

УДК 621.365.91:533.9+534.222.2+536.46

**Газификация углеродсодержащего сырья
в плазменно-дуговой электропечи
с теплонагревателем и взрывоопасность
смесей синтез-газа***

А.С. Аньшаков¹, А.А. Васильев², А.В. Пинаев², В.А. Фалеев¹

¹*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск,*

²*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск*

E-mail: anshakov@itp.nsc.ru

Проведена газификация древесных опилок при отдельном и совместном действии на сырье нагревателя и дугового разряда. Показано, что за счет сжигания в теплонагревателе части получаемого синтез-газа газификацию сырья можно проводить при уменьшении энергозатрат по сравнению с плазменной на 20-25 %. Впервые представлены данные о параметрах горения и детонации смесей синтез-газа с кислородом и воздухом при изменении соотношения как между топливными компонентами СО и Н₂, так и между топливом и окислителем.

Ключевые слова: дуговой разряд, плазменный газификатор, электропечь, синтез-газ, детонация, топливно-кислородная смесь.

В работах [1–4] расчетно-экспериментальными исследованиями показаны актуальность и целесообразность высокотемпературной (плазменной) переработки твердых бытовых, медицинских и других видов отходов путем газификации их органических составляющих. Получаемый синтез-газ (до 90 % об. смеси СО + Н₂) обладает высокой теплотворной способностью (10–12 МДж/м³) и может быть использован для получения тепловой и электрической энергии или жидкого топлива. Неорганическая часть отходов переводится в жидкий шлак с последующим остекловыванием или грануляцией его для производства, например, строительных материалов.

Кроме того, плазменная газификация углеродсодержащих отходов и твердых топлив вносит существенный вклад в решение экологических проблем окружающей среды. Во-первых, в плазменном газификаторе опасные соединения переводятся в более простые и безопасные, и путем быстрой закалки дымовых газов исключается образование вредных веществ. Во-вторых, в восстановительной среде водорода и оксида углерода не образуются токсичные соединения типа диоксинов, фуранов и оксиды азота.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 06-08-00761а).

Плазменная газификация любого органического сырья позволяет вводить тепло в реакционную зону с использованием в качестве плазмообразующих газов воздуха, кислорода, водорода, пара воды, синтез-газа, любого инертного газа. Если необходимо получить синтез-газ, пригодный для конверсии углеводородов (например, метанола), то использование воздуха, азота и других инертных газов в качестве плазмообразующих технологически нецелесообразно. При получении синтез-газа для энергетических установок (сжигание в двигателях внутреннего сгорания, энергетических котлах ТЭС и т. д.) возможно использование в качестве рабочего газа относительно небольшого количества воздуха и азота. Если в процессе газификации требуется уничтожить токсичные отходы, то в качестве плазмообразующего газа выбирается газ, исключающий возможность образования новых опасных соединений, например, водяной пар.

При термической переработке смешанных отходов и твердых топлив получаемый синтез-газ может являться побочным продуктом. Тогда для удаления влаги из сырья и проведения начальной стадии газификации углеродсодержащего сырья наряду с плазмотроном целесообразно применять теплонагреватель, использующий энергию горения продуктов газификации. Цель настоящей работы — показать возможность применения теплонагревателя в электродуговой печи для уменьшения расхода электроэнергии на газификацию и провести расчеты по определению взрывоопасности смесей синтез-газа с кислородом и воздухом.

I. ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ (ЭКСПЕРИМЕНТ)

Экспериментальная установка представляла собой футерованную электродуговую печь с теплонагревателем (рис. 1, *a, b*). Внешние размеры металлического корпуса 3 печи составляют $0,49 \times 0,73 \times 0,61 \text{ м}^3$, толщина стали 6 мм. Тепловая изоляция 4 выполнена внутри корпуса шамотным кирпичом, в том числе и сверху под съемной металлической крышкой. Внутренние размеры рабочего пространства печи — $0,24 \times 0,48 \times 0,35 \text{ м}^3$. Плоский герметичный теплонагреватель 6 изготовлен из нержавеющей стали с наружными размерами $370 \times 150 \times 30 \text{ мм}^3$ и толщиной сте-

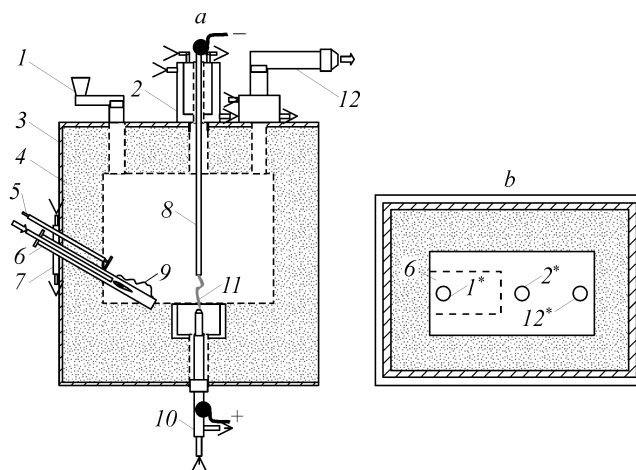


Рис. 1. Схема плазменно-дугового газификатора с теплонагревателем (*a*), вид сверху (*b*).

a: 1 — загрузочное устройство, 2 — верхний электродный узел, 3 — металлический корпус печи, 4 — внутренняя теплоизоляция печи, 5 — механический толкатель, 6 — теплонагреватель, 7 — фланец теплонагревателя, 8 — подвижный электрод-катод, 9 — углеродсодержащее сырье, 10 — нижний контактный ввод, 11 — электрическая дуга, 12 — блок очистки и закалки синтез-газа; *b*: 6 — теплонагреватель; 1*, 2*, 12* — отверстия для загрузочного устройства, подвижного электрода и выхода синтез-газа.

нок 2,5 мм. Теплонагреватель предназначен для сушки, предварительного нагрева и газификации углеродсодержащего сырья. Внутри теплонагревателя находятся пористая крупнозернистая среда размером около 1 см и коаксиальный трубчатый реактор (внешняя и внутренняя трубки наружными диаметрами 20 и 8 мм соответственно). Горючий газ поступает во внутреннюю трубку, окислитель (воздух) — в наружную. Для перемешивания газов и обеспечения устойчивой работы горелки пространство между трубками заполняли медной сеткой. Пламя из трубчатого реактора проходит через пористую среду (в результате чего увеличиваются теплоотдача и КПД теплонагревателя), и затем охлажденные продукты сгорания, выходя из теплонагревателя, поступают по трубопроводу в атмосферу. Теплонагреватель расположен в нижней части печи под углом 30° к торцу и крепится снаружи фланцем 7.

Углеродсодержащее сырье подается в печь с помощью загрузочного устройства 1 со шлюзовой камерой. Сырье 9 поступает сверху печи через шлюз на поверхность теплонагревателя. Толкатель 5 предназначен для подачи сырья в зону электрической дуги и для нестандартных ситуаций. Источник электродуговой плазмы состоит из верхнего электродного узла 2, нижнего контактного ввода 10 и подвижного электрода-катода 8. При работе электропечи образуется сильноточный дуговой разряд 11, который разогревает сырье и внутреннее пространство печи. Продукты газификации выходят через блок очистки и закалки синтез-газа 12. Все металлические части электродов, холодильника и внешний корпус теплонагревателя охлаждаются проточной водой, стрелками на рис. 1 обозначено движение воды.

Испытания газификатора проведены при отдельной и совместной работе источника электродуговой плазмы и теплонагревателя. Мощность теплонагревателя N_1 составляла 2 и 4 кВт. Внутри корпуса теплонагревателя в коаксиальном реакторе происходило сгорание пропано-воздушной стехиометрической смеси. Расход пропана и воздуха контролировался двумя ротаметрами, дополнительно взвешивался баллон с пропаном на электронных весах Massa-k с погрешностью 10 г. Температуру верхней поверхности теплонагревателя и газа внутри рабочего объема печи определяли с помощью двух хромель-алюмелевых термопар. Графики изменения температур и массового расхода пропана приведены на рис. 2 при расходе пропана около 2,5 л/мин.

Без использования теплового источника дуги при мощности теплонагревателя $N_1 = 2$ кВт температура газа внутри печи растет медленно по линейной зависимости 1, температура поверхности теплонагревателя через 40 мин достигает 500°C и в дальнейшем практически не меняется (см. рис. 2, а). В этом случае уже можно

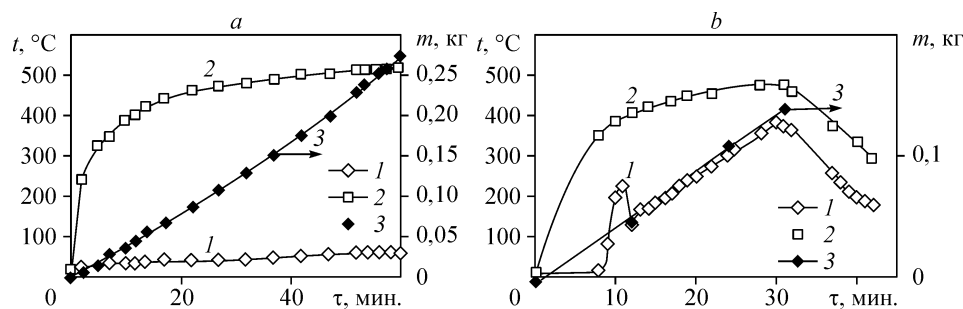


Рис. 2. Изменение температуры газа в печи (1) и поверхности теплонагревателя (2), массы m сгоревшего газа C_3H_8 (3) от времени.

Способ нагрева: а) — теплонагревателем при $N_1 = 2$ кВт, б) — теплонагревателем ($N_1 = 2$ кВт) и электрической дугой при средней мощности $N_2 = 4,5$ кВт.

осуществлять низкотемпературную газификацию углеродсодержащего сырья. Забор газа на анализ производился в стеклянную герметичную колбу.

Дополнительное включение теплового источника дуги (мощность $N_2 = 4-5$ кВт) через 8 мин после начала работы теплонагревателя приводит к существенно более быстрому росту температуры газа в рабочем объеме печи (см. рис. 2, *b*). В этом опыте не ставилось целью достижение максимальной температуры в печи, необходимо было лишь показать принципиальную выгоду от использования теплонагревателя. Поэтому порцию древесных опилок загрузили на поверхность теплонагревателя через шлюз спустя 30 мин (когда температура поверхности теплонагревателя составляла $500\text{ }^\circ\text{C}$, как и в первом опыте). После окончания газификации дуга отключалась, что приводило к естественному охлаждению печи. Результаты состава синтез-газа для этих опытов приведены в табл. 1 (расход плазмообразующего газа отсутствует, т. е. $G = 0$). Анализ проб газа выполнен на хроматографе «Хромос» на колонке, заполненной активированным углем. Кислород и азот на этой колонке выходят одним пиком. По площади пиков на хроматограммах определялось содержание горючих газов H_2 , CO , CH_4 , а также CO_2 , N_2 и O_2 . При расчете использовалась абсолютная (классическая) градуировка.

Из табл. 1 видно, что содержание горючих газов выше во втором случае, когда рабочий объем печи дополнительно нагрет электрической дугой до $400\text{ }^\circ\text{C}$. Расчет состава продуктов газификации при среднемассовой температуре $1200\text{ }^\circ\text{C}$ показывает, что содержание синтез-газа должно быть еще выше ($94,5\%$ об.).

При мощности теплонагревателя около 4 кВт температура его поверхности 900 K достигается за 25–30 мин. При температуре поверхности нагревателя 750 и 900 K скорость переработки опилок нагревателем (без дуги) составляет соответственно 3 и 2 мм/мин, или 50 и 35 кг/(м²·час). При газификации углеродсодержащего сырья в более холодном режиме получен синтез-газ с содержанием горючих 84–87 % об. При мощности теплонагревателя 4 кВт и достижении температуры его поверхности 900 K получается синтез-газ с калорийностью 9–11 МДж/м³. Процентное содержание горючих компонентов в синтез-газе всегда выше при совместной работе электродугового нагрева и теплонагревателя.

Стационарный рабочий режим в печи (среднемассовая температура $T = 1500\text{ K}$) достигается при мощностях электрической дуги 8 кВт и теплонагревателя — 2–3 кВт. Теплонагреватель осуществляет сушку, нагрев и частичную низкотемпературную газификацию углеродсодержащего сырья. При этом удается добиться снижения на 20–25 % затрат электрической энергии, расходуемой на плазменную газификацию ($0,5-0,75$ кВт·ч/кг сырья в зависимости от его влажности и условий газификации).

Применение автономного теплонагревателя, использующего энергию горения продуктов газификации, оправдано в технологиях утилизации техногенных отходов, когда синтез-газ является побочным продуктом. Для обеспечения устойчивой

Таблица 1

Состав синтез-газа (эксперимент), $G = 0$

№	Состав синтез-газа, % об. (древесные опилки)					
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂ + O ₂	Всего горючих
1 (<i>a</i>)	33	50,35	0,75	7,5	8,4	84,1
2 (<i>b</i>)	26,34	60,7	0,32	6,84	5,8	87,36
Расчет ($t = 1200\text{ }^\circ\text{C}$)	40	54,5	–	5,15	0,35	94,5

работы теплонагревателя в этом случае необходимо увеличивать габариты и производительность плазменно-дуговой установки, а также иметь резервуар для накопления синтез-газа.

II. РАСЧЕТЫ ВЗРЫВООПАСНОСТИ СМЕСЕЙ СИНТЕЗ-ГАЗА

Оценки условий инициирования взрыва синтез-газа в смесях с воздухом и кислородом имеют важное практическое значение для обеспечения безопасности, поскольку при разрушении резервуаров с синтез-газом существует возможность образования облаков взрывчатой смеси. Синтез-газ как смесь CO и H₂ относится к классу слабо изученных многотопливных систем, поэтому требуется дополнительный анализ, исследования и даже пересмотр некоторых известных для многотопливных систем представлений. Так, в работах [5–9] установлено, что для корректного определения задержки воспламенения τ в многотопливных системах необходимо отказаться от постоянства коэффициентов в формуле Аррениуса для “обобщенной” реакции индукционного периода τ (модель усредненной кинетики):

$$\tau = \frac{A \cdot \exp(E / RT)}{[f]^{k_1} [o]^{k_2} [in]^{k_3}}, \quad (1)$$

где E — энергия активации “лимитирующей” реакции индукционного периода, R — универсальная газовая постоянная, T — температура смеси в зоне индукции, в квадратных скобках — концентрация компонентов смеси (f — топливо, o — окислитель, in — инертная добавка), A и k_i — численные коэффициенты. Лучшее согласование расчетных и экспериментальных величин получается в случае, когда f представляет алгебраическую сумму концентраций топливных компонентов, поскольку при этом исчезает нефизическое стремление τ к бесконечности при переходе к монотопливной смеси.

В рамках модели детальной кинетики применительно к синтез-газу необходимо численно решать систему уравнений, представляющую “полную” схему превращения углеводородных топлив в продукты реакции, которая содержит несколько сотен прямых и обратных реакций с соответствующим количеством коэффициентов для скоростей элементарных реакций. После решения системы уравнений можно найти период индукции смеси, определив его, например, по максимальной скорости нарастания температуры. Повторив расчет для нескольких характерных концентраций добавляемого в систему второго топлива или промотора, можно проанализировать характер изменения τ . В дальнейшем полученные из расчета величины τ можно использовать напрямую, либо представить в виде формулы (1).

Неопределенность численных коэффициентов для скоростей реакций позволяет проанализировать лишь качественное изменение профилей концентраций важнейших для определения периода индукции веществ. Такие коэффициенты определяются по экспериментальным данным для параметров, далеких от детонационных. Затем эти коэффициенты обычно экстраполируются с какой-то точностью на детонационные условия. Точность расчетных схем “детальной” кинетики для описания двухтопливных систем обычно невысока [5, 6].

В настоящей работе при определении параметров горения и детонации синтез-газа A и E в (1) будем считать непостоянными и используем условия согласования задержки воспламенения с задержками воспламенения индивидуальных топлив при асимптотическом стремлении их концентраций к нулю (аналогично [5–10]). Трудность решения поставленной задачи связана с отсутствием набора коэффицици-

ентов в (1) на одной из границ концентрационного диапазона двухтопливной системы (для смеси CO–O₂), когда в системе полностью отсутствует водород. Слабая исследованность детонации в системе CO–O₂ и, тем более, CO–воздух, в первую очередь, обусловлена проблемами инициирования детонационного процесса в этой смеси (лишь после добавления в смесь нескольких процентов водорода удастся возбудить детонацию).

ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ

Расчетные данные получены с помощью компьютерной программы “Безопасность”, основой которой служат теоретические модели инициирования детонации и воспламенения смесей [6]. Наряду с традиционными параметрами — скоростью детонации D_0 , энерговыделением Q , давлением p , температурой T , ... — представлены данные о критических энергиях инициирования детонации E_3 . Часть численных результатов для топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей при различных соотношениях CO/H₂ представлены в табл. 2, где начальное давление

Таблица 2

Результаты термодинамических расчетов

Смесь	D_0 , м/с	p_d , атм	T_d , К	P_{v^*} , атм	T_{v^*} , К	T_p , К	P_{df^*} , атм	T_{df^*} , К	E_3 , Дж
2CO+O ₂ (стех.)	1798,4	18,48	3523	9,45	3358	2976	0,49	2852	3777
CO+O ₂	1753,6	17,98	3410	9,2	3248	2893	0,49	2758	1817
CO+3O ₂	1589,2	15,02	2810	7,72	2611	2245	0,47	2038	25500
CO+9O ₂	1192,5	8,42	1561	4,45	1396	1160	0,48	1017	3,57·10 ¹¹
4CO+O ₂	1802,8	18,17	3458	9,3	3282	2898	0,49	2758	17080
9CO+O ₂	1618,3	13,83	2623	7,15	2367	1963	0,47	1745	6,35·10 ⁷
1,6CO+O ₂ + +0,4H ₂	1904,6	18,3	3501	9,36	3340	2962	0,49	2840	765
1,2CO+O ₂ + +0,8H ₂	2048,8	18,33	3530	9,37	3365	2980	0,49	2856	162
CO+O ₂ +H ₂	2135,9	18,37	3550	9,39	3383	2993	0,49	2867	80
0,8CO+O ₂ + +1,2H ₂	2235,5	18,43	3573	9,42	3404	3008	0,49	2880	42
0,4CO+O ₂ + +1,6H ₂	2485	18,59	3624	9,5	3453	3042	0,49	2911	14
O ₂ +2H ₂	2836,7	18,79	3682	9,59	3504	3079	0,49	2945	6
2CO+O ₂ + +10 %H ₂	1879,8	18,33	3500	9,37	3338	2960	0,49	2837	1623
2CO+O ₂ + +25 %H ₂	2041,7	18,26	3503	9,34	3334	2950	0,49	2820	612
2CO+O ₂ + +50 %H ₂	2381,1	17,08	3261	8,75	3054	2645	0,48	2449	958
2CO+O ₂ + +75 %H ₂	2707,1	12,02	2260	6,22	2024	1650	0,46	1440	1,01·10 ⁶
2CO+воздух	1670,6	15,49	2864	7,96	2699	2383	0,48	2232	2,60·10 ⁷
1,9CO+возд+ +0,1H ₂	1679,3	15,44	2856	7,94	2692	2378	0,48	2227	1,83·10 ⁷
1,8CO+возд+ +0,2H ₂	1690	15,43	2855	7,93	2690	2376	0,48	2224	1,24·10 ⁷
CO+возд+H ₂	1793,1	15,4	2872	7,92	2698	2369	0,48	2205	4,19·10 ⁵
2H ₂ +возд	1969,3	15,58	2945	8	2749	2380	0,48	2186	3360

$p_0 = 1,0$ атм, температура $T_0 = 298$ К, термином air (воздух) обозначена смесь $O_2 + 3,76 N_2$. Здесь и на рисунках индексами обозначены параметры продуктов при различных способах достижения конечного состояния: v — мгновенный взрыв в бомбе при $V = \text{const}$, p — горение при $p = \text{const}$, d — детонация, df — дефлаграция с максимальной скоростью.

При соединении двух стехиометрических смесей $2CO + O_2$ и $2H_2 + O_2$, в зависимости от их соотношения, скорость ДВ и энерговыделение Q меняются достаточно заметно, в то время как давление и температура изменяются незначительно (см. вторую часть табл. 2). Для полноты информации в первой части табл. 2 приведены данные для смесей $CO-O_2$ при различных коэффициентах стехиометрии, а в четвертом — аналогичные данные для воздушных смесей. Видно, что при замене кислорода на воздух резко возрастают критические энергии инициирования.

Характер поведения некоторых параметров для наглядности представлен в графическом виде. На всех графиках вертикальной пунктирной линии на оси абсцисс соответствует молярная концентрация CO в исходной смеси $2\alpha CO + 2(1-\alpha)H_2 + O_2$; $C_f = 2\alpha / (2\alpha + 2(1-\alpha) + 1) = 2\alpha/3$ и меняется от 0 до $2/3$ при $0 < \alpha < 1$. Вертикальная пунктирная линия (рис. 3, *b*) соответствует энерговыделению тротилового заряда.

На рис. 3 параметры представлены для смеси $2CO + O_2 + \alpha H_2$, когда только одна индивидуальная смесь является стехиометрической (в данном случае $2CO + O_2$) при общем показателе стехиометрии двухтопливной смеси, отличном от единицы. В этом случае максимальная величина молярной концентрации $C = 2/(3 + \alpha)$,

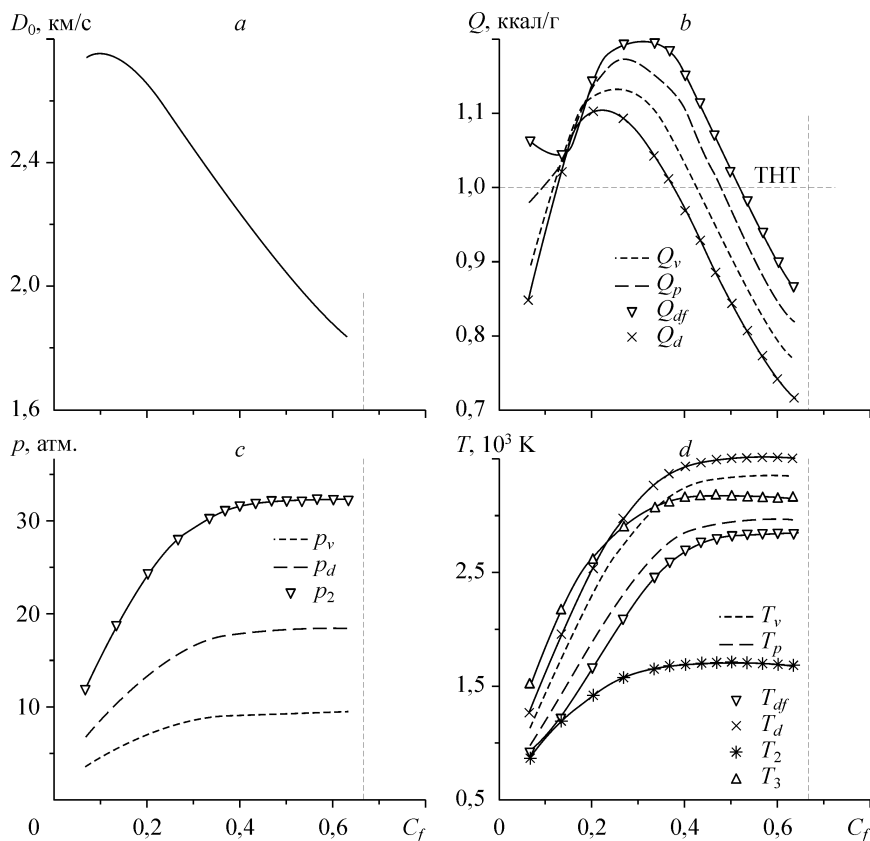


Рис. 3. Зависимости скорости детонации (*a*), энерговыделения (*b*), давления (*c*) и температуры (*d*) в смесях синтез-газа с кислородом от молярной концентрации окиси углерода при нестехиометрическом соотношении CO и H_2 с O_2 ; $a-d$ — $2CO + O_2 + \alpha H_2$.

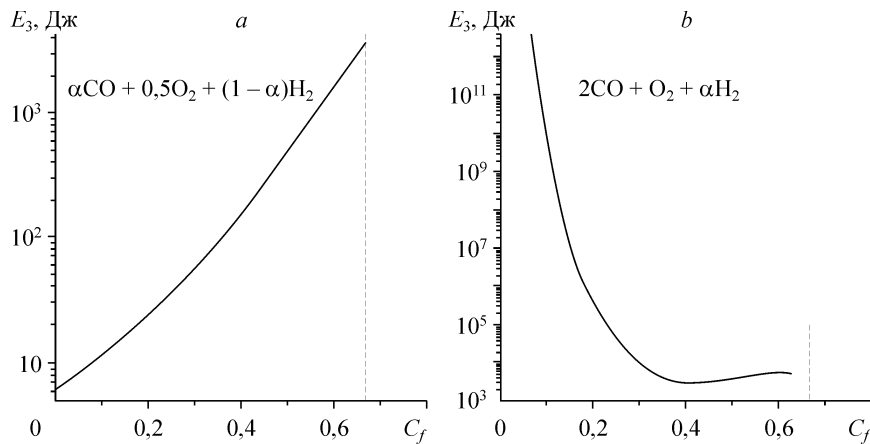


Рис. 4. Зависимости критической энергии инициирования сферической детонации в смесях синтез-газа с кислородом от молярной концентрации окиси углерода при стехиометрическом (а) и нестехиометрическом (б) соотношениях CO и H₂ с O₂.

причем α меняется от 0 до величины, близкой к верхнему концентрационному пределу для водородно-кислородных смесей. Видно, что для таких составов величины давления и температуры меняются уже более заметно. Это обусловлено отклонением от стехиометрии, когда при сдвиге состава к концентрационным пределам заметно падают основные газодинамические параметры продуктов реакции. Числовые данные этой серии — третья часть табл. 2.

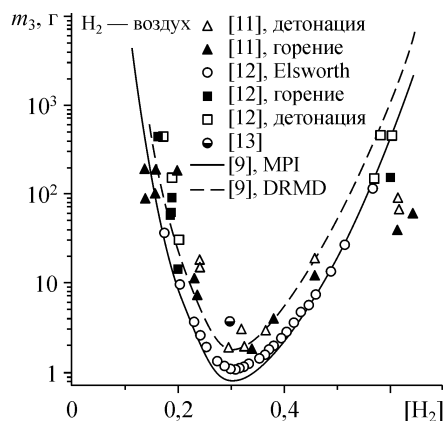
Здесь и далее для профилей давления индекс 2 соответствует давлению за ударной волной, распространяющейся со скоростью детонации, для профилей температуры индексы 2 и 3 соответствуют состояниям химика детонационной волны за падающей и отраженной ударными волнами.

С помощью модернизированных формул Аррениуса для синтез-газа с кислородом [7] были рассчитаны размеры ячеек многофронтной детонации и критические энергии инициирования для плоских, цилиндрических и сферических волн. На рис. 4, а, б приведены энергии инициирования сферической детонации для отдельных рассмотренных выше смесей. Стехиометрические смеси окиси углерода и водорода с кислородом — это $2\alpha\text{CO} + 2(1-\alpha)\text{H}_2 + \text{O}_2$ ($0 < \alpha < 1$). Из расчетов видно, что водород и окись углерода представляют собой индивидуальные топлива с сильно различающейся чувствительностью — при изменении их относительной концентрации размер детонационной ячейки меняется в несколько раз, а энергия инициирования детонации — на порядки (см. рис. 4, а — три порядка для топливно-кислородных смесей). Поэтому водород и является эффективным промотором для окиси углерода.

В качестве опорной точки взяты данные для чисто водородной смеси и от них спрогнозированы параметры синтез-газа. Подобные данные для водородных смесей приведены в [9], там же показано хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных по большинству параметров детонации для топливно-кислородных и топливно-воздушных смесей. Ниже приведен лишь график, иллюстрирующий степень соответствия расчетных и экспериментальных данных критической массы тротилового заряда для инициирования сферической детонации (рис. 5).

Здесь “оптимальному” набору коэффициентов формулы Аррениуса соответствуют кривые, рассчитанные по модели многоточечного инициирования (сплошная линия) [9] и по модели дифракционного инициирования (пунктирная) [9], символами отмечены экспериментальные данные различных авторов, видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных величин.

Рис. 5. Зависимость критической массы (d) тротилового заряда для инициирования сферической ДВ в различных водородно-воздушных смесях от молярной концентрации H_2 в смеси.



ВЫВОДЫ

1. Применение плазменно-дуговой электродуговой печи совместно с теплонагревателем для переработки техногенных отходов и твердых топлив позволяет провести газификацию органической составляющей с получением синтез-газа с содержанием более 85 % об. горючих компонентов. Показано, что за счет сжигания в теплонагревателе части получаемого горючего газа утилизацию углеродсодержащего сырья можно проводить при уменьшении количества потребляемой электроэнергии на 20–25 % по сравнению с чисто плазменной технологией.

2. Результаты расчета параметров горения и детонации могут быть рекомендованы для оценки взрывоопасности смесей синтез-газа в широком диапазоне изменения его компонентов.

3. При разбавлении топливно-кислородных смесей азотом и переходе к воздушным смесям происходит снижение скорости детонации, температуры и давления, возрастает критическая энергия инициирования, несмотря на особенности кинетического механизма индукционной стадии реакции (чисто цепной для водорода и более сложной для углеводородных топлив).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чердынченко В.С., Аньшаков А.С., Кузьмин М.Г. Плазменные электротехнологические установки. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 602 с.
2. Рутберг Ф.Г., Братцев А.Н., Попов В.Е. Плазмохимические методы переработки. Газификация и пиролиз отходов // Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Тематический том XI-5 Прикладная химия плазмы. М.: Янус-К, 2006. С. 7–33.
3. Лукашов В.П., Ващенко С.П., Багрянцев Б.А. и др. Плазмотермическая переработка твердых отходов // Экология и промышленность России. 2005. № 11. С. 4–9.
4. Аньшаков А.С., Фалеев В.А., Даниленко А.А. и др. Исследование плазменной газификации углеродсодержащих техногенных отходов // Теплофизика и аэромеханика, 2007. Т. 14, № 4. С. 639–650.
5. Cheng R.K., Oppenheim A.K. Autoignition in methane-hydrogen mixtures // Combust. Flame 1984. Vol. 58. P. 125–139.
6. Austin J.M., Shepherd J.E. Carbon monoxide detonations // 17th Inter. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, July 25–30, 1999, Heidelberg, Germany. CD ISBN 3-932217-01-2. Universitat Heidelberg, IWR.
7. Vasil'ev A.A. Determination of induction time in multi-fuels systems // Proc. of the Third Asia-Pacific Conf. on Combustion (ASPACC-2001) Seoul National Univ., Korea, 2001. P. 493–496.
8. Vasil'ev A.A., Magzumov A.E., Kirillov I.A., Rusanov V.D. Induction time in multi-fuels system. Effect of small additives of ozone and hydrogen-peroxide on hydrogen-air detonation // J. Phys. IV France. 2002. Vol. 12. EDP Sciences, Les Ulis. P. 353–361.
9. Васильев А.А. Околоскритические режимы газовой детонации: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Новосибирск, 1995. 386 с.
10. Васильев А.А. Дифракционная оценка критической энергии инициирования газовой детонации // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 4. С. 72–76.
11. Макеев В.И., Гостинцев Ю.А., Строганов В.В. и др. Горение и детонация водородно-воздушных смесей в свободных объемах // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 5. С. 16–18.
12. Benedick W.B., Guirao C.M., Knystautas R., Lee J.H. Critical charge for direct initiation of detonation in gaseous fuel-air mixtures // Dynamics of Explosion (Progress in Astronautics and Aeronautics; Vol. 106) / Ed. by I.R. Bowen, J.-C. Leyer, R.I. Soloukhin (Eds). N.-Y. 1986. P. 181–202.
13. Левин В.А., Марков В.В., Осинкин С.Ф. Иницирование детонации в водородовоздушной смеси взрывом сферического заряда ТНТ // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31, № 2. С. 91–95.

Статья поступила в редакцию 23 марта 2010 г.