

## Влияние температуры газовой смеси на эффективность получения синтез-газа из этанола в неравновесной плазме

© А.Н. Цымбалюк,<sup>1</sup> Д.С. Левко,<sup>2</sup> В.Я. Черняк,<sup>3</sup> Е.В. Мартыш,<sup>3</sup> О.А. Недыбалюк,<sup>3</sup> Е.В. Соломенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Восточно-Украинский национальный университет им. В. Даля,  
93034 Луганск, Украина

<sup>2</sup> Israel Institute of Technology, Technion,  
32000 Haifa, Israel

<sup>3</sup> Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко,  
03122 Киев, Украина  
e-mail: dima.levko@gmail.com

(Поступило в Редакцию 21 ноября 2012 г.)

Представлены результаты исследований механизма плазменной конверсии смеси паров этанола и воды, воздуха и углекислого газа  $\text{CO}_2$  в неравновесной плазме разряда типа „торнадо“. Исследовано влияние скорости прокачки  $\text{CO}_2$ , тока, протекающего через разряд, а также температуры газа в области разряда на концентрации молекулярного водорода и  $\text{CO}$ . Сравнение концентраций основных компонентов газовой смеси на выходе из реактора, полученных экспериментально и численным моделированием показало, что используемый кинетический механизм правильно описывает плазменную кинетику в исследуемой смеси.

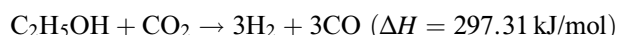
### Введение

Синтез-газ (смесь оксида углерода  $\text{CO}$  и водорода  $\text{H}_2$ ) является важным промежуточным продуктом для синтеза различных химических веществ, таких как аммиак, метанол, газолин, дизельное топливо и другие [1]. При этом для получения различных веществ требуется различное отношение  $\text{H}_2/\text{CO}$ .

Существует несколько методов получения синтез-газа: обработка твердого ископаемого топлива перегретым водяным паром, частичное окисление природного газа, термическое разложение древесины, конверсия различных углеводородных топлив в плазме различного типа разрядов [2]. В настоящее время главным источником синтез-газа является природный газ метан [1]. Тем не менее в связи с истощением запасов последнего ведутся поиски альтернативных источников, которые позволили бы добиваться высокого выхода синтез-газа с контролируемым отношением  $\text{H}_2/\text{CO}$ . В работе [3] было предложено в качестве альтернативы паровой конверсии метана использовать плазменную конверсию этилового спирта  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  для получения синтез-газа. Выбор этанола связан с тем, что он относится к возобновляемым топливам, которые могут быть получены из биомассы или промышленных отходов. В качестве реактора, в котором предлагается осуществлять конверсию этанола, выступает реактор типа „торнадо“ [4–7]. Плазма электрического разряда в реакторе такого типа является промежуточной между неравновесной и равновесной. С одной стороны, это связано с тем, что средняя энергия электронов в такой плазме по-прежнему остается порядка 1–2 eV, а их функция распределения остается неравновесной. Это позволяет селективно возбуждать различные степени свободы газа, а также эффективно осуществлять диссоциацию молекул электронным ударом. С другой стороны, температура газа в такой плазме

может достигать 1000–1500 К в результате энергии, выделяемой при химических превращениях этанола и углеводов, нарабатываемых за счет плазмохимических реакций. Высокая температура газовой смеси позволяет увеличивать концентрацию  $\text{H}_2$  за счет конверсии образующихся в разряде углеводов. Кроме того, поскольку на выходе из разряда температура газовой смеси остается высокой, эффективная конверсия идет в послеразрядной области.

Получение синтез-газа из чистого этанола в плазме электрического разряда обладает существенным недостатком. А именно не позволяет контролировать отношение  $\text{H}_2/\text{CO}$  в смеси. Поэтому предлагается осуществлять конверсию смеси этанола и оксида углерода  $\text{CO}_2$ . Из стехиометрического уравнения



видно, что добавление в смесь  $\text{CO}_2$  позволяет в два раза уменьшить расход этанола, поскольку атомы углерода присутствуют в  $\text{CO}_2$ . Кроме того, варьируя начальное отношение концентраций  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  и  $\text{CO}_2$ , можно получать синтез-газ с различным отношением  $\text{H}_2/\text{CO}$ .

В работе экспериментально и численным моделированием исследуется влияние параметров разряда, температуры газовой смеси и скорости прокачки  $\text{CO}_2$  через область разряда на состав синтез-газа на выходе из реактора при конверсии смеси воздуха с парами этанола и воды и  $\text{CO}_2$ .

### Экспериментальная установка

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В ее основе лежит кварцевая камера 1, герметично закрытая сверху и снизу металлическими

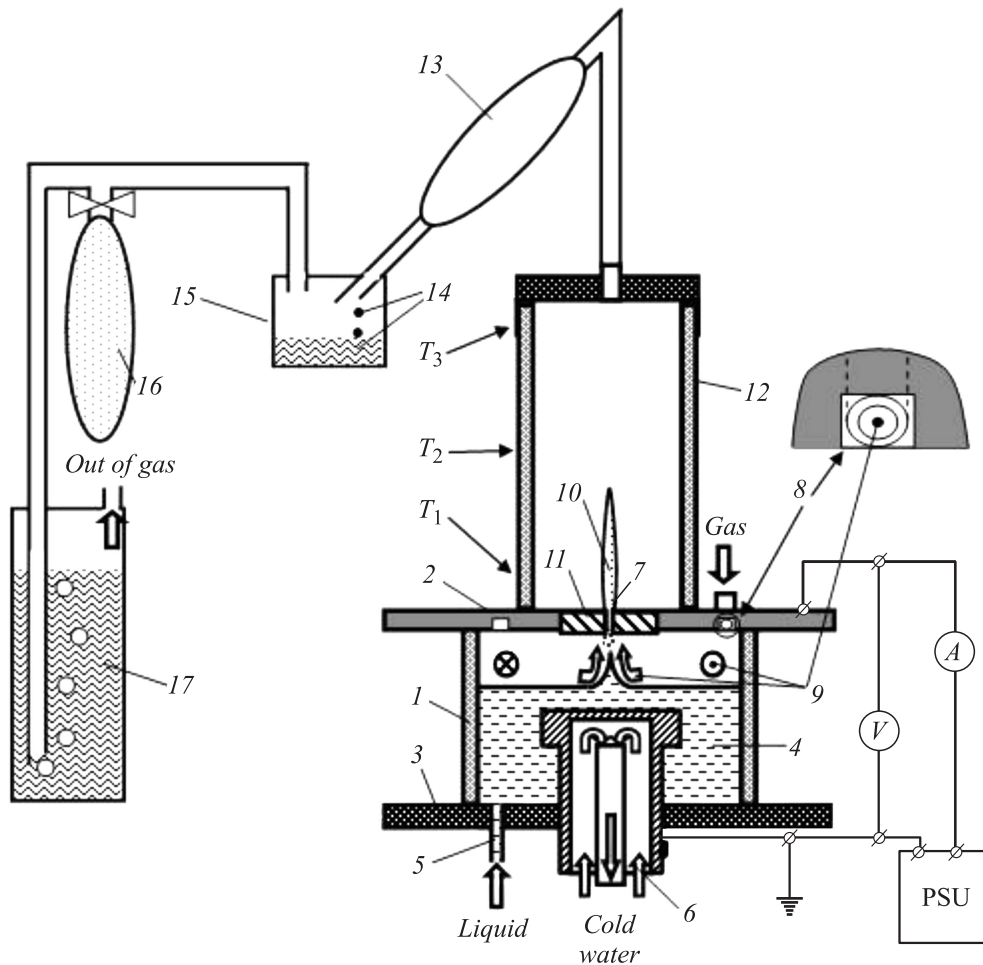


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

фланцами 2 и 3. Уровень рабочей жидкости 4 поддерживается постоянным с помощью шприцевого насоса сквозь отверстие 5. Металлический электрод 6,

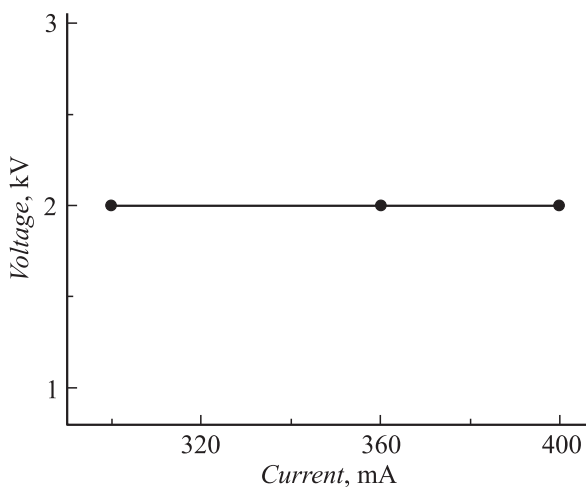


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика разряда; рабочая жидкость смесь  $C_2H_5OH$  и  $H_2O$ , рабочий газ — смесь  $CO_2$  и воздуха.

охлаждаемый проточной водой, может выступать как в качестве анода, так и в качестве катода. Роль второго электрода выполняет верхний фланец 2, в центре которого расположена медная втулка 11 с соплом 7. Высоковольтный блок питания (PSU) снабжен вольт- и амперметром для снятия вольт-амперных характеристик (ВАХ) разряда (рис. 2). Газ (смесь  $CO_2$  и воздуха) сквозь отверстие 8 входит по касательной к стенкам кварцевой камеры. Закручиваясь, он выходит через центральное сопло 9. При этом над поверхностью жидкости в центральной области создается зона пониженного давления. За счет этого жидкость на оси приобретает форму конуса, с вершины которого загорается разряд между поверхностью жидкости и верхним фланцем. Плазма разряда выносится потоком газа в камеру 12 в виде плазменного факела 10. Камера 12 служит как для изоляции продуктов реакций от атмосферы, так и для их теплоизоляции. После прохождения камеры 12 продукты реакции попадают в холодильник 13, в котором они охлаждаются до комнатной температуры. Частично сконденсировавшись, продукты реакции 14 попадают в разделительную камеру 15. Здесь продукты реакции с низкой температурой сжижения отделяются от

продуктов с высокой температурой сжижения (спирты, формальдегид и др.) и от сажи. Далее газ отбирается для анализа (масс-спектрометрия и газовая хроматография) в сосуд 16 и сквозь водяной затвор 17 выводится из системы.

К преимуществам такого типа реактора можно отнести изолированность от атмосферы (полная или частичная), что позволяет варьировать состав плазмообразующего газа и препятствует загрязнению помещения с установкой продуктами реакции, а также отсутствие эрозии электродов в режиме работы с жидким катодом. Кроме того, для частичного поддержания плазмы разряда используется химическая энергия топлива, что уменьшает расход электрической энергии. Возможность варьировать состав газа и рабочей жидкости дает возможность влиять на ход химических реакций в системе.

Для исследования продуктов реакции использовались газовая хроматография и методы спектроскопии поглощения инфракрасного излучения.

## Модель расчетов плазменной кинетики

Для изучения плазмохимических процессов была использована модель, предложенная в [6,7]. В соответствии с этой моделью газ непрерывно прокачивался через область разряда, которая представляла цилиндр с высотой, равной расстоянию между поверхностью жидкости и верхним электродом, и радиусом  $R$ . Последняя величина в рассматриваемой модели выступала в качестве параметра. Моделирование показало, что наилучшее согласие с экспериментальными данными достигается при  $R \approx 0.5$  см. Полное время расчета было разделено на три части: пребывание газа в области разряда до тех пор, пока концентрации всех компонентов не выходили на стационарный уровень, „дожигание“ смеси в факеле, где учитывалось изменение температуры газа за счет химических реакций, а затем пребывание смеси в камере 13 при комнатной температуре. Важно отметить, что пребывание газовой смеси в третьей камере не влияет на кинетику и на концентрации веществ. Это связано с тем, что активные атомы и радикалы исчезают из смеси во второй камере, а при комнатной температуре они образуются неэффективно.

В модели были сделаны следующие предположения.

1. Электрическая мощность, вводимая в разряд, усреднялась по всему объему, занимаемому разрядом.
2. Электрическое поле в разряде было однородным и не менялось с течением времени. Это поле было принято равным полю пробоя воздуха при данной температуре и давлении. Это предположение является корректным, поскольку скорость прокачки воздуха существенно превышает скорость прокачки  $\text{CO}_2$ .
3. Плазма в области разряда однородна.
4. Поскольку на температуру газа влияют не только химические процессы, но вынос газа и теплообмен с окружающей средой, было проведено исследование кинетики для температур газа в области

разряда  $T = 520\text{--}1300$  К. В связи с таким интервалом  $T$  был выбран кинетический механизм [7], состоящий из 30 компонентов газовой смеси и 173 реакций (130 химических и 43 электронно-молекулярных реакций). В указанной схеме молекулярный азот рассматривался только в качестве третьего тела, а генерация азотсодержащих компонентов не исследовалась.

Для моделирования плазмохимических процессов в разряде численно решалась следующая система кинетических уравнений:

$$\frac{dN_i}{dt} = S_{ei} + \sum_j k_{ij}N_j + \sum_{j,l} k_{ijl}N_jN_l + \dots + \frac{G}{V}N_i^0 - \frac{G}{V}N_i - kN_i. \quad (1)$$

Здесь  $N_i$ ,  $N_j$  и  $N_l$  — концентрации молекул и радикалов,  $k_{ij}$ ,  $k_{ijl}$  — константы скоростей химических процессов с участием  $i$ -й компоненты. Последние три слагаемых, входящие в (1), описывают непрерывное поступление и вынос газа из плазмы. Член  $\frac{G}{V}N_i^0$  описывает поступление молекул первичных компонентов (азота, кислорода, воды и этанола) в область разряда, а  $\frac{G}{V}N_i$  и  $kN_i$  — вынос газа за счет прокачки воздуха и разности давлений соответственно. Скорости электронно-молекулярных реакций определялись из уравнения

$$S_{ei} = \frac{W}{V} \frac{1}{\varepsilon_{ei}} \frac{W_{ei}}{\sum_i W_{ei} + \sum_i W_i}. \quad (2)$$

Здесь  $W$  — мощность, вкладываемая в разряд, а  $V$  — объем, занимаемый разрядом,  $\varepsilon_{ei}$  — энергетический порог реакции. В модели мощность  $W$  усреднялась по всему объему  $V$ . Также  $W_{ei}$  и  $W_i$  — удельная мощность, затрачиваемая на неупругие и упругие электронно-молекулярные процессы соответственно [7].

Во второй камере (камера 12, рис. 1) решалась система (1) с учетом только химических превращений. Кроме того, учитывалось изменение температуры газа за счет химических реакций решением уравнения

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\rho C_p} \sum_i H_i(T)\mu_i \frac{dN_i}{dt}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность газа,  $C_p$  — средняя удельная теплоемкость газа при постоянном давлении,  $H_i$  и  $\mu_i$  — молярная энтальпия и молярная масса  $i$ -й компоненты соответственно.

Чтобы определить начальные концентрации паров в области разряда, смесь этанол/вода рассматривалась как идеальный раствор. Поэтому парциальные давления паров равны произведению отношения концентраций этанола и воды в растворе  $x$  на давления насыщенных паров этанола  $P(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$  и воды  $P(\text{H}_2\text{O})$  при данных условиях.

Процессы, учитывавшиеся при расчетах функции распределения электронов по энергиям

№	Реакция	Ссылка
1	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}((100) + (010)) + e$	[9]
2	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(010) + e$	[9]
3	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{OH} + \text{H} + e$	[9]
4	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + 2e$	[9]
5	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(J = 0-0) + e$	[9]
6	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(J = 0-1) + e$	[9]
7	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(J = 0-2) + e$	[9]
8	$\text{H}_2\text{O} + e \rightarrow \text{H}_2\text{O}(J = 0-3) + e$	[9]
9	$\text{N}_2 + e \rightarrow \text{N}_2(A^3\Sigma_u^+) + e$	[10]
10	$\text{N}_2 + e \rightarrow \text{N}_2(a^1\Pi_g) + e$	[11]
11	$\text{N}_2 + e \rightarrow \text{N}_2(v) + e$	[12]
12	$\text{N}_2 + e \rightarrow \text{N} + \text{N} + e$	[13]
13	$\text{N}_2 + e \rightarrow \text{N}_2^+ + 2e$	[14]
14	$\text{O}_2 + e \rightarrow \text{O} + \text{O} + e$	[15]
15	$\text{O}_2 + e \rightarrow \text{O}_2(^1\Delta_g) + e$	[16]
16	$\text{O}_2 + e \rightarrow \text{O}_2^+ + 2e$	[14]
17	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + e \rightarrow \text{CH}_3 + \text{CH}_2\text{OH} + e$	—
18	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + e \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{OH} + e$	—
19	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + e \rightarrow \text{CH}_3\text{CHOH} + \text{H} + e$	—
20	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + e \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}^+ + 2e$	[17]
21	$\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO}_2(100) + e$	[18]
22	$\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO}_2(010) + e$	[18]
23	$\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO}_2(001) + e$	[18]
24	$\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO} + \text{O} + e$	[18]
25	$\text{CO}_2 + e \rightarrow \text{CO}_2^+ + e + e$	[18]

Скорости электронно-молекулярных реакций зависят от ФРЭЭ [7]. Она определялась численным решением кинетического уравнения Больцмана в двухчленном приближении [8] с учетом процессов, представленных в таблице. ФРЭЭ, рассчитанные для разных температур газовой смеси, приведены на рис. 3. Видно, что увеличение температуры приводит к увеличению доли элек-

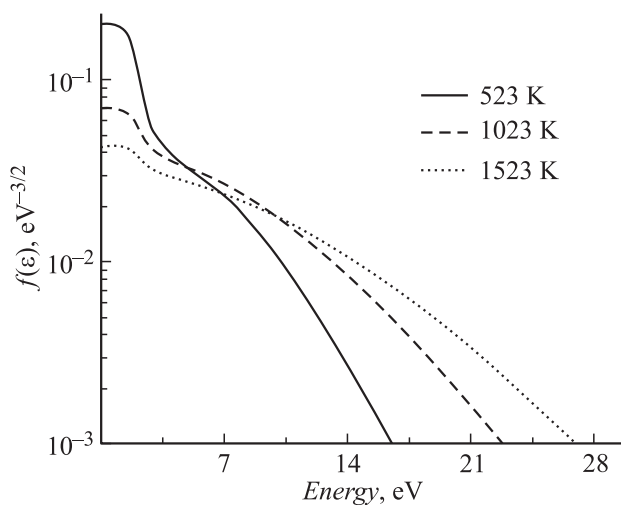


Рис. 3. Рассчитанные функции распределения электронов по энергиям при различных температурах газовой смеси; скорость прокачки  $\text{CO}_2$  через область разряда  $4.2 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

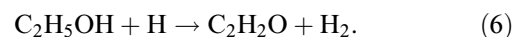
тронов с энергиями, превышающими 10 эВ, типичными для реакций диссоциации электронным ударом. Поэтому увеличение температуры газовой смеси увеличивает скорости электронно-молекулярных реакций. Также было получено, что увеличение скорости прокачки  $\text{CO}_2$  слабо влияет на ФРЭЭ, что связано с тем, что для рассматриваемого интервала скоростей азот является плазмоформирующим газом.

## Результаты и обсуждение

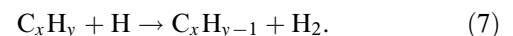
В результате моделирования было получено, что независимо от температуры газовой смеси главным электронно-молекулярным процессом в течение первых миллисекунд после начала разряда является диссоциация  $\text{O}_2$ . Скорости реакций диссоциации этанола, воды и углекислого газа имеют сравнимые скорости, однако уступают скорости диссоциации  $\text{O}_2$  на 1–1.5 порядка. При  $t = \tau$  на первое место выходит реакция диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  за счет увеличения концентрации последнего, нарабатывающегося за счет рекомбинации  $\text{H}$  и  $\text{OH}$ , а также за счет уменьшения концентрации  $\text{O}_2$ . Время  $\tau$  зависит от температуры:  $\tau \approx 2.5 \text{ ms}$  при  $T = 520 \text{ K}$ ,  $\tau \approx 0.64 \text{ ms}$  при  $T = 1020 \text{ K}$  и  $\tau \approx 0.41 \text{ ms}$  при  $T = 1523 \text{ K}$ . То есть увеличение температуры приводит к уменьшению времени, когда скорость диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  электронным ударом приобретает наибольшее значение среди других электронно-молекулярных реакций. Как было показано ранее [6,7], присутствие в смеси  $\text{H}_2\text{O}$  существенно влияет на образование  $\text{H}_2$ . Энергия диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  ( $\approx 7 \text{ eV}$ ) ниже энергии диссоциации  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  ( $\approx 7.9 \text{ eV}$ ), поэтому образование атомов  $\text{H}$  идет быстрее именно за счет диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$ .

Исследование состава газовой смеси на выходе из реактора при различных значениях температуры в области разряда показало, что наилучшее согласие с экспериментальными данными достигается при  $T = 1020 \text{ K}$ . На рис. 4 приведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными для основных компонентов газовой смеси при скоростях прокачки воздуха и  $\text{CO}_2$ , равных  $82.5$  и  $4.25 \text{ cm}^3/\text{s}$  соответственно. Видно, что для всех компонентов достигается хорошее согласие.

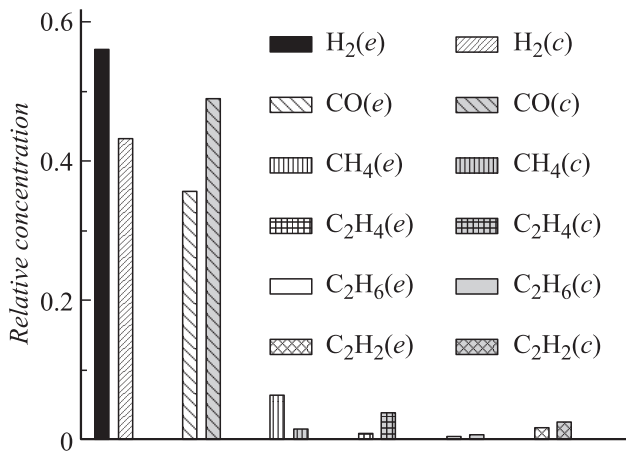
Было получено, что независимо от температуры газовой смеси в течение первых микросекунд после начала разряда главным процессом образования  $\text{H}_2$  является реакция



По мере наработки различных углеводородов реакция (6) сменяется реакциями, характерными для низкотемпературного горения легких углеводородов:



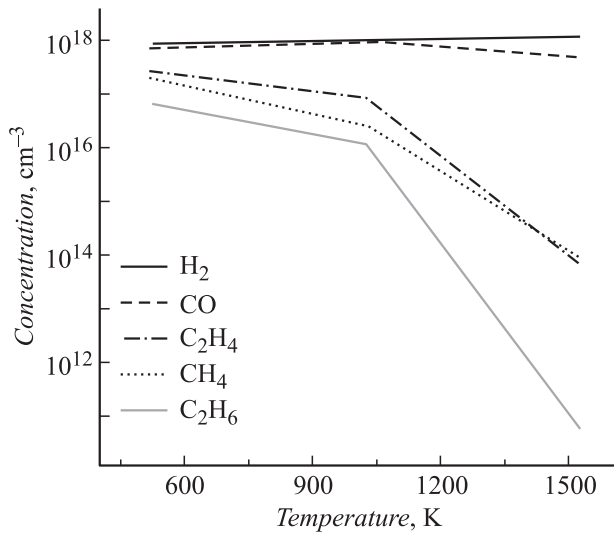
При этом роль последних увеличивается при увеличении температуры. При  $T > 1000 \text{ K}$  реакции типа (7)



**Рис. 4.** Относительные концентрации основных продуктов газовой смеси на выходе из реактора; скорость прокачки воздуха 82.5 см<sup>3</sup>/с, скорость прокачки CO<sub>2</sub> 4.25 см<sup>3</sup>/с, температура газа в области разряда 1020 К.

ударом. При этом увеличение температуры приводит к уменьшению времени  $\tau$ . При больших временах на первое место выходит термодиссоциация нарабатываемого в разряде CH<sub>3</sub>CO.

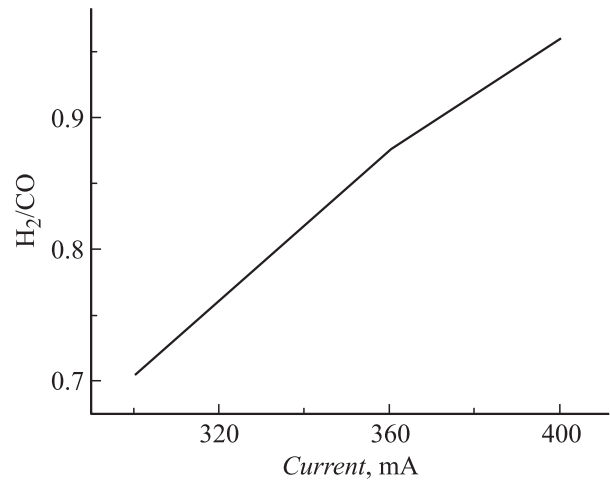
На рис. 6 представлена зависимость H<sub>2</sub>/CO от тока  $I$ , протекающего через разряд. Видно, что отношение увеличивается при увеличении  $I$ . Сравнение зависимости H<sub>2</sub>/CO от скорости прокачки воздуха через область разряда, полученной экспериментально и в результате моделирования при температурах газа в области разряда 1020 и 1270 К, представлено на рис. 7. Видно, что для отношения H<sub>2</sub>/CO лучшее согласие достигается при  $T = 1270$  К в отличие от концентраций других компонентов газовой смеси, для которых лучшее согласие достигается при  $T = 1020$  К (рис. 4). В то же время и эксперимент, и моделирование показывают, что H<sub>2</sub>/CO уменьшаются при увеличении скорости прокачки CO<sub>2</sub>.



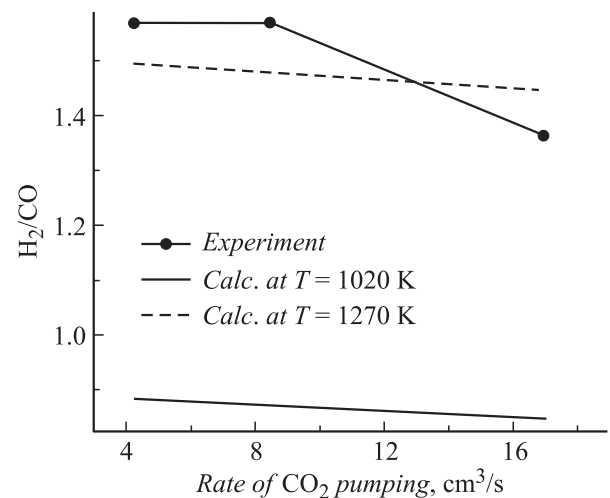
**Рис. 5.** Концентрации главных компонентов газовой смеси на выходе из реактора в зависимости от температуры газовой смеси в области разряда; скорость прокачки воздуха 55 см<sup>3</sup>/с, скорость прокачки CO<sub>2</sub> 8.5 см<sup>3</sup>/с.

ответственны за наработку H<sub>2</sub> в послеразрядной области. Использование послеразрядной камеры 12 (рис. 1) позволяет увеличивать концентрацию H<sub>2</sub> по сравнению с ее значением на выходе из разряда на 10–20%. На рис. 5 представлены рассчитанные зависимости концентраций основных компонентов газовой смеси на выходе из реактора от температуры газа в области разряда. Видно, что концентрация H<sub>2</sub> увеличивается при увеличении  $T$ , а концентрации углеводородов уменьшаются. Последний факт связан с увеличением констант скоростей реакций (7) при увеличении температуры.

Также результаты моделирования показали, что в течение первых  $\tau \approx 1-10 \mu\text{s}$  главным процессом образования CO является диссоциация CO<sub>2</sub> электронным



**Рис. 6.** Зависимость отношения [H<sub>2</sub>]/[CO] от тока, протекающего через разряд; скорость прокачки воздуха 82.5 см<sup>3</sup>/с, скорость прокачки CO<sub>2</sub> 4.25 см<sup>3</sup>/с, температура газа в области разряда 1020 К.



**Рис. 7.** Зависимость отношения [H<sub>2</sub>]/[CO] от скорости прокачки CO<sub>2</sub>.

В первую очередь это связано с увеличением концентрации  $\text{CO}_2$  в области разряда, поскольку скорость прокачки газа не оказывает существенного влияния на концентрации паров, являющихся источником  $\text{H}_2$ .

Энергоэффективность рассматриваемого реактора  $\eta$  [2], вычисленная при скорости прокачки  $\text{CO}_2$ , равной  $8.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , и токе, протекающем через разряд  $300 \text{ mA}$ , составляет 35%. Сравнение с энергоэффективностями реакторов, представленных в [2], показывает, что по указанной характеристике данный реактор не уступает ранее предложенным.

## Заключение

Проведены экспериментальное и численное исследования конверсии этанола в плазменном реакторе типа „торнадо“. Методом газовой хроматографии определен состав продуктов на выходе из реактора. Показано, что концентрации основных компонентов газовой смеси слабо зависят от скорости прокачки  $\text{CO}_2$  через область разряда.

Для численного моделирования кинетики была выбрана модель, учитывавшая непрерывную прокачку газа через область разряда, а также измерение температуры газа со временем в послеразрядной области. В результате моделирования были определены основные процессы, ответственные за генерацию и разложение основных компонентов газовой смеси. Сравнение концентраций основных компонентов газовой смеси на выходе из реактора, измеренных экспериментально, а также полученных в результате моделирования, показало, что наилучшее согласие достигается при температуре газовой смеси  $1020 \text{ K}$ .

Показано, что увеличение температуры газа приводит к увеличению отношения  $\text{H}_2/\text{CO}$ , что указывает на возможность использования послеразрядной области для контроля за составом синтез-газа. Также было получено, что концентрация  $\text{CO}_2$  при рассматриваемых условиях слабо влияет на концентрации исследуемых компонентов. Например, при образовании  $\text{CO}$  реакция диссоциации  $\text{CO}_2$  электронным ударом оказывает существенное влияние на  $[\text{CO}]$  лишь в течение нескольких микросекунд после начала разряда. При больших временах доминирующим каналом становится процесс с участием активного  $\text{HCO}$ , образующегося из этанола, и молекулярного кислорода.

Поскольку  $\text{CO}_2$  добавляется в газовую смесь для того, чтобы контролировать отношение  $\text{H}_2/\text{CO}$  в смеси на выходе из реактора, необходимо добиться увеличения роли этой компоненты в кинетике. Это можно сделать, увеличив время, в течение которого реакция диссоциации  $\text{CO}_2$  электронным ударом оказывает главное влияние на концентрацию  $\text{CO}$ . Два возможных пути заключаются в уменьшении температуры газовой смеси или в увеличении концентрации  $\text{CO}_2$ .

## Список литературы

- [1] *Lieuwen T.C., Yang V., Yetter R.* Synthesis gas combustion. NY: Taylor & Francis Group, 2009.
- [2] *Petitpas G., Rollier J.D., Darmon A.* et al. // Int. J. Hydrogen Energy. 2007. Vol. 32. P. 2848–2867.
- [3] *Nedybaliuk O.A., Chernyak V.Ya., Olszewski S.V.* // Problems of Atomic Science and Technology. 2010. Vol. 6. P. 135–137.
- [4] *Kalra C., Gutsol A., Fridman A.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2005. Vol. 33. P. 32.
- [5] *Chernyak V., Olszewskii S., Nedybalyuk O.* et al. // J. Energy and Power Eng. 2011. Vol. 5. P. 403–410.
- [6] *Левко Д.С., Щедрин А.И., Черняк В.Я., Ольшевский С.В., Недыбалюк О.А.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 21. С. 54–60.
- [7] *Levko D., Shchedrin A., Chernyak V., Olszewski S., Nedybaliuk O.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. P. 145 206.
- [8] *Головинский П.М., Щедрин А.И.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 2. С. 51–56.
- [9] *Itikawa Y., Mason N.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2005. Vol. 34. P. 1.
- [10] *Gillant C.J., Tennyson J., McLaughlin B.M., Burke P.G.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1996. Vol. 29. P. 1531.
- [11] *Ajello J.M.* // J. Chem. Phys. 1970. Vol. 53. P. 1156.
- [12] *Vicic M., Poparic G., Belic D.S.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1996. Vol. 29. P. 1273.
- [13] *Mok Y.S., Ham S.W., Nam I.S.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. Vol. 26. P. 1566.
- [14] *Straub H.C.* // Phys. Rev. A. 1996. Vol. 54. P. 2146.
- [15] *Raizer Yu.P.* Gas Discharge Physics. Berlin: Springer, 1991.
- [16] *Higgins R., Noble C.J., Burke P.G.* // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 1994. Vol. 27. P. 3203.
- [17] *Rejoub R., Morton C.D., Lindsay B.G., Stebbings R.F.* // J. Chem. Phys. 2003. Vol. 118. P. 1756.
- [18] *Itikawa Y.* // J. Phys. Chem. Ref. Data. 2002. Vol. 31. P. 749.