

## СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМАРНОЙ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ПЛАЗМЫ В СТАЦИОНАРНЫХ И ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДАХ

**В.Б. Юферов, А.С. Свичкарь, В.В. Катречко, Т.И. Ткачева, С.В. Шарый, В.О. Ильичева**  
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
 Харьков, Украина*

Рассмотрены процессы образования атомарной и молекулярной частично ионизованной плазмы в стационарном магнитном поле. Проведено исследование вольт-амперных характеристик стационарных и импульсных разрядов в одно-, двух- и трехатомных газах.

Ранее, в работе [1], указывалось, что при переработке отработанного ядерного топлива (ОЯТ) возможно получение энергетической стоимости ион-электронной пары на уровне 500...1000 эВ/еi. Однако не было приведено данных расчетов и условий вычисления. В работе [2] на основании различных экспериментальных данных была приведена величина  $2 \cdot 10^4$  эВ/еi, а также указывалось, что кроме энергозатрат на создание плазмы в эту величину входят и энергозатраты для магнитной, вакуумной систем и системы охлаждения, которые составляют до 90% общих энергозатрат. В дальнейших работах при выборе имитационных сред указывалось на зависимость величины энергозатрат от многоатомности имитационных сред. В настоящей работе проведено сравнение имитационных сред, состоящих из одно-, двух- и трехатомных молекул ( $Ar$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ), что более близко к веществам ОЯТ, оставшимся после термической переработки, чем, например, к  $Ar$ ,  $Kr$ ,  $Xe$ , которые использовались в качестве имитационных сред.

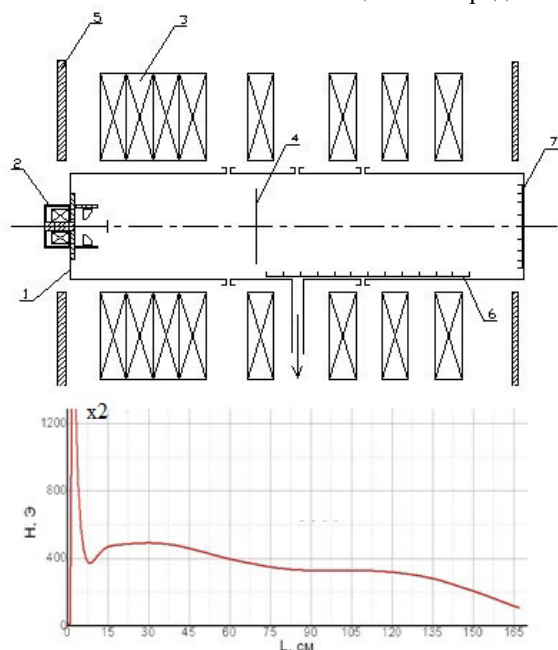


Рис. 1. Схематический вид установки ДИС-1 и осевое распределение магнитного поля: 1 – вакуумная камера ( $D=0,38$  м,  $L=1,65$  м); 2 – плазменный источник; 3 – система создания аксиально-симметричного магнитного поля; 4 – система создания радиального электрического поля; 5 – магнитопровод; 6 – продольный коллектор; 7 – торцевой коллектор

Эксперименты проводились на установке ДИС-1, схематический вид которой представлен на Рис. 1, работающей в стационарном режиме. Напряжение и ток на разрядном промежутке плазменного источника с накаливаемым катодом  $\sim 60$  В, 10 А (энерговклад 600...700 Вт) при работе с молекулярной плазмой азота. При заданных условиях получена не предполагаемая смесь ионов азота, а только плазма ионов  $N_2^+$ . С энергетической точки зрения атомарные ионы  $N^+$ , имеющие меньшую энергию ионизации (14,54 эВ), чем  $N_2^+$  (15,5 эВ), должны иметь большую плотность. Однако, для бесстолкновительной плазмы в системах ограниченного размера более вероятна реакция  $N_2+e=2N+e$ , начинающая идти при энергиях более 9,12 эВ, при этом нейтральные атомы, не удерживаемые магнитным полем, идут на стенки, где рекомбинируют в молекулу  $N_2$ , которая возвращается в разрядный объем, и цикл повторяется. Следовательно, для образования  $N^+$  необходимо увеличить величину  $T_e$ , чтобы перейти к иным сечениям ионизации и диссоциативной ионизации:  $N_2+e=N+N^++2e$ , т.е. увеличить энерговклад в разряд.

Повышение энерговклада в стационарном режиме не представляется возможным из-за тепловых нагрузок на элементы плазменного источника. Для решения этой проблемы использовался дополнительный импульсный источник тока с разрядным током около 1кА: емкость конденсаторной батареи 6,6 мФ, напряжение до 300 В с использованием индуктивности, определяющей длительность импульса. Эта система описана в [3]. Импульс тока от конденсаторной батареи накладывался на стационарный разряд (Рис. 2).

Как видно из Рис. 2, при одинаковых начальных условиях (зарядном напряжении импульсного источника, рабочем давлении, напряженности магнитного поля) амплитуды и длительности импульсов для разных газов различны.

Рост разрядного тока прекращается, хотя разрядное напряжение продолжает увеличиваться, поскольку не происходит дальнейшего увеличения числа заряженных частиц. Энергия вкладывается во внутренние степени свободы частиц, т.е. во вращательные и колебательные энергетические уровни молекул. Особенно это проявляется на трехатомном  $CO_2$ . Снижение разрядных токов при одинаковых начальных условиях также указывает на снижение плотности и температуры как электронов, так ионов и нейтралов.

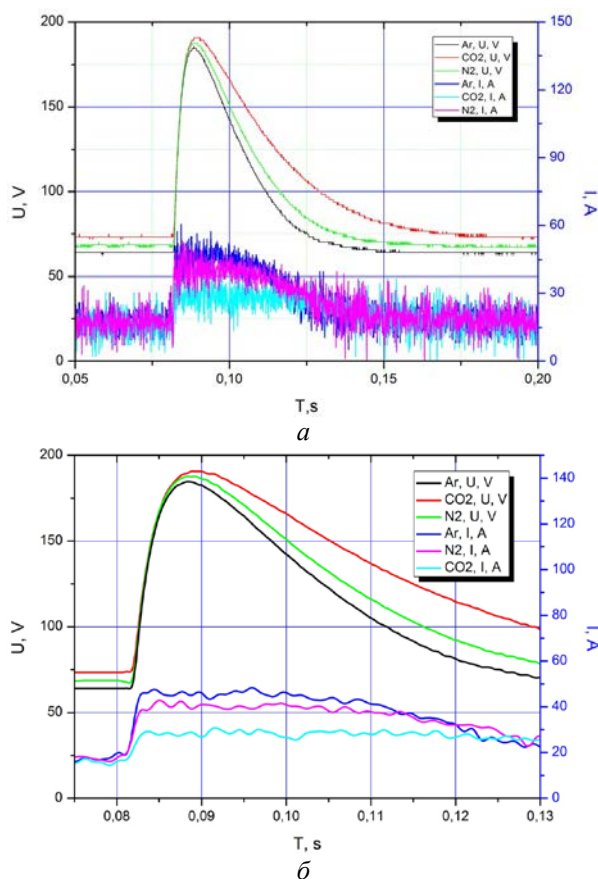


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения для Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> при одинаковых начальных условиях: а – несглаженная осциллограмма; б – сглаженный фронт осциллограммы

Проведено сравнение разрядных токов и напряжений для газов Ar, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> при рабочих давлениях P=2·10<sup>-4</sup> Торр и P=2·10<sup>-3</sup> Торр (Рис. 3). Зарядное напряжение импульсного источника и напряженность магнитного поля оставались постоянными. Наблюдается увеличение длительности импульса тока с одновременным уменьшением величины разрядного тока для рабочего давления 2·10<sup>-3</sup> Торр по сравнению с импульсом тока для давления 2·10<sup>-4</sup> Торр. Как известно, процесс разряда конденсаторной батареи может определяться соотношениями  $I = U/\omega L e^{-Rt/2L} \sin \omega t$  и  $T = 2\pi/\sqrt{1/LC + (R/2L)^2}$ . Изменение величины разрядного тока и длительности импульса свидетельствует о зависимости индуктивности, емкости и активного сопротивления разрядного промежутка от рабочего давления.

Из Рис. 3 следует, что повышение плотности нейтралов приводит не к повышению ионизации, а к затратам энергии на возбуждение частиц.

Из представленных данных можно сделать вывод: индуктивность, емкость и активное сопротивление разрядного промежутка зависят от рабочего давления и рабочего газа (одно-, двух- или трехатомного).

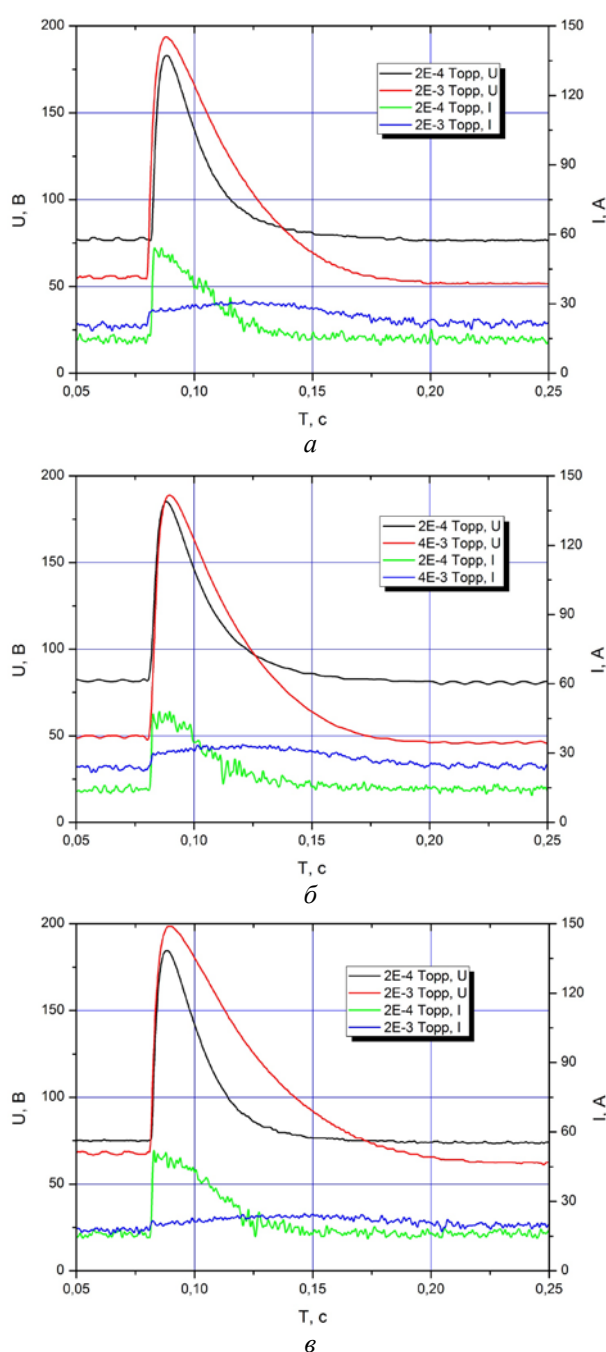


Рис. 3. Сглаженные осциллограммы тока и напряжения на разрядном промежутке установки ДИС-1 при различных рабочих давлениях – P=2·10<sup>-4</sup> Торр и P=2·10<sup>-3</sup> Торр для газов: а – Ar; б – N<sub>2</sub>; в – CO<sub>2</sub>

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин, Н.Н. Семашко и др. Применение методов плазменной сепарации элементов к обращению с ядерными материалами // *Атомная Энергия*. 2006, т. 101, № 4, с. 302-306.
2. В.Б. Юферов, В.О. Ильичева, О.С. Друй, С.В. Шарый. О некоторых особенностях магнитоплазменной переработки отработанного ядерного топлива // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2012, № 4, с. 191-193.

3. В.Б. Юферов, С.В. Шарый, М.О. Швец, А.Н. Озеров. Проект источника газо-металлической плазмы для сепарационной технологии // *Вопросы*

*атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования».* 2014, № 5, с. 184-187.

*Статья поступила в редакцию 11.11.2015*

### **COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ATOMIC AND MOLECULAR PLASMA IN STATIONARY AND PULSED DISCHARGE**

*V.B. Yuferov, A.S. Svichkar, V.V. Katrechko, T.I. Tkachova, S.V. Shariy, V.O. Ilichova*

The processes of formation of atomic and molecular partially ionized plasma in a magnetic field and plasma of a stationary magnetic field is considered. The current-voltage characteristics of stationary and pulsed discharges in mono-, di- and triatomic gases studied.

### **ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТОМАРНОЇ І МОЛЕКУЛЯРНОЇ ПЛАЗМИ У СТАЦІОНАРНИХ ТА ІМПУЛЬСНИХ РОЗРЯДАХ**

*В.Б. Юферов, О.С. Свічкач, В.В. Катречко, Т.І. Ткачова, С.В. Шарий, В.О. Ільчова*

Розглянуто процеси утворення атомарної та молекулярної частково іонізованої плазми в стаціонарному магнітному полі. Проведено дослідження вольт-амперних характеристик стаціонарних та імпульсних розрядів в одно-, дво- та трьохатомних газах.