

## Создание аксиально несимметричного распределения электрического потенциала в отражательном разряде

*А.П. Ойлер<sup>1,2,\*</sup>, М.А. Валинуров<sup>1,2</sup>, А.В. Гавриков<sup>1</sup>, Р.А. Усманов<sup>1</sup>, В.П. Смирнов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>*Объединённый институт высоких температур РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*

<sup>\*</sup>*andrey\_oiler@ijht.ru*

**Аннотация.** В работе было проведено экспериментальное исследование пространственного распределения электростатического потенциала плазмы в цилиндрически асимметричном отражательном разряде с дополнительной инъекцией электронов. Нарушение симметрии создавалось неконцентрическими кольцевыми электродами на торцах цилиндрического разрядного промежутка, а также термоэмиссионным катодом, расположенном на одном из торцов на расстоянии 14 см от оси заземленной металлической вакуумной камеры. Было обнаружено, что распределение электрического потенциала в плазменном объеме тоже оказывается асимметричным, причем глубина потенциальной ямы не уменьшается по сравнению с симметричным расположением электродов. Данный факт радикально отличает рассмотренный разряд от аналогичного, но без термоэммитера электронов, когда подобная асимметрия разряда приводит к заметному снижению глубины потенциальной ямы в плазменном объеме.

**Ключевые слова:** распределение потенциала плазмы, термоэмиссионный катод, отражательный разряд.

### 1. Введение

Создание замкнутого ядерного топливного цикла является актуальной проблемой, стоящей перед современной ядерной энергетикой. В настоящее время одними из наиболее употребимых методов переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) являются гидрометаллургические методы [1]. Несмотря на доказанную эффективность, эти методы предполагают образование значительного количества сопутствующих отходов. Ввиду этой проблемы активно развиваются как сам гидрометаллургический метод, так и «сухие» методы переработки ОЯТ, которые должны быть лишены этого существенного недостатка.

Одним из таких методов является плазменный метод масс-сепарации [2–4], в рамках разработки которого была проведена данная работа. Здесь рассматривается масс-сепаратор В.П. Смирнова [5] с однородным магнитным полем и перпендикулярным к нему электрическим полем. Эта конфигурация полей реализуется в отражательном разряде (разряде Пеннинга) с потенциальной ямой на оси симметрии разряда. В ходе плазменной сепарации разделяемое вещество переводится в ионизированное состояние, а получившиеся ионы начинают двигаться в конфигурации скрещенных полей, и потому можно осуществить разделение по параметру отношения массы к заряду иона.

При таком рассмотрении одним из ключевых факторов, определяющим свойства плазменного сепаратора, является пространственное распределение электрического поля в плазменном объеме.

Согласно проведенному моделированию движения разделяемых ионов в осесимметричном потенциале, траектории сепарируемых частиц лежат только в третьей части вакуумной камеры (Рис. 1) [6]. Другими словами, если осуществлять реализацию плазменного разделения элементов в цилиндрически симметричном случае, то около двух третей объема камеры будут заполнены плазмой, но не использованы для осуществления самого процесса сепарации, что является не очень эффективным с точки зрения практического использования метода. Одним из возможных вариантов совершенствования является сокращение области занимаемой только плазмой, вплоть до объема, занимаемого траекториями разделяемых веществ, но тогда распределение потенциала в плазменном объеме перестает быть

осесимметричным. Экспериментальному исследованию возможности создания такого распределения потенциала в разряде Пеннинга с дополнительной инжекцией электронов и посвящена настоящая работа.

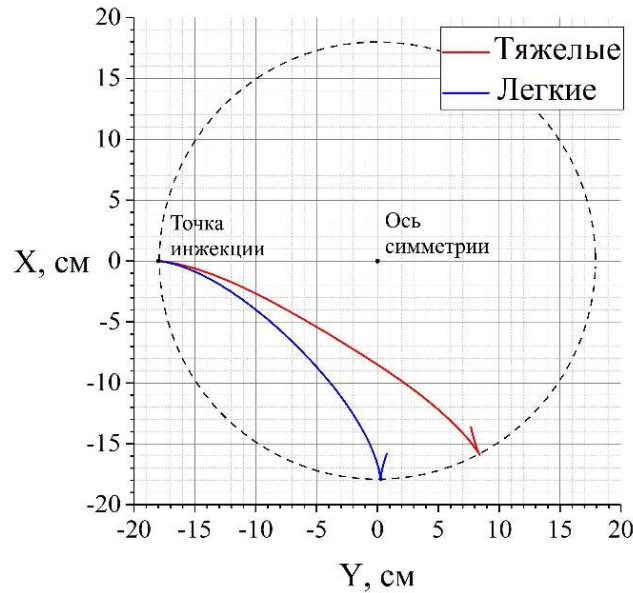


Рис. 1. Расчетные траектории движения ионов в цилиндрически симметричном экспериментальном профиле потенциала плазмы [6].

## 2. Установка и условия эксперимента

Принципиальная схема эксперимента представлена на Рис. 2. Вакуумная камера имеет длину 2.3 м и внутренний диаметр 86 см. Величина магнитного поля варьировалась от 93 до 140 мТл. На торцах камеры расположены кольцевые электроды – катоды. На обоих торцах четыре внутренних кольцевых электрода были сдвинуты в одном и том же направлении так, чтобы центр первого электрода был сдвинут на 14 см от оси симметрии вакуумной камеры (Рис. 2, Рис. 3). Эти внутренние электроды замкнуты друг с другом и к ним прикладывается напряжение  $-550$  В. Пятый и шестой электроды соосны со стенками вакуумной камеры и находятся под плавающим потенциалом.

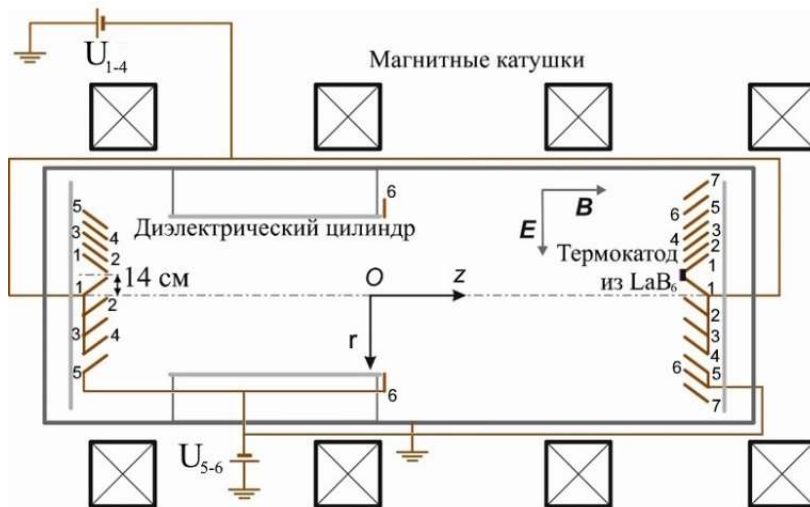


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

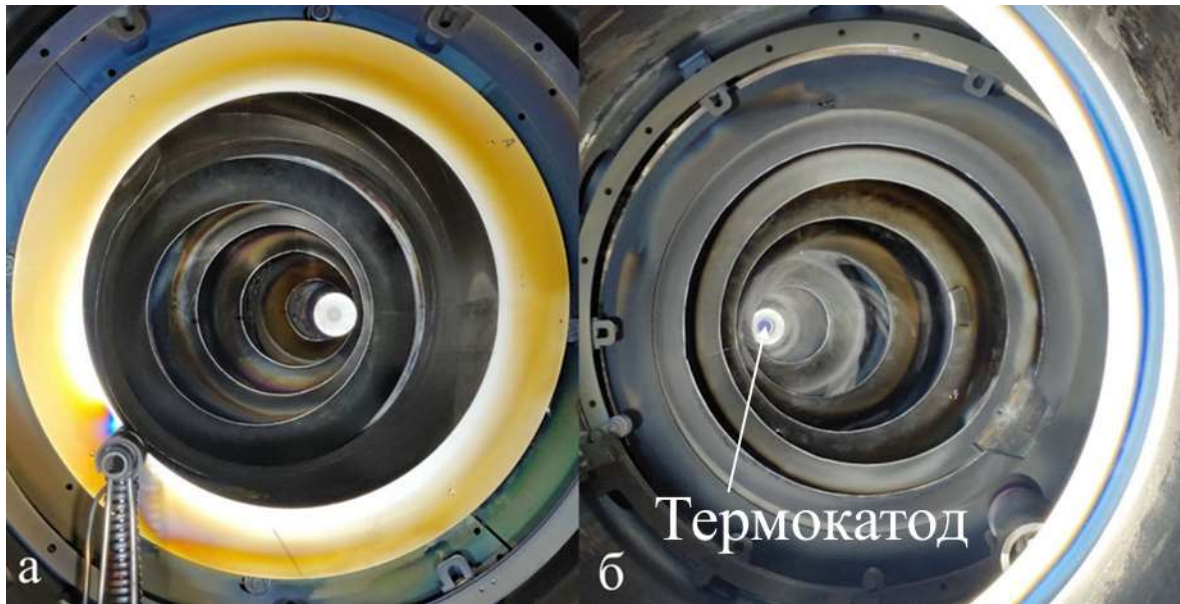


Рис. 3. (а) – Торец с охлаждаемой мишенью для электронного пучка, (б) – торец с термоэмиссионным катодом.

Отражательный разряд зажигается между торцевыми катодами и цилиндрической поверхностью заземленной вакуумной камеры, которая является анодом. Радиус плазменного столба составляет около 30 см. На одном из торцов установлен подогреваемый термоэмиссионный элемент из  $\text{LaB}_6$  диаметром 2 см (Рис. 3б). Ток разряда составляет величину порядка 10–12 А. Для выхода на рабочие режимы в камере создается предельный вакуум около  $6 \cdot 10^{-5}$  Торр, потом напускается аргон, давление которого составляет  $3 \cdot 10^{-4}$  Торр.

Измерения электрического потенциала проводились при помощи термоэмиссионного зонда [7, 8], который вводился в камеру вдоль диаметра, являющегося линией смещения кольцевых катодов. Скорость перемещения зонда составляла около 4 см/с. Сигнал считывался с зонда с частотой от 1 до 10 кГц и усреднялся по 50 значениям. Типичные флуктуации потенциала плазмы от среднего значения составляли порядка 20%. Также проводились измерения с использованием двойного зонда, которые позволили установить, что в условиях эксперимента температура электронов находилась в интервале 5–10 эВ, а концентрация плазмы была около  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Погрешность определения координат зондов составляет около 3 мм. Из-за риска сгорания термоэмиссионного зонда вблизи силовых линий магнитного поля, опирающихся на термокатод, измерения профиля потенциала плазмы в этой области не проводились.

### 3. Результаты экспериментов и обсуждение

Результаты измерения потенциала плазмы и их сравнение с аксиально симметричным случаем представлены на Рис. 4б. Ранее в работе [9] были проведены аналогичные эксперименты со сдвинутым холодным катодом (Рис. 4а), т.е. без дополнительной инъекции термоэлектронов в плазменный объем. Необходимо отметить, что в этих экспериментах при смещении катода характерное электрическое поле не изменялось, но глубина потенциальной ямы уменьшалась по сравнению со случаем осесимметричного разряда. В настоящей работе, напротив, при смещении термоэмиссионного катода глубина потенциальной ямы не уменьшается, что приводит к более резкому отличию характерных электрических полей по разные «стороны» от минимума потенциальной ямы.

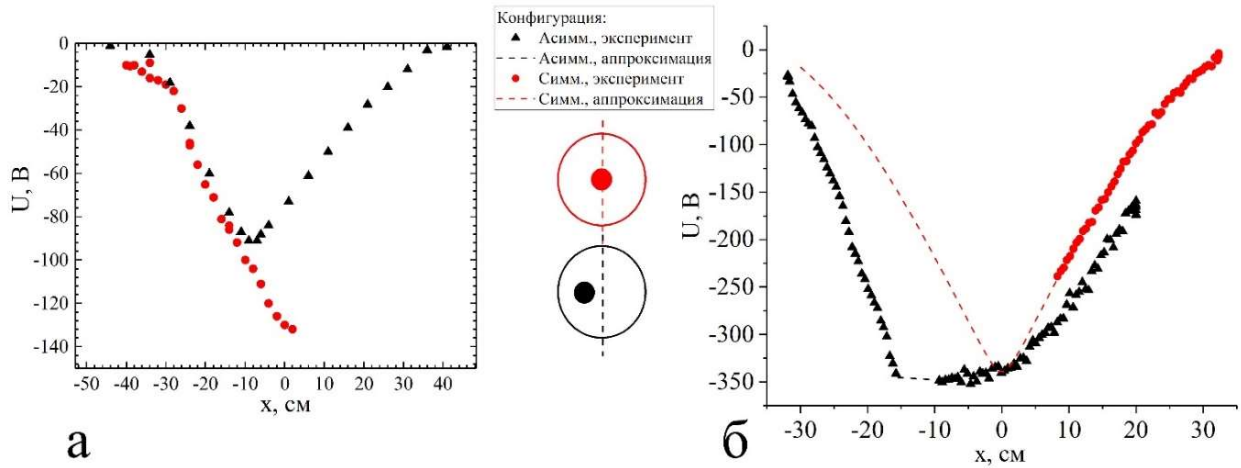


Рис. 4. Сравнение симметричного и асимметричного распределения потенциала плазмы вдоль диаметра при использовании сдвинутого а) холодного катода [9], б) термоэмиссионного катод.

Результаты исследования зависимости пространственного распределения потенциала плазмы от величины магнитного поля представлены на Рис. 5. Обнаружено, что его форма не зависит от магнитного поля в диапазоне от 930 до 1400 Гс (Рис. 5).

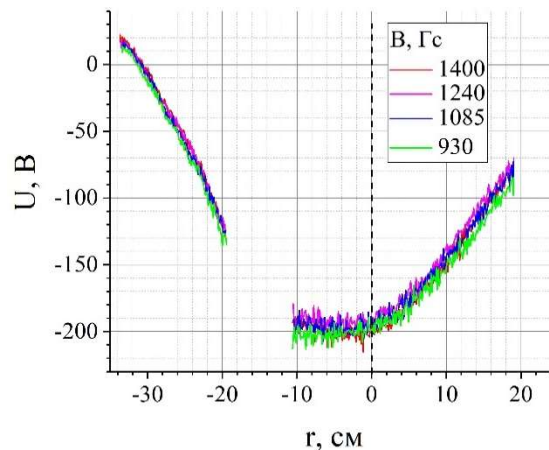


Рис. 5. Изменение радиальных распределений электрического потенциала плазмы в зависимости от величины магнитного поля при  $p_{Ar} = 0.12$  мТорр.

Такое поведение может быть объяснено замагниченностью электронов. Действительно, во всем рассмотренном диапазоне магнитных полей параметр Холла  $\chi = eB/(m_e v_{en}) \gg 1$  т.е. электроны являются замагниченными ( $e$  – элементарный заряд,  $B$  – величина магнитного поля,  $m_e$  – масса электрона,  $v_{en}$  – частота столкновений электронов с нейтральным газом), и изменение величины поля  $B$  практически не приводит к изменению подвижности электронов вдоль или поперек магнитных силовых линий, а значит и распределение электрического потенциала в плазменном объеме практически не должно изменяться.

#### 4. Заключение

Сформулируем основные выводы представленной работы. Была продемонстрирована возможность воспроизведения в плазменном объеме электрического потенциала, задаваемого асимметричными торцевыми электродами. Было обнаружено, что при вариации магнитного поля в диапазоне от 930 до 1400 Гс форма профиля пространственного распределения потенциала плазмы не изменяется.

Установлено, что использование термоэмиссионного катода, инжектирующего электроны в плазму отражательный разряда, существенно влияет на пространственное распределение электрического потенциала. Показано, что в этом случае глубина потенциальной ямы не уменьшается по сравнению с симметричным расположением электродов. Данный факт радикально отличает разряд с дополнительной инъекцией электронов от аналогичного, но без термоэмиттера, когда подобная асимметрия разряда приводит к заметному снижению глубины потенциальной ямы в плазменном объеме.

## 5. Список литературы

- [1] J. Jang, T.-J. Kim, G.-Y. Kim, D. Yoon, and S.-J. Lee, Uranium recovery via electrochemical deposition with a liquid zinc cathode followed by electrochemical oxidation of rare earth metals, *Journal of Nuclear Materials*, vol. **520**, 245, 2019; doi: 10.1016/j.jnucmat.2019.04.024
- [2] N.A. Vorona, A.V. Gavrikov, A.A. Samokhin, V.P. Smirnov, and Yu.S. Khomyakov, On the possibility of reprocessing spent nuclear fuel and radioactive waste by plasma methods, *Physics of Atomic Nuclei*, vol. **78**, no. 14, 1624, 2015; doi: 10.1134/s1063778815140148
- [3] D.A. Dolgolenko and Yu.A. Muromkin, Separation of mixtures of chemical elements in plasma, *Physics-Uspekhi*, vol. **60**, no. 10, 994, 2017; doi: 10.3367/ufne.2016.12.038016
- [4] S.J. Zweben, R. Gueroult, and N.J. Fisch, Plasma mass separation, *Physics of plasmas*, vol. **25**, no. 9, 2018; doi: 10.1063/1.5042845
- [5] V.P. Smirnov, A.A. Samokhin, N.A. Vorona, and A.V. Gavrikov, Study of charged particle motion in fields of different configurations for developing the concept of plasma separation of spent nuclear fuel, *Plasma physics reports*, vol. **39**, no. 6, 456, 2013; doi: 10.1134/s1063780x13050103
- [6] G. Liziakin, et al., Plasma mass separation in configuration with potential well, *Journal of physics. D, Applied physics*, vol. **54**, no. 41, 414005, 2021; doi: 10.1088/1361-6463/ac128e
- [7] J.P. Sheehan and N. Hershkowitz, Emissive probes, *Plasma sources science & technology*, vol. **20**, no. 6, 063001, 2011; doi: 10.1088/0963-0252/20/6/063001
- [8] Y. Murzaev, G. Liziakin, A. Gavrikov, R. Timirkhanov, and V. Smirnov, A comparison of emissive and cold floating probe techniques for electric potential measurements in rf inductive discharge, *Plasma Science & Technology/Plasma science and technology*, vol. **21**(4), 045401, 2019; doi: 10.1088/2058-6272/aaf250
- [9] G.D. Liziakin, A.V. Gavrikov, Y.A. Murzaev, R.A. Usmanov, and V.P. Smirnov, Parameters influencing plasma column potential in a reflex discharge, *Physics of Plasmas*, vol. **23**(12), 2016; doi: 10.1063/1.4969084