ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 1999, том 37, № 4, с. 533–539

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЫ

УДК 537.525+539.19

КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗОВАНИЯ И ГИБЕЛИ АТОМОВ ВОДОРОДА В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ СТОЛБЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В СМЕСИ Ar–H_2

© 1999 г. **И. Н. Бровикова, Э. Г. Галиаскаров, А. М. Исляйкин, В. И. Светцов**

Ивановский государственный химико-технологический университет

Поступила в редакцию 15.04.98 г.

В положительном столбе разряда постоянного тока в смеси Ar–H_2 измерены скорости образования и концентрации атомов, константы скоростей их гетерогенной гибели и некоторые электрофизические характеристики плазмы при давлении P_g = 200 Па и токе разряда $I_{раз}$ = 50 мА. На основе этих данных путем совместного решения уравнения Больцмана, уравнений колебательной кинетики для $H_2(X^1\Sigma_g)$ и химической кинетики показано, что колебательно-возбужденные молекулы слабо влияют на процессы с участием электронов как непосредственно, так и косвенно через функцию распределения электронов по энергиям. Анализ процессов диссоциации показал, что наряду с распадом электронных состояний, возбуждаемых из $H_2(X^1\Sigma_g)$ электронным ударом, в образовании атомов H важную роль могут играть реакции молекул H_2 с возбужденными атомами аргона и водорода. Гибель атомов происходит в результате гетерогенной рекомбинации, протекающей по первому кинетическому порядку относительно их концентрации.

Для плазмохимии характерно использование смесей газов, одним из компонентов которых является инертный газ, для повышения концентрации каких-либо из активных компонентов, образующихся в плазме. В работах [1, 2], посвященных исследованию механизма диссоциации молекул H_2 в таких системах, установлено, что значительный вклад в процессы возбуждения, диссоциации и ионизации дают атомы в возбужденных состояниях. Исследования, проводившиеся для смесей H_2–Ar с содержанием H_2 до 10%, показывают возможность достижения высокой степени разложения H_2. Можно ожидать, что такие системы являются более эффективными источниками атомов H, чем водородная плазма. С целью выяснения справедливости этого предположения проводились измерения электрофизических параметров, скоростей диссоциации H_2 и концентраций атомов водорода в плазме смеси Ar–H_2 в широком диапазоне состава газовой смеси, по полученным результатам сделан анализ механизма диссоциации.

Эксперимент. Измерения проводились на установке, описание которой дано в работе [3]. Тлеющий разряд постоянного тока возбуждался в цилиндрическом реакторе внутренним диаметром 15 мм, изготовленным из стекла марки С52. Проводились кинетические эксперименты, которые заключались в измерении концентрации атомов в зависимости от длины положительного столба (ПС) разряда и расхода газа. Обработка этих зависимостей, детали которой приведены в [3], позволяла определять скорости образования атомов и вероятности их гетерогенной гибели как в зоне плазмы, так и в области потокового послесвечения.

Атомы $H(^2S)$, выходящие из разряда, регистрировались ЭПР-спектрометром РЭ1301. Напряженность продольного электрического поля E измерялась по напряжению компенсации тока в цепи двух цилиндрических зондов диаметром 20 мкм. Температура газа на оси ПС T_0 определялась методом двух термопар [4]. Измерения проводились при фиксированном значении давления (P_g = 200 Па) и тока разряда ($I_{раз}$ = 50 мА).

Водород получался электрохимическим разложением воды в генераторе “Водень-1”. Дополнительная его очистка осуществлялась пропусканием через ловушку с жидким азотом и его чистота, контролируемая масс-спектрометром МХ7304, была не хуже 0.995. Содержание примесей в аргоне не превышало 0.001.

Начальное процентное соотношение газов в смеси устанавливалось соответствующим изменением расходов каждого газа, которые измерялись капиллярными ротаметрами.

Результаты измерений. На рис. 1, 2 приведены значения напряженности продольного электрического поля и стационарные концентрации атомов H(1S) (при длине ПС существенно большей характерной длины релаксации концентрации). Как и для плазмы H_2 [3], гибель атомов водорода происходит в зоне плазмы по первому кинетическому порядку относительно их концентрации. Значение вероятности гетерогенной гибели атомов в зоне плазмы практически не зависит от состава газовой смеси и составило в среднем $(2.6 \pm 0.5) \times 10^{-4}$.

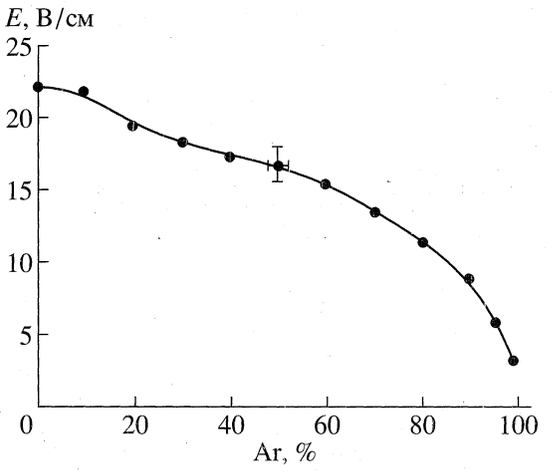

Рис. 1. Влияние состава смеси на напряженность продольного электрического поля. Давление 200 Па, ток разряда 50 мА.

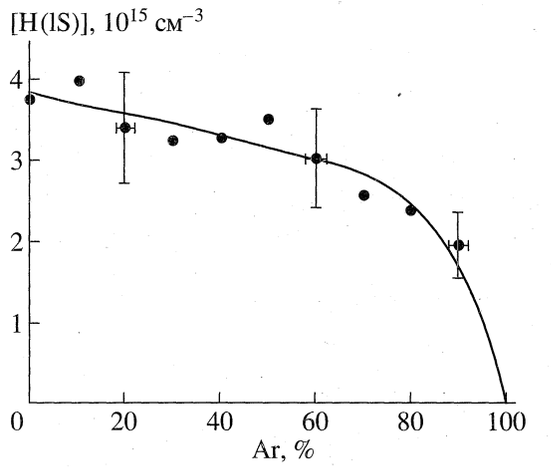

Рис. 2. Влияние состава смеси на стационарную концентрацию атомов H(1S). Точки – эксперимент, кривая – расчет. Давление 200 Па, ток разряда 50 мА.

Соответствующие значения вероятности в зоне потокового послесвечения приблизительно на порядок величины ниже.

Анализ механизма диссоциации. В условиях неравновесной плазмы к диссоциации молекул могут приводить следующие процессы: диссоциация через колебательный континуум основного состояния, диссоциация в результате возбуждения электронным ударом нестабильных и предиссоциирующих электронных состояний с колебательных уровней основного состояния молекул, диссоциация при столкновениях возбужденных частиц. Следовательно, анализ механизма образования атомов водорода требует совместного рассмотрения кинетического уравнения Больцмана для электронов, уравнений колебательной кинетики для $H_2(X^1\Sigma_g)$ и уравнений химической кинетики.

Для определения функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ), а также характеристик электрона, рассчитываемых на ее основе, использовалось уравнение для стационарной изотропной части ФРЭЭ, полученное в двучленном приближении разложения по сферическим гармоникам. Сечения столкновения электронов с атомами и молекулами водорода брались из [5, 6] соответственно, а с атомами аргона – из [7, 8].

Уравнения колебательной кинетики включали одноквантовые процессы *V–V*- и *V–T*-обмена при столкновениях H_2–H_2, H_2–H, H_2–Ar, гетерогенную дезактивацию с вероятностью 2×10^{-3} [9], накачку и дезактивацию в соударениях 2-го рода электронами. Дополнительными каналами образования колебательно-возбужденных молекул (КВМ) могут быть радиационные переходы с лежащих выше синглетных уровней [10]. Константы скоростей *V–T*- и *V–V*-обмена рассчитывались в рамках SSH теории с учетом влияния ангармонизма на величину адиабатического фактора и предэкспоненциального множителя [11]. Для партнеров по столкновению H_2–H_2, H_2–H и H_2–Ar использовались параметры крутизны потенциала взаимодействия 3.57 [12], 4.52 и 3.01 $Å^{-1}$ [13] соответственно. Константы $K_{10}(T)$ и $K_{10}^{01}(T)$ *V–T*- и *V–V*-релаксации для соударений H_2–H_2 брались из работы [11], для соударений H_2–H – из [14], для соударений H_2–Ar – из [15], а спектроскопические характеристики молекулы H_2 – из [16]. Предполагалось, что при рекомбинации атомов образуются молекулы на нулевом колебательном уровне, а функции распределения КВМ нормировались на концентрацию молекул H_2.

В таблице представлены процессы, учитываемые при вычислении стационарных концентраций частиц. Константы скоростей процессов с участием электронов находились по ФРЭЭ и соответствующему сечению. Диффузионное время жизни ионов определялось так же, как в [17]. Подвижности ионов в газовой смеси вычислялись по закону Бланка. Значения подвижности каждого сорта ионов в собственном и чужом газе брались из [18, 19]. Если такие сведения в литературе отсутствовали, то подвижности ионов оценивались по формуле Ланжевена с известной поляризуемостью газа (в единицах a_0^3, a_0 – радиус Бора): $\beta(H) = 4.5$, $\beta(H_2) = 5.42$, $\beta(Ar) = 11.08$ [13].

Процедура расчета заключалась в следующем. С заданным набором входных параметров (начальный состав смеси, давление P_g (Па), напряженность электрического поля E (В/см), ток разряда I (мА), радиус трубки R (см), температура газа T_g (К) и стенки T_w (К)) вычислялись ФРЭЭ, характеристики электронов и константы скоростей процессов с участием электронов без учета

Анализируемые реакции

№ п/п	Процессы	Константа	Ссылка
1	$H_2(X^1\Sigma g^+, v = 0) + e \longrightarrow H_2(X^1\Sigma g^+, v = 1–3) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
2	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H_2(b^3\Sigma u^+) \longrightarrow 2H(1S) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
3	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H_2(a^3\Sigma g^+) \longrightarrow 2H(1S) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
4	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H_2(c^3\pi u^+) \longrightarrow 2H(1S) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
5	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H_2(B^1\Sigma g^+) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
6	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H_2(C^1\pi u^+) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
7	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H_2^+ + 2e$	из расчета ФРЭЭ	–
8	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H(1S) + H(n = 2)$	из расчета ФРЭЭ	–
9	$H_2(X^1\Sigma g^+) + e \longrightarrow H(1S) + H(n = 3)$	из расчета ФРЭЭ	–
10	$H(1S) + e \longrightarrow H(2S) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
11	$H(1S) + e \longrightarrow H(2P) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
12	$H(1S) + e \longrightarrow H(n = 3) + e$	из расчета ФРЭЭ	–
13	$H(1S) + e \longrightarrow H^+ + 2e$	из расчета ФРЭЭ	–
14	$H(2S, 2P) + e \longrightarrow H^+ + 2e$	из расчета ФРЭЭ	–
15	$Ar + e \longrightarrow Ar(Y) + e$, $Y = {}^3P_2, {}^3P_1, {}^3P_0, {}^1P_1$	из расчета ФРЭЭ	–
16	$Ar + e \longrightarrow Ar^+ + 2e$	из расчета ФРЭЭ	–
17–20	$Ar(Y) + e \longrightarrow Ar^+ + 2e$, $Y = {}^3P_2, {}^3P_1, {}^3P_0, {}^1P_1$	3×10^{-8} см^3/с	[1]
21–23	$Ar({}^3P_2) + e \longrightarrow Ar({}^3P_1, {}^3P_0, {}^1P_1) + e$	2×10^{-7} см^3/с	[1]
24	$Ar({}^3P_1) + e \longrightarrow Ar({}^3P_2) + e$	3×10^{-7} см^3/с	[1]
25	$Ar({}^3P_1) + e \longrightarrow Ar({}^3P_0) + e$	1×10^{-8} см^3/с	[1]
26	$Ar({}^3P_1) + e \longrightarrow Ar({}^1P_1) + e$	2×10^{-7} см^3/с	[1]
27	$Ar({}^3P_0) + e \longrightarrow Ar({}^3P_2) + e$	1×10^{-6} см^3/с	[1]
28	$Ar({}^3P_0) + e \longrightarrow Ar({}^3P_1) + e$	3.5×10^{-8} см^3/с	[1]
29	$Ar({}^3P_0) + e \longrightarrow Ar({}^1P_1) + e$	2×10^{-7} см^3/с	[1]
30	$Ar({}^1P_1) + e \longrightarrow Ar({}^3P_2) + e$	3×10^{-7} см^3/с	[1]
31	$Ar({}^1P_1) + e \longrightarrow Ar({}^3P_0) + e$	7×10^{-8} см^3/с	[1]
32	$Ar({}^1P_1) + e \longrightarrow Ar({}^3P_1) + e$	2×10^{-7} см^3/с	[1]
33–36	$Ar(Y) + e \longrightarrow Ar(4p) + e$, $Y = {}^3P_2, {}^3P_1, {}^3P_0, {}^1P_1$	5×10^{-7} см^3/с	[1]
37	$Ar(4p) \longrightarrow Ar({}^3P_1) + h\nu$	10^8 с$^{-1}$	[1]
38	$Ar(4p) \longrightarrow Ar({}^1P_1) + h\nu$	10^8 с$^{-1}$	[1]
39	$Ar(4p) \longrightarrow Ar({}^3P_2) + h\nu$	4×10^{-7} с$^{-1}$	[1]
40	$Ar(4p) \longrightarrow Ar({}^3P_0) + h\nu$	10^8 с$^{-1}$	[1]
41	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar({}^3P_2) \longrightarrow 2H(1S) + Ar$	6.6×10^{-11} см^3/с	[1]
42	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar({}^3P_1) \longrightarrow 2H(1S) + Ar$	20×10^{-11} см^3/с	[1]
43	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar({}^3P_0) \longrightarrow 2H(1S) + Ar$	$(8.7 \pm 1.8) \times 10^{-11}$ см^3/с	[1]
44	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar({}^1P_1) \longrightarrow 2H(1S) + Ar$	$(25 \pm 4) \times 10^{-11}$ см^3/с	[1]
45	$H(2S, 2P) + H_2(X^1\Sigma g^+) \longrightarrow 3H(1S)$	1.3×10^{-9} см^3/с	[1]

Таблица. Окончание

№ п/п	Процессы	Константа	Ссылка
46	$H(2S, 2P) + H_2(X^1\Sigma g^+) \longrightarrow H_3^+$	$\sigma_{пр} = 5 \times 10^{-15}$ см^2	[20]
47	$H(1S) + Ar(^3P_2) \longrightarrow H(2S, 2P) + Ar$	4×10^{-11} см^3/с	[1]
48	$H(1S) + Ar(^3P_1) \longrightarrow H(2S, 2P) + Ar$	40×10^{-11} см^3/с	[1]
49	$H(1S) + Ar(^3P_0) \longrightarrow H(2S, 2P) + Ar$	4×10^{-11} см^3/с	[1]
50	$H(1S) + Ar(^1P_1) \longrightarrow H(2S, 2P) + Ar$	40×10^{-11} см^3/с	[1]
51	$H(1S) + H_s(wall) \longrightarrow S + H_2(X^1\Sigma g^+, v = 0)$	$\nu_T\gamma/2R$, с$^{-1}$	
52	$H(1S) + H(1S) + H \longrightarrow H_2(X^1\Sigma g^+, v = 0) + H$	2.6×10^{-32} см^6/с	[21]
53	$H(1S) + H(1S) + H_2 \longrightarrow H_2(X^1\Sigma g^+, v = 0) + H_2$	8×10^{-33} см^6/с	[21]
54	$H(1S) + H(1S) + Ar \longrightarrow H_2(X^1\Sigma g^+, v = 0) + Ar$	8×10^{-33} см^6/с	
55–65	$Ar(Y) + Ar(Y) \longrightarrow Ar^+ + Ar + e$, $Y = {}^3P_2, {}^3P_1, {}^3P_0, {}^1P_1$	1×10^{-9} см^3/с	[1]
66	$Ar(^3P_2, {}^3P_0)(wall) \longrightarrow Ar$	$5.78D/R^2$, с$^{-1}$	[1]
67	$Ar(^3P_1) \longrightarrow Ar + h\nu$	5×10^4 с$^{-1}$	[1]
68	$Ar(^1P_1) \longrightarrow Ar + h\nu$	2.5×10^5 с$^{-1}$	[1]
69	$H(2S, 2P) + Ar \longrightarrow H(1S) + Ar$	3×10^{-11} см^3/с	[1]
70	$H(2S, 2P) + H(1S) \longrightarrow 2H(1S)$	3×10^{-11} см^3/с	[17]
71	$H(2S, 2P) \longrightarrow H(1S) + h\nu$	10^{20}/[H], с$^{-1}$	[1]
72	$H(2S, 2P) + e \longrightarrow H(n = 3) + e$	4×10^{-7} см^3/с	[17]
73	$H(n = 3) \longrightarrow H(2S, 2P) + h\nu$	5×10^8 с$^{-1}$	[17]
74–77	$Ar(Y) + e \longrightarrow Ar(\varepsilon_п > 13.5$ эВ$) + e$	3×10^{-9} см^3/с	[1]
78	$Ar(\varepsilon_п > 13.5$ эВ$) + Ar \longrightarrow Ar_2^+ + e$	10^{-10} см^3/с	[1]
79	$Ar^+ + 2Ar \longrightarrow Ar_2^+ + Ar$	$(8–39) \times 10^{-32}$ см^6/с	[22]
80	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar^+ \longrightarrow Ar + H_2^+$	3×10^{-10} см^3/с	[22]
81	$H_2(X^1\Sigma g^+) + ArH^+ \longrightarrow Ar + H_3^+$	5×10^{-10} см^3/с	[22]
82	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar_2H^+ \longrightarrow 2Ar + H_3^+$	3×10^{-11} см^3/с	[22]
83	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar^+ \longrightarrow H(1S) + ArH^+$	7.4×10^{-10} см^3/с	[22]
84	$H_2(X^1\Sigma g^+) + Ar_2^+ \longrightarrow H(1S) + Ar_2H^+$	4.9×10^{-10} см^3/с	[22]
85	$H_2^+ + Ar \longrightarrow H(1S) + ArH^+$	$(5–30) \times 10^{-10}$ см^3/с	[22]
86	$H_2(X^1\Sigma g^+) + H_2^+ \longrightarrow H(1S) + H^+ + H_2(X^1\Sigma g^+)$	$(1–20) \times 10^{-10}$ см^3/с	[21]
87	$H_2(X^1\Sigma g^+) + H_2^+ \longrightarrow H(1S) + H_3^+$	$(2–20) \times 10^{-10}$ см^3/с	[21]
88	$H^+ + 2H_2(X^1\Sigma g^+) \longrightarrow H_3^+ + H_2(X^1\Sigma g^+)$	3.1×10^{-29} см^6/с	[22]
89	$H_3^+ + 2Ar \longrightarrow ArH_3^+ + Ar$	1×10^{-31} см^6/с	[22]
90	$Ar^+ + e(wall) \longrightarrow Ar$	D_A	–
91	$Ar_2^+ + e(wall) \longrightarrow 2Ar$	D_A	–
92	$ArH^+ + e(wall) \longrightarrow H(1S) + Ar$	D_A	–
93	$Ar_2H^+ + e(wall) \longrightarrow H(1S) + 2Ar$	D_A	–
94	$H^+ + e(wall) \longrightarrow H(1S)$	D_A	–
95	$H_2^+ + e(wall) \longrightarrow H_2(X^1\Sigma g^+)$	D_A	–
96	$H_3^+ + e(wall) \longrightarrow H(1S) + H_2(X^1\Sigma g^+)$	D_A	–

сверхупругих и *e–e*-столкновений. Далее определялось распределение молекул $H_2(X^1\Sigma_g)$ по колебательным уровням и вновь повторялась процедура вычисления ФРЭЭ, но с учетом сверхупругих и *e–e*-столкновений. Затем находилась общая концентрация частиц и состав газовой смеси для фиксированного значения вероятности гетерогенной гибели атомов γ. С новым составом плазмы вновь рассчитывались ФРЭЭ и константы скоростей процессов, распределение по колебательным уровням, новые значения концентраций и т.д. до тех пор, пока значения концентраций не переставали изменяться. В ходе расчета величина γ подбиралась таким образом, чтобы удовлетворить измеренным значениям концентрации атомов H.

Оценки характерной длины релаксации ФРЭЭ показали, что в условиях опытов она меньше R, т.е. можно предполагать наличие локальной связи между ФРЭЭ и параметром E/N, который уменьшается при переходе от центра реактора к стенке из-за уменьшения температуры и, как следствие, приводит к уменьшению констант скоростей пороговых процессов с участием электронов. Однако этот эффект для процессов колебательного возбуждения и диссоциации почти компенсируется увеличением концентрации молекул, так что значения средней по сечению скорости близки к значениям, получающимся, если для концентрации электронов брать среднее значение, а для концентрации молекул и констант скоростей – значение на оси реактора.

Результаты расчетов колебательного распределения, нормированные к концентрации молекул H_2, представлены на рис. 3. Как и в плазме водорода, *V–T*-релаксация на атомах H является основным процессом гибели КВМ $H_2(X^1\Sigma_g)$, поэтому скорости диссоциации через колебательный континуум остаются крайне незначительными ($\leq 10^{11}$ см$^{-3}$ с$^{-1}$). Эффективная колебательная температура T_V водорода растет с увеличением содержания аргона в смеси, однако сверхупругие столкновения с КВМ практически не влияют на вид ФРЭЭ. Это обусловлено тем, что увеличение колебательной температуры компенсируется снижением доли водорода в смеси.

Результаты расчета скорости образования атомов H(1S) в результате возбуждения электронным ударом нестабильных и предиссоциирующих электронных состояний с колебательных уровней основного состояния молекулы приведены на рис. 4. Константы скоростей диссоциации слабо зависят от состава смеси в связи с тем, что увеличение средней части ФРЭЭ компенсируется уменьшением доли быстрых электронов (рис. 5), а частота диссоциации увеличивается из-за роста концентрации электронов (или уменьшения скорости дрейфа). Однако это увеличение компенсируется снижением концентрации молекул H_2. В результате при увеличении содержания аргона до 60% скорость образования атомов H меняется незначительно. Оказалось также, что вклад КВМ в скорость диссоциации по этому механизму монотонно растет с увеличением содержания аргона в смеси и достигает примерно 30% от скорости, рассчитанной в предположении, что все молекулы

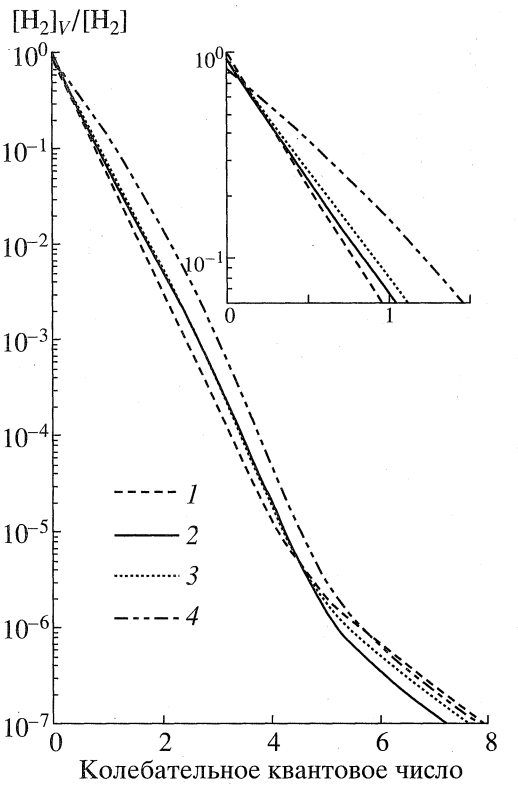

Рис. 3. Функция распределения молекул H_2 ($X^1\Sigma_g$) по колебательным уровням: *1* – 0% Ar, T_V = 2160 K; *2* – 30% Ar, T_V = 2393 K; *3* – 60% Ar, T_V = 2570 K; *4* – 90% Ar, T_V = 3724 K.

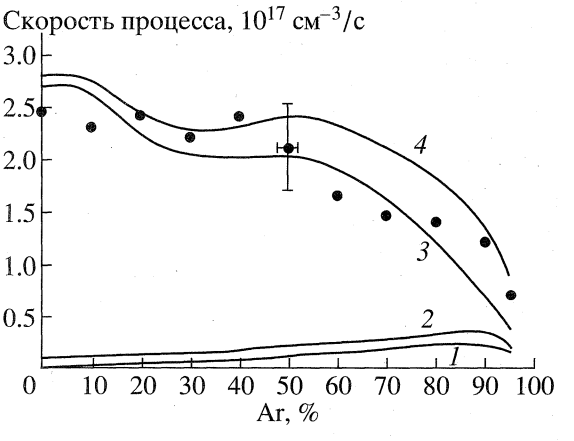

Рис. 4. Скорость образования атомов H(1S) в зависимости от состава смеси. Точки – эксперимент, кривые – расчет по реакциям из таблицы: *1* – (47–50), *2* – (45), *3* – (2–4, 8, 9), *4* – полная.

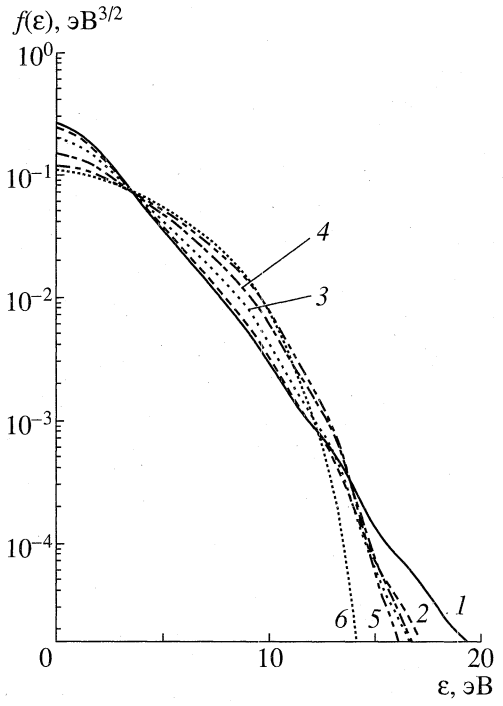

Рис. 5. Функция распределения электронов по энергиям при содержании аргона в смеси: *1* – 0, *2* – 20, *3* – 40, *4* – 60, *5* – 80, *6* – 99%.

находятся на нулевом колебательном уровне при 90% аргона.

Дополнительно атомы образуются в реакциях с участием возбужденных атомов аргона Ar($^3P_2$, $^3P_1$, $^3P_0$, $^1P_1$) (реакции 41–44 в таблице) и водорода H(2S, 2P) 45, концентрация которых быстро возрастает с увеличением содержания аргона. Анализ процессов с участием возбужденных атомов аргона показывает, что практически весь поток их возбуждения идет на диссоциацию. В то же время взаимодействие H(2S, 2P) с молекулами H_2 может приводить также к образованию иона H_3^+ 46, причем скорость этой реакции выше, чем реакции 45, и ион H_3^+, как показывают результаты расчетов, является основным в рассматриваемых условиях. В свою очередь, нейтрализация иона H_3^+ на стенке может привести к образованию атома H(1S). Результаты вычисления общей скорости образования атомов (т.е. с учетом всех возможных каналов) представлены на рис. 4. Там же для сравнения приведены экспериментальные значения скорости.

Расчетные значения вероятности гетерогенной гибели атомов H(1S), при которых достигалось соответствие расчетных и экспериментальных данных, также практически не зависят от состава плазмы, но оказались несколько выше экспериментальных и составили примерно $(3.5 \pm 0.5) \times 10^{-4}$.

Таким образом, полученные данные показывают, что в исследуемой смеси происходит увеличение частоты образования атомов H по сравнению с водородной плазмой и энергетического КПД процесса, поскольку напряженность электрического поля падает. По этой причине несмотря на уменьшение концентрации водорода абсолютные значения скорости диссоциации H_2 остаются практически постоянными при содержании аргона до 50%.

Авторы выражают особую признательность за полезные консультации В.В. Рыбкину.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Ю.А., Рытова Н.М., Солдатова И.В. и др.* Механизм разложения H_2 в тлеющем разряде в Ar + H_2 // ХВЭ. 1988. Т. 22. № 2. С. 152.
2. *Иванов Ю.А., Рытова Н.М., Солдатова И.В. и др.* Тлеющий разряд в Ar + H_2. Эксперимент и математическое моделирование // ХВЭ. 1988. Т. 22. № 4. С. 363.
3. *Бровикова И.Н., Галиаскаров Э.Г., Рыбкин В.В., Бессараб А.Б.* Кинетические характеристики образования и гибели атомов водорода в положительном столбе тлеющего разряда в H_2 // ТВТ. 1998. Т. 36. № 5. С. 706.
4. *Максимов А.И., Сергиенко А.Ф., Словецкий Д.И.* Измерение температуры газа в тлеющем разряде термопарным методом // Физика плазмы. 1978. Т. 4. Вып. 2. С. 347.
5. *Loureiro J., Ferreira C.M.* Electron and Vibrational Kinetics in Hydrogen Positive Column // J. Phys. D. Appl. Phys. 1989. V. 22. P. 1680.
6. *Shimamura J.* Cross Sections for Collisions of Electrons with Atoms and Molecules // Sci. Pap. Inst. Phys. and Chem. Res. 1989. V. 82. P. 1.
7. *Ferreiro C.M., Loureiro J.* Electron Transport Parameters and Excitation Rates in Argon // J. Phys. D. Appl. Phys. 1983. V. 16. № 9. P. 1611.
8. *Кочетов Н.В.* Расчет физических процессов в электроразрядных лазерах на окиси углерода: Дис. ... канд. физ-матем. наук: 02.04.08. М.: МФТИ, 1977. 156 с.
9. *Гершензон Ю.М., Розенштейн В.Б., Уманский С.Я.* Гетерогенная релаксация колебательной энергии молекул. Химия плазмы / Под ред. Смирнова Б.М. М.: Атомиздат, 1977. С. 61.
10. *Matveyev A.A., Silakov V.P.* Kinetic Processes in Highly Ionized Non-Equilibrium Hydrogen Plasma // Plasma Sources Sci. Technol. 1995. V. 4. P. 606.
11. *Биллинг Г.* Колебательно-колебательный и колебательно-поступательный энергообмен с многоквантовыми переходами при столкновениях атома с двухатомной молекулой и двух двухатомных молекул. В кн.: Неравновесная колебательная кинетика / Под ред. Капителли М. М.: Мир, 1989. С. 104.
12. *Loureiro J., Ricard A.* Electron and Vibrational Kinetics in N_2–H_2 Glow Discharge with Application to Surface Processes // J. Phys. D. Appl. Phys. 1993. V. 26. P. 163.

13. *Радциг А.А., Смирнов Б.М.* Справочник по атомной и молекулярной физике. М.: Атомиздат, 1980. 240 с.
14. *Gorse C., Capittelli M., Bretagne I., Bacal M.* Vibrational Excitation and Negative-Ion Production in Magnetic Multicusp Hydrogen Discharges // Chem. Phys. 1985. V. 93. № 1. P. 1.
15. *Никитин Е.Е., Осипов И.Л., Уманский С.Я.* Колебательно-поступательный обмен энергией при столкновении гомоядерных двухатомных молекул. В сб.: Химия плазмы. Вып. 15 / Под ред. Смирнова Б.М. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 3.
16. *Хьюбер К.П., Герцберг Г.* Константы двухатомных молекул. М.: Мир, 1984. 368 с.
17. *Lebedev Yu.A., Epstein I.L.* Simulation of Microwave Plasma in Hydrogen // J. Moscow Phys. Soc. 1995. V. 1. № 1. P. 103.
18. *Мак-Даниэль И., Мэзон Э.* Подвижность и диффузия ионов в газах. М.: Мир, 1976. 422 с.
19. *Мак-Даниэль И.* Процессы столкновения в ионизованных газах. М.: Мир, 1967. 482 с.
20. *Glass-Maujean M.* Collisional Quenching of H(2S) Atoms by Molecular Hydrogen. Two Competive Reactions // Phys. Rev. Lett. 1989. V. 62. № 2. P. 144.
21. *Michel P., Pfau S., Rutsher A., Winkler R.* Diffusionstheoretische Beschreibung der Dissoziation und des Ionenhaushaltes im Schwachionisierten Saulenplasma der Wasserstoffentladung // Beitr. Plasmaphys. 1980. V. 20. № 1. P. 25.
22. Ионно-молекулярные реакции / Под ред. Вирина А.И. М.: Наука, 1979. 548 с.