

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ЛИНЗЫ С ИНИЦИАЦИЕЙ РАЗРЯДА ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*А. А. Дроздовский<sup>а,1</sup>, П. В. Сасоров<sup>б</sup>, А. В. Богданов<sup>а</sup>,  
Р. О. Гаврилин<sup>а</sup>, С. А. Дроздовский<sup>а</sup>, А. В. Канцырев<sup>а</sup>,  
М. А. Карпов<sup>в</sup>, В. А. Панюшкин<sup>а</sup>, И. В. Рудской<sup>а</sup>, С. М. Савин<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Институт теоретической и экспериментальной физики им. А. И. Алиханова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва

<sup>б</sup> Институт прикладной математики РАН, Москва

<sup>в</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва

Активно ведутся работы по созданию лазерных ускорителей с фокусировкой полученных пучков плазменными линзами. Для эффективной фокусировки необходимо исследовать, при какой инициации пробоя образуется разряд с более равномерным распределением плотности тока. Наши исследования показали, что распределение плазмы равномерно в течение более длительного времени, включая область максимального тока, если разряд инициируется электронным пучком.

Currently, work is underway to create laser accelerators with beams focusing obtained by plasma lenses. For effective focusing, it is necessary to investigate at which initiation of breakdown a discharge forms with a more uniform distribution of current density. Our studies have shown that the plasma distribution is uniform over a longer period of time, including the region of maximum current, if the discharge is initiated by an electron beam.

PACS: 41.75.Jv; 52.38.Kd

### ВВЕДЕНИЕ

Поскольку плазменная линза при большой фокусирующей силе имеет малые размеры, она находит применение при создании новых компактных лазерных ускорителей [1]. Фокусирующие свойства плазменной линзы определяются распределением плотности разрядного тока. Распределение в общем случае неоднородно. Пучок в различные моменты разрядного импульса можно сфокусировать и в точку, и в кольцо, и в нечто иное [2]. В используемых плазменных линзах процесс разряда начинается с пробоя по поверхности трубки. В нашем случае при подаче импульса высокого напряжения на разрядную трубку производится инжекция электронного пучка, создающего плазменный канал, что обуславливает развитие разряда по всему сечению трубки, а не только на ее периферии. Для такого типа разряда были проведены оценочные расчеты в МГД-приближении [3], показавшие более плавное распределение

---

<sup>1</sup>E-mail: drozdovsky@itep.ru

тока по разряду при относительно меньшем уровне пинчевания и меньшей температуре плазмы. Для исследования динамики плазмы Z-пинча с инициацией разряда электронным пучком в лаборатории высокой плотности энергии в веществе ИТЭФ была создана экспериментальная установка [3–5].

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Она включает в себя источник пучка электронов с энергией 250 кэВ, на выходе которого расположены три аксиально-симметричные короткие соленоидальные магнитные линзы, камеры наблюдения с помещенными в них сцинтилляторами, а также разрядная камера формирования Z-пинча. Амплитуда тока пучка из пушки — 100 А, длительность пучка на вершине импульса — 60 нс.

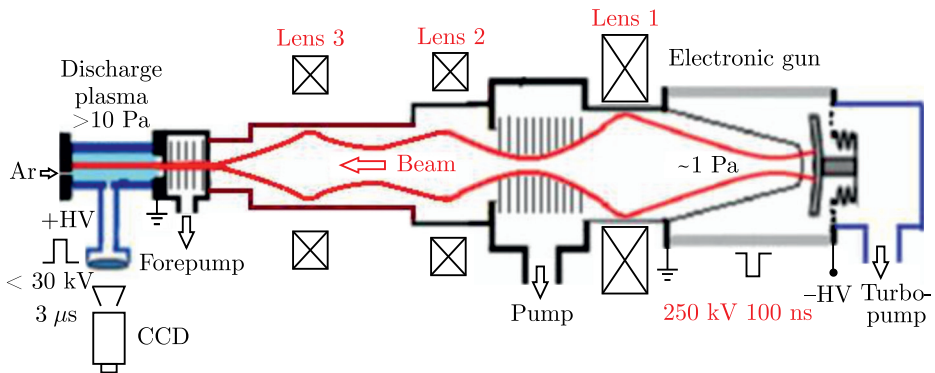


Рис. 1. Схема установки для исследования Z-пинчевых разрядов

Исследования проводятся в широком диапазоне давлений, от 0,1 до 10 мбар. Сложность состоит в том, что давление в электронной пушке не должно превышать 0,05 мбар. Самый радикальный способ решить эту проблему — установка разделительной пленки. Разработано динамическое устройство разделения объемов с помощью тонкой майларовой пленки. При имеющейся величине энергии электронов пучка толщина майларовой пленки должна быть менее 1 мкм, что усложняет работу устройства и замедляет проведение экспериментов. Для исследований в области малых давлений, до 0,5 мбар, можно обойтись без разделительной пленки за счет градиента давления, создаваемого путем применения системы дифференциальной откачки. В местах кроссоверов электронного пучка расположены пакеты диафрагм и установлены дополнительные откачные посты. Вакуумная откачка электронной пушки производится турбомолекулярными насосами, а разрядной камеры — двумя форвакуумными насосами. В результате достигнуто отношение давлений в разрядной трубке и в пушке более 10.

## 2. ПРОВОДКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

Расчет прохождения электронного пучка от катода электронной пушки до разрядной трубки проводился по оригинальной программе VBM [6], основанной на ис-

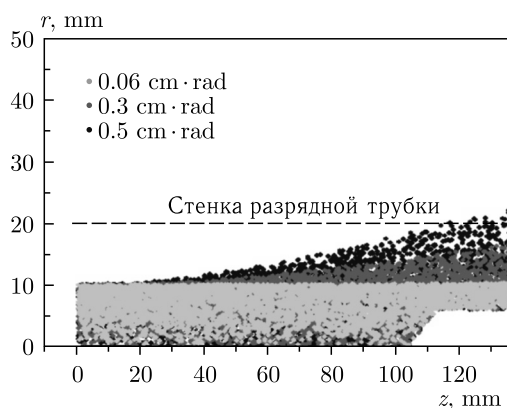


Рис. 2. Расходимость электронного пучка в разрядной трубке

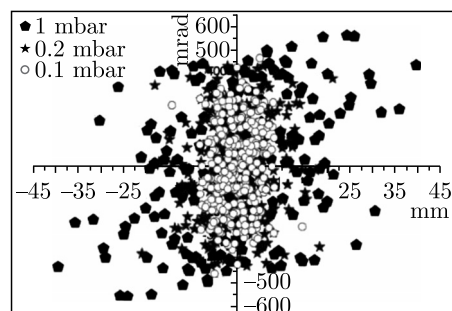


Рис. 3. Фазовые объемы пучка, входящего в разрядную трубку

пользовании системы уравнений Власова–Максвелла с расчетом столкновений частиц методом Монте-Карло. На рис.2 показана расходимость электронного пучка в разрядной трубке при различной величине эмиттанса входящего электронного пучка. Рассчитано прохождение электронного пучка от пушки до разрядной трубки при условиях дифференциальной откачки. Предполагалось, что давление в канале растет линейно от катода до разрядной трубки. На рис.3 показаны фазовые объемы пучка на входе в разрядную трубку при различных давлениях  $\text{Ar}$  в разрядной трубке.

Из расчетов следует, что в диапазоне давлений 0,1–1 мбар ток частиц, входящих в апертуру (диаметр) 20 мм и попадающих в требуемый фазовый объем  $0,1\pi$  см $\cdot$ рад, составляет от 90 до 20% от тока пучка, выходящего из пушки. Поэтому для проведения исследований при давлениях более  $\sim 0,5$  мбар необходимо на входе в разрядную трубку устанавливать разделительную майларовую пленку толщиной  $\sim 0,5$  мкм.

### 3. РАЗРЯДНАЯ КАМЕРА И УСТРОЙСТВО НАБЛЮДЕНИЯ Z-ПИНЧА

Разработана камера ввода пучка карусельного типа (рис.4). На каждый выстрел устанавливается новое разделительное окно с майларом толщиной 0,5 мкм (рис.5). Майлар такой толщины не обладает собственной жесткостью. Его можно нанести только на малое отверстие диаметром меньше 2 см между двух резиновых колец с поддерживающей тонкой сеткой. Это устройство обеспечивает перепад давлений от  $\sim 0,02$  мбар — со стороны электронной пушки, до  $\sim 10$  мбар — со стороны разрядной камеры. После прохода пучка и формирования разряда поступающая в отверстие плазма прожигает пленку. К новому выстрелу поворотное устройство устанавливает новое окно. В течение сеанса можно произвести 21 выстрел. К следующему сеансу производится вакуумное вскрытие для замены окон.

На рис.6 схематично показан горизонтальный разрез экспериментальной установки. При исследовании динамики Z-пинча производится наблюдение собственного излучения плазмы в областях видимого света и ближнего ультрафиолета с помощью стрик-камеры ВIFO К-008 в режиме временной развертки свечения плазмы

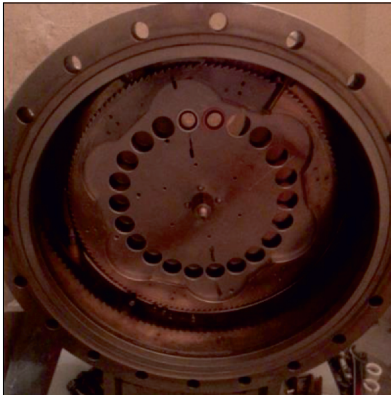


Рис. 4. Камера с вращающимся диском с гнездами для окон



Рис. 5. Майларовое окно

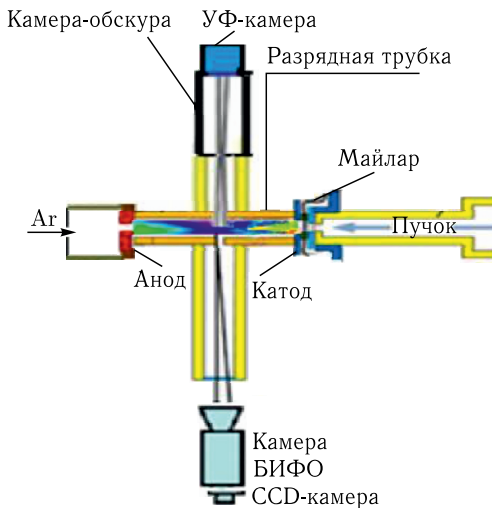


Рис. 6. Горизонтальный разрез установки

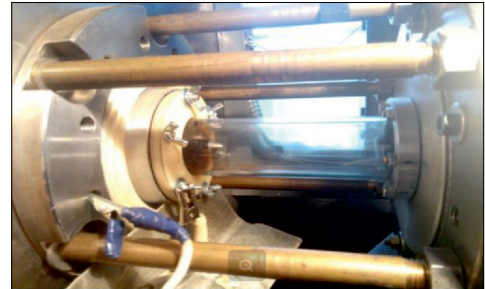


Рис. 7. Кварцевая разрядная трубка

из тонкого слоя в среднем сечении разрядной трубки. Одновременно может производиться регистрация жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена с использованием камеры-обскуры. Для того чтобы данное излучение не поглощалось в стенке разрядной трубки, последняя разделяется на две части с зазором  $\sim 3$  мм между ними.

На рис. 7 — фото разрядной камеры с целиковой кварцевой трубкой длиной 20 см, внутренним диаметром 3,9 см, со стенкой толщиной 3 мм. В такой конфигурации возможна не только регистрация свечения разряда в одном сечении, но и наблюдение всего разряда в определенное время (покадровая съемка). В частности, возможно наблюдение инъекции электронного пучка в разрядную трубку.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**4.1. Наблюдения разряда при покадровой съемке (frame-режим).** На рис. 8 и 9 показано свечение разрядной трубки в однокадровом режиме регистрации для двух характерных моментов времени (длительность кадра — 200 нс): свечение трека электронного пучка до пробоя и свечение разряда в момент максимального сжатия. Диаметр кварцевой трубки — 40 мм.

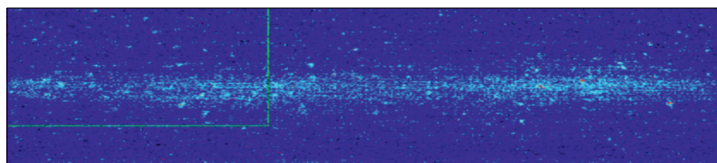


Рис. 8. Свечение трека пучка до пробоя

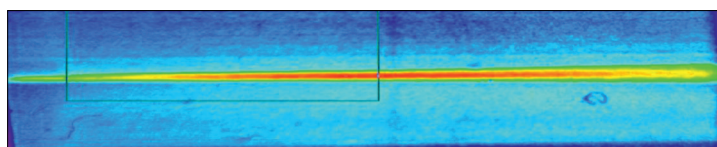


Рис. 9. Свечение разряда в момент максимального сжатия

**4.2. Исследование разряда в кварцевой трубке с инициацией и без инициации разряда пучком.** Экспериментальное исследование динамики Z-пинча производилось путем регистрации собственного излучения плазмы в областях видимого света и ближнего ультрафиолета с помощью стрик-камеры VIFO K-008 в режиме временной развертки свечения плазмы из тонкого слоя в среднем сечении разрядной трубки. При этом проводилась математическая обработка экспериментальных данных, которые представляют собой распределение плотности излучения на плоскости отображения регистрирующего прибора. Для этого используется регуляризованное обращение преобразования Абеля вариационным методом [7]. В результате получили распределение объемной плотности эмиссии излучения плазмы в предположении, что разряд аксиально-симметричный и излучение в нем не поглощается. Трубка наполнялась аргоном при давлении 0,2 мбар. Длительность синусоидальной полуволны разряда — 3,5 мкс. Параметры пучка: ток  $\sim 10$  А, длительность — 50 нс, диаметр пучка  $\sim 1,5$  см. Эксперименты производились в режиме с дифференциальной откачкой без разделяющей майларовой пленки. На рис. 10 показана временная развертка свечения разряда при токе разряда 40 кА при традиционном разряде.

На рис. 11 показана временная развертка свечения разряда при токе разряда 40 кА, но при инициации разряда электронным пучком. На рис. 12, а и б приведены радиальные распределения плотности эмиссии излучения плазмой в диапазоне видимого света и ближнего ультрафиолета.

Процесс разряда, как видно по экспериментальным данным, является достаточно сложным. Отличие наблюдаемых разрядов можно объяснить прежде всего тем, что при традиционном разряде пробой происходит по поверхности стенки разрядной трубки, инициируя ее распыление, что сопровождается более интенсивным излучением

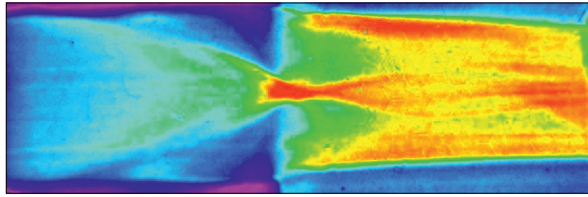


Рис. 10. Развертка излучения разряда длительностью 2 мкс без пучка

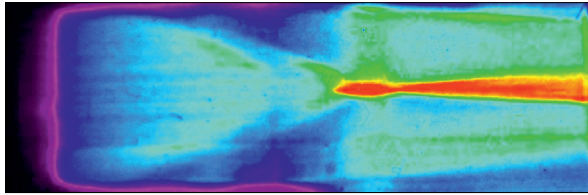


Рис. 11. Временная развертка излучения разряда длительностью 2 мкс с пучком

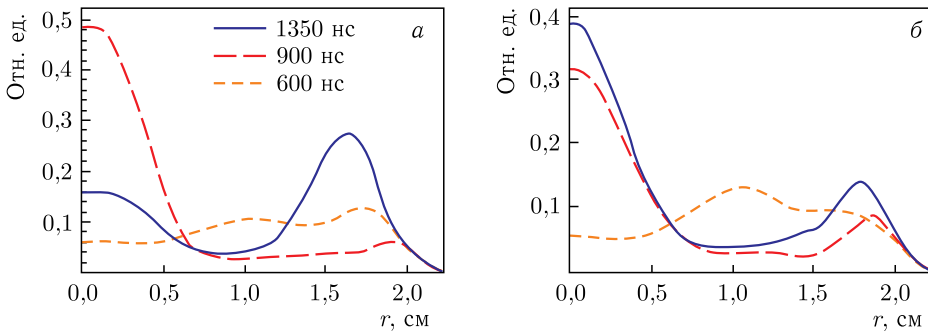


Рис. 12. Радиальное распределение плотности эмиссии в различные моменты времени после начала разряда без пучка (а) и с пучком (б)

пристеночной плазмы. Внешние слои плазмы на рис. 11 лишь постепенно вовлекаются в процесс сжатия. Это показывает, что разряд на временах порядка 500 нс еще «помнит» способ его инициации.

Отметим, что в МГД-расчетах не удастся пока воспроизвести эту особенность, что хорошо видно на примере обсчета конкретного эксперимента. Производился разряд в атмосфере аргона давлением 0,2 мбар. Длительность первой полуволны — 3,5 мкс. Амплитуда тока — 50 кА. На рис. 13 показана временная развертка свечения разряда.

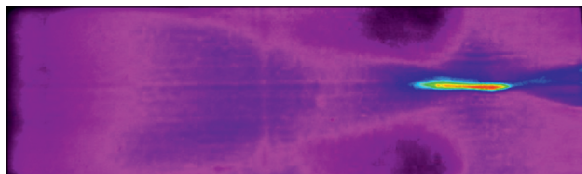


Рис. 13. Свечение разряда (длительность — 2 мкс)

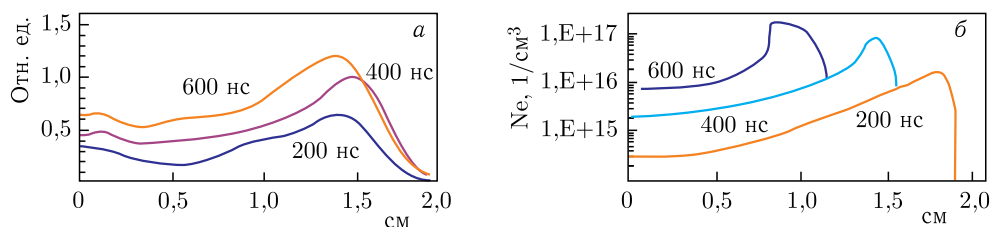


Рис. 14. а) Экспериментальное распределение плотности эмиссии излучения плазмой. б) Расчетное распределение электронной плотности плазмы

На рис. 14, а приведены радиальные распределения плотности эмиссии излучения плазмы, полученные в результате обработки экспериментальных результатов. На рис. 14, б представлены результаты расчета для тех же условий по программе МГД-кода NPINCH [8].

Экспериментальное равномерное распределение плотности эмиссии излучения, видимо, соответствует близкому к равномерному распределению разрядного тока. Отметим, что этот режим является наиболее благоприятным для фокусировки пучка заряженных частиц.

Как можно видеть, результаты расчета в МГД-приближении, которые хорошо описывают традиционный Z-пинч, существенно отличаются от экспериментальных результатов для случая инициации разряда электронным пучком.

## 5. РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ВАКУУМНОГО УФ И МЯГКОГО РЕНТГЕНА

В настоящее время мы развиваем методику регистрации излучения разрядной плазмы в области вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения [9], что существенно расширяет энергетический диапазон исследований. Поскольку данное излучение сильно поглощается в воздухе и в стенке разрядной трубки, даже если она кварцевая, был изготовлен специальный вакуумный канал, соединяющий разрядную трубку с регистрирующим прибором (см. рис. 6). Канал входит в экранирующий железный шкаф с регистрирующим прибором. Шкаф связан с общей землей высоким импедансом с  $L \sim 1$  Гн. Это предохраняет от опасного развития разряда по вакуумному каналу камеры-обскуры к регистрирующему прибору. В канале, кроме того, располагаются диафрагмы, препятствующие распространению плазмы, а на входе в шкаф установлены постоянные магниты. Поскольку в данном случае стандартная оптика неприменима, для получения изображения изучаемого разряда используется техника камеры-обскуры. Размер радиальной щели камеры-обскуры составил 0,5 мм.

Произведены первые отладочные наблюдения вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена для тока разряда 40 кА в кварцевой трубке при давлении 1 мбар (рис. 15). По времени оно соответствует 3/4 развертки видимого излучения (рис. 16), где сжатый разряд имеет диаметр  $\sim 15$  мм в момент времени  $\sim 1500$  нс после начала разряда.

Как видно из приведенных рисунков, зона эмиссии жесткого излучения Z-пинча находится в приосевой области вдвое меньшего диаметра.

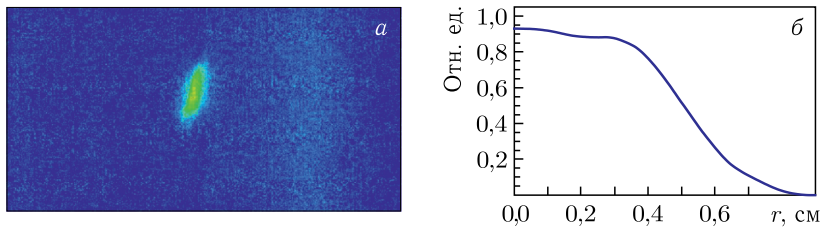


Рис. 15. а) Отображение излучения тонкого слоя Z-пинча с  $\lambda < 200$  нм. б) Поперечное распределение источников излучения с  $\lambda < 200$  нм

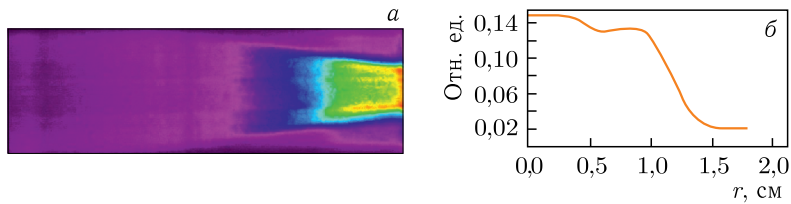


Рис. 16. а) Временная развертка видимого излучения разряда при  $P = 1$  мбар. б) Радиальное распределение плотности эмиссии видимого диапазона

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На созданной установке для исследования Z-пинча с инициацией разряда электронным пучком проведены исследования в условиях дифференциальной вакуумной откачки при давлении газа в разрядной трубке менее 0,5 мбар.

Сравнительные эксперименты с инициацией разряда электронным пучком и без инициации показали заметные отличия свойства разряда, особенно значительные в течение пинчевания и последующего развития разряда. Такие отличия пока не поддаются численному анализу в МГД-приближении.

Проведено численное и экспериментальное исследование прохождения электронного пучка от пушки до разрядной трубки при условиях дифференциальной откачки. Показано, что в диапазоне давлений 0,1–1 мбар из-за рассеяния на газе величина тока инжектируемого пучка составляет от 90 до 20% от исходного значения. Поэтому исследование пробоя и развития разряда при давлениях более 0,5 мбар возможно только с использованием разделяющей пленки. Для этого было создано вакуумное разделительное устройство карусельного типа со сменными майларовыми окнами толщиной 0,5 мкм.

Освоена методика регистрации излучения разрядной плазмы в области вакуумного ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучения, что позволяет приступить к изучению динамики изменения температуры разрядной плазмы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *van Tilborg J., Geddes C.G.R., Mattis N.H., Satorov P.V. et al.* Lensing for Relativistic Laser-Plasma-Accelerated Electron Beams // *Phys. Rev. Lett.* 2015. V. 115. P. 184802.



2. *Drozdowskiy A., Drozdowskiy S., Golubev A.A., Sasorov P. et al.* Conversion of Beams in Plasma Lens and Investigation of Z-Pinch Dynamics // *Problems Atom. Science Technol.* 2013. No. 6. P. 39–42.
3. *Drozdovsky A.A., Bogdanov A.V., Gavrilin R.O., Drozdovsky S.A. et al.* Installation for Studying the Plasma of Z-Pinch Initiated by an Electron Beam // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2016. V. 13, No. 7, P. 816–821.
4. *Drozdovsky A.A., Bogdanov A.V., Gavrilin R.O., Golubev A.A. et al.* Electronic Gun for Physical Researches // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 5. P. 577–580.
5. *Drozdovsky A.A., Bogdanov A.V., Gavrilin R.O., Drozdovsky S.A. et al.* The Research of the Plasma of Z-Pinch Initiated by the Electron Beam // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 14, No. 7.
6. *Roudskoy I.V., Kulevoy T.V., Petrenko S.V. et al.* Bernas Ion Source Discharge Simulation // *Rev. Sci. Instr.* 2008. V. 79, P. 02B313.
7. *Дроздовский С.А.* Операторный логарифм и вариационные методы в задачах обращения. Препринт ИТЭФ 5-17. М., 2017.
8. *Bobrova N.A., Bulanova S.V., Razinkova T.L., Sasorov P.V.* Dynamics of a Pinch Discharge in Capillaries // *Plasma Phys. Rep.* 1996. V. 22. P. 349.
9. *Карпов М.А. и др.* // Тр. Междунар. конф. «XX Харитоновские чтения», Саров, Россия, 17–20 апр. 2018 г.