

03;04;12

Перераспределение компонентов газовой фазы в процессе искрового разряда над водным электролитом

© А.М. Орлов, И.О. Явтушенко, Д.С. Боднарский

Ульяновский государственный университет,
432000 Ульяновск, Россия
e-mail: yavigor@mail.ru, OrlovAM@ulsu.ru

(Поступило в Редакцию 31 мая 2011 г.)

Проведен анализ состава газовой фазы в замкнутом объеме в процессе искрового разряда над жидкой поверхностью. Получены уравнения кинетики протекающих процессов, позволившие рассчитать реальные изменения парциальных давлений значимых компонентов при плазмохимическом взаимодействии. Определены константы скоростей основных реакций, сопутствующих плазменному разряду в замкнутом объеме в воздушной атмосфере.

Плазменные разряды, к числу которых прежде всего следует отнести коронный, тлеющий, искровой и дуговой, хорошо изучены и некоторые из них давно используются во многих областях науки и техники [1–3]. Так, коронный разряд применяется в промышленности [3] в качестве электрофильтров для очистки газов, в процессах электронно-ионной технологии при нанесении порошковых и лакокрасочных покрытий. Тлеющий дуговой и импульсные разряды используются при возбуждении газовых лазеров [3,4]. На основе дугового или высокочастотного (ВЧ) разряда созданы плазмотроны [3], широко применяемые, в частности, при получении особо чистых полупроводников и металлов.

Однако плазменные образования формируются не только в газовой среде, но и в контактных зонах погруженных в электролит объектов [5,6]. Так, в последнее время получил распространение электрохимический метод нанесения тугоплавких защитных покрытий, основанный на использовании явления анодного искрового разряда. Плазменное образование, реализуемое в контактной области погруженного в раствор металлического изделия [7], позволяет получать экранирующие покрытия даже на тонких легкоплавких металлах, как Al и его сплавы. Подобные покрытия не отличаются по своим свойствам от керамики.

В последнее время повышенное внимание проявляется и к плазменным разрядам над жидкой поверхностью [8–10], когда область плазменного (чаще всего искрового) разряда локализуется между нависающим электродом и жидкой поверхностью.

Несмотря на многочисленные способы практической реализации рассматриваемых процессов, часто реализуемых в воздушной атмосфере, их физическая сущность чаще всего остается не выясненной, а гипотетические механизмы протекающих явлений обычно основываются на экспериментально фиксируемых параметрах. Исключением, по нашему мнению, могут служить работы [11–13], установившие основные закономерности формирования плазменного шнура над водной поверхностью. Однако эти и другие [8,9] работы рассматривают физику взаимодействия плазмы с водной поверхностью, не затрагивая плазменную переработку компонентов газовой и жидкой фаз. Представленные здесь результаты пытаются в какой-то мере заполнить этот пробел.

Исследования проводились в ячейке, представленной на рис. 1. U-образная кварцевая труба 1 с внутренним диаметром $\varnothing 13.6$ и высотой 142 mm герметизировалась резиновыми пробками с вольфрамовым W (катод) и никелевым Ni (анод) электродами $\varnothing 2.5$ mm. Внутренний объем незаполненной раствором системы¹ $V_0^* = 40.276 \text{ cm}^3$ предварительно оценивался по весу дистиллированной воды, заполняющей всю систему. Стартовый объем рабочей системы $V_0 = 18.276 \text{ cm}^3$ (в дальнейшем — ячейки) зависел от объема электролита, добавляемого перед опытом, который для анализируемой серии опытов был неизменным (22 cm^3). Частичное заполнение кварцевой емкости электролитом² осуществлялось таким образом, чтобы исключить присутствие под резиновой пробкой газовых пузырьков в анодном плече ячейки с Ni-электродом. Система подключалась

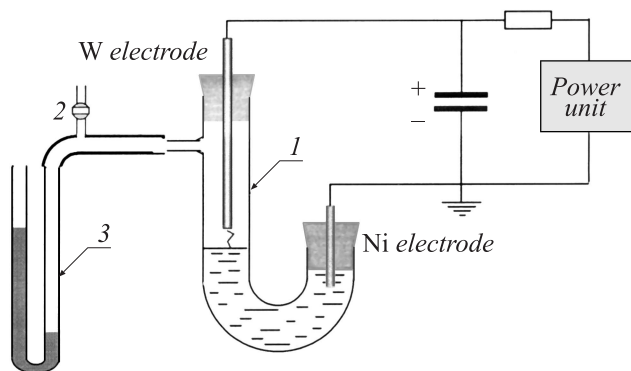


Рис. 1. Принципиальная схема установки манометрического измерения давления при плазменном разряде.

¹ Внутренний объем системы V_i , изначально заполненный воздухом, представлен свободным объемом кварцевой трубки, внутренним объемом вакуумного шланга (внутренний $\varnothing 2 \text{ mm}$) и свободным объемом правого плеча манометра.

² Состав используемого водного электролита: NiSO_4 , 175 g/l + NaCl , 67.7 g/l.

к конденсаторной батарее (в дальнейшем конденсатор с предельным рабочим напряжением $U = 20 \text{ kV}$) емкостью $7.5 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$ с регулируемым блоком питания. Воздушный зазор между нависающим W катодом и находящейся под анодным потенциалом поверхностью электролита соответствовал $\sim 1 \text{ mm}$. Ячейка через боковой штуцер подключалась к водяному манометру 3 (рис. 1). Частота искрового разряда f фиксировалась радиотехническими средствами с выводом информации на осциллограф С1-83. В процессе длительного 12.5 часового плазменного возбуждения отслеживались четыре взаимосвязанных параметра: время регистрации t , частота искрового разряда f , давление в ячейке P и напряжение пробоя U_b . Непрерывно подаваемое на конденсатор напряжение с блока питания U всегда превышало напряжение пробоя (U_b) воздушного зазора электрод (W)–электролит.

Изменение давление ΔP в ячейке отслеживалось относительно стартового атмосферного³ значения P_0 , определяемого в основном кислородом (20.95 vol.%) и азотом (78.09 vol.%). Парциальные значения давлений O_2 и N_2 при стартовой температуре T_0 лежали в основе определения количества молей доминирующих компонентов на старте искрового разряда.

Начало искрового разряда всегда сопровождалось стремительным изменением $\Delta P(t)$, неизменно проходящим через небольшой локальный максимум, а затем — ярко выраженный локальный минимум (рис. 2). По истечении установленного времени плазменный разряд прекращался. Отключение электричества способствовало вначале быстрому спаду $\Delta P(t)$ в ячейке с последующим постепенным выходом этого параметра на постоянное значение. Фиксируемый при этом перепад давлений использовался для определения уровня перегрева системы в процессе искрового разряда

$$\Delta T = T_1 \left(\frac{\Delta P}{P_1} + \frac{\Delta V}{V_1} - \frac{\Delta P}{P_1} \cdot \frac{\Delta V}{V_1} \right), \quad (1)$$

где $\Delta T = (T_1 - T_2)$ — перепад температуры (после разрыва электрической цепи) между начальным и стационарным значениями T_i ; T_1 , P_1 и V_1 — температура, давление и объем системы в момент отключения электричества; ΔV — изменение объема ячейки с момента отключения U до выхода системы на стационарный режим. Согласно проведенным расчетам, искровой разряд в условиях опыта повышает исходную температуру газового объема кварцевой ячейки на 10.8 grad.

Обращает на себя внимание старт искрового разряда (см. вставку на рис. 2) с явно выраженным экстремальным изменением $\Delta P(t)$ при $t_{\max} = 2.75 \text{ min}$. Разрядный старт, как и его финиш, при $U = \text{const}$ всегда сопровождается мгновенным изменением давления на 5–6 Pa, вызванным появлением ($t = +0$) или исчезновением после снятия напряжения высокотемпературной ($\sim 10\,000 \text{ K}$)

³ До старта разряда ячейка через кран 2 соединялась с внешней атмосферой ($\Delta P = 0$).

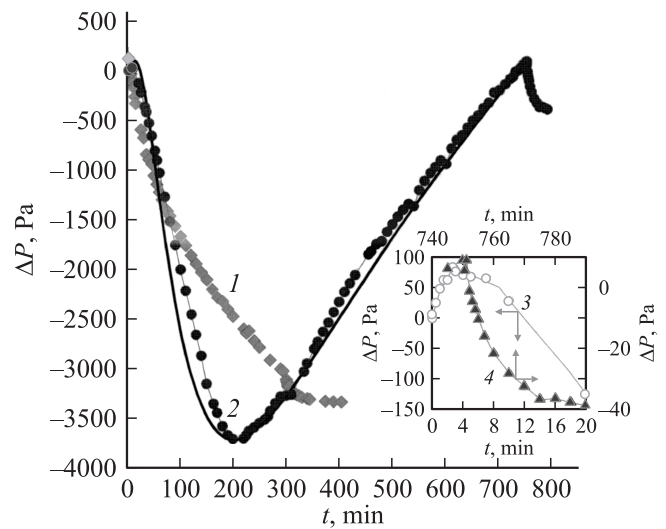


Рис. 2. Влияние искрового разряда на изменение давления в закрытой емкости. 1 — разряд в естественной атмосфере между вольфрамовыми электродами [15]. $U = 9.2 \text{ kV}$, U_b не фиксировалось, $f_{\text{av}} = 11.8 \text{ Hz}$. 2 — разряд над никелевым электролитом. $U = 9.23 \text{ kV}$, $U_b = 3.54 \pm 0.46 \text{ kV}$, $f_{\text{av}} = 10.2048 \text{ Hz}$. Точки — эксперимент, линия — результат расчета $\Delta P(t)$. На вставке отдельные участки кривой 2: 3 — начальное изменение давления в ячейке, 4 — изменение давления после прекращения разрядов.

микрзоны, локализованной в канале искрового разряда. Последующее плавное изменение $\Delta P(t)$, проходящее через локальный максимум, определяется режимом установления теплового баланса ячейки с внешней атмосферой и конкурирующими процессами в плазме искрового разряда, приводящими к общему снижению числа молей газовой фазы. Однако наличие локального минимума ($t \approx 200 \text{ min}$) и следующий за ним непрерывный рост давления однозначно указывают не только на перераспределение компонентов воздушной атмосферы, но и на непрерывное поступление какой-то новой составляющей в газовую атмосферу анализируемой ячейки. Учитывая это, проведем более углубленное рассмотрение кинетики протекающих явлений.

Используемая в опытах катодная поляризация нависающего над раствором вольфрамового электрода способствует переносу электронной составляющей плазмы искрового разряда к водной поверхности, результатом взаимодействия которой является водород. Каждый разрядный импульс наполняет систему очередной порцией выделяемого водорода, оцениваемого значением $n_j = Q_1/zF$. Для никелевого электролита заряд любой искры перераспределяется между восстанавливаемым водородом и Ni и не может быть оценен по емкости конденсатора. При разряде над водной поверхностью весь ток разрядного импульса затрачивается на восстановление водорода. Так что при разветвлении тока на параллельные процессы количество введенного в ячейку

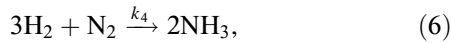
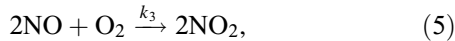
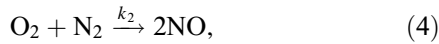
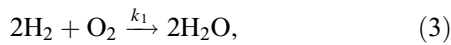
молекулярного водорода определяется уравнением

$$n_j = Bt, \quad (2)$$

где $B = I_1/(2zF)$, F — число Фарадея, $z = 1$ — валентность водорода, I_1 — усредненное по времени t значение тока, пошедшее на восстановление водорода⁴; $Q_1 = I_1 \cdot t$.

Численно I_1 не может превышать усредненного по периоду значения полного тока $[A]$ $I = fQ = fCU_b$, легко оцениваемого по известной частоте разрядных импульсов f и напряженного разряда $U_b < U$.

При теоретическом описании меняющегося давления и состава газовой фазы будем опираться на реальную последовательность доминирующих процессов, протекающих только в шнуре плазменного разряда:



Представленные уравнения со своими значениями констант скоростей k_1 показывают всю сложность протекающих явлений, связанных с параллельно-последовательным взаимодействием компонентов. Действительно, в рассматриваемом нами варианте предусматривается параллельное поглощение H_2 в двух процессах и O_2 — в трех. С другой стороны, поглощение кислорода в реакции (5) осуществляется нарабатанной в (4) моноокисью азота, что свидетельствует о последовательности развиваемых событий. Нарбатываемая двуокись азота в реакции (5) также служит промежуточным звеном для появления еще одного канала (7) поставки монооксида азота. Все это должно учитываться при составлении соответствующих кинетических уравнений.

Оценка скорости протекания каждого из рассматриваемых процессов может быть проведена через любой исходный или нарабатанный компонент. Учитывая это, напишем дифференциальные уравнения скоростей (3)–(7), присвоив общему (т.е. суммарному по всем реакциям) числу молей компонентов, участвующих в плазмохимическом процессе, соответствующие символы: для водорода H_2 символ „ x “, O_2 — „ y “, N_2 — „ z “, NO — „ ξ “, NO_2 — „ μ “, H_2O — „ γ “. Внутри каждого параллельно-последовательного маршрута (3)–(7) те же компоненты обозначим аналогичными символами с подстрочными индексами соответствующих реакций, отнеся каждый компонент к одному молю.

Пусть на старте плазменного разряда ($t = 0$) в ячейке локализовано y_0 моль кислорода O_2 и z_0 азота N_2 . Причем $n_0 = y_0 + z_0$. Если к моменту времени t искровыми

⁴ Множитель „2“ учитывает практически мгновенную трансформацию выделяемого при искровом разряде атомарного водорода в молекулярную форму.

разрядами нарабатывается $n_0 = Bt$ моль водорода, то он прореагирует по маршруту (3) с кислородом и по маршруту (6) с азотом. Общий расход H_2 для любого из этих маршрутов составит $x = 2x_3 + 3x_6 = 2y_3 + 3z_6$, а непрореагировавшими останутся $(Bt - x)$ моль H_2 . Если проводить идентификацию водорода по другим компонентам соответствующих реакций, то выше представленная эквивалентная замена $2x_3$ на $2y_3$ и $3x_6$ на $3z_6$ очевидна, поскольку количество провазимодействовавшего водорода вдвое больше O_2 ((3) маршрут) и втрое — N_2 ((6) маршрут).

Одновременная переработка O_2 происходит по трем параллельным для кислорода маршрутам, что позволяет представить его расход обобщенным уравнением $y = y_3 + y_4 + y_5$. Учитывая результирующие значения x и y , скорость выжигания кислорода по третьему маршруту представим уравнением

$$\frac{dy_3}{dt} = \frac{k_1}{V} \underbrace{(Bt - x^2)}_{H_2} \underbrace{(y_0 - y)}_{O_2}. \quad (8)$$

Аналогичный анализ, проведенный для остальных маршрутов, дает соответствующие значения скоростей анализируемых реакций. Так, для маршрута (4):

$$\frac{dy_4}{dt} = \frac{k_2}{V} \underbrace{(y_0 - y)}_{O_2} \underbrace{(z_0 - z)}_{N_2}, \quad (9)$$

где количество прореагировавшего кислорода соответствует прежнему значению $y = y_3 + y_4 + y_5$, а удаленного из системы азота — $z = z_4 + z_6 = y_4 + z_6$; для маршрута (5):

$$\frac{dy_5}{dt} = \frac{k_3}{V} [2\xi_4 + \xi_7 - 2\xi_5]^2 (y_0 - y),$$

где число молей NO в (4) и (5) может быть выражено через O_2 и NO_2 соответственно уравнением $2\xi_4 + \xi_7 - 2\xi_5 = 2y_4 + \frac{1}{3}\mu_1 - 2y_5$, так что для маршрута (6):

$$\frac{dz_6}{dt} = \frac{k_4}{V} (Bt - x)^3 (z_0 - z). \quad (11)$$

При расчетах удаленный по маршруту (3) водород по-прежнему представлен через O_2 , а по маршруту (6) — через N_2 : $x = 2x_3 + 3x_6 = 2y_3 + 3z_6$. Аналогично $z = z_4 + z_6 = y_4 + z_6$.

Скорость протекания последнего процесса (7) оценим по NO_2 , ранее нарабатанному по маршруту (5). При написании (12) мы пренебрегли парами азотной кислоты, которые практически полностью поглощаются водой. Более того, из-за постоянного присутствия конденсированной H_2O в замкнутом объеме при установившемся температурном режиме всегда сохраняется влажность 100%, поддерживающая в газовой фазе неизменное количество молей водяного пара γ_0 . Так что для маршрута (7):

$$\frac{d\mu_7}{dt} = \frac{1}{3} \frac{k_5}{V} (2\mu_5 - 3\mu_7)^3 \gamma_7, \quad (12)$$

где $\gamma_7 = \text{const}$ — значение, определяемое давлением насыщенного пара воды.

Расчетные параметры анализируемых реакций в плазменном шнуре искрового разряда

№ п/п	Реакции	Порядок реакции (по исходным компонентам)	Константа скорости реакции, $k_i, 1/(\text{mol} \cdot \text{s})$
1	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \xrightarrow{k_1} 2\text{H}_2\text{O}$	$2 = (1 + 1)$	$8.5 \cdot 10^{-5}$
2	$\text{O}_2 + \text{N}_2 \xrightarrow{k_2} 2\text{NO}$	$2 = (1 + 1)$	$7.5 \cdot 10^{-6}$
3	$2\text{NO} + \text{O}_2 \xrightarrow{k_3} 2\text{NO}_2$	$2 = (1 + 1)$	$4.8 \cdot 10^{-6}$
4	$3\text{H}_2 + \text{N}_2 \xrightarrow{k_4} 2\text{NH}_3$	$2 = (1 + 1)$	$1.0 \cdot 10^{-7}$
5	$3\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \xrightarrow{k_5} 2\text{HNO}_3 + \text{NO}$	$2 = (2 + 0)$	$5 \cdot 10^{-3}$

Примечание. $U = 9.23 \text{ kV}$, $U_b = 3.54 \pm 0.46 \text{ kV}$, $f_{av} = 10.2048 \text{ Hz}$. Расчетное значение $B = 7.1 \cdot 10^{-10} \text{ mol/s}$.

Таким образом, мы располагаем системой из пяти уравнений (8)–(12) с 6 неизвестными (если не известен ток): $y_3, y_4, y_5, z_6, \mu_7$ и B . Остальные компоненты этих уравнений взаимосвязаны стехиометрическими коэффициентами внутри каждой реакции (3)–(7). Недостающее уравнение может быть получено из экспериментальной зависимости $\Delta P(t)$, связанной с вычисляемым параметром n очевидным соотношением

$$\Delta P(t) = n \frac{RT}{V} - P_0, \quad (13)$$

где $n = n_0 + Bt - 3y_3 - y_5 - 2z_6 - 2\xi_7$ — число молей компонентов, определяющих давление $P(t) = nRT/V$; R — универсальная газовая постоянная; V — объем, изменение которого не превышает 15%; T — абсолютная температура, меняющаяся в процессе искрового разряда по эмпирическому закону: $T(t) = T - ru^t$, где $T = T_0 + \Delta T \approx 309 \text{ K}$ — стационарное значение температуры, устанавливающееся при плазменном разряде; $r = 11.0602$, $u = 0.99993$.

Численное значение $n(t)$ вытекает из балансового соотношения числа молей наработанных и потребленных компонентов в (3)–(7). Так, вызванное маршрутом (3) изменение давления связано лишь с количеством переработанных продуктов O_2 (y_3) и H_2 ($2y_3$), но не с полученными здесь парами воды, тут же переходящими при влажности 100% в конденсат.

К снижению давления приводят и плазменные процессы, протекающие по маршрутам (5)–(7), в которых число молей перерабатываемых продуктов лишь частично компенсируется нарабатываемыми компонентами NO_2 , NH_3 и NO . Это приводит к дополнительному снижению числа молей газовой фазы в рассматриваемых реакциях на $y_5, 2z_6$ и $2\xi_7$ молей соответственно.

И лишь маршрут (4) характеризуется сбалансированностью наработанных в плазме исходных и конечных продуктов реакции, которые не оказывают никакого влияния на давление в замкнутом объеме ячейки, что и отражено вышеприведенным значением n .

Система уравнений (8)–(13) не поддается аналитическому решению, поэтому она решена численным методом. Наилучшая согласованность экспериментальных и расчетных данных (рис. 2) фиксируется только при конкретных значениях k_i и определенных, обычно более

низких по отношению к (3)–(7), порядках реакций. Действительно, большинство описываемых здесь процессов относятся к реакциям (3), (4) порядков, которые на практике почти не реализуются. Причина этого заключается в том, что реагируют только те молекулы, которые сталкиваются, а вероятность одновременного столкновения (3)–(4) молекул, особенно если концентрация некоторых из них незначительна ($\text{H}_2, \text{NO}, \text{NO}_2, \text{NH}_3$ на старте и O_2 на финише), чрезвычайно мала. Поэтому порядок таких реакций понижается вплоть до первого и может принимать дробные значения. Скорость подобного процесса определяется компонентом с меньшей концентрацией.

Графическая иллюстрация проведенных расчетов представлена сплошной линией на рис. 2. Этими вычислениями подтверждена и непосредственная связь локального максимума на старте искрового разряда с перераспределением взаимно компенсирующих процессов температурных и структурных изменений, протекающих в плазме искрового разряда. Что касается хорошего согласия экспериментальных и расчетных изменений ΔP на протяжении всего 12.5-часового воздействия плазмы, то оно может быть получено лишь при конкретных значениях k_1 и соответствующих порядках реакций, представленных в таблице.

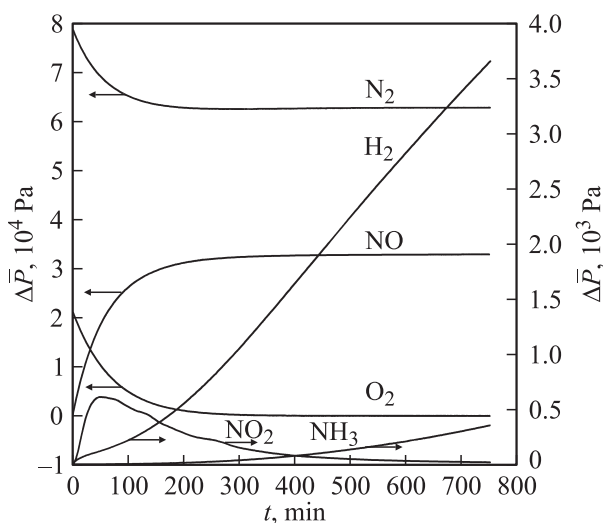


Рис. 3. Изменение парциального давления \bar{P}_i компонентов газовой фазы в процессе искрового разряда.

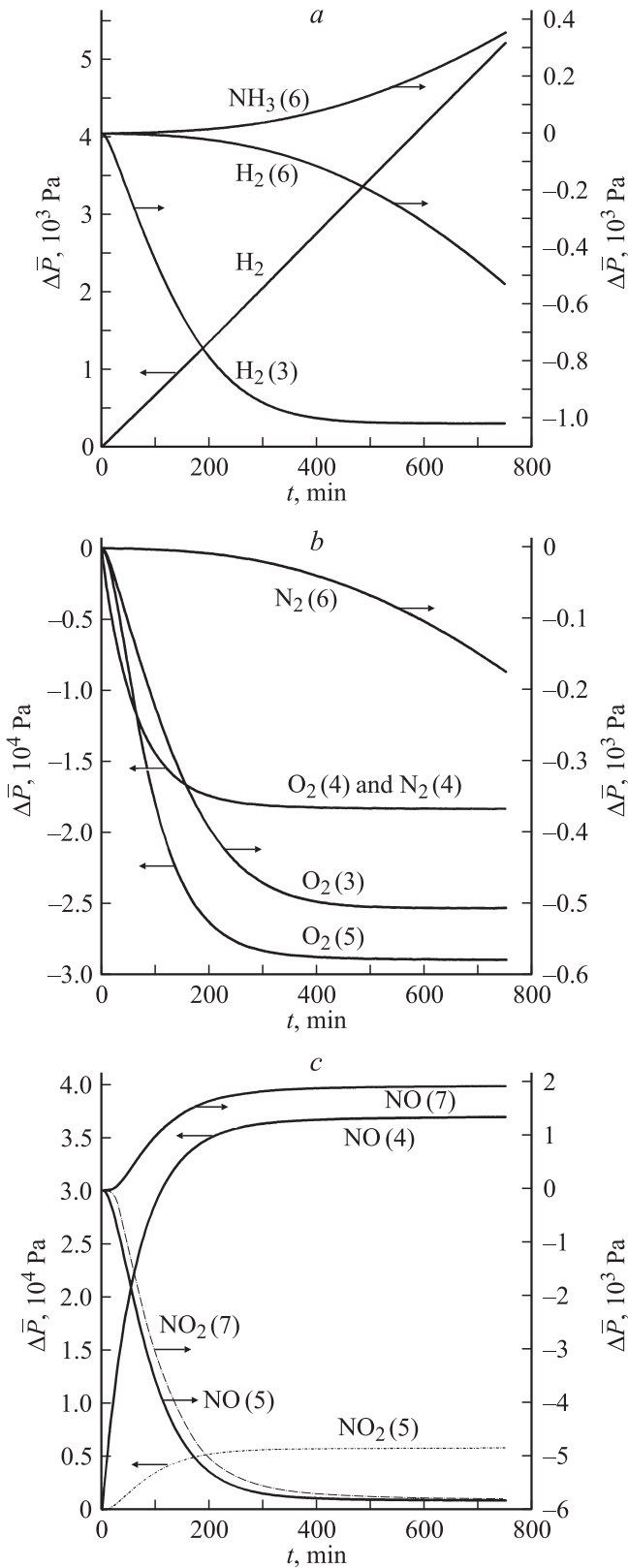


Рис. 4. Весовая доля парциальных давлений компонентов конкретизированных реакций (3)–(7) в общем балансе изменения давления, представленного кривой 2 на рис. 2. Цифры в скобках указывают на тип реакции (3)–(7).

Результирующее ΔP , устанавливаемое в ячейке на различных временных этапах, определяется суммой парциальных давлений всех исходных и наработанных компонентов в шнуре искрового разряда. О динамике их перераспределения можно судить по соответствующим кривым рис. 3. Анализ представленных здесь результатов указывает на наличие двух принципиально отличающихся этапов, первый из которых контролируется процессами (3)–(7) в шнуре искрового разряда, второй — доминированием свободного водорода, инжектируемого в газовую атмосферу, из контактной зоны плазменного шнура с электролитом.

Превалирующая роль кислорода, предопределяющего протекание четырех из пяти реакций, очевидна, поскольку этап эффективного воздействия плазмы на преобразующие процессы (3)–(7) завершается в точке локального минимума, характеризующегося практически полным выжиганием O_2 (95.64%). При этом большая часть выделенного H_2 связывается кислородом, а после его выжигания ($t > 200$ min) лишь незначительная часть нарабатываемого водорода идет на образование аммиака. Однако представленная здесь информация дает лишь интегральную характеристику парциальных изменений \bar{P}_i того или другого компонента. Между тем особый интерес представляет динамика плазменной переработки составляющих газовой фазы по каждому параллельно-последовательному маршруту, что позволяет оценить весовую долю компонентов любой реакции в общем балансе изменения давления. Результаты этих расчетов представлены на рис. 4. Видно, что H_2 практически полностью перерабатывается по первому маршруту (рис. 4, a), представленному уравнением (3). Этот процесс характеризуется большим значением константы скорости k_1 (таблица). Параллельное потребление водорода по четвертому маршруту (6) незначительно, а константа скорости k_4 в 850 раз меньше k_1 . Так что этой реакцией можно пренебречь. Следовательно, можно пренебречь и азотом, связываемым этой реакцией. Отсюда приоритет в параллельной переработке N_2 сохраняется за вторым маршрутом (4), константа скорости которой в 75 раз выше k_4 . Среди трех параллельных маршрутов (3)–(5) эта же реакция (4) является определяющей и в связывании O_2 .

Большая скорость плазменной переработки O_2 и N_2 по второму маршруту (4) предопределяет быстрое накопление в атмосфере ячейки монооксида азота, последовательная переработка которой (5) в ограниченном объеме плазменного шнура не успевает за поступлением окисла.

Найденные нами значения k_j , представленные в 4-м столбце таблицы, оцениваются относительно общей продолжительности плазмохимической обработки. Между тем все рассматриваемые процессы активизируются только в небольшом объеме плазменного шнура, время существования которого ограничено $\sim 10^{-7}$ s [9]. При средней частоте разряда 10.21 Hz и быстро протекающих рекомбинационных процессах ($\Delta t \leq 10^{-6}$ s) [14]

99.9990% времени каждого периода система остается инертной. Несмотря на это, реальные значения констант скоростей плазмохимических реакций должны оставаться постоянными, независимо от оценки этого параметра по длительности разрядного импульса ($\sim 10^{-7}$ s), по межразрядному периоду $1/f$ или, что то же самое, по общей продолжительности плазмохимической обработки, в пределах которой 99.9990% времени система остается инертной. Это действительно так, поскольку заряд каждого разрядного импульса остается неизменным, как и произведение It , определяющее этот заряд. К сожалению, мы не располагаем аналогичной хотя бы приближенной независимой количественной информацией других авторов, анализировавших искровой разряд над водной поверхностью. Сравнительному анализу при идентичных U и f могут быть подвергнуты лишь процессы взаимодействия кислорода с N_2 (5) и NO (6), реализуемые, однако, в совершенно иных условиях искрового разряда⁵ [15]. Видно (рис. 2), что искровой разряд над водной поверхностью не только ускоряет плазменную переработку компонентов газовой фазы, но и обеспечивает экстремальный ход кривой после выработки кислорода.

Хорошая корреляция экспериментальных и расчетных данных позволяет провести оценку перераспределения тока и количества прошедшего электричества между „водородной“ и „никелевой“ составляющими при взаимодействии электронной составляющей плазмы искрового разряда с поверхностным слоем никелевого электролита. Так, среднее значение тока, найденное по коэффициенту $B = 7.1 \cdot 10^{-10}C$, оказалось равным $1.35 \cdot 10^{-4}$ А, что на 53.41% ниже суммарного тока $(2.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$ А, вычисленного по разрядному напряжению, емкости конденсатора и частоте разряда. Следовательно, лишь 46.59% прошедшего электричества при искровом разряде затрачивается на восстановление металлического Ni в контактной зоне плазменного шнура с электролитом.

При обычном освещении локализованные в растворе мелкодисперсионные металлические частицы визуально не обнаруживаются, но фиксируются под микроскопом в лучах лазерного излучения в виде ярко мерцающих точек, возникающих в результате рассеивания света на плоских (двумерных) наночастицах. С помощью магнита, расположенного снаружи ячейки, эти частички легко могут быть собраны в растворе в небольшой рыхлый шарик. Однако эти результаты имеют самостоятельный интерес и будут представлены к рассмотрению в ближайшее время.

⁵ В работе [15] анализируется изменение состава сухой воздушной атмосферы в процессе непрерывно возбуждаемых искровых разрядов между металлическими электродами.

Список литературы

- [1] Ломаев М.И., Скакун В.С., Сосни Э.А. и др. // УФН. 2003. Т. 41. Вып. 2. С. 201–217.
- [2] Александров В.В., Грибовский Г.Г., Зукакишвили Г.Г. и др. // ЖЭТФ. 2003. Т. 124. Вып. 4(10). С. 829–839.
- [3] Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Сов. энциклопедия, 1983. 928 с.
- [4] Mesyats G.A., Osipov V.V., Tarasenko V.F. // Pulsed Gas Lasers. Billingham (Wash. USA): SPIE, 1995. 374 p.
- [5] Орлов А.М., Явтушенко И.О., Журавлева А.В. // ЖТФ. 2010. Т. 80. Вып. 2. С. 60–65.
- [6] Потребняк А.Д., Кульментьева О.П., Кобзев А.П. и др. // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 8. С. 8–15.
- [7] Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П. // Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов. Новосибирск: Наука, 1991. С. 93.
- [8] Орлов А.М., Явтушенко И.О., Чурилов М.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 12. С. 30–38.
- [9] Орлов А.М., Явтушенко И.О., Чурилов М.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 13. С. 61–70.
- [10] Рудинский М.Э., Гуткин А.А., Брунков П.Н. // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 8. С. 1053–1058.
- [11] Белошеев В.П. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 8. С. 50–58.
- [12] Белошеев В.П. // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 7. С. 109–114.
- [13] Знаменский И.А., Латфуллин Д.Ф., Луцкий А.Е., Мурсенкова И.В. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 17. С. 35–41.
- [14] Грановский В.Д. Электрический ток в газе. Установившийся ток. М.: Наука, 1971. 543 с.
- [15] Орлов А.М., Явтушенко И.О., Боднарский Д.С. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 12. С. 25–34.