

02;04

©1993 г.

## КИНЕТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИСТОЧНИКАХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ БОЛЬШОЙ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ РАЗРЯДА

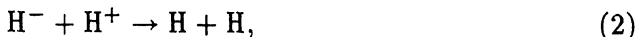
*В.П.Горещкий, А.В.Рябцев, И.А.Солошенко, А.Ф.Тарасенко, А.И.Шедрин*

Проведено численное моделирование кинетических процессов в источнике отрицательных ионов водорода  $H^-$  с отражательным разрядом при большой удельной мощности, вкладываемой в разряд. Показано, что при малых удельных мощностях ( $W \leq 100$  Вт/см<sup>3</sup>) концентрация отрицательных ионов водорода  $N_{H^-}$  пропорциональна разрядному току  $I$ , а при больших —  $\sqrt{I}$ . Последнее приводит к насыщению плотности  $H^-$ , когда  $W > 500$  Вт/см<sup>3</sup>.

1. Исследование кинетических процессов в водородном разряде представляет значительный интерес в связи с созданием объемных источников отрицательных ионов водорода для инжекторов нейтральных частиц. К настоящему времени эти процессы были подробно исследованы как теоретически, так и экспериментально в источниках с магнитными стенками, рабочий объем которых  $V \geq 10^3$  и удельные мощности, вкладываемые в разряд, сравнительно невелики ( $W \approx 1-5$  Вт/см<sup>3</sup>) [1-7].

В настоящей работе приводятся результаты аналогичных исследований в источниках с отражательным разрядом, характеризующихся малым объемом ( $V \sim 1.5$  см<sup>3</sup>) и высокой удельной мощностью разряда ( $W \geq 10^2$  Вт/см<sup>3</sup>).

Показано, что концентрация отрицательных ионов водорода  $N_{H^-}$  в плазме пропорционально возрастает с увеличением удельной мощности вплоть до  $W \sim 500$  Вт/см<sup>3</sup>, достигая величины  $N_{H^-} \sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. При  $W > 500$  Вт/см<sup>3</sup> и фиксированном давлении  $p$ , а также при постоянном токе и  $p \geq 0.15$  Тор плотность  $H^-$  в разряде стремится к насыщению. Определяющими механизмами гибели ионов  $H^-$  в объеме являются ионная рекомбинация и рассеяние на электронах

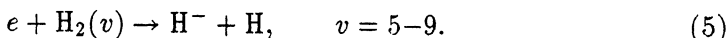


С возрастанием объема разрядной камеры существенную роль в кинетике начинает играть атомарный водород, поскольку, с одной стороны,

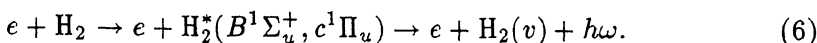
увеличивается его концентрация, с другой, — из-за уменьшения плотности плазмы падают скорости процессов (1)–(3). Доминирующим механизмом гибели отрицательных ионов становится рассеяние на атомарном водороде



2. При численном моделировании кинетических процессов в источнике отрицательных ионов водорода  $\text{H}^-$  с отражательным разрядом учитывались процессы, приведенные в таблице. Генерация  $\text{H}^-$  происходит в результате диссоциативного прилипания термализованных электронов к колебательно-возбужденным молекулам



Образование высоковозбужденных молекул водорода главным образом связано с прямыми процессами (6) с пороговой энергией  $\epsilon_n > 10$  эВ



Поэтому в возбуждение  $\text{H}_2$  основной вклад вносит высокоэнергетичная часть функции распределения электронов ( $\Phi$ РЭ), которая рассчитывалась из уравнения Больцмана [4] с учетом как упругого, так и неупругого рассеяний на компонентах смеси в разряде. Электрон-электронное рассеяние максвеллизует  $\Phi$ РЭ в области небольших энергий и сглаживает провалы в интервале высоких энергий, которые имеют место при малых концентрациях плазмы (рис. 1).

Взаимодействие атомарного водорода с  $\text{H}_2(v)$  не оказывает существенного влияния на распределение  $\text{H}_2(v)$  по возбужденным состояниям, поскольку колебательная температура  $T_v$  порядка температуры атомов водорода  $T_{\text{H}}$  (предполагалось  $T_{\text{H}} = 4000$  К).

1	$\text{H}_2(v) + e$	$\rightarrow \text{H}_2^+ + e + e, \quad v = 0, \dots, 14$
2	$\text{H} + e$	$\rightarrow \text{H}^+ + e + e$
3	$\text{H}_2 + e$	$\rightarrow \text{H} + \text{H} + e$
4	$\text{H} + \text{H}(\text{wall})$	$\rightarrow \text{H}_2$
5	$\text{H}_2^+ + e$	$\rightarrow \text{H} + \text{H}$
6	$\text{H}_2 + e$	$\rightleftharpoons \text{H}_2(v), \quad v = 1, 2, 3$
7	$e + \text{H}_2$	$\rightarrow e + \text{H}_2^*(B^1\Sigma_u^+, c^1\Pi_u) \rightarrow$ $\rightarrow e + \text{H}_2(v) + h\nu, \quad v = 1, \dots, 14$
8	$\text{H}_2(v) + \text{H}$	$\rightarrow \text{H}_2(v') + \text{H}, \quad v = 1, \dots, 14, \quad v' = 0, \dots, 14$
9	$\text{H}_2(v) + \text{wall}$	$\rightarrow \text{H}_2(v'), \quad v = 1, \dots, 14, \quad v' = 0, \dots, v$
10	$\text{H}_2(v) + e$	$\rightarrow \text{H}^- + \text{H}, \quad v = 0, \dots, 14$
11	$\text{H} + e$	$\rightarrow \text{H}^-$
12	$\text{H}_2^+ + e$	$\rightarrow \text{H}^- + \text{H}^+$
13	$\text{H}^- + \text{H}_2^+$	$\rightarrow \text{H}_2 + \text{H}$
14	$\text{H}^- + \text{H}^+$	$\rightarrow \text{H} + \text{H}$
15	$\text{H}^- + \text{H}_2$	$\rightarrow \text{H} + \text{H}_2 + e$
16	$\text{H}^- + \text{H}$	$\rightarrow \text{H} + \text{H} + e$
17	$\text{H}^- + e$	$\rightarrow \text{H} + e + e$
18	$\text{H}^+ + e(\text{wall})$	$\rightarrow \text{H}$
19	$\text{H}_2^+ + e(\text{wall})$	$\rightarrow \text{H}_2$

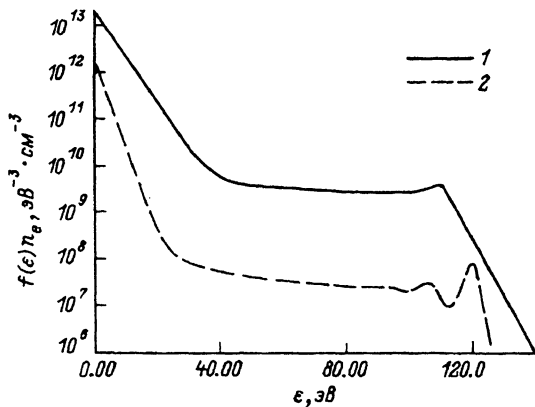


Рис. 1. Функция распределения электронов по энергиям. 1 — источник с малым объемом ( $V = 1.4 \text{ см}^3$ ,  $W = 350 \text{ Вт/см}^3$ ,  $p = 0.028 \text{ Тор}$ ); 2 — источник с большим объемом ( $V = 10^3 \text{ см}^3$ ,  $W = 3 \text{ Вт/см}^3$ ,  $p = 0.008 \text{ Тор}$ ).

Снятие колебательного возбуждения на стенках камеры учитывалось аналогично [2]. При этом считалось, что коэффициент  $\gamma$  изменяется линейно от 4 до 1 в диапазоне колебательных уровней  $v = 1-14$ .

Численные расчеты проводились для параметров источника отрицательных ионов с разрядом Пеннинга, описанного в работе [5]. В источнике такого типа плазма в основном сосредоточена в колонне небольшого радиуса ( $R_k \approx 0.125 \text{ см}$ ). Радиус всей камеры  $\sim 0.25 \text{ см}$ . При токе в разряде  $I = 2-10 \text{ А}$ , напряжении  $U \approx 100 \text{ В}$  и объеме камеры  $V = 1.4 \text{ см}^3$  удельная мощность составляет величину  $W \approx 150-700 \text{ Вт/см}^3$ . Были выполнены также сравнительные расчеты для источника с большим объемом разрядной камеры и следующими параметрами:  $S/V = 0.8$  ( $S$  — площадь поверхности разрядной камеры),  $V = 10^3 \text{ см}^3$ ,  $I = 25 \text{ А}$ ,  $W = 3 \text{ Вт/см}^3$ ,  $p = 8 \cdot 10^{-3} \text{ Тор}$ , которые аналогичны использованным в [1-7].

Все электронные скоростные константы определялись по ФРЭ. Кинетические уравнения, описывающие процессы в таблице, решались совместно с уравнением Больцмана.

3. На рис. 2,3 представлены концентрации компонентов плазмы и смеси на стационарной стадии в источнике отрицательных ионов для удельных мощностей  $350$  и  $3 \text{ Вт/см}^3$ . Как видно, плотность электронов, отрицательных ионов и  $\text{H}^+ + \text{H}_2^+$  пропорциональна вкладываемой в разряд энергии. В соответствии с тем, что единственным каналом регенерации  $\text{H}$  является рекомбинация на стенке камеры



большой процент атомарных ионов и атомов водорода соответствует большим значениям  $S/V$  (рис. 3).

Если концентрационные зависимости в целом повторяют удельную мощность, то процентный вклад отдельных процессов с возрастанием вводимой энергии претерпевает изменения. На рис. 4 приведено отношение концентраций  $N_{\text{H}^-}$  в отражательном разряде без учета отдельных реакций гибели отрицательных ионов к величине  $N_{\text{H}^-}$  при полном наборе всех процессов. С повышением плотности тока в разряде процессы (1)-(3) гибели ионов  $\text{H}^-$  становятся определяющими. В связи с этим увеличение тока и соответственно удельной мощности свыше  $500 \text{ Вт/см}^3$  приводит к насыщению концентрации  $\text{H}^-$  (рис. 5).

Рис. 2. Концентрация компонентов плазмы и смеси на стационарной стадии.

$V = 1.4 \text{ см}^3$ ,  $W = 350 \text{ Вт/см}^3$ .

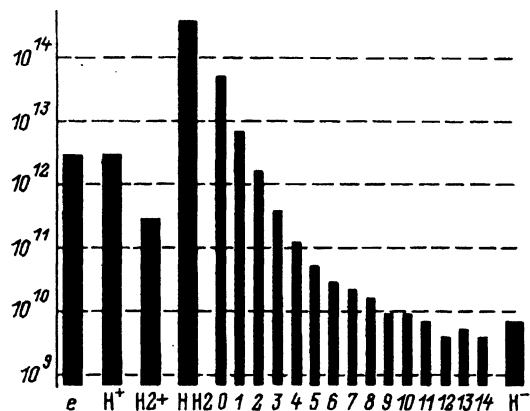
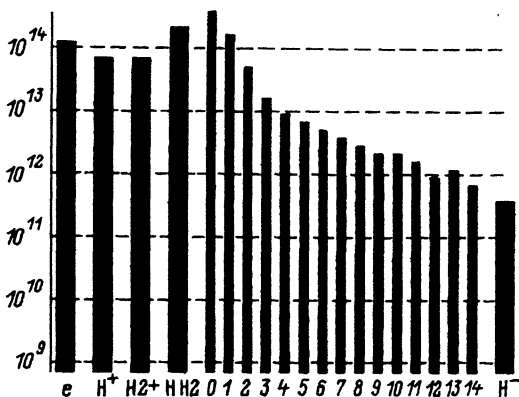


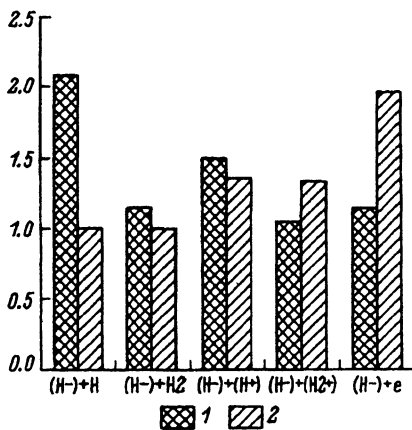
Рис. 3. Концентрация компонентов плазмы и смеси на стационарной стадии.

$V = 10^3 \text{ см}^3$ ,  $W = 3 \text{ Вт/см}^3$ .

Рис. 4. Отношение концентрации  $N_{H^-}$  в разряде без учета отдельных реакций гибели отрицательных ионов к величине  $N_{H^-}$  при полном наборе всех процессов.

$V, \text{ см}^3$ : 1 —  $10^3$ , 2 — 1.4;

$W, \text{ Вт/см}^3$ : 1 — 3, 2 — 350.



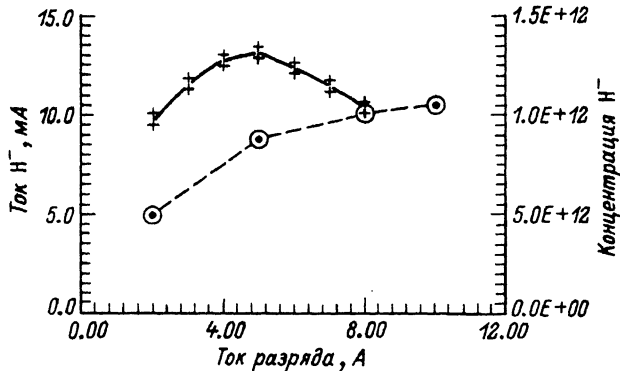


Рис. 5. Зависимость концентрации  $N_{H^-}$  (штриховая линия — теория) и тока отрицательных ионов водорода (сплошная линия — эксперимент) от тока разряда.  
 $p = 0.15$  Тор,  $U \approx 100$  В,  
 $V = 1.4$  см<sup>3</sup>.

На основании численных расчетов можно выделить следующие основные члены в уравнениях баланса для электронов, возбужденных молекул  $H_2$  и ионов  $H^-$ :

$$\langle \sigma_i \rangle \frac{I}{e} N_{H_2} = k_R n_e N_{H_2^+}, \quad (8)$$

$$\langle \sigma_v \rangle \frac{I}{e} N_{H_2} = k_v n_e N_{H_2(v)}, \quad v = 1-14, \quad (9)$$

$$n_e \sum_{v=1}^{14} k_v N_{H_2(v)} = k_H N_H N_{H^-} + k_e n_e N_{H^-} + k_r N_{H_2^+} N_{H^-}, \quad (10)$$

где  $\langle \sigma_i \rangle$  и  $\langle \sigma_v \rangle$  — усредненные по ФРЭ сечения ионизации и колебательного возбуждения молекул  $H_2$ ,  $k_R$ ,  $k_r$ ,  $k_v$ ,  $k_H$ ,  $k_e$  соответственно скорости электрон-ионной и ион-ионной рекомбинации, диссоциативного прилипания, отрыва электрона при рассеянии на атомах водорода и на электронах;  $I$  — плотность тока в разряде.

Из (8)–(10) в предположении  $n_e \sim N_{H_2^+}$  следует простое выражение для  $N_{H^-}$  как функции тока, которое естественно имеет оценочный характер,

$$N_{H^-} = \frac{\sum_{v=1}^{14} \langle \sigma_v \rangle \frac{I}{e} N_{H_2}}{k_H N_H + (k_e + k_r) \sqrt{\frac{\langle \sigma_i \rangle I N_{H_2}}{e k_R}}}. \quad (11)$$

Здесь не учитывалась зависимость  $N_H$  от тока разряда, так как концентрация атомарного водорода близка к своему предельному значению, определяемому начальной плотностью  $N_{H_2}$ . Как видно из (11), при малых токах  $N_{H^-} \sim I$ , а при больших  $N_{H^-} \sim \sqrt{I}$ . Учет всех реакций (см. таблицу) приведет к еще более слабой зависимости  $N_{H^-}$  от тока.

Аналогичным образом ведет себя концентрация отрицательных ионов как функция давления (рис. 6). Но в данном случае выход на насыщение обусловлен падением скорости возбуждения  $H_2$  из-за уменьшения температуры электронов.

На экспериментальных кривых (рис. 5,6) показана зависимость тока извлекаемых ионов от давления и разрядного тока. Уменьшение тока ионов  $H^-$  после выхода  $N_{H^-}$  на насыщение может быть связано с процессами

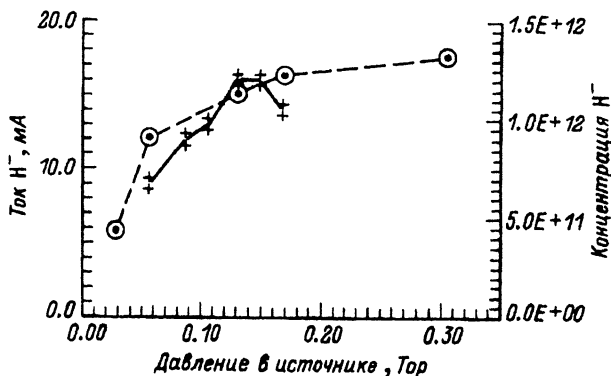


Рис. 6. Зависимость концентрации  $N_{H^-}$  (штриховая линия — теория) и тока отрицательных ионов водорода (сплошная линия — эксперимент) от давления.

$W = 450$  Вт/см<sup>3</sup>,  $V = 1.4$  см<sup>3</sup>.

ми дрейфа и диффузии плазмы к аноду, что не входит в рамки рассмотрения настоящей работы и частично обсуждалось в [6]. Представляет интерес работа [7], где также исследовалась зависимость концентрации ионов  $H^-$  от тока в разряде, но при низких давлениях  $p = 10^{-3} - 10^{-2}$  Торр и малых удельных мощностях  $W < 1$  Вт/см<sup>3</sup>, когда баланс электронов и возбужденных молекул водорода определяется не объемными процессами, а уходом на стенки камеры. В этой ситуации плотности электронов и  $N(v)$  пропорциональны току, соответственно  $N_{H^-} \sim I^2$  при малых концентрациях плазмы и имеет место линейная зависимость при  $n_e \geq 10$  см<sup>-3</sup>. Переход от одной зависимости к другой в [7] также обусловлен изменением механизмов гибели  $H^-$ . Исследования, проведенные в настоящей работе, описывают эволюцию киветики при дальнейшем увеличении давления и удельной мощности.

Важными параметрами источника ионов являются отношения  $N_{H^-}/W$  и  $N_{H^-}/N_{H_2}$ , характеризующие энергетическую и газовую экономичность. Если первая величина на линейном участке зависимости  $N_{H^-}(I)$  практически постоянна, то газовая экономичность возрастает с увеличением давления и удельной мощности в разряде. Для параметров, приведенных на рис. 2 и 3, отношение  $N_{H^-}/N_{H_2}$  соответственно возрастает с величины  $\sim 10^{-5}$  до  $0.5 \cdot 10^{-3}$ .

Таким образом, как показывают результаты численного моделирования, при больших удельных энергиях, вкладываемых в разряд, значительно выше концентрация отрицательных ионов и газовая экономичность. Но превышение удельной мощности выше определенных пределов (в нашем случае  $\sim 500$  Вт/см<sup>3</sup>) приводит к падению темпа накопления  $H^-$  вследствие того, что определяющими процессами разрушения отрицательных ионов становятся ион-ионная рекомбинация и рассеяние на электронах.

### Список литературы

- [1] Gorse C., Capitelli M., Bacal M., Bretagne I., Lagana A. // Chem. Phys. 1987. Vol. 117. P. 177–195.
- [2] Capitelli M., Gorse C., Berlemont P. et al. // Chem. Phys. Lett. 1991. Vol. 179. N 1–2. P. 48–52.
- [3] Berlemont P., Skinner D.A., Bakal M. // Chem. Phys. Lett. 1991. Vol. 183. N 5. P. 397–402.
- [4] Головинский П.М., Горецкий В.П., Рябцев А.В. и др. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 10. С. 46–52.

- [5] *Горецкий В.П., Солошенко И.А., Тарасенко А.Ф.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. Вып. 11. С. 201-204.
- [6] *Golovinsky P.M., Goretsky V.P., Mosijuk A.N. et al.* // V Intern. Symp. on the Production and Neutralization of Negative Ions and Beams. Brookhaven, 1989. P. 340-353.
- [7] *Bacal M., Bruneteau A.M., Nachman M.* // J. Appl. Phys. Vol. 55. N 1. P. 15-25.

Институт физики  
Киев

Поступило в Редакцию  
5 августа 1992 г.

---