

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ $Z$ -ПИНЧА, ИНИЦИИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

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

<sup>а</sup> Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва

<sup>б</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

<sup>а</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва

Разработана установка для исследования динамики плазмы  $Z$ -пинча с инициацией разряда электронным пучком. Выполнены исследовательские и наладочные работы по созданию системы формирования электронного пучка с помощью адиабатической плазменной линзы. Представлены результаты исследований.

Installation is developed for research of dynamics of  $Z$ -pinch plasma with initiation of the category by an electron beam. Research and adjustment works on creation of system of formation of an electron beam are performed. Results of researches are presented.

PACS: 52.58.Lq

### ВВЕДЕНИЕ

Целью данной работы является создание экспериментальной установки для исследования динамики плазмы  $Z$ -пинча с инициацией разряда электронным пучком. При подаче импульса высокого напряжения на разрядную трубку на ее оси создается плазменный канал с помощью импульсного электронного пучка, что обуславливает начало развития разряда в области оси трубки, а не на ее периферии.

Динамика развития сильноточного разряда, его пинчевания, существенно зависит от начальной геометрии его возникновения. Обычно процесс разряда начинается после подачи высокого напряжения на разрядную трубку с пробоя по поверхности трубки. Но возможна также инициация разряда по оси разрядной трубки. Для этого там следует создать условия развития пробоя. Такая возможность была исследована для случаев осевой предыонизации как электронным, так и лазерным импульсами небольшой мощности [1, 2]. Представляет также интерес исследовать развитие пинча в случае, когда пробой вызывается непосредственно электронным пучком малого диаметра до момента подачи высокого напряжения. Закономерности пробоя при инжекции сильноточного электронного пучка в газовую среду были достаточно широко исследованы [3].

---

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

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Для выяснения того, какое влияние может оказывать возбуждение разряда по оси разрядной трубки за счет прохождения пучка релятивистских электронов, были проведены оценочные расчеты с помощью МГД-кода NPINCH [4].

**Вариант 1.** Параметры разряда: диаметр разрядной трубки — 2 см; начальное давление аргона — 16 Торр; производная тока — 0,126 ТА/с. На рис. 1, *a* приведено радиальное распределение плотности тока в некоторые типичные моменты времени в этом варианте. При возбуждении пробоя внешним источником по оси разряда возникает резко пикированная к оси плотность тока. Однако за счет распространения волны ионизации от оси к периферии разряда постепенно происходит выравнивание плотности тока, а потом, при дальнейшем росте разрядного тока, возникает распределение плотности тока с максимумом на периферии разряда. Дальнейшее развитие разряда при продолжающемся росте разрядного тока слабо отличается от случая, когда разряд возбуждается вдоль поверхности изолятора. Время перехода с одного режима разряда на другой сильно зависит

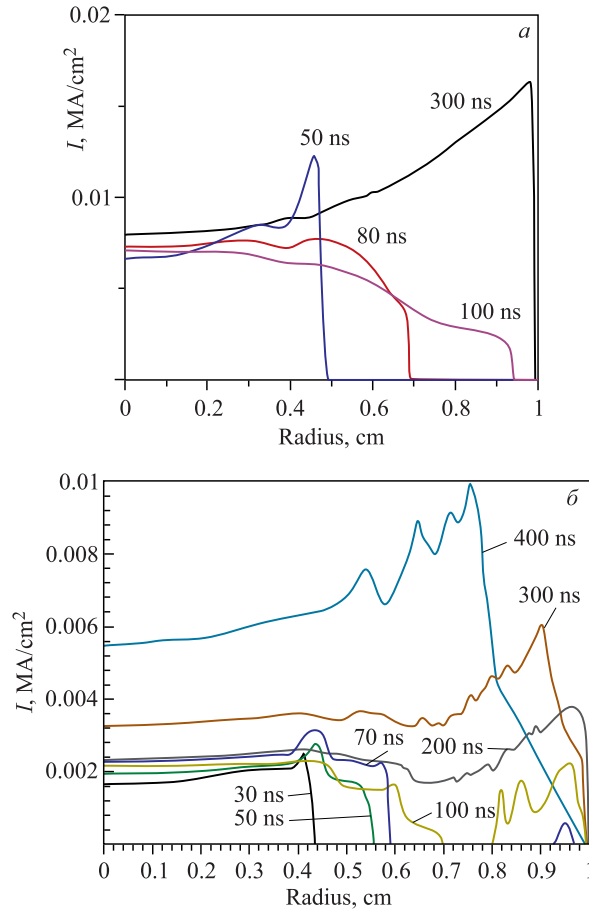


Рис. 1. Распределение плотности тока в разряде, инициированном по оси, в разные моменты времени

от начального давления аргона, от производной тока и от диаметра трубки. Стоит заметить, однако, что распространение ионизационного фронта в условиях, типичных для экспериментов настоящего проекта с относительно низкими начальными производными тока (0,1–0,2 TA/c), происходит в основном за счет теплопроводности и джоулева нагрева, а не за счет распространения ударной волны, как это происходит при заметно более высокой производной тока (2 TA/c). От диаметра возбуждающего пучка электронов зависимость слабая. В выбранном примере диаметр пучка был равен 6,32 мм.

**Вариант 2** (рис. 1, б). Соответствует условиям «физического пуска» данной установки (см. последний раздел). Разрядный ток с максимумом 50 кА и полупериодом 4 мкс протекает в трубке диаметром 2 см, заполненной азотом при начальном давлении 0,1 Торр. Сначала разряд развивается вблизи оси. Это действует предыонизация электронным пучком. При росте тока разряда на его границе возникает индуктивное напряжение около 110 В/см. Примерно в момент времени 70 нс из-за этого начинается пробой вблизи стенки. Однако в данном случае «экспериментальное пробойное напряжение» при таком низком давлении не кажется так уж сильно заниженным. После 70 нс начинается разряд вблизи стенки, и к моменту времени около 360 нс начинается отрыв плазмы от стенки (пинчевание). Распределение тока в этот момент времени качественно отличается от того случая, когда нет инициации разряда вдоль его оси. Это приводит к более плавному распределению тока по разряду, а значит к меньшим степеням сжатия в момент максимального сжатия и к меньшим температурам на оси разряда. Это качественно соответствует имеющимся экспериментальным данным. Такие различия позволяют осуществить более полное исследование физики сжатия плазмы в Z-пинчах.

Нужно иметь в виду, что основные процессы пробоя нейтрального газа не описываются гидродинамическими моделями. Поэтому при подготовке электронного пучка для осевого инициирования Z-пинча следует исходить из результатов экспериментальных исследований пробоя при инжекции сильноточного электронного пучка в газовую среду [3]. При типичных условиях развития Z-пинча электронный пучок должен иметь следующие параметры: амплитуда тока > 100 А, длительность фронта ~ 10 нс, энергия электронов > 200 кэВ.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка (рис. 2) состоит из собственно электронной пушки [5], на выходе которой расположены две аксиально-симметричные магнитные линзы, камеры наблюдения с расположенными в них сцинтилляторами, адиабатической плазменной линзы и камеры формирования Z-пинча. Вакуумная откачка электронной пушки производится турбомолекулярным насосом, а плазменная часть — форвакуумным. Из электронной пушки пучок электронов с энергией 250 кэВ вводится через разделяющую фольгу в экспериментальный канал с давлением ~ 1 мбар. В канале пучок сжимается в адиабатической плазменной линзе, а затем инжектируется в камеру формирования Z-пинча. На рис. 3 показаны осциллограммы тока пучка и напряжение, полученное на линии Блюмляйна амплитудой 25 кВ. Амплитуда тока пучка — 50 А и длительность пучка на вершине — 60 нс.

Были проведены измерения энергетического спектра электронного пучка на магнитном анализаторе (рис. 4). Продолжение распределения спектра выше максимальной энергии обусловлено величиной угловой дисперсии пучка, которая превышает 0,1 рад.

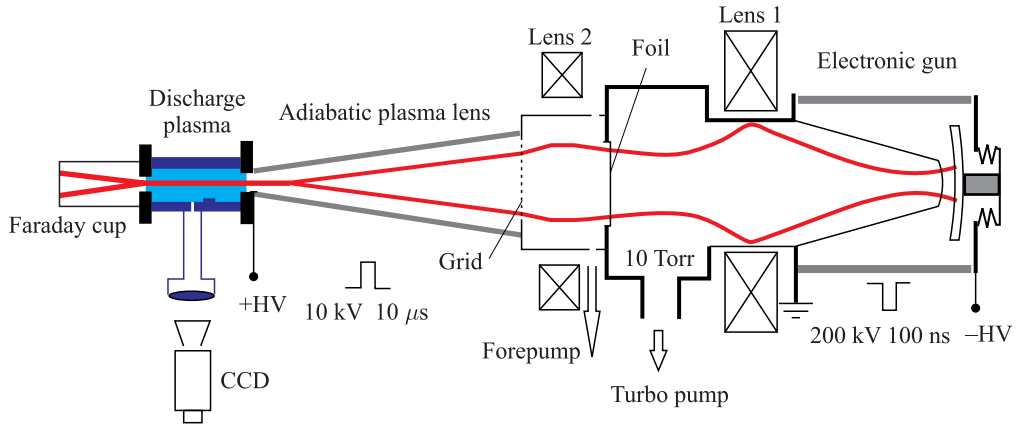


Рис. 2. Исследовательский стенд

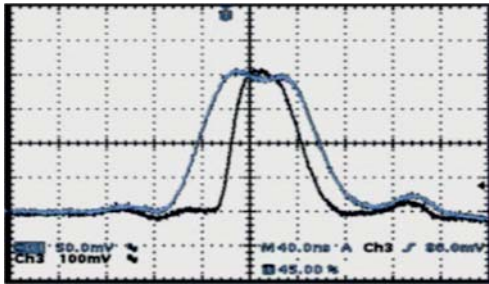


Рис. 3. Ток пучка (темная кривая) и напряжение на линии Блюмляйна

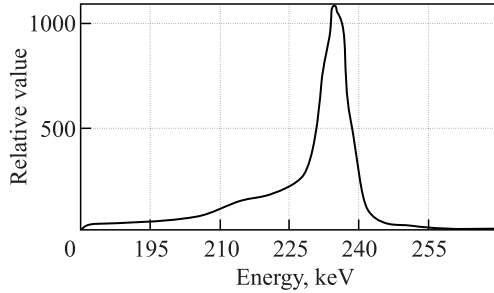


Рис. 4. Спектр электронного пучка при зарядном напряжении пушки 25 кВ

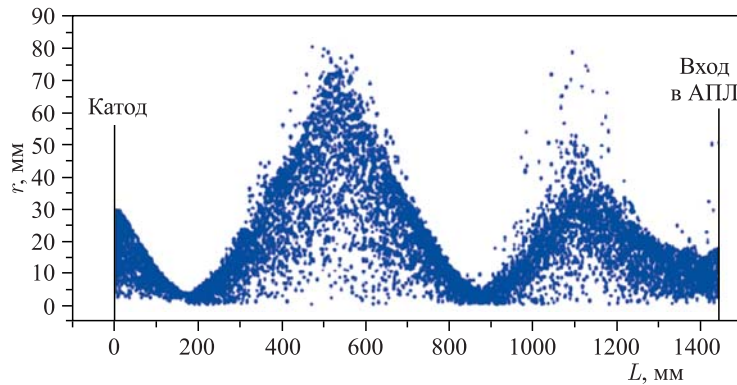


Рис. 5. Результаты расчета [6] распространения пучка при  $I = 100$  А,  $U = 200$  кВ. Плотность изображающих точек соответствует произведению плотности пучка  $n_e(r)$  координаты  $r$

Расчет прохождения электронного пучка в электронной пушке и адиабатической плазменной линзе (рис. 5) проводится по оригинальной программе VBM [7], основанной на использовании системы уравнения Власова–Больцмана с расчетом столкновений частиц методом Монте-Карло.

### 3. АДИАБАТИЧЕСКАЯ ПЛАЗМЕННАЯ ЛИНЗА

**3.1. Описание АПЛ.** Фокусировка заряженных частиц в плазменной линзе выполнена следующим образом (рис. 6): плазменный ток аксиального разряда создает азимутальное магнитное поле, которое фокусирует пучок, проходящий через разрядную трубку. Если разрядная трубка коническая, плотность тока и магнитного поля увеличиваются с уменьшением диаметра трубки. Таким образом, конический плазменный Z-разряд можно использовать, чтобы уменьшить размер пучка путем увеличения фокусирующей силы вдоль линзы [8]. Увеличение фокусирующей силы уменьшает длину волны колебаний частиц и в то же время амплитуду колебания, что приводит к уменьшению радиуса огибающей пучка. Это отличается от традиционной «когерентной» фокусировки. Такое сжатие пучка может быть достигнуто медленным, «адиабатическим», изменением геометрических и соответствующих динамических параметров.

При этом отношение конечного радиуса пучка  $r_f$  к начальному значению  $r_i$  зависит от изменения радиуса конической трубки  $R$  следующим образом:

$$\frac{r_f}{r_i} = \left( \frac{R_f}{R_i} \right)^{1/2}.$$

Такая зависимость получается в случае линейных фокусирующих сил, что соответствует равномерному распределению плотности разрядного тока. Успешное испытание адиабатической плазменной линзы было проведено в Беркли [9] на пучке ионов  $K^+$  с энергией 1,5 МэВ.

Поскольку плазменная линза имеет большую длину ( $\sim 1$  м), она может выполнять дополнительные функции. Так, на ее протяжении возможно создание градиента давления газа, что позволит иметь отличающиеся значения давления газа в разных частях установки. Вместе с тем, линза является демпфером, защищающим электронную пушку от интенсивного выброса плазмы из разрядной трубки Z-пинча.

Был создан импульсный генератор с тиратроном TDI1-150/25 в качестве коммутатора на ток до 20 кА. Длительность импульса тока достаточно велика, 14 мкс, поэтому, согласно нашим исследованиям [10] разрядов такой длительности, разрядный ток на вершине импульса должен заполнять все сечение трубки, а в центральной части, где проходит пучок, распределение тока должно быть близко к равномерному.

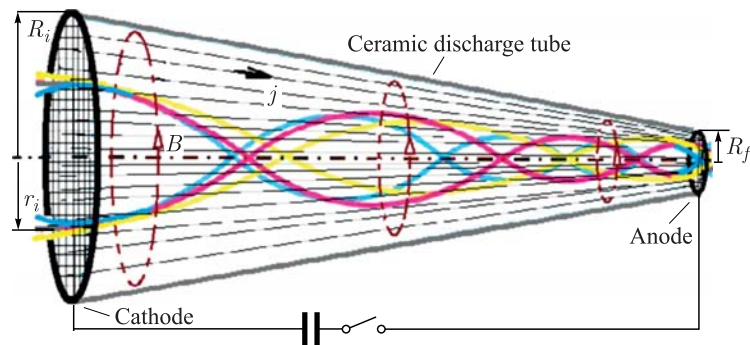


Рис. 6. Схематическое изображение геометрии и принципа работы адиабатической плазменной линзы

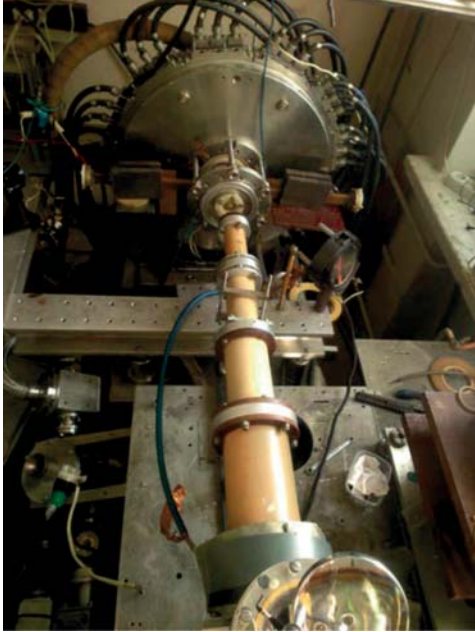


Рис. 7. Адиабатическая плазменная линза на входе в систему исследования Z-пинча

С использованием полученных данных о состоянии плазмы были проведены расчеты прохождения электронного пучка через адиабатическую плазменную линзу. В качестве входных параметров электронного пучка использовались результаты расчета проводки пучка до АПЛ.

Результаты расчета приведены на рис. 10 и 11 для тока пучка 10 А при энергии 200 кВ. Плотность изображающих точек соответствует произведению плотности пучка  $n_e(r)$  и координаты  $r$ . Координата входа пучка — 950 мм, координата выхода — 100 мм.

Вместо конической разрядной трубки решили применить набор цилиндрических трубок полной длиной 120 см и изменением диаметра от 100 до 30 мм (рис. 7).

### 3.2. Численное моделирование АПЛ.

Были проведены расчеты процесса разряда в используемых цилиндрических трубках по программе NPINCH при амплитуде тока 10 кА. Они подтвердили однородный характер распределения разрядного тока по сечению разряда. Приведенные ниже графики для электроннои температуры (рис. 8) и степени ионизации (рис. 9) соответствуют максимуму полуволны тока в АПЛ, который достигается при 7,5 мкс после начала разряда.

Важно, что плазма не успевает охладиться на стадии падения тока вплоть до 14 мкс. Она даже несколько нагревается до тех пор, пока течет ток. Поэтому приведенная степень ионизации сохраняется (даже слегка увеличивается) на всем протяжении полупериода тока и возможна тонкая регулировка работы АПЛ в широких пределах силы линзы.

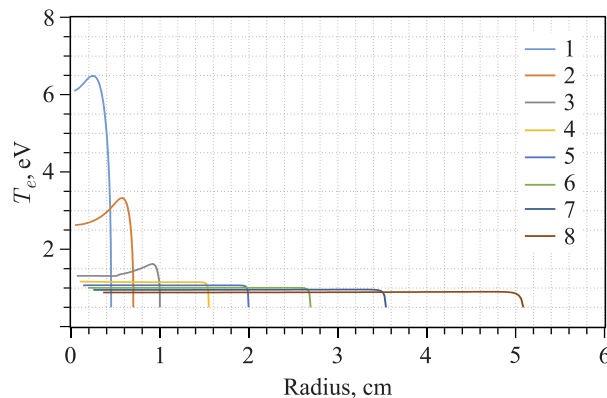


Рис. 8. Радиальное распределение электронной температуры в каждой секции

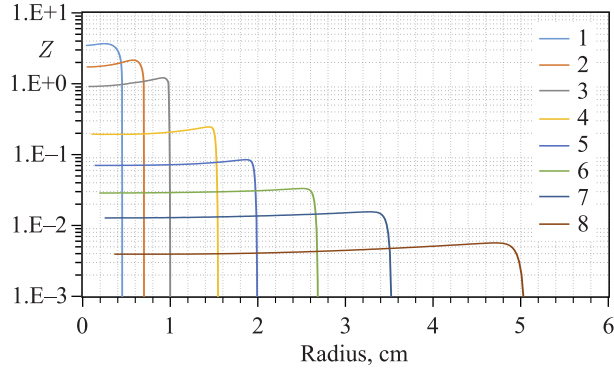


Рис. 9. Радиальные распределения степени ионизации в каждой секции

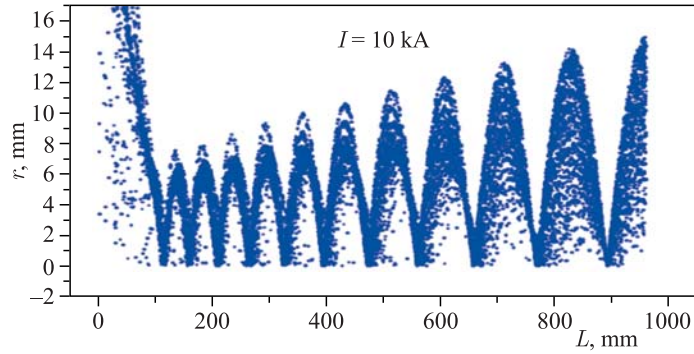


Рис. 10. Результаты расчета распространения пучка через АПЛ при  $I = 10 \text{ кА}$ . Координата входа пучка — 950 мм, координата выхода — 100 мм

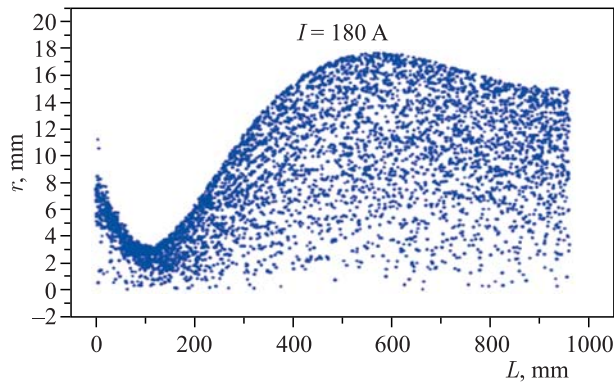


Рис. 11. Результаты расчета распространения пучка через АПЛ при  $I = 180 \text{ А}$

Первый вариант соответствует настоящему адиабатическому режиму работы линзы, описанному в начале данного раздела, когда длина линзы существенно больше длины волны колебаний фокусируемых частиц.

Во втором варианте (неадиабатическом) на длине линзы укладывается четверть длины волны колебаний частиц. Он может быть предпочтительнее для использования при создании  $Z$ -пинча.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Устойчивый разряд в АПЛ происходит при давлении 0,1 Торр и меньше. Были проведены испытания АПЛ на пучке электронов с энергией 250 кэВ и при токе 50 А. На рис. 12 показано свечение сцинтилляторов на входе и выходе из АПЛ, а также в середине разрядной трубки формирования  $Z$ -пинча. Полный размер пучка на входе АПЛ составляет  $\sim 40$  мм, а на выходе АПЛ и в разрядной трубке  $\sim 10$  мм.

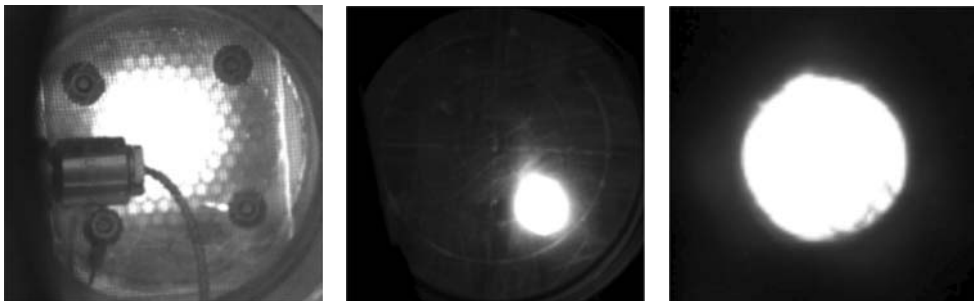


Рис. 12. Свечение сцинтилляторов на входе и выходе из АПЛ и в разрядной трубке

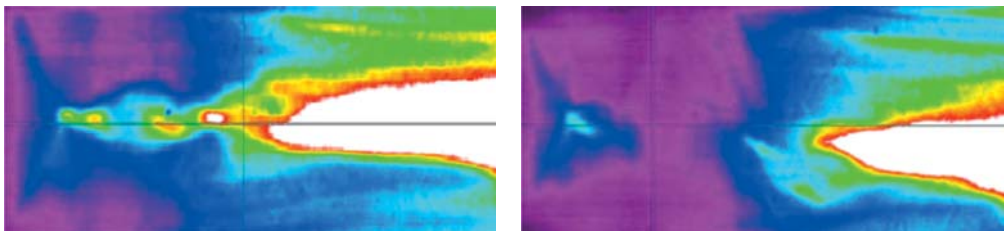


Рис. 13. Светимости плазмы в разрядной трубке без пучка (слева) и с ним (справа) в первые 2 мкс

Были проведены первые наблюдения светимости плазмы в разрядной трубке (рис. 13) при следующих условиях. Разрядный ток  $\sim 50$  кВ, время разряда — 4 мкс; параметры пучка: диаметр  $\sim 1$  см, ток  $\sim 10$  А, длительность — 100 нс. Разрядная трубка находится сразу за адиабатической плазменной линзой, и плазма из нее натекает в трубку через отверстие 1,5 см. Газ по составу атмосферный, остаточный, давление — 0,1 Торр.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый способ возбуждения разряда является нетрадиционным, что вызывает интерес к поиску физических отличий такого типа разрядов от традиционных, возбуждаемых вдоль поверхности изолятора. Проведенные расчеты  $Z$ -пинчевых разрядов, возбуждаемых пучком электронов вдоль оси трубки, показывают, что распределения тока в начальные моменты времени в разряде качественно отличаются от того случая, когда



нет инициации разряда вдоль ее оси. Это приводит к более плавному распределению тока по разряду, а значит к меньшим степеням сжатия в момент максимального сжатия и к меньшим температурам на оси разряда. Это качественно соответствует имеющимся экспериментальным данным. Такие различия позволят осуществить более полное исследование физики сжатия плазмы в Z-пинчах, а также лучше понять динамику распределения разрядного тока при различных условиях формирования разряда. Это необходимо для решения актуальных задач создания плазменных линз с определенными фокусирующими свойствами. Какие распределения тока в разряде отвечают определенным типам фокусировки пучков заряженных частиц, было подробно исследовано нами [10]. Сейчас активно ведутся работы по созданию компактных лазерных ускорителей (электронных и протонных) [11]. Для них актуально решение вопросов транспортировки и фокусировки пучков в разрядах Z-пинчового типа, а это требует тщательного исследования способов формирования таких разрядов.

Проведенные численные и экспериментальные исследования разработанной системы формирования пучка электронов с энергией 250 кэВ и током 50 А позволяют приступить к осуществлению инъекции электронного пучка в разрядную трубку Z-пинча.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Esaulov A. et al.* Magnetohydrodynamic Simulation of Gas Embedded Plasma Discharge // *Phys. Plasmas*. 2001. V. 8. P. 1385.
2. *Bobrova N.A. et al.* Laser-Heater Assisted Plasma Channel Formation in Capillary Discharge Waveguides // *Phys. Plasmas*. 2013. V. 20. P. 020703.
3. *Лебедев А. Н., Шальнов А. В.* Основы физики и техники ускорителей. М.: Энергоиздат, 1991.
4. *Bobrova N.A. et al.* Dynamics of a Pinch Discharge in Capillaries // *Plasma Phys. Rep.* 1996. V. 22. P. 349.
5. *Drozdovsky A.A. et al.* Electronic Gun for Physical Researches // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2014. V. 11, No. 5. P. 577–580.
6. *Drozdovsky A.A. et al.* An Electronic Gun with the Adiabatic Plasma Lens // RUPAC'14, Obninsk, 2014; [www.jacow.org](http://www.jacow.org).
7. *Roudskoy I.V., Kulevoy T.V., Petrenko S.V.* Bernasion Source Discharge Simulation // *Rev. Sci. Instr.* 2008. V. 79. P. 02B313.
8. *Chen P. et al.* Plasma-Based Adiabatic Focuser // *Phys. Rev. Lett.* V. 64. P. 1231–1234.
9. *Tauschwitz A. et al.* Adiabatic Focusing and Channel Transport for Heavy Ion Fusion // *Proc. of Intern. Conf. on Laser Int. and Rel. Plasma Phen.*, Monterey, CA, 1997. V. 406. P. 251–258. V. 1–3. P. 1–5.
10. *Drozdowskiy A. et al.* Conversion of Beams in the Plasma Lens and Investigation of Z-Pinch Dynamics // *Problems of At. Science and Technol.* 2013. No. 6(88). P. 39–42.
11. *Leemans W.P. et al.* Multi-GeV Electron Beams from Capillary-Discharge-Guided Subpetawatt Laser Pulses in the Self-Trapping Regime // *Phys. Rev. Lett.* 2014. V. 113. P. 245002.