

## 04 Электрофизическая установка для конверсии природного газа при атмосферном давлении

© В.Е. Маланичев,<sup>1,2</sup> М.В. Малашин,<sup>1</sup> А.В. Озерский,<sup>2</sup> В.Ю. Хомич,<sup>1</sup> В.М. Шмелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,  
191186 Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,  
119991 Москва, Россия  
e-mail: mve.191@gmail.com

(Поступило в Редакцию 12 декабря 2017 г. В окончательной редакции 26 апреля 2018 г.)

В электрофизической установке при обработке смеси метана и этана барьерным разрядом была экспериментально исследована конверсия углеводородов. Для разработанного плазмохимического реактора с помощью алгоритма решения „ZDPlasKin“ была проведена теоретическая оценка плазмокинетических процессов, протекающих в разряде. Экспериментальные результаты согласуются с теоретической оценкой.

DOI: 10.21883/JTF.2018.11.46625.2599

### Введение

На протяжении нескольких десятилетий привлекает к себе внимание барьерный разряд с диэлектриком (БР) как средство для инициации и стимулирования химических реакций, начиная от образования озона из воздуха и заканчивая разделением различных химических соединений [1]. В неравновесной системе, которой является БР, высока эффективность и скорость проведения химических реакций [2]. При различных значениях напряженности электрического поля, или давления среды, возбуждаются различные состояния активных частиц [3,4], поэтому изменяя параметры разряда, можно направлять энергию по нужному каналу для достижения наибольшей эффективности химических реакций.

Одним из перспективных направлений является обработка метана разрядом [5,6]. В настоящее время метан в основном используется для домашнего и промышленного отопления и для выработки электроэнергии. Использование метана для химической промышленности сопровождается рядом технологических трудностей и пока ограничивается получением синтез-газа, поскольку метан является одной из наиболее стабильных молекул [7]. Синтез-газ в промышленных масштабах получают паровой конверсией метана. Также его можно получить парциальным окислением метана. Вторая технология показывает более низкий выход синтез-газа по сравнению с первой, но обладает рядом преимуществ, таких как реакция экзотермичная, процесс не требует катализатора, процесс возможно реализовать при атмосферном давлении, в процессе не используются пары воды, которые приводят к коррозии узлов установки. На основе вышеперечисленного, авторы работы считают перспективным развитие технологии с использованием реакции парциального окисления метана.

Для увеличения выхода синтез-газа при процессе парциального окисления метана предлагается предварительная обработка исходного газа (метан или природный газ)

барьерным разрядом. В ряде работ [8–10] при обработке разрядом метана или метаносодержащей смеси газов наблюдался прямой синтез различных углеводородов, а также наработка химически активных частиц.

Так, в работе [8] для конверсии метана использовали импульсный искровой разряд с частотой повторения 2–20 kHz. При этом степень конверсии метана составляла 23.5%, а энергозатраты — 3.8 eV/molec. Основным продуктом плазменного пиролиза являлся ацетилен. Также искровой разряд для конверсии метана использовали авторы работы [9]. Частота повторения импульса напряжения составляла 50 Hz при размахе 5 kV. Зависимость конверсии метана от энергозатрат была линейна и составляла от 18 до 69% при 14–25 eV/molec. В работе [10] использовался импульсный искровой разряд со схожими внешними характеристиками (50 Hz, 5 kV амплитуда импульсов напряжения). При этом необходимо отметить, что энергоэффективность резко уменьшилась в диапазоне, где конверсия метана составляла более чем 60%. Таким образом, при конверсии метана 50% энергозатрат составлял 3.5 eV/molec, а уже при 68% — 12 eV/molec.

Наиболее близкие к настоящему исследованию работы, посвященные конверсии метана в барьерном разряде. Так, в работе [9] использовали БР с двумя разными системами питания. В первом случае к электродам газоразрядной ячейки подводили униполярные прямоугольные импульсы напряжения с амплитудой до 20 kV, частотой 50 Hz и скважностью 2. Во втором — синусоидальное напряжение с такой же амплитудой и частотой. В первом случае конверсия метана составила 6–13% при энергозатратах 38–57 eV/molec. Во втором — при конверсии 5–8% энергозатраты составляли 116–175 eV/molec. В обоих случаях зависимость конверсии от энергозатрат была линейна. В другой работе [10] с помощью БР, при частоте синусоидального напряжения 75 kHz, получили конверсию метана 24%, энергозатрат составлял 17 eV/molec.

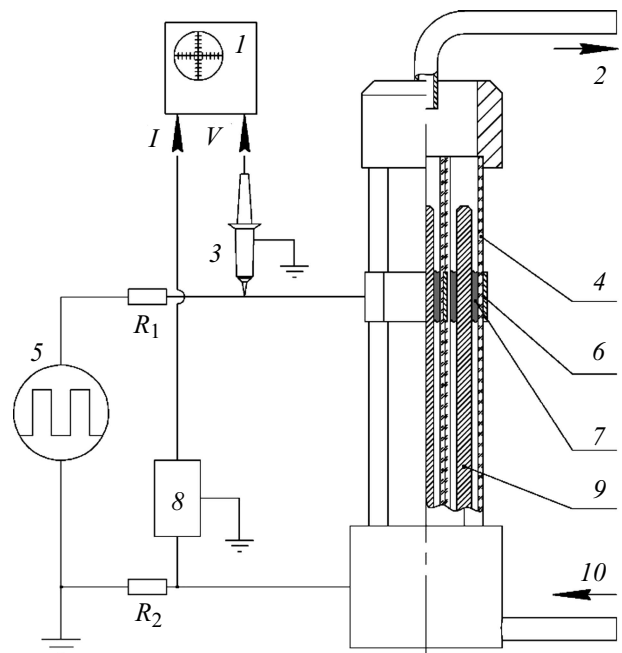
Теоретическое моделирование процесса конверсии метана в барьерном разряде проведено в работах [11,12]. В первой работе конверсия метана составляла 13,8%. При этом основным продуктом являлся этан. В исследовании [12] конверсия  $\text{CH}_4$  достигала 40%, и в результате образовывался этан и ацетилен.

Обзор существующих теоретических и экспериментальных наработок показал, что в данный момент не существует однозначных, согласующихся результатов по процессам, происходящим при обработке метана БР. По этой причине авторы настоящей работы считают необходимым провести ряд как экспериментальных, так и теоретических исследований в этой области. Эта информация будет полезна при разработке как систем пиролиза метана в плазме для получения более сложных углеводородов, так и для систем подготовки исходной смеси для дальнейшего парциального окисления. Первичные исследования [13] были проведены для системы, в которой смешивался природный газ с воздухом. Смесь предварительно обрабатывалась плазмой и подавалась в область парциального окисления. Эти исследования показали увеличение селективности по синтез-газу. Для более эффективного использования предварительной обработки разрядом необходимо детальное понимание происходящего процесса.

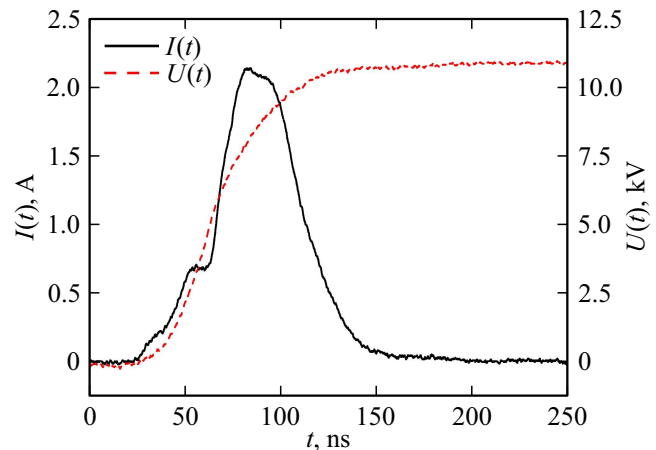
В настоящей работе предпринята попытка провести сравнение экспериментально полученных результатов плазменного пиролиза природного газа с результатами 0-мерного моделирования химической кинетики, которая инициируется и стимулируется барьерным разрядом. В качестве исходного газа использовалась смесь метана (98,2% vol.) и этана (1,8% vol.). Такой состав смеси характерен для природного газа, подаваемого потребителям после газораспределительных станций. Таким образом, газовый состав по сравнению с предыдущими экспериментами [13] был упрощен, т. е. исключен воздух.

### Экспериментальная установка

На рис. 1 схематически изображен плазмохимический реактор (ПХР) включенный в экспериментальный стенд. Входной поток  $G_g = 1.41/\text{min}$   $10$  поступает в семь идентичных каналов, внутри каждого из которых находится заземленный электрод  $9$ , выполненный в виде стержня из латуни диаметром 5 mm, стенки каналов выполнены из кварцевых трубок с внешним диаметром 10 mm и толщиной стенки 1.5 mm  $4$ . Каждая из трубок обернута в алюминиевую фольгу, которая выступает в роли внешнего электрода  $6$ , к которому с помощью специального генератора  $5$  прикладывались прямоугольные высоковольтные импульсы с амплитудой 12 kV, длительностью 0.06 ms с частотой  $f = 4\text{ kHz}$  [14–17]. Входной поток, проходя по каналу, попадает в область горения БР  $7$ . Химический состав прореагировавшей смеси анализировался с помощью хроматографа марки „МЗ700“  $2$ , который имеет три параллельных аналитических канала,



**Рис. 1.** Экспериментальная установка.  $1$  — осциллограф,  $2$  — выходной поток в хроматограф,  $3$  — высоковольтный пробник,  $4$  — кварцевая трубка,  $5$  — генератор высоковольтных импульсов,  $6$  — внешний электрод,  $7$  — область обработки плазмой,  $8$  — аттенуатор,  $9$  — внутренний электрод,  $10$  — входной поток смеси метана и этана,  $R_1$  — токоограничивающий резистор,  $R_2$  — токовый шунт.



**Рис. 2.** Типичная осциллограмма тока  $I(t)$  и зависимость от времени напряжения на разрядном промежутке  $U(t)$ .

что позволяет одновременно анализировать все компоненты газа. Хроматограф оснащен тремя детекторами — одним пламенно-ионизационным и двумя детекторами по теплопроводности. В системе использовались набивная колонка с молекулярными ситами CaA, колонка с Rogaq Q и капиллярная колонка HP-PLOT  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KCL}$ , соединенная с пламенно-ионизационным детектором.

Напряжение, прикладываемое к внешнему электроду, измерялось с помощью высоковольтного пробника

Tektronix P6015A 3. Ток, протекающий в цепи с ПХР, измерялся с помощью токового шунта  $R_2$  и аттенюатора 8.

Обработка смеси метана и этана проводилась с помощью БР при мультисканальном режиме горения разряда [18–20]. Характерные осциллограммы тока и напряжения представлены на рис. 2. Значение средней мощности, вкладываемой в плазму, составляло 25 Вт. Среднее значение энергии, вкладываемой в разряд за один период, 6,2 мДж. Среднее значение амплитуды тока разряда для каждого из семи каналов составляло 2,1 А.

В процессе экспериментов измерялось объемное содержание метана, этилена, этана и водорода на выходе из ПХР.

### Теоретическая модель

Для объяснения экспериментальных результатов проведено моделирование кинетики преобразования природного газа на основе пакета „ZDPlasKin“ [21]. Как исходные данные задавалась начальная концентрация метана ( $N_{\text{CH}_4} = 265,1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) и этана ( $N_{\text{C}_2\text{H}_6} = 4,9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Температура нейтральных частиц и ионов считалась постоянной и равной 300 К.

Также в модель вводились зависимости приведенного электрического поля  $EN^{-1}(t)$  и концентрации электронов  $n_e(t)$  от времени в течение одного периода  $T = 1/f = 0,25 \text{ мс}$  [3]:

$$EN^{-1}(t) = E_{\Sigma}(t)(N_{\text{CH}_4} + N_{\text{C}_2\text{H}_6})^{-1}, \quad (1)$$

$$n_e(t) = \frac{1}{q_e \mu_e S_{\text{md}} E_{\Sigma}(t)}. \quad (2)$$

Здесь  $E_{\Sigma}(t)$  — суммарная напряженность электрического поля,  $q_e$  — заряд электрона,  $\mu_e = 280 \text{ см}^2(\text{В} \times \text{с})^{-1}$  — среднее значение подвижности электронов в метане [22,23],  $I(t)$  — ток, протекающий через разрядный промежуток,  $S_{\text{md}}$  — суммарная

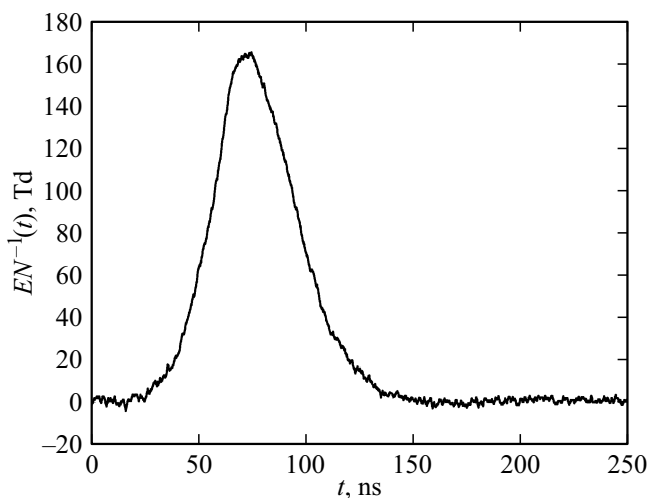


Рис. 3. Зависимость приведенной напряженности электрического поля от времени.

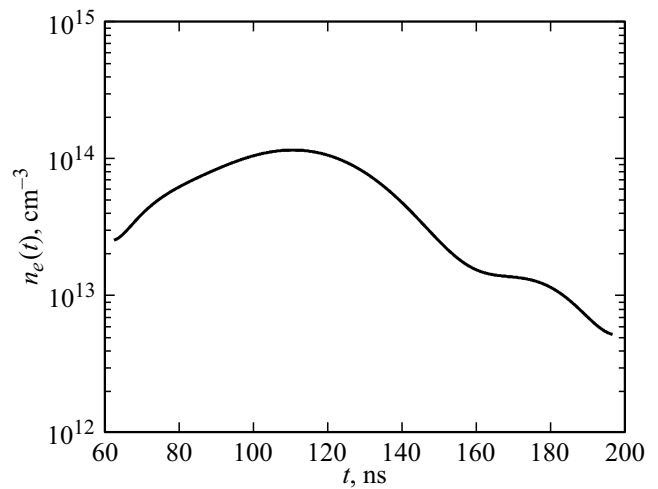


Рис. 4. Зависимость концентрации электронов от времени.

площадь поперечных сечений микроразрядов, происходящих за время переднего/заднего фронта импульса напряжения. Количество микроразрядов оценивалось исходя из данных работы [24] о заряде, переносимом одним микроразрядом  $Q_{\text{md}} = 0,5 \text{ нС}$ . Суммарный заряд  $Q_{\Sigma} = 116 \text{ нС}$ , полученный из осциллограммы тока (рис. 2), делился на  $Q_{\text{md}}$ . Диаметр поперечного сечения одного микроразряда  $d_c = 0,3 \text{ мм}$  был взят из работы [20]. Таким образом,

$$S_{\text{md}} = \frac{Q_{\Sigma}}{Q_{\text{md}}} \frac{\pi d_c^2}{4}. \quad (3)$$

Суммарная напряженность электрического поля рассчитывалась исходя из типичной осциллограммы напряжения (рис. 2), на разрядном промежутке, по формуле

$$E_{\Sigma} = \frac{U(t)}{l} - E_{\text{com}}, \quad (4)$$

где  $U(t)$  — напряжение на разрядном промежутке,  $l = 1 \text{ мм}$  — межэлектродный зазор,  $E_{\text{com}}$  — напряженность электрического поля, созданная зарядом, осевшим на диэлектрик. Напряженность электрического поля в зазоре рассчитывалась по формуле для промежутка с плоско-параллельной геометрией. Такое приближение уместно для коаксиальной геометрии с отношением кривизны электродов, близким к единице. Напряженность электрического поля  $E_{\text{com}}$  рассчитывалась по следующей формуле:

$$E_{\text{com}} = \frac{\int_{t_0}^t I(t) dt}{\epsilon_0 \epsilon_{\text{CH}_4} S}, \quad (5)$$

где  $t_0$  — момент начала зарядно-разрядных процессов,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon_{\text{CH}_4}$  — диэлектрическая проницаемость метана,  $S = 220 \text{ мм}^2$  — площадь внутренней поверхности диэлектрика, на которой накапливается заряд.

Таблица 1. Процессы, включенные в модель

Группа № 1			
Процесс	Ссылка	Процесс	Ссылка
Упругие соударения		Диссоциация	
$CH_4 + e \rightarrow CH_4 + e$	[23]	$CH_4 + e \rightarrow CH_3 + H + e$	[31]
$C_2H_6 + e \rightarrow C_2H_6 + e$	[28]	$CH_4 + e \rightarrow CH_2 + H_2 + e$	[31]
Ионизация		$CH_4 + e \rightarrow CH + H + H_2 + e$	[31]
$CH_4 + e \rightarrow CH_4^+ + 2e$	[23]	$C_2H_6 + e \rightarrow C_2H_5 + H + e$	[32]
$CH_4 + e \rightarrow CH_3^+ + 2e + H$	[23]	$C_2H_6 + e \rightarrow C_2H_4 + H_2 + e$	[32]
$C_2H_6 + e \rightarrow C_2H_6^+ + 2e$	[23]	$C_2H_4 + e \rightarrow C_2H_3 + H + e$	[32]
$C_2H_4 + e \rightarrow C_2H_4^+ + 2e$	[23]	$C_2H_2 + e \rightarrow CH + CH + e$	[32]
$C_2H_2 + e \rightarrow C_2H_2^+ + 2e$	[23]	$C_2H_2 + e \rightarrow C_2H + H + e$	[32]
$C_3H_8 + e \rightarrow C_3H_8^+ + 2e$	[29]	$C_2H_2 + e \rightarrow CH_2 + C + e$	[32]
$C_3H_6 + e \rightarrow C_3H_6^+ + 2e$	[30]	$C_3H_8 + e \rightarrow C_2H_4 + CH_4 + e$	[32]
$H_2 + e \rightarrow H_2^+ + 2e$	[31]	$C_3H_8 + e \rightarrow C_3H_6 + H_2 + e$	[32]
		$H_2 + e \rightarrow H + H + e$	[33]
Группа № 2			
Процесс	Коэф. скорости реакции	Ссылка	
$CH_4 + CH \rightarrow C_2H_4 + H$	$9.74 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + CH_2 \rightarrow CH_3 + CH_3$	$3.01 \times 10^{-19} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + C_2H \rightarrow C_2H_2 + CH_3$	$1.31 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + C_2H_3 \rightarrow C_2H_4 + CH_3$	$2.28 \times 10^{-18} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + C_2H_5 \rightarrow C_2H_6 + CH_3$	$1.83 \times 10^{-24} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + H \rightarrow H_2 + CH_3$	$8.43 \times 10^{-19} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + C_2H_2 + H \rightarrow C_2H_3 + CH_4$	$2.81 \times 10^{-31} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + C_2H_4 + H \rightarrow C_2H_5 + CH_4$	$3.66 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4 + C_2H_5 + H \rightarrow C_2H_6 + CH_4$	$9.20 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_3 + CH_3 \rightarrow C_2H_5 + H$	$2.71 \times 10^{-19} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_3 + C_2H_2 \rightarrow C_2H + CH_4$	$7.65 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_3 + C_2H_4 \rightarrow C_2H_3 + CH_4$	$1.94 \times 10^{-21} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_3 + CH_3 + CH_4 \rightarrow C_2H_6 + CH_4$	$1.56 \times 10^{-26} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_3 + C_2H_5 + CH_4 \rightarrow C_3H_8 + CH_4$	$1.00 \times 10^{-28} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_2 + H_2 \rightarrow H + CH_3$	$5.00 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H + C_2H_2 \rightarrow C_4H_2 + H$	$1.50 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_2 + H \rightarrow C_2H + H_2$	$6.12 \times 10^{-27} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_3 + C_2H_3 \rightarrow C_2H_4 + C_2H_2$	$1.60 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_3 + H_2 \rightarrow C_2H_4 + H$	$9.78 \times 10^{-20} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_5 + C_2H_5 \rightarrow C_2H_6 + C_2H_4$	$2.41 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_5 + H_2 \rightarrow C_2H_6 + H$	$2.97 \times 10^{-21} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
Группа № 3			
$CH_5^+ + C_2H_4 \rightarrow C_2H_5^+ + CH_4$	$1.50 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_5^+ + C_2H_2 \rightarrow C_2H_3^+ + CH_4$	$1.60 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_4^+ + CH_4 \rightarrow CH_5^+ + CH_3$	$1.50 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$CH_3^+ + CH_4 \rightarrow C_2H_5^+ + H_2$	$1.20 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_5^+ + H \rightarrow C_2H_4^+ + H_2$	$1.00 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_4^+ + C_2H_3 \rightarrow C_2H_5^+ + C_2H_2$	$5.00 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_4^+ + C_2H_3 \rightarrow C_2H_3^+ + C_2H_4$	$5.00 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	
$C_2H_4^+ + H \rightarrow C_2H_3^+ + H_2$	$3.00 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$	[12]	

Результат расчета зависимостей  $EN^{-1}(t)$  и  $n_e(t)$ , соответствующих времени развития разряда при нарастании напряжения, представлены на рис. 3 и 4. При расчетах

используется 0-мерное приближение, т.е. рассчитывались параметры  $EN^{-1}(t)$  и  $n_e(t)$  для малого объема, который находился в начале (на фронте ионизации)

Таблица 2. Частицы, включенные в модель

Молекулы	Ионы	Радикалы
CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>2</sub> , H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> <sup>+</sup> , CH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , CH <sub>5</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> <sup>+</sup> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> <sup>+</sup> , C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> <sup>+</sup> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> <sup>+</sup> , H <sub>2</sub>	C, CH, CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> , C <sub>2</sub> H, C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> , H

Таблица 3. Сравнение результатов анализа химического состава хроматографом и результатов моделирования

Компонент	Исходный состав	Эксперимент	Моделирование
$N_{\text{CH}_4}, 10^{17}, \text{cm}^{-3}$	$265.2 \pm 0.3$	$260.5 \pm 1.4$	262.4
$N_{\text{C}_2\text{H}_4}, 10^{17}, \text{cm}^{-3}$	0.0	$2.4 \pm 0.4$	2.6
$N_{\text{C}_2\text{H}_6}, 10^{17}, \text{cm}^{-3}$	$4.8 \pm 0.4$	$5.9 \pm 0.5$	6.3
$N_{\text{H}_2}, 10^{17}, \text{cm}^{-3}$	0.0	$1.2 \pm 0.4$	1.5

стримера в момент его „прорастания“. Формирование каждого такого канала происходит по классическому стримерному механизму, описанному Б. Лёбом [25], с поправкой на наличие диэлектрика на поверхности металлического электрода. Такой механизм развития разряда подтверждается рядом экспериментов с оптической регистрацией процесса развития разряда [26,27]. В этом объеме наибольшая концентрация электронов, а также на заряженные частицы действует электрическое поле большей величины (подобно системе „игла–плоскость“). В работе [25] утверждается, что стример развивается при напряженности этого поля, равной значению напряженности внешнего приложенного электрического поля.

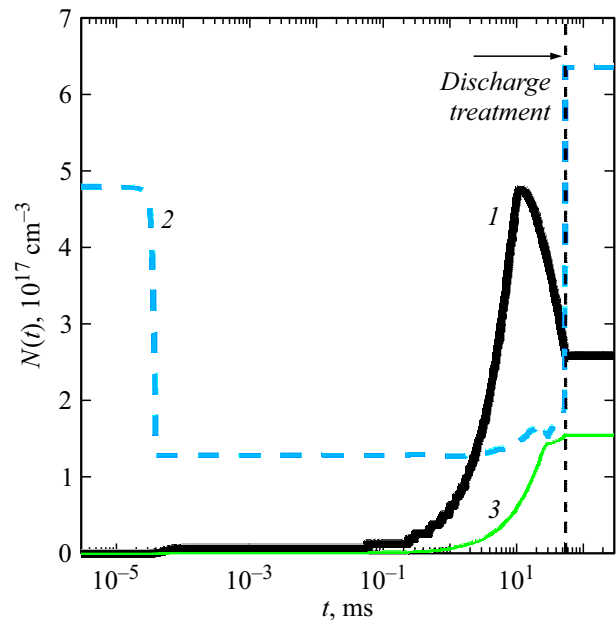
Исходя из расхода газа  $G_g$  и геометрии разрядного промежутка рассчитывалось время нахождения обрабатываемого газа в разрядном промежутке  $t_{\text{res}} = 57 \text{ ms}$ . Таким образом, количество импульсов  $N_{\text{imp}} = t_{\text{res}}/T = 228$ .

В модели расчет был рассмотрен еще в течение 300 s после подачи последнего импульса, что соответствовало времени диагностики, во время которого шли реакции рекомбинации активных радикалов. При этом значения  $n_e(t)$  и  $EN^{-1}(t)$  были близки к нулю.

При моделировании учитывался 51 процесс (табл. 1) в котором участвовало 27 частиц, не считая электронов (табл. 2). В табл. 1 все процессы разделены на три группы. Группа № 1 включает в себя столкновения электронов с различными молекулами и радикалами. Группа № 2 — реакции при столкновении двух нейтральных частиц. В группе № 3 указаны процессы взаимодействия нейтральных частиц и ионов. Также в таблице для каждой реакции указан источник откуда была взята для расчета зависимость поперечного сечения от энергии электронов или скоростной коэффициент.

## Результаты и обсуждение

В результате моделирования были получены зависимости концентрации рассматриваемых частиц от вре-

Рис. 5. Результаты моделирования зависимости концентрации молекул от времени 1 — C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>; 2 — C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 3 — H<sub>2</sub>.

мени. На рис. 5 приведены зависимости  $N(t)$ , полученные в результате моделирования для молекул, которые сравнивались с экспериментальными данными (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>). Изменение хода графика зависимости  $N_{\text{C}_2\text{H}_4}(t)$  объясняется увеличением скорости реакции потребления этилена из-за увеличения концентрации атомарного водорода, который участвует в реакции  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H} + \text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5 + \text{CH}_4$ . Резкое увеличение концентрации этана связано с рекомбинацией остаточных радикалов CH<sub>3</sub> и C<sub>2</sub>H<sub>5</sub> после окончания всех разрядных процессов.

В табл. 3 представлены обработанные (% vol. переведены в  $\text{cm}^{-3}$ ) результаты анализа химического состава газа с помощью хроматографа и результаты моделиро-



- [16] Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // Приборы и техника эксперимента. 2016. Вып. 2. С. 71.
- [17] Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. Вып. 9. С. 54.
- [18] Малашин М.В., Мошкунов С.И., Хомич В.Ю., Шершунова Е.А., Ямщиков В.А. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 5. С. 48.
- [19] Khomich V.Yu., Malashin M.V., Moshkunov S.I., Shershunova E.A., Yamschikov V.A. // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2014. Vol. 42. N 10. P. 3314.
- [20] Khomich V.Yu., Malanichev V.E., Malashin M.V., Moshkunov S.I. // IEEE Trans. on Plasma Sci. Vol. 44. N 8. P. 1349.
- [21] Pancheshnyi S., Eismann B., Hagelaar G.J.M., Pitchford L.C. Computer code ZDPlasKin, <http://www.zdplaskin.laplace.univ-tlse.fr> (University of Toulouse, LAPLACE, CNRS-UPS-INP, Toulouse, France, 2008).
- [22] BOLSIG+ solver ver. 03/2016, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net)
- [23] Hayashi database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on March 14, 2017.
- [24] Gibalov V.I., Pietsch G.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. Vol. 33. P. 2618.
- [25] Loeb L.B., Meek J.M. The mechanism of the electric spark. Stanford, California, USA: Stanford University Press, 1941. (Chapter II).
- [26] Kettlitz M., Höft H., Holder T., Weltmann K.-D., Brandenburg R. // Plasma Sources Science and Technology. 2013. Vol. 22. P. 025003.
- [27] Brandenburg R., Wagner H.-E., Morozov A.M., Kozlov K.V. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. Vol. 38. P. 1649.
- [28] Morgan database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on March 14, 2017.
- [29] Puech database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on March 14, 2017.
- [30] Biagi database, [www.lxcat.net](http://www.lxcat.net), retrieved on March 14, 2017.
- [31] Janev R.K., Reiter D. // Phys. Plasmas. 2002. Vol. 9. P. 4071.
- [32] Janev R.K., Reiter D. // Phys. Plasmas. 2004. Vol. 11. P. 780.
- [33] Corrigan S.J.B. // J. Chem. Phys. 1965. Vol. 43. P. 4381.
- [34] Scarduelli G., Guella G., Mancini I., Dilecce G., Benedictis S., Tosi P. // Plasma Process. Polym. 2009. Vol. 6. N 1. P. 27.