после каждых 700 ч ее функционирования предусмотрено проведение регламентных работ.

Исключение саже- и смолообразования является дополнительным фактором борьбы с образованием диоксинов и фуранов, так как оно происходит наиболее активно именно на твердых частицах в результате гетерогенных каталитических процессов [29–31].

Дополнительное преимущество плазменных технологий состоит в том, что после переработки

ТБО образуется минимальное количество твердого остатка (несколько процентов от начальной массы). Будучи оплавленным в стеклоподобной массе (то есть витрифицированным), он представляет собой нейтральный субстрат, безопасный 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 % (мас.). Из этого остатка извлекается всего 30 % металла, да и то только обладающего магнитными свойствами.

Пароводяные технологии производства альтернативных топлив перспективны при использовании углеводородных ресурсов, в частности, углеродсодержащего сырья. Именно присутствие водяного пара решает проблему включения водорода в продукты газификации [13, 32, 33]; последний также является самостоятельным альтернативным топливом и предметом исследований в водородной энергетике [34]. Процесс производства альтернативных топлив энергетически не может быть более выгодным, чем простое извлечение первичных углеводородных топлив на устье скважины, однако это не распространяется на его экономику.

Обсуждая перспективы плазменных технологий газификации, нельзя обойти молчанием проблему риска образования таких вредных веществ, как оксиды азота в случае применения в качестве плазмообразующего газа воздуха или его смесей. С помощью плазменных технологий еще несколько десятилетий назад пытались решить проблему получения связанного азота для производства минеральных удобрений [35, 36]. Вопреки принятым выше допущениям о равновесном протекании основных процессов газификации разложение оксидов азота при охлаждении плазмы в широком диапазоне температур за срезом сопла плазмотрона не может рассматриваться как равновесный процесс.

В настоящей работе представлены результаты моделирования процесса газификации углеводородсодержащего сырья с применением плазменных технологий, выполненного в Институте газа НАНУ в рамках инновационного проекта [37] и при исследовании процессов термохимической подготовки низкорекреационного угля [38].

**Плазменные газификаторы и инсинераторы.** В развитых странах в настоящее время широко распространено двухстадийное сжигание отходов в специальных инсинераторах (на первой стадии — газификация, на второй — сжигание с получением тепловой энергии

продуктов полного окисления). Если обе стадии этой технологии, применяемой для переработки опасных отходов, удовлетворяют требованиям Директивы 2000/76/ЕС, то они обеспечивают их гарантированное и безопасное уничтожение. Капитальные затраты на строительство технологических комплексов для высокотемпературной газификации на 50 % ниже, чем на строительство комплексов эквивалентной производительности на базе инсинераторов, а эксплуатационные затраты ниже на 30 % [39]. В условиях СНГ, где уровень содержания хлора в отходах заранее неизвестен, другие технологии, кроме удовлетворяющих вышеприведенной норме Директивы 2000/76/ЕС о сжигании опасных отходов, не применимы вовсе.

Если инсинераторы применяются для уничтожения туш животных или для кремирования, эти требования несколько мягче и предполагают поддержание температуры на уровне 850 °С при времени удержания при этой температуре не менее 2 с [24].

Принципиальное преимущество плазменных установок для переработки или уничтожения отходов по сравнению с инсинераторами как ближайшими конкурирующими технологиями на основе двухстадийного сжигания состоит в их более высокой энергетической эффективности. Инсинераторы потребляют на входе тот или иной вид топлива (обычно дизельное или газ [40]), обеспечивая надлежаще высокий уровень температуры для сжигания отходов. Эта энергия может быть частично использована, что повышает в целом энергетическую эффективность установки. Вопреки точке зрения авторов одной из разработок инсинераторов [40] энергетики вполне справедливо применяют по отношению к отходам не только термины «уничтожение» или «обезвреживание», но и «переработка» или «конверсия», поскольку получается дополнительный энергетический продукт. Однако, если сопоставить три основных вида топливно-энергетических ресурсов, применяемых в экономике: электроэнергию, топливо и тепловую энергию, то именно последняя очень часто является наименее ликвидной. В условиях отдельно функционирующей установки ей трудно найти применение, в том числе для собственных нужд. При этом следует учесть, что, в соответствии с требованиями Директивы 2000/76/ЕС, получаемые дымовые газы должны быть предварительно быстро охлажденными ниже 200 °С. Причем их объем существенно превышает объем продуктов газификации на выходе плазменно-парового газификатора, так как этот дым содержит, кроме продуктов окисления перерабатываемого сырья,

продукты сжигания топлива и значительные объемы балластного азота в составе воздуха-окислителя. Таким образом, инсинераторы должны комплектоваться гораздо более производительной, чем в газификаторах, системой очистки, являющейся довольно дорогостоящей.

В отличие от этого в плазменных газификаторах конечным продуктом, подающимся в систему быстрого охлаждения и очистки, является горячий синтез-газ, в котором основной запас энергии заключается в химических связях, а не в тепловом движении молекул. Здесь система охлаждения и очистки требует переработки меньших объемов газа. Получаемый энергетический продукт является топливом, представляющим собой гораздо более ликвидный энергоресурс. Он, в частности, может быть использован для непосредственного энергетического самообеспечения установки [41–43], например, с применением газопоршневой электростанции.

Таким образом, с точки зрения энергетики можно говорить, что плазменные технологии позволяют утилизировать химическую энергию отходов, а также перерабатывать минеральный остаток в витрифицированный продукт, пригодный для применения в строительных работах. Наиболее добросовестные разработчики инсинераторов указывают, что предлагаемые ими технологии не гарантируют полной нейтральности получаемых шлаков. Считается, что большинство из этих установок имеет существенный недостаток — образование токсичного шлака, содержащего растворимые соли тяжелых металлов и остатки органических компонентов [44].

Основной недостаток плазменных технологий в настоящее время состоит в относительно небольшом ресурсе работы электродов применяемых плазмотронов (сотни часов). В свое время такой аргумент был основным со стороны противников широкого внедрения в странах СНГ плазменных технологий розжига и стабилизации горения пылеугольного топлива в котлах тепловых электростанций [2], пока не внедрился первый образец такого оборудования в КНР. В настоящее время оно применяется на почти 1000 блоков в этой стране. Ресурс работы электродов особой проблемы не составляет, так как они легко заменимы и недорогостоящие.

**Плазменно-паровая технология газификации углеродсодержащего сырья. Ее сопоставление с парокислородной технологией.** Обсуждаемые здесь технологии газификации отличаются тем, что необходимая для их протекания тепловая энергия вводится в систему с плазмой. Частичное окисление сырья кислородом при этом может не играть опреде-

ляющей роли для поддержания реакций газификации с точки зрения достижения номинального уровня температуры. В случае применения в качестве газифицирующего агента только водяного пара базовая реакция газификации (так называемая реакция водяного газа) является эндотермической [20]:



(здесь и далее принимается правило знаков, свойственное термодинамическим расчетам).

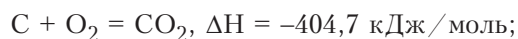
В таком виде эта реакция записана для угля, имеющего энтальпию образования  $\Delta H = 12,5 \text{ кДж/моль}$ . В случае рассмотрения графитизированного углерода величина  $\Delta H$  в данной реакции должна быть увеличена на отмеченную энтальпию образования угля.

Получаемая смесь водорода и монооксида углерода в различных соотношениях обычно называется синтез-газом. Она применяется, в частности, для производства синтетических жидких топлив. При температурах  $\geq 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  равновесие этой реакции выходит практически на насыщение в сторону получения продуктов газификации. Приведенная реакция дает представление о стехиометрии и ее энергетике, но для учета полноты процесса даже при упрощенном рассмотрении необходимо учитывать протекание сопутствующих реакций газификации (также записанных для угля) [20]:

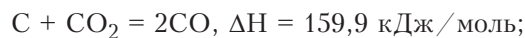
а) газификация кислородом (неполное горение)



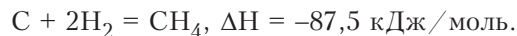
б) горение в кислороде



в) газификация диоксидом углерода (реакция Будуара)



г) газификация водородом (гидрогазификация)



В последующих деталях выкладках они учитываются автоматически за счет применяемого программного обеспечения — системы термодинамических расчетов ТЕРРА [45], принцип работы которой кратко представлен ниже.

Плазменные технологии, используя электрическую энергию для получения собственно плазмы как рабочего тела в обсуждаемых технологических процессах, легко позволяют достигать экстремальных состояний вещества и процесса, если сравнивать их с возможностями технологий, использующих первичные топлива.

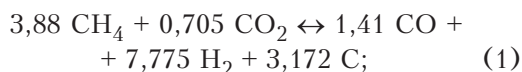


Вложенная энергия не исчезает из процесса, однако в конечном итоге коэффициент преобразования первичного топлива для электроэнергии составляет всего около 0,25 с учетом эффективности генерации электрической энергии и потерь на ее транспортировку потребителям. Это предопределяет целесообразность применения плазменных технологий [7].

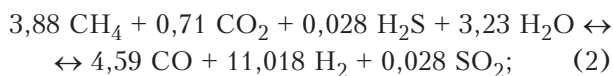
Для сокращения доли электрической энергии, используемой в процессе плазменной газификации, в состав газифицирующего пароводяного агента может дополнительно вводиться воздух, в том числе обогащенный кислородом, или даже технический кислород. Иногда практикуемое противопоставление плазменных технологий газификации и технологий с использованием кислорода не является достаточно обоснованным, учитывая, что последний не является природной субстанцией и его производство также требует определенных затрат энергии. Это можно проиллюстрировать на примере конверсии биогаза в синтез-газ [1]. Ее смысл — получение более ликвидного продукта, который подобно выше описанной технологии Европейского центра возобновляемой энергии [27] может быть использован для производства биодизеля на основе процесса Фишера-Тропша в интересах конкретных заказчиков.

Ниже сопоставлены три возможные технологии конверсии биогаза (его приблизительный состав, %: CH<sub>4</sub> — 66; CO<sub>2</sub> — 33; H<sub>2</sub>S — 1):

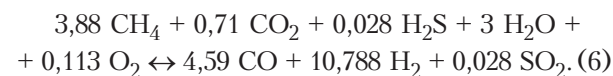
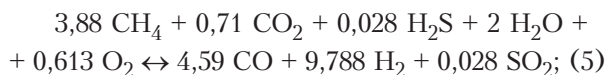
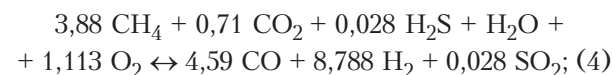
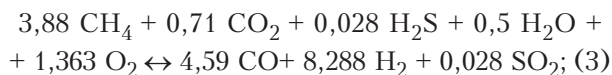
1) пиролиз биогаза (с учетом предварительной очистки от H<sub>2</sub>S)



2) плазменно-паровая конверсия



3) парокислородная конверсия (с убывающими отношениями O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O и замещением недостатка тепловой энергии Джоулевым нагревом)



Для всех этих реакций определены энергетические затраты, необходимые для их проведения в области температур 1000–2000 К: для реакций (1) и (2) — только Джоулев нагрев и компенсация их эндотермического характера, а для реакций (3)–(6) — также на производство кислорода, требуемого для их проведения (рис.1). Для оценки последних приняты наиболее оптимистичные перспективные оценки на его производство по данным [46], которые составляют 0,35 кВт·ч/нм<sup>3</sup> (для реально применяемых в настоящее время установок для получения кислорода — около 1 кВт·ч/нм<sup>3</sup>).

Эти данные свидетельствуют, что пиролиз биогаза (1) (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 по показателям выхода синтез-газа и по энергетическим затратам является плазменно-паровая конверсия биогаза (2). Добавление кислорода увеличивает общие энергетические затраты, а сопутствующее уменьшение количества водяного пара уменьшает выход синтез-газа. Таким образом, парокислородная конверсия (3)–(6) обладает более скромными показателями энергетической эффективности. Выбор технологий должен исходить из конкретно решаемых задач.

**Установка для плазменно-паровой газификации.** Возвращаясь к плазменно-паровой технологии газификации углеродсодержащего сырья на примере медицинских отходов, следует отметить, что технологически процесс осуществляется в закрытом реакторе в условиях отсутствия или дефицита свободного кислорода [9, 37, 41–43]. Реактор (рис.2) выполнен

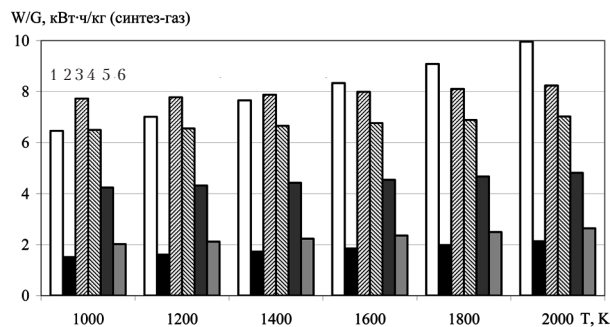


Рис.1. Диаграммы энергетической эффективности отдельных вариантов конверсии биогаза при разных температурах: 1 — пиролиз; 2 — паровая конверсия; 3 — 0,5H<sub>2</sub>O + 1,363O<sub>2</sub>; 4 — 1H<sub>2</sub>O + 1,113O<sub>2</sub>; 5 — 2H<sub>2</sub>O + 0,613O<sub>2</sub>; 6 — 3H<sub>2</sub>O + 0,113O<sub>2</sub>.

в металлическом корпусе К, футерованном изнутри слоем тепловой изоляции И (производства НИИ стеклопластиков и волокна, г. Буча, Киевская обл.), состоящей из волокнистых огнеупорных и теплоизоляционных материалов на основе  $Al_2O_3$  и неорганических высокотемпературных связующих. Этот слой изоляции распространяется на внутреннюю поверхность канала выхода продуктов газификации (газохода) вплоть до скруббера Вентури СВ. Футеровка рабочего пространства плазмохимического реактора выполнена огнеупорными плитами толщиной до 100 мм. Рабочая поверхность плит, образующая рабочую камеру, пропитана огнеупорным клеем. Диаметр рабочей камеры 400 мм.

Тепловой режим работы реактора обеспечивается за счет обогрева его внутреннего объема с помощью плазмотрона Пл. Узел организации движения плазменного потока, расположенный в зоне непосредственного влияния струи на стенку камеры, изготовлен из высокотемпературного огнеупорного материала «Бакор-33», который может длительное время выдерживать ее воздействие. Она вводится в камеру реактора тангенциально, что позволяет организовать завихрение потока с целью обеспечения равномерного разогрева рабочей камеры до уровня температур, необходимых для проведения процесса газификации.

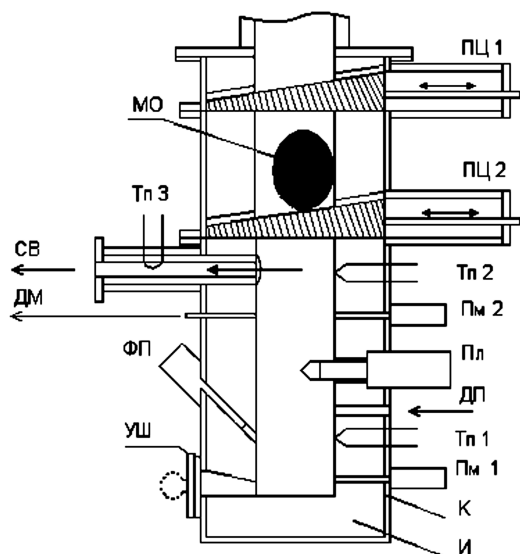
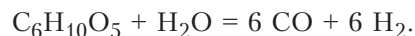


Рис.2. Схема плазменно-парового реактора: К – корпус; И – тепловая изоляция; ПЦ1, ПЦ2 – пневмоцилиндры шлюзовой камеры; Пл – плазмотрон; Тп1–Тп3 – термопары; Пм1, Пм2 – пирометры; ФП – фотоприемник; ДМ – к дифманометру; СВ – к скрубберу Вентури (горячий газоход); УШ – узел удаления шлака с уплотнительной прокладкой; ДП – дополнительная подача плазмообразующего газа; МО – пакет с медицинскими отходами (показан в процессе загрузки).

Реактор включает также узлы ПЦ1 и ПЦ2 периодической загрузки пакетированных медицинских отходов МО, образующие шлюзовую камеру. Организация работы установки не предполагает полную загрузку всего объема реактора отходами. Наоборот, для удовлетворения требований вышеупомянутой Директивы 2000/76/ЕС [24] над перерабатываемыми отходами имеется свободное пространство, объем которого можно определить из соображений пребывания в нем продуктов газификации не менее 2 с. Его можно оценить на основе примера паровой газификации целлюлозы – типичного компонента медицинских отходов:



При среднечасовой переработке 50 кг целлюлозы объемный выход получаемых продуктов газификации при 1200 °С составит 0,124 м<sup>3</sup>/с. Исходя из этого, определяется требуемый объем свободного пространства реактора и газохода, который должен более чем в 2 раза превышать секундный расход. При этом во всех точках этого объема температура должна быть не ниже 1100 °С. Для ее контроля объем реактора оборудован термопарами Тп1–Тп3 (на рис.2 показана часть из них). В качестве дополнительных средств контроля используются пирометры Пм1 и Пм2, а также фотоприемник ФП.

Принципиально важным элементом установки (рис.3) является вентилятор (дымосос) 11, обеспечивающий отбор продуктов газификации и создающий разрежение в реакторе по отношению к атмосфере, чтобы исключить попадание этих продуктов в окружающее пространство. Уровень этого разрежения контролируется манометром ДМ (см. рис.2).

Реактор оборудован также дополнительным вводом пара в его объем ДП, минуя плазмотрон, а также узлом удаления жидких продуктов переработки отходов (шлака) УШ.

Другие основные блоки и узлы установки в целом представлены на рис.3. Здесь показаны плазменно-паровой узел, включающий плазмотрон 1, парогенератор 3, узел очистки продуктов газификации, содержащий скруббер Вентури 7 с системой закалки газов 8 и емкость с технологическим раствором 9 для промывки продуктов газификации. Установка содержит также общую систему управления и контроля на основе промышленного компьютера (на рисунках не показана).

Плазменно-паровой узел обеспечивает генерирование плазменной струи заданных параметров и состава (от атмосферного воздуха, в том числе обогащенного кислородом, до чистого во-

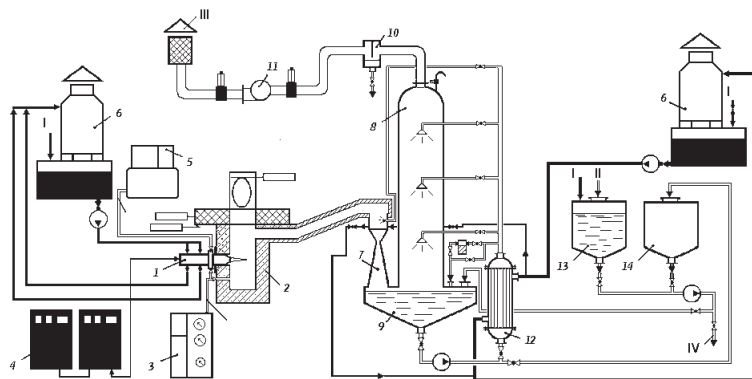


Рис.3. Технологическая схема плазменно-паровой установки: 1 — плазмотрон; 2 — реактор плазменно-паровой; 3 — парогенератор; 4 — последовательно соединенные источники питания «Плазма-2»; 5 — компрессор; 6 — градирня; 7 — скруббер Вентури; 8 — система заправки газов; 9 — подскрубберная емкость; 10 — фильтр-каплеуловитель;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

дяного пара). Процесс генерирования плазмы заключается в подготовке плазмообразующей среды (воздух — водяной пар) с необходимыми параметрами (давление, температура) и ее непрерывной подачи в электродуговой плазмотрон с полыми медными электродами, между которыми горит электрическая дуга мощностью до 160 кВт. В результате образуется плотная плазма со среднемассовой температурой  $T_{pl}$ , истекающая через полый анод-сопло в виде струи во внутренний объем реактора. Последняя в результате смешивания с другими ингредиентами процесса газификации (и их нагрева) принимает температуру рабочего объема реактора  $T_r$ . Таким образом, генерированная на выходе плазмотрона высокоскоростная плазменная струя с указанными параметрами является исходным теплоносителем и частично реагентом для процессов переработки углеродсодержащего сырья.

Расход плазмообразующего газа однозначно связан с мощностью плазмотрона, так как генерирование струи плазмотрона сопряжено со значительными расходами энергии на разогрев этого газа, его диссоциацию и ионизацию при температуре  $T_{pl}$ . Дальнейшее охлаждение струи связано с разогревом новых порций этого же плазмообразующего газа, подаваемого в реактор вне плазмотрона, а также перерабатываемого сырья с учетом происходящих химических реакций до температуры  $T_r$ .

При работе установки в стационарном режиме происходит периодическая загрузка реактора углеродсодержащим сырьем  $M_c$  с периодичностью полного цикла переработки  $T_{II}$ . Можно считать, что средний расход сырья составляет  $M_c/T_{II}$ . При этом за счет высоких температур

протекания процесса газификации обеспечивается высокая скорость протекания реакций, что позволяет принять равновесную модель процесса газификации.

Смысл управления работой установки для газификации углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий состоит в следующем. Исходя из состава перерабатываемого сырья и его среднего расхода, требуется установить такие состав и расход плазменной струи, а также дополнительную подачи в реактор компонентов плазмообразующего газа, чтобы обеспечить безопасный и наиболее энергетически выгодный режим переработки этого сырья (далее — оптимальный). Этого

можно добиться, применяя адекватную модель процесса газификации.

Ключевая идея собственно моделирования состоит в том, чтобы на основе определения термодинамических свойств газифицирующего агента (полученного с помощью плазмотрона или дополнительно вводимого в реактор) и перерабатываемого сырья добиться баланса энергии и массового расхода компонент с учетом происходящих в реакторе процессов газификации в оптимальном режиме.

Для достижения этих целей в реальном масштабе времени установка для плазменно-паровой газификации оборудована системой датчиков (частично представлены на рис.2), обеспечивающих контроль всех технологических процессов, и системой исполнительных устройств, позволяющих осуществлять необходимые корректировки процесса газификации. Управление ее работой осуществляется с помощью промышленного компьютера. В целом аппаратура управления и контроля оборудования выполняет функции автоматического управления процессом работы этого высокотехнологичного устройства, а также осуществляет мониторинг и архивацию всех параметров работы оборудования и создаваемых в процессе переработки химических веществ [37, 38, 42].

На рис.4 представлен внешний вид установки для переработки медицинских отходов производительностью 50 кг/ч.

### Обеспечение экологических требований

Принципиальным недостатком представленной в предыдущем разделе технологии является быстрое захлаживание продуктов газификации

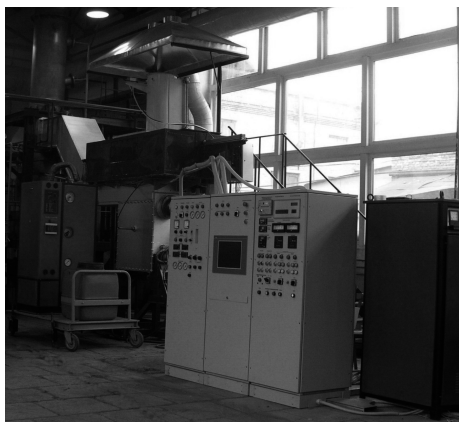


Рис.4. Опытно-промышленная установка для переработки медицинских отходов.

и, следовательно, безвозвратные потери их тепловой энергии. Однако при этом обеспечивается максимальная экологическая безопасность производства. Действительно, переработка отходов связана с риском попадания в систему хлорсодержащих материалов, особенно в условиях так называемого одностадийного сжигания, так как она сопряжена с образованием диоксинов и фуранов, являющихся супертоксикантами, предельная допустимая эмиссия которых в атмосферу в продуктах переработки составляет ничтожную величину  $10^{-10}$  г/м<sup>3</sup> [24].

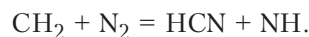
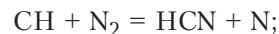
**Проблема образования супертоксикантов.** Наиболее опасный температурный диапазон с точки зрения образования супертоксикантов — 200–650 °С [25]. С этим связан повсеместный отказ от одностадийного сжигания отходов, в котором указанный температурный диапазон является близким к рабочему, и переход к двухстадийному сжиганию в инсинераторах.

Однако следует объективно учитывать ключевую разницу в применяемых технологиях в Украине и странах ЕС, где, например, на уровне стандартов исключено применение хлорсодержащих компонентов в медицинских технологиях. Кроме того, в ЕС стандартизирован состав твердого топлива, производимого из отсортированных ТБО по предельному содержанию хлора [39]; причем для производства синтетических топлив могут применяться только те из указанных твердых топлив, в которых содержание хлора не превышает 1 %. Украина далека от таких стандартов, а огромные накопления ТБО на полигонах для их захоронения или на несанкционированных мусоросвалках вообще исключают соответствие каким-либо стандартам.

Тема риска образования диоксинов и фуранов в процессе переработки отходов относится к одной из наиболее спекулятивных в нашей

стране. Это обусловлено тем, что вследствие дороговизны процедуры измерений (1,5 тыс. долл. за один тест) осмысленных экспериментов и надежных исследований в Украине не проводилось, поэтому отсутствует объективная база для реальных оценок.

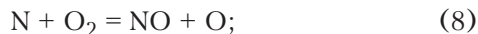
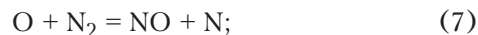
**Роль плазменных процессов в образовании оксидов азота.** Подобно тому, как это происходит в процессах горения, при газификации может происходить образование оксидов азота [47–49], причем по аналогии с топливными можно говорить о NO<sub>x</sub>, образующихся из газифицируемого сырья. Азот из этого сырья частично попадает в продукты газификации, частично может попадать в шлак, если он образует соответствующие прочные соединения. Однако доля последнего невелика, как невелико и общее количество образуемого шлака в плазменных технологиях. Превращения азотсодержащих веществ в газовой фазе приводят к образованию в основном HCN, CN, NH<sub>3</sub> и атомарного азота [49]. Указанные соединения в дальнейшем образуют в зависимости от температуры и количества окислителя либо оксиды азота, либо молекулярный азот. Могут образовываться также так называемые быстрые оксиды азота, которые получают при окислении азотсодержащих соединений, формирующихся по реакциям типа



Топливные и быстрые NO<sub>x</sub> образуются преимущественно в интервале температур 960–1200 К.

В случае применения в качестве газифицирующего агента воздушной плазмы существенно возрастает роль образования термических NO<sub>x</sub> вследствие гораздо больших температур в плазме, чем в пламени, и вследствие специфического для оксидов азота эффекта «закалки» [50], происходящего при снижении температуры от плазменной до существующей в реакторе.

Согласно экспериментальным данным [51], основным источником электронов в воздушной плазме вплоть до 7000 К при атмосферном давлении является образование ионов именно оксида азота NO<sup>+</sup>. Таким образом, этот оксид является неотъемлемым атрибутом воздушной плазмы. Цепной механизм реакции образования оксида азота в современных представлениях имеет вид [48]:





Скорость процесса в целом определяется первой, эндотермической, реакцией, требующей энергии активации не менее 313,8 кДж/моль.

В 1959 г. Ю.П.Райзер применительно к теории ядерного взрыва показал, что при высоких температурах (несколько тысяч градусов) в воздухе идет интенсивная реакция соединения кислорода и азота, в результате которой окисляется несколько процентов азота. Около 1 % образующегося оксида азота окисляется при таких температурах до диоксида (именно он определяет характерные оптические свойства ядерного взрыва, так как хорошо поглощает видимый свет) [50]. Общепринятые предельно допустимые концентрации (которые соответствуют национальным санитарным нормам для населенных мест [52]) для диоксида азота являются более жесткими, чем для оксида азота, и составляют следующие максимальные разовые значения: ПДК (NO<sub>2</sub>) = 0,085 мг/м<sup>3</sup> и ПДК (NO) = 0,4 мг/м<sup>3</sup>.

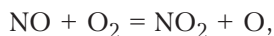
Оксид азота, образовавшийся при высоких температурах, не распадается при остывании воздуха, так как скорость реакции чрезвычайно резко падает при понижении температуры — в этом и состоит эффект закалки. Характерное время (с) установления равновесной концентрации оксида азота определено в работе [50] применительно к реакциям (7) и (8) и составляет:

$$\tau_{NO} = [2,06 \cdot 10^{-12} / (c_{N_2})^{1/2}] \cdot e^{53750/T},$$

где c<sub>N<sub>2</sub></sub> — равновесная массовая концентрация азота.

Учитывая, что в воздушной плазме реакция (9) не реализуется ввиду отсутствия H<sub>2</sub>, эти данные могут быть применены для оценок в условиях настоящей работы. Графики равновесных значений концентраций NO и NO<sub>2</sub> и зависимости τ<sub>NO</sub> от температуры представлены на рис.5; резкое увеличение τ<sub>NO</sub> со снижением T обусловлено большой энергией активации реакции.

В работе [50] исследование образования NO<sub>2</sub> при высоких значениях температур выполнено на основе реакции



для которой характерное время составляет

$$\tau_{NO_2} = (k_- c_O)^{-1},$$

где k<sub>-</sub> — константа скорости для этой реакции в обратном направлении; c<sub>O</sub> — равновесная массовая концентрация атомов кислорода.

Принимая современное значение k<sub>-</sub> = 10<sup>12</sup> · exp(302/T) [53], можно определить температурную зависимость τ<sub>NO<sub>2</sub></sub>. Она представлена на рис.5,6 (кривая 4).

Характерное время снижения температуры в плазменной струе τ<sub>j</sub>, возвращаясь к процессам газификации, можно оценить, исходя из видимого размера струи плазмотрона l<sub>j</sub> ~ 0,3 м и скорости потока порядка скорости звука в плазме v ~ v<sub>pl</sub><sup>s</sup> ~ 10<sup>3</sup> м/с: τ<sub>j</sub> = l<sub>j</sub>/v<sub>pl</sub><sup>s</sup> ~ 3 · 10<sup>-4</sup> с. Отобразив его горизонтальной линией от оси ординат на рис.5,6, получим два значения температуры T<sub>NO\*</sub> и T<sub>NO<sub>2</sub>\*</sub>, при которых происходит закалка в потоке плазмы концентраций оксида и диоксида азота соответственно. Сами значения этих концентраций c<sub>NO</sub><sup>j</sup> и c<sub>NO<sub>2</sub></sub><sup>j</sup> легко находятся с помощью рис.5,а через отмеченные выше значения температур. Соответствующее графическое построение приведено на рис.5. Таким

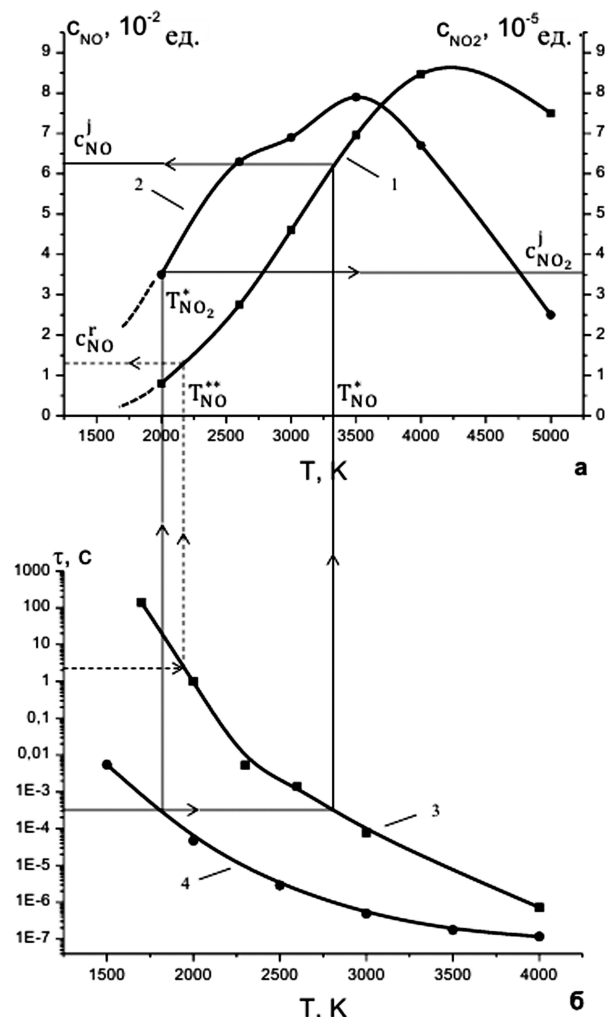
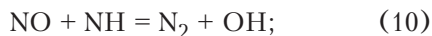


Рис.5. Температурные зависимости равновесных значений концентраций оксида азота c<sub>NO</sub> (1) и диоксида азота c<sub>NO<sub>2</sub></sub> (2) в воздухе (а) и характерных времен τ<sub>NO</sub> (3) и τ<sub>NO<sub>2</sub></sub> (4) установления их равновесной концентрации (б); графическое построение (прямые со стрелками), показывающее закалку этих частиц в плазменной струе на уровне концентраций c<sub>NO</sub><sup>j</sup> и c<sub>NO<sub>2</sub></sub><sup>j</sup> и в плазменном реакторе на уровне c<sub>NO</sub><sup>j</sup>.

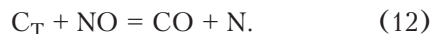
образом, если начальное значение температуры плазмы в плазмотроне составляет  $T \geq T_{\text{NO}_2^*}$ , то будут достигаться равновесные значения концентраций оксида и диоксида азота, а в конце струи они составят  $c_{\text{NO}}^j$  и  $c_{\text{NO}_2}^j$ .

Работе газификатора свойственно еще одно характерное время — время пребывания продуктов газификации в реакторе  $\tau_r \sim 2$  с при температуре около 1500 К. Используя данные рис.5,6 нетрудно заключить, что здесь оксид азота сохраняет свое неравновесное значение концентрации, а диоксид азота выходит на равновесное значение  $c_{\text{NO}_2}^r$  при указанной температуре по отношению к упомянутому неравновесному значению концентрации  $c_{\text{NO}}^j$ .

Однако, здесь рассмотрено поведение собственно газифицирующего агента на примере воздушной плазмы. В реальном процессе конверсии углеродсодержащего сырья следует учитывать возможность реакций оксидов азота с продуктами газификации. Не случайно, одним из преимуществ применения топливно-энергетических систем на основе воздушных плазмотронов для повышения эффективности использования твердых топлив является снижение выбросов  $\text{NO}_x$  [49]. По мнению авторов этих технологий, превращение  $\text{NO}_x$  в азот происходит в результате газофазных реакций (8), (9) и



а также гетерогенной реакции с углеродом коксового остатка



С точки зрения технологий горения считается также целесообразным применение бедных смесей, характеризующихся недостатком окислителя. При этом кислород будет связан преимущественно углеродом, а не азотом, снижая риск образования его оксидов. Такое решение выглядит недостаточно приемлемым в процессах газификации вследствие риска сажеобразования. Эта задача требует отдельного рассмотрения.

Применяемые системы газоочистки в технологиях переработки опасных отходов на основе промывки продуктов газификации в растворе кальцинированной соды являются также действенным средством очистки их от  $\text{NO}_x$  [54].

Получение более строгих соотношений в целом предполагает решение задачи кинетики образования оксидов азота и выходит за рамки этой публикации.

Анализ образования оксидов азота в процессах газификации требует рассмотрения кинети-

ческих соотношений. Абсолютные значения их содержания даже в случае применения в качестве газифицирующего агента воздушной плазмы составляют единицы процентов и поэтому при рассмотрении в равновесном приближении не вызывают существенных искажений компонентного состава получаемых продуктов газификации.

Следует особо подчеркнуть в связи с этим преимущества применения в качестве газифицирующего агента пароводяной плазмы, где подобная проблема не возникает вовсе. Более того, для снижения риска образования топливных оксидов азота в слабо контролируемых локальных областях взаимодействия плазменной пароводяной струи с газифицируемым сырьем предусмотрено снижение температуры струи дополнительным подмешиванием порций холодного плазмообразующего газа непосредственно на выходе плазмотрона [55].

### Плазмотрон

Применяется электродуговой плазмотрон, выполненный по двухэлектродной осевой схеме с медными полыми электродами: полым глухим катодом и выходным соплом-анодом с уступом [56]. Стабилизация привязки катодного участка электрической дуги в полости катода осуществляется магнитным полем от соленоида, запитанного последовательно с электрической дугой. Стабилизация привязки анодного участка дуги осуществляется газодинамически с помощью уступа в канале сопла-анода и магнитным полем от соленоида, запитанного последовательно с электрической дугой. Столб электрической дуги стабилизируется по оси дугового канала в зоне наименьшего давления (воздушного) парового вихря. В качестве рабочих газов применяются сжатый воздух и водяной пар. Поджиг плазмотрона осуществляется на воздухе с переходом на пар в качестве плазмообразующего газа. В качестве охлаждающей жидкости применяется вода.

Мощность плазмотрона — до 160 кВт, ток дуги — до 400 А, КПД = 0,71. Напряжение холостого хода источника электропитания 500 В. Внешний вид плазмотрона и генерируемой им плазменной струи в процессе наладки оборудования представлен на рис.6.

Струя паровой плазмы имеет высокую температуру и скорость с максимумом на оси, которые могут достигать 7000 К и 2000 м/с. Для технологии газификации углеродсодержащих веществ необходимы такие параметры пара: 1500–2000 К и 30–100 м/с. Для приведения к этим параметрам плазмы струи плазмотрона на его выходе применен цилиндрический реакторный насадок, в который через за-

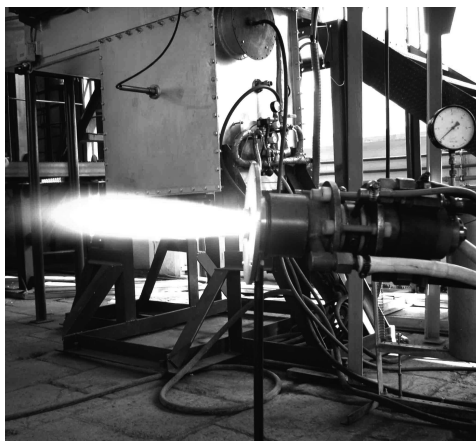


Рис.6. Пароводяной плазмотрон в процессе наладки оборудования.

вихритель подается вторичный пар [55]. За счет вихревого течения вторичного пара на короткой дистанции 0,5–3 калибра струя паровой плазмы интенсивно перемешивается со вторичным паровым потоком с выравниванием всех параметров (температуры, скорости, концентраций) по сечению канала насадка. Температура пара на выходе насадка может составлять 1200–2000 °С.

Кроме снижения риска образования топливных оксидов азота в слабо контролируемых локальных областях взаимодействия плазменно-паровой струи с газифицируемым сырьем, применение цилиндрического реакторного насадка снижает локальную термическую нагрузку на тепловую изоляцию плазменно-парового реактора.

#### **Термодинамическая модель процесса газификации углеродсодержащего сырья с применением плазменных технологий**

Рассмотрение кинетических, тепло- и массообменных процессов при повышенных температурах, как правило, уже на этапе постановки задачи моделирования приводит к значительным трудностям. В детальных расчетных схемах они обычно связаны со сложностями математического характера и отсутствием необходимых замыкающих исходных данных, а в упрощенных моделях — с чрезмерной схематизацией процесса. В связи с этим большую популярность приобрели термодинамические методы моделирования. Они предполагают, что рабочее тело в рассматриваемых процессах образует условно замкнутую, изолированную систему, в которой установилось локальное фазовое и химическое равновесие. В таком приближении состояние системы определяется лишь содержанием в ней химических элементов и значением двух параметров состояния.

Правомерность использования термодинамически равновесного приближения оправдывается высоким уровнем концентрации энергии в рассматриваемых объемах и, следовательно, высокими скоростями протекания процессов превращения, практически мгновенно приводящими среду в состояние локального равновесия (за некоторыми исключениями, отмеченными выше).

**Методика расчетов.** Для описания состояния термодинамического равновесия используется метод, основанный на понятии химического сродства и степени завершенности химических реакций. Он использует один из принципов экстремумов термодинамики, записываемый в виде максимума некомпенсированной теплоты химических реакций (немеханической работы), которая представляется как результат действия химических сил  $A_q$  вдоль некоторых координат  $\xi_q$ , называемых степенями завершенности реакций [57–61]. Этот метод сводится к решению задачи о нахождении экстремума термодинамического потенциала относительно степеней завершенности реакций [58]. В конечном итоге он является следствием второго закона термодинамики и закона сохранения энергии, распространенных на изолированные многокомпонентные системы, находящиеся в состоянии равновесия. Второй закон термодинамики постулирует принцип максимума энтропии в предельно равновесном состоянии. Поэтому в дальнейшем этот принцип будет использован непосредственно.

Установление фазового и химического равновесия в любой системе — реальный необратимый процесс. Для него характерно возрастание энтропии, выражаемое в соответствии со вторым началом термодинамики соотношением  $dS \geq \delta Q/T$ . Знак неравенства означает, что когда в системе протекает необратимый процесс, то в ней как бы действуют внутренние источники тепла, которые «порождают» энтропию. В равновесном состоянии эти источники иссякают, энтропия достигает своего максимального значения, а само неравенство превращается в уравнение  $dS = 0$ . Расчет равновесия изолированных многокомпонентных термодинамических систем может быть сведен к задаче определения состояния, характеризующего максимумом энтропии. С математической точки зрения она сводится к решению задачи на условный экстремум, причем для составления искомого уравнения необходимо найти аналитическую связь между величиной энтропии единицы массы рабочего тела и термодинамическими параметрами, определяющими ее состав, свойства и условия существования.

Такая методика реализована в виде автоматизированной системы термодинамических расчетов ТЕРРА [45]. При этом считается, что рас-

смагриваемая система состоит из нейтральных компонентов газовой фазы и отдельных конденсированных фаз, причем для газовой фазы в целом и для каждого ее компонента в отдельности справедливо уравнение состояния идеального газа, а конденсированные фазы — однокомпонентные и несмешивающиеся.

### **Состав углеродсодержащего сырья.**

Для проведения расчетов по термодинамическому равновесию в процессе термического разложения углеродсодержащего сырья необходимо интерпретировать реальный состав обрабатываемых материалов, учитывая возможное многообразие исходного сырья. Для демонстрационных расчетов выбирался типичный представитель, исходная структура которого отображалась в виде брутто-формулы. В соответствии с этим для отдельных групп углеродсодержащего сырья выбраны следующие брутто-формулы. Для полимерных материалов, ориентируясь на полиэтилен и полипропилен, содержащих только атомы углерода и водорода — одна и та же брутто-формула  $C_5H_{10}$ . Для полихлорвинила, в состав которого входит атом хлора, использована формула  $C_2H_3Cl$  (учет хлора представляется методически интересным из-за его токсичности и проблемы избавления от него в относительно низкотемпературных процессах переработки отходов). Ткани, бумагу, картон можно рассматривать как условную целлюлозу с брутто-формулой  $C_6H_{10}O_5$ , учитывая, что основой всех этих материалов является целлюлоза, имеющая различную молекулярную массу в зависимости от длины используемых волокон (длины полимерной цепочки). Резиновые и латексные изделия, кроме углерода и водорода содержащие в небольшом количестве атомы серы (что также методически интересно с точки зрения часто возникающей проблемы сероочистки), рассматриваются как  $C_{50}H_{80}S$ .

Для каждой группы углеродсодержащего сырья следует учитывать отдельно конкретное содержание влаги. Так, при переработке только полимерных материалов количество непосредственно вносимой с ними влаги близко к нулю, а содержание влаги при переработке других материалов требует конкретного учета.

**Методика определения стандартной энтальпии образования компонентов углеродсодержащего сырья.** Для расчета удельных энергетических затрат на высокотемпературную конверсию углеродсодержащего сырья, кроме знания параметров равновесного состава, соответствующего выбранной температуре проведения процесса, необходимо знание стандартной энтальпии образования исходных материалов, подлежащих конверсии.

В некоторых случаях для этих компонентов могут отсутствовать такие данные в литературе. Поэтому для веществ, состоящих преимущественно из углеводородов, в качестве косвенного метода определения стандартной энтальпии образования выбран подход, основанный на использовании формулы Д.И. Менделеева [62] для расчета теплоты сгорания веществ. В соответствии с этим низшая теплота полного сгорания вещества (учитывая правило знаков, принятое при термодинамических расчетах)  $Q_H = -100 (81 c_C + 246 c_H - 26 (c_O + c_S) - 6 c_W) \cdot 4,19$  кДж/кг (здесь  $c_C$ ,  $c_H$ ,  $c_O$ ,  $c_S$ ,  $c_W$  — массовые доли атомов углерода, водорода, кислорода, серы и воды). Причем для простых веществ ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $C(s)$  — твердая фаза углерода и т.п.) энтальпия образования равняется нулю.

Из соотношения для теплоты сгорания

$$Q_H = \Delta H^{\text{ВЫХ}} - \Delta H^{\text{ИСХ}}$$

следует, что

$$\Delta H^{\text{ИСХ}} = \Delta H^{\text{ВЫХ}} - Q_H,$$

где  $\Delta H^{\text{ИСХ}}$  — сумма энтальпий исходных веществ;  $\Delta H^{\text{ВЫХ}}$  — сумма энтальпий продуктов реакции.

В работе [38] показано, что энтальпия образования целлюлозы с брутто-формулой  $C_6H_{10}O_5$  (типичный пример биомассы, а также компонент медицинских отходов) составляет  $\Delta H_{C_6H_{10}O_5} = -6120$  кДж/кг.

**Расчет параметров газифицирующего агента.** Решающий вклад в поддержание процесса газификации с точки зрения его энергетике вносит плазменная струя. В качестве плазмообразующего газа могли использоваться водяной пар, воздух, технический кислород или их смеси. Для обеспечения полноты протекания реакций предусмотрено введение в реактор дополнительных порций компонента плазмообразующего газа и вне плазмотрона. В качестве одной из компонент газифицирующего агента следует рассматривать также влагу, содержащуюся в газифицируемом сырье.

Выполненные далее предварительные расчеты позволяют определить для плазмотрона заданной тепловой мощности общий и покомпонентный расход плазмообразующей смеси в зависимости от требуемой температуры в реакторе и соотношения компонентов, используемых для ее создания. Как показывает расчет, варьирование состава плазменной струи и газифицирующего агента в целом дает возможность наиболее оптимально организовать переработку углеродсодержащего сырья с учетом его конкретного состава и в случае необходимости — дополнительных требований к составу получаемых продуктов переработки этого сырья.



В основе расчета лежит метод энергетических балансов с использованием полной энтальпии компонентов при заданной температуре в реакторе, который производился с помощью системы термодинамических расчетов ТЕРРА. При этом исходная энтальпия паров воды соответствовала полной энтальпии насыщенных водяных паров при 100 °С, а воздуха — его полной энтальпии при 20 °С.

Процедура расчета параметров газифицирующего агента как продуктов охлаждения плазменной струи до заданной температуры в реакторе состояла в расчете значений полной энтальпии исходной смеси для заданной последовательности температур в реакторе  $I_k = I(t_k)$ ,  $k = 1, \dots, n$  при разных процентных значениях содержания воды в исходной смеси и кислорода в воздухе. По наиболее вероятным условиям процесса конверсии углеродсодержащего сырья расчет производился для диапазона температур 1200–3000 °С с шагом 100 °С ( $n = 19$ ). Далее рассчитывалось количество тепловой энергии  $\Delta_k$ , необходимое для подогрева 1 кг исходной смеси от начального состояния до заданной температуры в рассматриваемом диапазоне  $\Delta_k = I_k - I_0$ , где  $I_0$  соответствует энтальпии исходной смеси.

Исходя из заданной тепловой мощности плазматрона  $W$ , определялся секундный общий расход  $G_{sum}$  газифицирующего агента

$$G_{sum}(t_k) = W / \Delta_k,$$

а также покомпонентный:

$$G_{H_2O}(t_k) = \gamma G_{sum}(t_k);$$

$$G_{O_2}(t_k) = (1 - \gamma) G_{sum}(t_k) \eta;$$

$$G_{N_2}(t_k) = (1 - \gamma) G_{sum}(t_k) (1 - \eta),$$

где  $\gamma$  — массовая доля водяного пара в газифицирующей смеси ( $0 \leq \gamma \leq 1$ );  $\eta$  — массовая доля кислорода в воздухе, используемом для образования смеси.

Результаты расчетов для соотношений вода : атмосферный воздух ( $\eta = 0,23$ ) и вода : воздух, обогащенный кислородом ( $\eta = 0,55$ ), представлены на рис.7. Они выполнены применительно к плазматрону тепловой мощностью 100 кВт. Использование плазматронов другой мощности приведет к пропорциональному изменению приведенных данных.

В этих расчетах учтено, что максимальное количество газифицирующего агента, которое может быть подано непосредственно с плазменной струей, связано с мощностью плазматрона и уменьшается при повышении температуры

плазменной струи. Однако этого количества может оказаться недостаточно для того, чтобы сместить процесс конверсии в необходимую сторону. Поэтому, как правило, возникает необходимость подачи в качестве реагента дополнительного количества газифицирующего агента.

При непосредственном использовании программы ТЕРРА нет возможности разделить указанные потоки газифицирующего агента, имеющие различное происхождение и различающиеся по уровню энтальпии. Для решения этой задачи к тому количеству энергии, которое вносится в реакционный объем плазменной струей в соответствии с мощностью плазматрона, добавлялось количество энергии, которое было затрачено при нагреве дополнительного газифицирующего агента до температуры в реакционном объеме.

Часть воды в сконденсированном состоянии поступает в реакционный объем непосредственно с перерабатываемым материалом при температу-

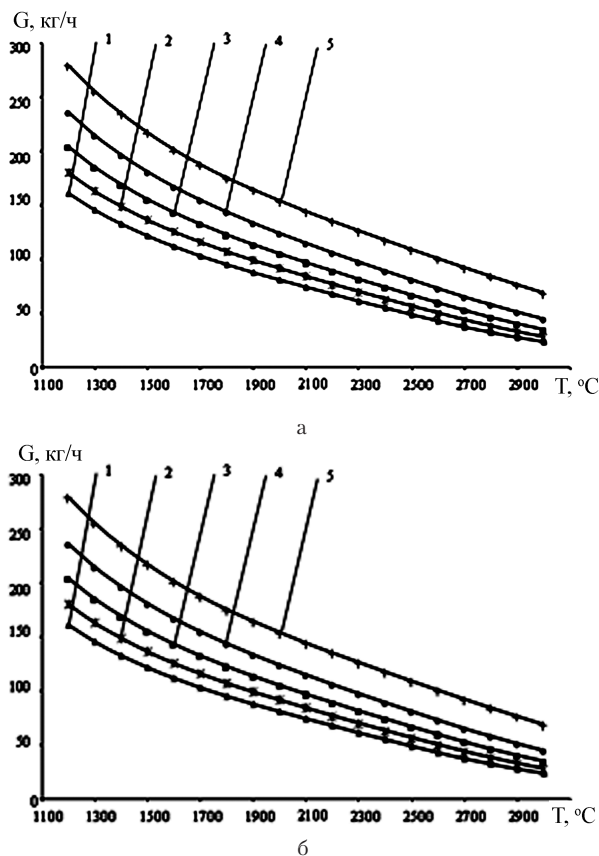


Рис.7. Зависимость расхода газифицирующего агента с учетом использования его части в качестве плазмообразующего газа и нагрева в плазматроне от требуемой температуры в реакторе для смесей водяной пар — воздух атмосферный ( $\eta = 0,23$ ) (а) и водяной пар — воздух, обогащенный кислородом ( $\eta = 0,55$ ) (б) при различных объемных содержаниях водяного пара в смеси  $\gamma$ : 1 — 1,0; 2 — 0,8; 3 — 0,6; 4 — 0,4; 5 — 0,2; 6 — 0. Тепловая мощность плазматрона 100 кВт.

ре  $t_m$  последнего. Это означает, что от общего количества энергии, подводимой в реакционный объем с плазменной струей и дополнительным газифицирующим агентом, вычитается энергия  $\Delta_m$ , расходуемая на перевод конденсированной воды  $G_{H_2O_m}$  в паровое состояние при 100 °С:

$$\Delta_m = G_{H_2O_m} [c_{H_2O(ж)} (100 - t_m) + \Delta Q_{H_2O}],$$

где  $c_{H_2O(ж)}$ ,  $\Delta Q_{H_2O}$  — удельная теплоемкость и теплота парообразования воды.

Методически подобным образом учитывается при составлении энергетического баланса дополнительный нагрев сухой части перерабатываемого материала.

### Равновесные составы продуктов конверсии углеродсодержащего сырья

Далее приведены оценки термодинамически равновесного состава продуктов конверсии углеродсодержащего сырья и необходимой тепловой мощности плазмотрона при заданной производительности установки, а также возможной производительности установки по переработке отдельных видов упомянутого сырья при фиксированной мощности плазмотрона. Оба типа расчетов производились для разных значений температуры в реакторе для переработки сырья с учетом соотношения реагентов (вода, воздух, кислород), образующих плазменную струю.

**Оценка требуемых соотношений реагентов в процессе переработки углеродсодержащего сырья с учетом экологических требований.** Предварительно проведен анализ по выбору оптимального соотношения «перерабатываемое сырье — окислитель». При этом преследовалась цель получения таких продуктов, которые могут быть легко удалены из образующейся газовой фазы и конденсированных веществ, чтобы их можно было использовать для дальнейшей переработки или безопасного захоронения [63].

Термодинамический анализ систем, содержащих химические элементы, способные образовывать нежелательные соединения в газовой фазе, показал, что при окислении соединений, содержащих серу и хлор, при недостатке окислителя могут образовываться HCl, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>. Выбор в качестве окисляющего агента водяного пара способствует тому, что за счет наличия водорода в системе тормозятся реакции образования газообразных оксидов серы и свободного хлора, то есть таких газов, которые трудно удаляются в газоочистном узле.

При наличии в отходах тяжелых металлов желательнее при окислении перевести их в кон-

денсированную фазу при температурном режиме, не допускающем возгонки этих металлов и перехода в газовую фазу. При недостатке окислителя и при наличии Ca, Mg, Na можно добиться связывания серы в достаточно тугоплавкие соединения и перевести их в конденсированную фазу, а хлор связать в HCl и удалить из газовой фазы в системе газоочистки. Количество окислителя должно быть таким, чтобы исключить образование свободного углерода в конденсированном состоянии, иначе это осложнит систему газоочистки (образуются сажевые частицы) и затруднит возможное полезное использование твердого остатка после переработки отходов в реакторе.

Априори невозможно предсказать требуемое количество теплоносителя, при котором достигается желаемый состав продуктов реакции для данного вида сырья. Поэтому необходимо некоторое первое приближение, основанное на известных данных о термодинамической стабильности веществ в газовой и конденсированной фазах. В частности, на первом этапе важно оценить, сколько водяного пара необходимо для окисления отходов без образования сажи, так как на конденсированных частицах углерода возможно образование диоксинов и фуранов, а также определить количество вредных веществ, попадающих при этом в газовую фазу.

**Оценочные расчеты для случая, когда сырье содержит латекс, резину и целлюлозу.** Такие расчеты важны с точки зрения возможности учета роли серы и азота, участвующих в процессе конверсии. Выберем для примера исходное сырье следующего состава: C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub> (0,867) + C<sub>50</sub>H<sub>80</sub>S (0,119) + O<sub>2</sub> (0,002) + N<sub>2</sub> (0,012), где числа в скобках обозначают удельное содержание в сырье соответствующих веществ при переработке. Это соответствует следующему составу: С — 40,465; Н — 66,819; О — 26,861; S — 0,167; N — 0,857 моль/кг, или С — 0,4890; Н — 0,0677; О — 0,4324; S — 0,0054; N — 0,0054 кг/кг сырья.

Термодинамически стабильными соединениями в интервале рабочих температур (1200–1600 °С) при недостатке кислорода являются СО и N<sub>2</sub>. Небольшой избыток кислорода может привести к окислению серы до SO<sub>2</sub>, а при его недостатке наиболее вероятными будут H<sub>2</sub>S или свободная сера. Определим количество водяного пара, которое обеспечит образование в продуктах СО и SO<sub>2</sub>.

В соответствии со стехиометрическими соотношениями, на образование 1,1404 кг СО необходимо 0,6514 кг кислорода, а на окисление серы до SO<sub>2</sub> — 0,0054 кг. С учетом собственно-

го кислорода в сырье для окисления необходимо 0,2244 кг кислорода или 0,2527 кг водяного пара на 1 кг сырья.

Избыточный кислород окисляет СО до СО<sub>2</sub> и водород до Н<sub>2</sub>О, уменьшая тем самым концентрации горючих компонентов (СО и Н<sub>2</sub>) в газовой фазе. Поэтому количество водяного пара должно быть в количестве, достаточном для окисления углерода до СО, что составит 0,2466 кг водяного пара на 1 кг сырья.

В итоге полученные продукты будут иметь следующий состав (отнесенный к исходному сырью или к образованной смеси):

СО	Н <sub>2</sub>	Н <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	Единица измерения
1,1404	0,0953	0,0058	0,0054	кг/кг сырья
0,9146	0,0764	0,0047	0,0043	кг/кг смеси
32,65	37,90	0,138	0,154	моль/кг смеси
46,09	53,50	0,19	0,22	% (об.)

**Оценочные расчеты для случая, когда сырье содержит пластмассы.** Исходный состав сырья: С<sub>5</sub>Н<sub>10</sub> (0,656) + С<sub>2</sub>Н<sub>3</sub>Сl (0,338) + О<sub>2</sub> (0,0013) + N<sub>2</sub> (0,0044). Ему соответствует следующий состав: С – 57,604; Н – 109,797; Сl – 5,410; О – 0,081; N – 0,311 моль/кг, или С – 0,6918; Н – 0,1107; Сl – 0,1918; О – 0,0013; N – 0,0044 кг/кг сырья.

Учитывая высокую термодинамическую стабильность СО и НСl (при недостатке окислителя) и N<sub>2</sub> в интервале температур 1000–2000 °С, предполагаемый состав газов после неполного окисления будет включать следующие вещества в заметных концентрациях: СО, Н<sub>2</sub>, НСl и N<sub>2</sub>. Выясним минимальное количество водяного пара, необходимое для окисления сырья без образования сажи.

Для образования НСl (для связывания всего хлора) необходимо 0,0055 кг водорода на 1 кг сырья, то есть водород имеется в избытке.

Для связывания углерода в СО необходимо 0,9216 кг кислорода на 1 кг сырья и с учетом собственного кислорода в отходе с водяным паром необходимо внести 0,9203 кг кислорода на 1 кг сырья, которое содержится в 1,0363 кг водяного пара, необходимого для окисления отхода. Предполагаемый состав продуктов реакции представлен ниже:

Н <sub>2</sub>	СО	НСl	N <sub>2</sub>	Единица измерения
0,1086	0,7923	0,0969	0,0022	кг/кг сырья
0,2212	1,6134	0,1973	0,0044	кг/кг смеси,
53,87	28,29	2,655	0,079	моль/кг смеси
63,46	33,32	3,13	0,09	% (об.)

Полученное количество водяного пара служит ориентиром для выполнения расчета термо-

динамически равновесного состава для указанного выше сырья с учетом теплоносителя. Поскольку конденсированная фаза отсутствует, то принятое значение расхода водяного пара (1,0363 кг/кг сырья) следует считать обоснованным.

**Примеры наличия конденсированной фазы.** В случае, когда сырье содержит стекло и металлы, желательнее, чтобы оно подвергалось минимальной деструкции с минимальным образованием газовой фазы во избежание попадания тяжелых металлов в систему газоочистки. Для выяснения состава газовой фазы при нагреве без взаимодействия с водяным паром был выполнен расчет термодинамически равновесного состава в интервале рабочих температур (1200–1600 °С).

Как показал предварительный расчет, при термическом воздействии на сырье, содержащее, например, латунь (Cu<sub>9,57</sub>Zn<sub>4,12</sub>Al), образуется незначительное количество газовой фазы (не более 75 г/кг сырья), содержащей в основном пары цинка, количество которых практически не зависит от температуры. При снижении температуры цинк легко окисляется до ZnO, а в присутствии соединений серы (например, сероводорода) переходит в ZnS.

Можно оценить также, достаточно ли паров цинка, выделяющихся из сырья, содержащего стекло и металлы, для связывания сероводорода, образующегося при деструкции отходов, содержащих латекс и резину, с учетом того, что цинк имеет большее сродство с серой, чем с кислородом.

## Выводы

Приведены методы моделирования процессов плазменной газификации медицинских отходов, представляющих собой один из наиболее сложных в реализации примеров конверсии углеродсодержащего сырья. С применением этих методов моделирования создана установка для плазменно-паровой газификации медицинских и токсичных отходов. Показано, что такого рода технология обладает наивысшими показателями энергетической эффективности, в том числе, вопреки бытующему мнению, по сравнению с парокислородными технологиями.

Установка выполнена в полном соответствии с требованиями Директивы 2000/76/ЕС для этих технологий и гарантированно исключает образование супертоксикантов в процессе переработки хлорсодержащего сырья.

Проанализированы условия образования тепловых оксидов азота в плазменно-воздуш-

ных технологиях газификации. Установлено, что в процессах плазменно-паровой газификации исключен риск образования этих оксидов.

*Выполнение этой работы поддержано Национальной академией наук Украины (проект 12-12 НАНУ). Авторы выражают признательность сотрудникам Института газа НАН Украины Гуревичу Н.О., Пьяных К.Е., Смихуле А.В., Сухорейброй С.А. и Института высоких температур РАН (Москва) Филимоновой Е.А. за полезные консультации. Особая благодарность национальному эксперту по отходам Четверикову В.В., сотрудникам Института физики плазмы (Прага) Машиляному А. и Института физики НАН Украины Наумову В.В. за предоставленные материалы.*

### Список литературы

1. Жовтянский В.А., Колесник В.В., Орлик В.Н. и др. Термодинамический анализ процессов конверсии биогаза в синтез-газ // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Энергоэффективность-2012» (Санкт-Петербург, РФ, 29 мая – 1 июня 2012 г.). – СПб.: Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН, 2012. – С. 50–52.
2. Мессерле В.Е., Устименко А.Б. Плазменно-топливные системы для повышения энергоэффективности пылеугольных тепловых электростанций // Там же. – С. 69–74.
3. Nema S.K., Ganeshprasad K.S. Plasma pyrolysis of medical waste // Current Sci. – 2002. – Vol. 83, № 3. – P. 271–278.
4. Rutberg Ph.G. Plasma Pyrolysis of Toxic Waste // Plasma Physics and Controlled Fusion. – 2003. – Vol. 45. – P. 957–969.
5. Патон Б.Е., Чернец А.В., Маринский Г.С. и др. Перспективы применения плазменных технологий для уничтожения и переработки медицинских и других опасных отходов. Ч. I, II // Современ. электрометаллургия. – 2005. – № 3. – С. 54–63; № 4. – С. 52–60.
6. Roberts M., Nester S., Boulanov D., Rabovitser J. Illinois coal gasification/reforming using low-temperature plasma // Gas Technology Institute. ICCI Project Number 05-1/4.1B-4. Final technical report. – Chicago, 2006. – 34 p.
7. Жовтянский В.А. Электрическая дуга – основа теплотехнических применений плазмы. Ч. I. Общие свойства электродуговой плазмы и особенности процессов теплопереноса // Пром. теплотехника. – 2007. – Т. 29, № 4. – С. 13–22.
8. Бондаренко Б.И., Жовтянский В.А. Проблема утилізації твердих побутових відходів і знешкодження небезпечних відходів в Україні: Від проекту концепції – до державної науково-технічної програми // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2008. – № 4. – С. 63–69.
9. Жовтянский В.А., Петров С.В., Коржик В.Н. и др. Установка для конверсии углеродсодержащих материалов // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Энергоэффективность» (Киев, 6–8 окт. 2008 г.). – Киев: Ин-т газа НАНУ, 2008. – С. 114–116.
10. Чередниченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. – Новосибирск: Новосиб. гос. техн. ун-т, 2008. – 602 с.
11. Hrabovsky M., Hlina M., Konrad M. et al. Thermal plasma gasification of biomass for fuel gas production // J. High Temp. Mater. Proc. – 2009. – Vol. 13, № 3–4. – P. 299–313.
12. Патон Б.Е., Бондаренко Б.И., Жовтянский В.А. Новый источник возобновляемой энергии – твердые бытовые отходы // Проблемы развития энергетики: Погляд громадськості. – 2009. – № 6. – С. 249–253.
13. Жовтянский В.А., Колесникова Э.П., Рутберг Ф.Г., Кумкова И.И. Перспективы производства альтернативных топлив на основе процессов газификации углеродсодержащего сырья // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Энергоэффективность-2010» (Киев, 19–21 окт. 2010 г.). – Киев: Ин-т газа НАНУ, 2010. – С. 19–21.
14. Кузнецов В.А., Рутберг Ф.Г., Братцев А.Н. и др. Газификация отработанных автомобильных шин воздушной и паровой плазмой // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – № 2. – С. 46–50.
15. Zhang Q., Dor L., Fenigshtein D. et al. Gasification of municipal solid waste in the Plasma Gasification Melting process // Appl. Energy. – 2012. – Vol. 90. – P. 106–112.
16. Мосса А.Л., Савченко Г.Э., Савчин В.В., Левашов А.С. Мобильные плазменные системы. Варианты, исполнения, использования и сравнительный анализ // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Энергоэффективность-2012» (Санкт-Петербург, 29 мая – 1 июня 2012 г.). – СПб.: Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН, 2012. – С. 21–22.
17. Ващенко С.П., Лукашов В.П. Электродуговые плазменные плазмотроны комбинированного типа // Там же. – С. 38–39.
18. Планковский С.И. Плазменные технологии утилизации ТБО. Современное состояние и перспективы // Материалы IV Междунар. конф. (Харьков, 31 янв. – 1 февр. 2007 г.). – Харьков: Эко-Информ, 2007. – С. 208–210.
19. Вербовский В.С. Возможности применения газодизельных электростанций в Украине // Эко-технологии и ресурсосбережение. – 2003. – № 1. – С. 13–18.
20. Шиллинг Г., Бонн Б., Краус У. Газификация угля. – М.: Недра, 1986. – 175 с.
21. Гололобов О.И. Исследование процесса закалки продуктов высокотемпературных химических реакций в сверхзвуковом сопле: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1971. – 25 с.
22. Федоров Л.А. Диоксины как экологическая опасность: Ретроспектива и перспективы. – М.: Наука, 1993. – 266 с.



23. Безуглый В.К., Бондаренко Б.И., Виноградова Т.В., Семенюк Н.И. Предотвращение образования ПХДД и ПХДФ при термохимической деструкции твердых бытовых отходов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 1. — С. 44–47.
24. 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.
25. 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/BER/Guidelines/tabid/187/language/en-US/Default.aspx>
26. Юдушкин Н.Г., Артамонов М.Д. Газогенераторные тракторы. — М. : ГНТИ машиностроительной литературы, 1955. — 244 с.
27. The European Centre for Renewable Energy. — <http://www.eee-info.net>
28. Пьяных К.Е., Антошук Т.А. Производство и использование генераторного газа для обеспечения работы парового котла // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Энергоэффективность-2012» (Санкт-Петербург, 29 мая — 1 июня 2012 г.). — СПб. : Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН, 2012. — С. 75–77.
29. Герасимов Г.Я. Образование диоксинов при сжигании хлорсодержащих топлив // Физика горения и взрыва. — 2001. — Т. 37, № 2. — С. 29–34.
30. Колесник В.В., Орлик В.Н., Олейник С.Ю., Россоха А.В. Термодинамический анализ процессов образования диоксинов // Укр. хим. журн. — 2008. — Т. 74, № 12. — С. 78–82.
31. Колесник В.В., Орлик В.Н., Олейник С.Ю., Россоха А.В. Термодинамический анализ процессов образования фуранов // Там же. — 2009. — Т. 75, № 9–10. — С. 99–102.
32. Жовтянский В.А. Энергосбережение // Энергетика : История, настоящее и будущее. — Киев, 2010. — Т. 4. — С. 269–312, 481–484.
33. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные энерготехнологии. — Киев : Наук. думка, 2004. — 186 с.
34. Жовтянский В.А. Отримання водню із використанням плазмових технологій // Фундаментальні проблеми водневої енергетики. — Київ : КІМ, 2010. — С. 130–156.
35. Кинетика и термодинамика химических реакций в низкотемпературной плазме / Отв. ред. Л.С.Поллак. — М. : Наука, 1965. — 254 с.
36. Ганз С.Н., Пархоменко В.Д. Получение связанного азота в плазме. — Киев : Выща шк., 1976. — 192 с.
37. Розробка технологій та обладнання для екологічно чистої переробки небезпечних відходів із використанням плазмових та інших високоефективних джерел енергії : (Заключ. звіт) / Ін-т електроварювання ім. Є.О.Патона НАН України. — № ДР 0107U0002636; Інв. № 0208U00-0862. — Київ, 2007. — 866 с.
38. Оптимизация процессов термохимической подготовки низкорекреационного угля : (Заключ. отчет) / Ин-т газа НАН Украины. — № ГР 0106U010-950; Інв. № 0209U005321. — Київ, 2008. — 200 с.
39. Четвериков В.В. Тенденции в разработке новых технологий термической переработки твердых бытовых отходов // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2009. — № 4. — С. 58–62.
40. Чарнецкий А.Д., Кофман Д.И., Востриков М.М. Медотходы. Уничтожить в инсинераторах или обезвреживать в стерилизаторах? // Медтехника и медизделия. — 2006. — № 2. — 9 с. — [www.turmalin.ru/pdf/Medothody-sjigat-obezvrejivat.pdf](http://www.turmalin.ru/pdf/Medothody-sjigat-obezvrejivat.pdf)
41. Жовтянский В.А. Разработки Института газа НАН Украины в области плазменных технологий и оборудования // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2009. — № 4. — С. 97–108.
42. Petrov S.V., Zhovtyansky V.A., Korzyk V.N., Bondarenko S.G. Technology and Equipment for Organic Waste Steam Plasma Processing // Сб. докл. конф. Междунар. ассоциации по твердым отходам (ISWA) «Передовые технологии переработки и захоронения отходов : Ориентиры применения и критерии выбора» (Москва, РФ, 31 мая — 2 июня 2011 г.). — М. : ЗАО «Фирма СИБИКО Интернешнл», 2011.
43. Жовтянский В.А., Петров С.В. Паро-плазменная технология переработки органических отходов в альтернативное топливо // Новини енергетики. — 2011. — № 6. — С. 9–15.
44. Бернадинер И.М., Бернадинер М.Н. Обезвреживание опасных отходов: Выбор оптимальной технологии // Твердые бытовые отходы. — 2010. — № 9. — <http://www.zaobt.ru/utilizaciya-othodov/obezvrezhivanie-opasnyh-othodov-2.php>
45. Ватолин Н.А., Моисеев Г.К., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах. — М. : Металлургия, 1994. — 353 с.
46. Лавренченко Г.К. Современные технологии получения кислорода из воздуха // Сб. тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Энергоэффективность-2010» (Киев, 19–21 окт. 2010 г.). — Киев : Ин-т газа НАНУ, 2010. — С. 54–55.
47. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. — Л. : Недра, 1977. — 294 с.
48. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. — М. : Физматлит, 2006. — 352 с.
49. Устименко А.Б. Плазменно-топливные системы для повышения эффективности использования твердых топлив : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Алматы, 2012. — 44 с.
50. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М. : Наука, 1966. — 688 с.

51. Laux C.O., Spence T.G., Kruger C.H., Zare R.N. Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasma // *Plasma Sources Sci. Technology*. — 2003. — Vol. 12. — P. 125–138.
52. ДСП-201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) : Затв. наказом М-ва охорони здоров'я Укр. від 09.07.97 № 201.
53. Dautov N.G., Starik A.M. On the choice of kinetic scheme in description of H<sub>2</sub>-air mixture detonation behind shock waves // *High Temp.* — 1993. — Vol. 31. — P. 292–301.
54. Ганз С.Н. Очистка промышленных газов. — Днепропетровск : Промінь, 1977. — 118 с.
55. Пат. 98271 Укр., МПК<sup>9</sup> Н 05 Н 1/24. Электродуговой плазмотрон / С.В.Петров, С.Г.Бондаренко, В.А.Жовтянский та ін. — Оубл. 28.04.11.
56. Методи та перспективи отримання водню на основі застосування плазмових технологій : (Звіт, 3-й етап) / Ін-т газу НАНУ. — № ДР 0106U010948; Інв. № 0209U008404. — Київ, 2008. — 41 с.
57. Кричевский И.Р. Понятия и основы термодинамики. — М. : Химия, 1970. — 140 с.
58. Cruise D.R. Notes on the rapid computation of complex equilibria // *J. Phys. Chem.* — 1964. — Vol. 68, № 12. — С. 3797–3802.
59. Гиббс Дж.В. Термодинамика. Статистическая механика. — М. : Наука, 1982. — 584 с.
60. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : Справ. / Л.В.Гурвич, И.В.Вейц, В.А.Медведев и др. — М. : Наука, 1982.
61. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. — М. : Мир, 2002. — 461 с.
62. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. — М. : Наука, 1977. — 345 с.
63. Колесник В.В., Орлик В.Н. Концепция комплексной утилизации и обезвреживания массовых промышленных отходов и привлечения внебалансовых источников энергии // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. — 2007. — № 5. — С. 45–52.

Поступила в редакцию 20.07.12

**Zhovtyansky V.A.<sup>1</sup>, Petrov S.V.<sup>1</sup>, Kolesnyk V.V.<sup>1,2</sup>,  
Orlyk V.M.<sup>1</sup>, Lelyukh Yu.I.<sup>1</sup>, Nevzglyad I.O.<sup>1</sup>,  
Goncharuk Yu.A.<sup>2</sup>, Yakymovych M.V.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *The Gas Institute of NASU, Kiev*

<sup>2</sup> *National Technical University of Ukraine «KPI», Kiev, Ukraine*

<sup>3</sup> *National Aviation University, Kiev, Ukraine*

## **The Conversion of Carbonaceous Raw Materials by Plasma Technology Application**

The problems of optimization of alternative gas fuels production based on carbonaceous raw conversion in gasification processes of sub-standard fuels and biomass, municipal solid waste utilization, hazardous waste decontamination (for example – medical) by plasma technologies application are considered. The process of plasma and steam carbonaceous raw gasification is simulated on the basis of thermodynamic equilibrium approximation in reactor with an internal volume heated by plasma torch and operating in air (including oxygen-enriched), water vapor or their mixtures as gasifying agent. The equipment for hazardous waste decontamination is described. The requirements for an exception of super toxicants and soot formation by the equipment regimes selection are taken into consideration. The conditions of nitrogen oxide and dioxide formation on the basis of kinetic approach in the event of air plasma application are analyzed. The estimations of thermodynamically equilibrium compositions of carbonaceous raw conversion products for wastes example are presented.

**Key words:** alternative gas fuel, plasma and steam gasification, plasmatron, sub-standard fuels, municipal solid waste, medical waste, super toxicants, nitrogen oxides, gas synthesis.

Received July 20, 2012