

УДК 533.9.082.5

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ИНЕРТНЫХ ГАЗАХ С ПАРАМИ ВОДЫ

А. В. Бернадский¹, В. Н. Очкин¹, И. В. Кочетов^{1,2}

Исследуется поведение концентраций паров воды и её фрагментов во влажной плазме. Результаты плазмохимического моделирования сравниваются с результатами прямых измерений диссоциации молекул воды в плазме.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, тлеющий разряд, плазмохимия.

Определение малых концентраций молекул воды и её фрагментов в плазме имеет много приложений, например, контроль герметичности стенок термоядерных реакторов [1]. В ряде работ нами предложено и реализовано несколько спектроскопических методик решения такой задачи, включая измерения абсолютных светимостей гидроксила [2], актинометрию [3, 4] и лазерную спектроскопию [5]. Результаты продемонстрировали хорошее взаимное согласие и рекордные чувствительности.

Полученные данные дают основу для создания и тестирования модели физико-химических процессов в плазме влажных инертных газов для расчетов в условиях, трудно доступных измерениям. Первая полуэмпирическая версия такой модели была описана нами в работе [4]. Она учитывала только реакции с участием электронов, нейтральных атомов и молекул и использовала экспериментальные данные для концентраций и энергий электронов. В данной работе описывается самосогласованная модель, использующая в качестве исходных только макроскопические параметры – состав и давление исходного газа, геометрию реактора и стационарный электрический ток через плазму. Расчеты выполнялись для разряда в смеси He-H₂O (99:148) при давлении 50 Па в кварцевой трубке с внутренним диаметром 20 мм для сравнения с результатами измерений по методу актинометрии [5].

К объемным и гетерогенным плазмохимическим реакциям нейтральных компонентов из модели работы [4] в настоящей модели добавлены объемные процессы ионизации, диссоциативного прилипания и отлипания электронов, ион-ионной рекомбинации

¹ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: berav@sci.lebedev.ru.

² Акционерное общество “Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, 108840 Россия, Москва, г. Троицк, ул. Пушковых, вл. 12.

и гибели заряженных частиц на стенке трубки. Использовалось приближение, предложенное в работе [6] для учета увеличения скорости диффузии электронов на стенку при превышении концентрации отрицательных ионов над концентрацией электронов. Совместно с кинетическими уравнениями для плазмохимических процессов решалось уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергиям (ФРЭЭ) в двухчленном приближении и уравнения для внешней электрической цепи с источником напряжения и балластным сопротивлением. Для расчета температуры нейтрального газа добавлено уравнение теплопроводности. Кроме электронов учитывались частицы He^+ , H_2^+ , O_2^+ , H_2O^+ , H^- , O^- , He , H_2O , O_2 , H_2 , H_2O_2 , HO_2 , OH , H и O . Принимался бесселев радиальный профиль концентрации электронов.

Для решения системы уравнений использовалась программа Chemical Workbench (CWB 4.0.9150, www.kintech.ru) [7]. Система решалась до достижения стационарных концентраций всех рассматриваемых компонент. Анализ результатов вычислений показал, что в условиях эксперимента молекулы H_2O , O_2 и H_2 разрушаются электронным ударом, а образуются при гетерогенной рекомбинации атомов кислорода и водорода на стенке. По литературным данным вероятности рекомбинации на стекле при наличии разряда для O [8, 9] и H [10, 11] лежат в пределах $3 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$ и $10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$, соответственно.

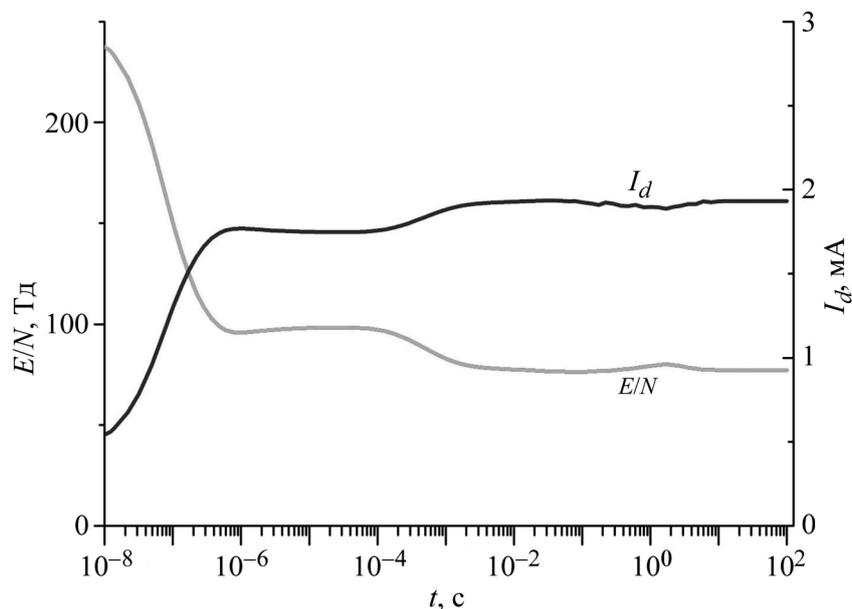


Рис. 1: Расчетная зависимость приведенного электрического поля и тока разряда от времени.

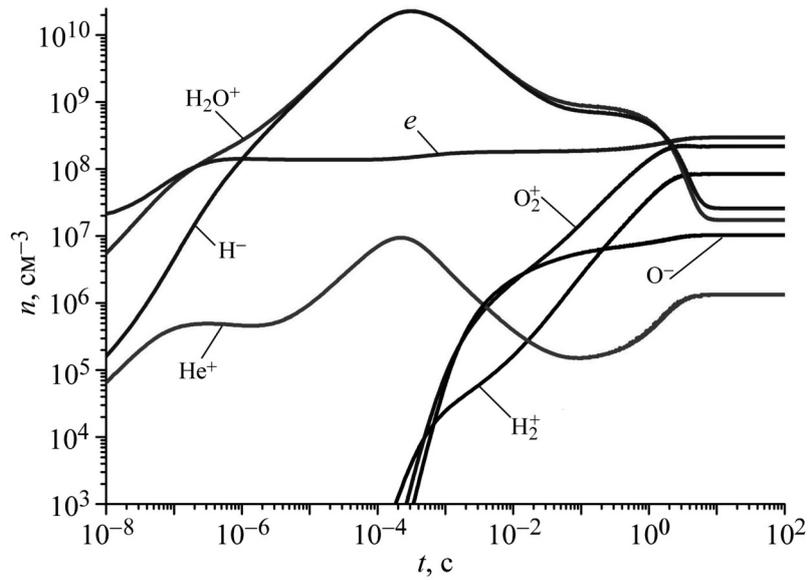


Рис. 2: Расчетная динамика концентраций заряженных частиц в плазме.

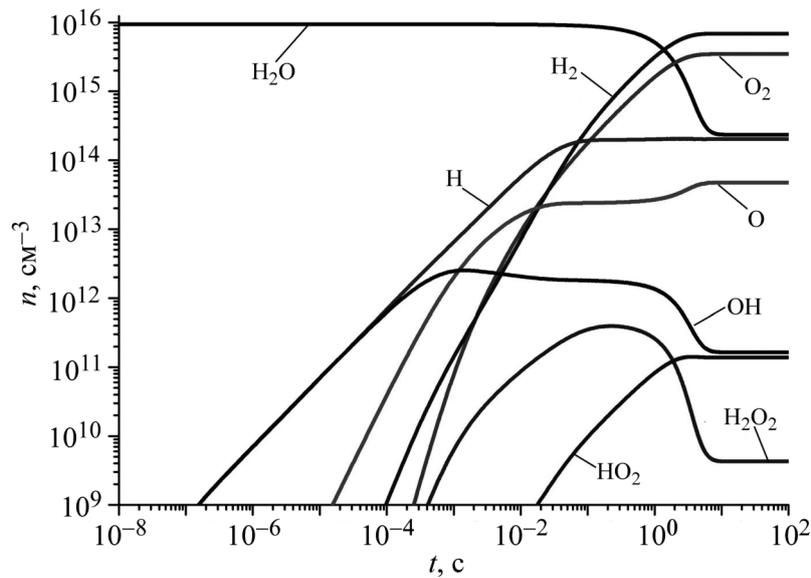


Рис. 3: Расчетная динамика концентраций молекул, радикалов и атомов в плазме.

На рис. 1 представлена расчётная динамика поведения приведенного электрического поля E/N в плазме и тока разряда I_d . Ко времени 0.3 мкс после пробоя разрядного промежутка устанавливаются квазистационарные значения E/N около 100 Тд и тока разряда 1.7 мА. При этом (рис. 2) растет концентрация отрицательных ионов H^- и ко времени 100 мкс она на два порядка превышает концентрацию электронов n_e , сдер-

живая рост n_e из-за упомянутого выше увеличения скорости диффузии электронов на стенку. Это, в свою очередь, приводит к небольшому (на 2–3 Тд) увеличению E/N . Далее в плазме нарабатываются атомы Н и О, их концентрации линейно растут до времени 1–5 мс. К этому времени их количество достаточно для обеспечения заметного отлипания электронов от H^- , составляющих основную долю отрицательных ионов. При этом квазистационарное значение E/N падает до 77 Тд, а ток I_d возрастает до 2 мА. К моменту 3 с (рис. 3) происходит сильная диссоциация молекул воды, образование молекул O_2 и H_2 , что завершает установление стационарных концентраций всех частиц плазмы. Для всех рисунков 1–3 стационарный ток разряда 2 мА.

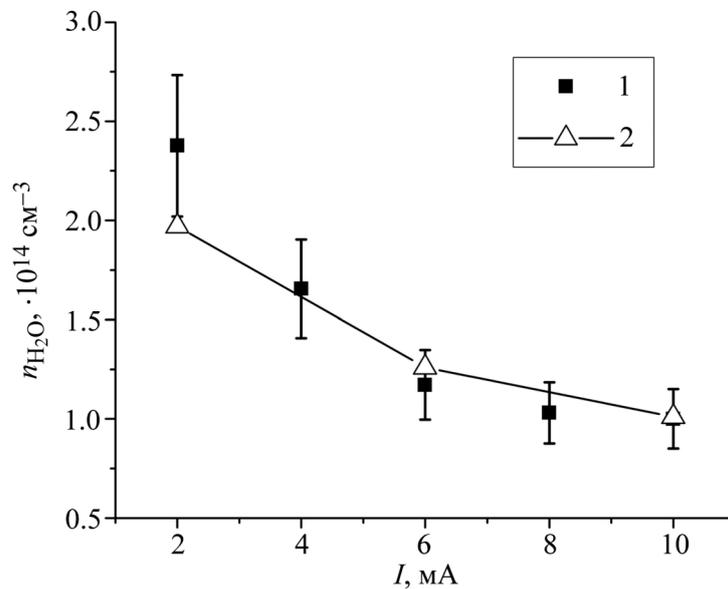


Рис. 4: Сопоставление измеренных (1) [5] и расчетных (2) концентраций воды при разных токах разряда.

На рис. 4 показано сравнение стационарных концентраций молекул воды в плазме, измеренных методом оптической актинометрии и при расчете по описанной модели при разных токах. Видно хорошее согласие результатов, полученное при вероятностях гетерогенной рекомбинации атомов О и Н – $3.5 \cdot 10^{-4}$ и $1.5 \cdot 10^{-4}$, соответственно. Эти значения лежат в пределах точностей измерений [8–11], они же использовались и при расчетах, результаты которых показаны на рис. 1–3.

Авторы приносят благодарность Ю. С. Акишеву и А. В. Демьянову за плодотворное обсуждение результатов моделирования.

Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00273).

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] ITER Final Design Report No. G 31 DDD 14 01.07.19 W 0.1, Section 3.1: Vacuum Pumping and Fuelling Systems (IAEA, Vienna, 2001).
- [2] А. В. Бернадский, В. Н. Очкин, О. Н. Афонин, А. Б. Антипенков, *Физика плазмы* **41**(9), 767 (2015); doi: 10.7868/S0367292115090036.
- [3] А. В. Бернадский, В. Н. Очкин, Р. Н. Бафоев, *Краткие сообщения по физике ФИАН* **43**(6), 18 (2016).
- [4] A. V. Bernatskiy, V. N. Ochkin, and I. V. Kochetov, *Journal of Physics D: Applied Physics* **49**(39), 395204 (2016); doi: 10.1088/0022-3727/49/39/395204.
- [5] A. V. Bernatskiy, V. V. Lagunov, V. N. Ochkin, and S. N. Tskhai, *Laser Physics Letters* **13**(7), 075702 (2016); doi: 10.1088/1612-2011/13/7/075702.
- [6] S. Adamson, V. Astapenko, I. Chernysheva, et al., *Journal of Physics D: Applied Physics* **40**(13), 3857 (2007); doi: 10.1088/0022-3727/40/13/S06.
- [7] M. Deminsky, V. Chorkov, G. Belov, et al., *Computational Materials Science* **28**(2), 169 (2003); doi: 10.1016/S0927-0256(03)00105-8.
- [8] L. Magne, H. Coitout, G. Cernogora, and G. Gousset, *J. Phys. III France* **3**(9), 1871 (1993); doi: 10.1051/jp3:1993247.
- [9] И. Н. Бровикова, Н. В. Холодкова, И. В. Холодков, Р. М. Кольцов, *Электронная обработка материалов* **44**(4), 51 (2008).
- [10] Э. Г. Галиаскаров, *Образование и гибель атомов водорода в тлеющем разряде пониженного давления в водороде и его смесях с азотом. Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук* (Иваново, Ивановская государственная химико-технологическая академия, 1997).
- [11] И. Н. Бровикова, *Электронная обработка материалов* **43**(5), 75 (2007).

Поступила в редакцию 12 апреля 2017 г.