

УДК 533.9; 534-16  
EDN: VGCLXD

PACS: 52.75Fk; 41.75Fr; 41.75Ht; 62.50Ef

**Оценка влияния плазменных процессов в вакуумном диоде  
сильноточного электронного ускорителя «Кальмар»  
на развитие ударно-волновых процессов в мишенях**© Е. Д. Казаков<sup>1,2,3,4,\*</sup>, М. Ю. Орлов<sup>1</sup>, А. Р. Смирнова<sup>1,3,4</sup>, М. Г. Стрижаков<sup>1</sup>,  
К. А. Сунчугашев<sup>1</sup>, Л. М. Юсупова<sup>1,2</sup>, С. И. Ткаченко<sup>1,3,4,5</sup><sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 123182 Россия

\* E-mail: kazakov\_ed@nrcki.ru

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250 Россия<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
г. Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия<sup>4</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва, 125047 Россия<sup>5</sup> Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, 125412 РоссияСтатья поступила в редакцию 11.11.2024; после доработки 13.01.2025; принята к публикации 14.02.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.9

*Рассматривается вопрос о влиянии диодной плазмы на формирование и распространение волн сжатия и ударных волн внутри мишеней при исследовании воздействия сильноточных электронных пучков на твердые мишени. Экспериментальные исследования проведены на установке «Кальмар», генерирующей сильноточный пучок электронов. Для получения оценок проведено численное моделирование процессов, происходящих в диоде, заполненном плазмой, в рамках одномерной магнитной гидродинамики. Полученные результаты моделирования подтверждают, что плазма может обеспечивать давление, достаточное для создания наблюдаемых в эксперименте вторичных волн сжатия.*

*Ключевые слова:* плазма диода; сильноточный пучок электронов; прозрачные мишени; ударно-волновые процессы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-2-55-61

**Введение**

Исследование формирования и распространения ударных волн внутри различных материалов при мощном импульсном воздействии является актуальным, так как всё больше новых композитных и полимерных материалов используются в авиационной и ракетно-космической технике, в судостроении и в специальных приложениях [1]. Экспериментальные исследования в этой области проводятся уже более пятидесяти лет, с использованием различных видов воздействия на образцы [2–6]. Основными инструментами инициации меха-

нического ударно-волнового воздействия являются баллистический и взрывной генератор [7], электровзрывные устройства [8]. Наравне с ними активно используются импульсные лазеры большой мощности, магнитно-импульсные генераторы [9], а также сильноточные ускорители электронов и ионов. В данной работе рассматриваются особенности ударно-волновых процессов, возникающих в прозрачных материалах при воздействии сильноточного электронного пучка установки «Кальмар» (ток до 35 кА, напряжение на диоде до 350 кВ, длительность пучка электронов  $\approx 100$  нс).

Относительно высокая проникающая способность – одна из особенностей таких электронных пучков в качестве источника ударных волн. В связи с тем, что длительность воздействия пучка составляет около ста наносекунд, энергия выделяется в приповерхностном слое толщиной не более нескольких сотен микрометров (до 80 % электронов поглощается в слое менее 100 мкм), а время разгрузки такой области – не менее 500 нс, процесс поглощения энергии пучка можно считать изохорным. В большинстве работ оценки различных параметров на поверхности мишени производят с учетом только взаимодействия пучка электронов с поверхностью мишени и разгрузки области энерговыделения, однако, после прохождения электронного пучка в диодном зазоре образуется плазма [10], влиянием которой как правило пренебрегают. Некоторые экспериментальные результаты, демонстрирующие динамику прохождения ударной волны по мишени [10,11], дают основания рассмотреть вопрос о влиянии диодной плазмы на формирование и распространение ударных волн внутри мишени более детально.

Вопрос о влиянии диодной плазмы на формирование и распространение волн сжатия и ударных волн внутри мишеней поднимался и ранее, при исследовании воздействия сильноточных электронных пучков на конденсированные мишени. Однако, исследований, подтверждающих или опровергающих это на сегодняшний день нет. В результате моделирования анодного факела [12] получены достаточно экстремальные параметры плазмы (средняя электронная температура  $T_e \approx 10$  эВ, средняя концентрация  $n_e > 5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ). Проведенное нами одномерное МГД моделирование параметров плазменного столба, подтверждает предположение, что давление плазмы может достигать значений достаточных для формирования волн сжатия, которые наблюдаются в экспериментах.

### Экспериментальные исследования

Эксперименты по изучению влияния диодной плазмы на формирование и прохождения ударных волн и волн сжатия в прозрачных мишенях проводились на сильноточном ускорителе «Кальмар» [13]. Образцы-мишени, изготовленные из различных прозрачных материалов, крепились к пластине анодного узла.

Остаточное давление в вакуумной камере было не более  $10^{-2}$  Па.

Система оптической диагностики основана на просвечивании диодного промежутка и/или мишени лазерным излучением перпендикулярно оси диода. Лазерное излучение проходит в диагностические окна через исследуемую область. Изображение переносится на фотокатод электронно-оптической камеры СФЭР-6, работающей в хронографическом режиме, с помощью системы объективов и зеркал [9]. В связи с тем, что характерные времена плазменных и ударно-волновых процессов отличаются приблизительно на порядок, зафиксировать плазменные процессы качественно возможно только на хронограммах с большими временными развертками. Необходимо отметить, что параметры плазмы в прианодной области могут принимать значения, при которых невозможно зафиксировать плазму с помощью имеющихся диагностик.

На рисунке 1 представлена совместная хронограмма, зарегистрированная методом теневого фотографирования с одновременной регистрацией собственного свечения плазмы. В верхней части изображения на фоне зондирующего излучения видно распространение тени, которая появляется в результате изменения коэффициента преломления при прохождении волны сжатия или ударной волны в мишени, закрепленной на задней поверхности анодной пластины. В нижней части изображения (ниже временной оси) наблюдаем собственное свечение плазмы в диоде ускорителя. Зондирующее излучение через диодный зазор не проходило, будучи заблокировано экраном.

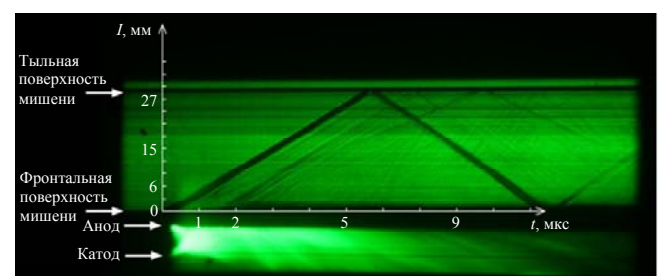


Рис. 1. Совместная хронограмма, зарегистрированная методом теневого фотографирования с одновременной регистрацией собственного свечения плазмы. Временная ось ориентирована вдоль оси пучка. Энергия пучка электронов в данном выстреле составляла 450 Дж; мишень изготовлена из стекла (ЛК-5)

Из данной хронограммы видно, что в первые 300–400 нс формируется ударная волна, скорость распространения которой  $\sim 5,4$  км/с. В нижней части хронограммы видно, что к концу этого временного промежутка яркое собственное свечение, распространяющееся от электродов к центру, замыкает диодный промежуток. Можно сделать вывод, что излучающая плазма замыкает диодный промежуток. К моменту времени в 1,5–2 мкс собственное свечение плазмы становится менее интенсивным. После  $\sim 2$  мкс в объеме мишени появляются множественные затемнения, каждое из которых может соответствовать распространению волн сжатия в материале. Появление этих волн на поздних стадиях разлета анодной плазмы может быть обусловлено избыточным давлением в прианодной области, возникающим в плазменном канале.

Измерение тока и напряжения в диодном зазоре производилось с помощью шунта и емкостного делителя соответственно [14]. Имея данные о токе и напряжении, можно определить мощность и интегральную энергию, вкладываемую пучком в образец.

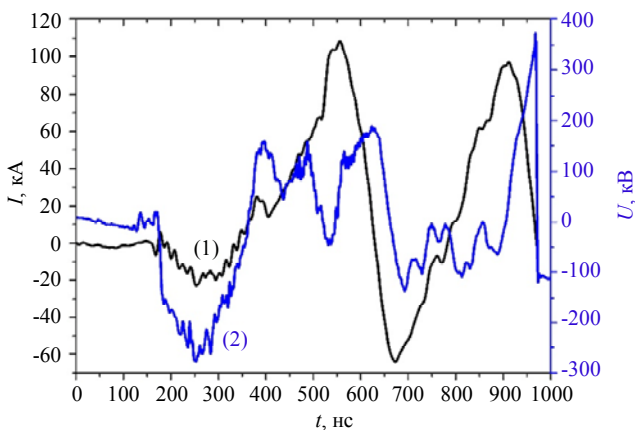


Рис. 2. Временные зависимости тока (1) и напряжения (2), измеренные в диодном промежутке

На рисунке 2 представлена характерная временная зависимость тока пучка электронов и тока проводимости через диод. Видно, что в промежутке времени с 150 нс до 350 нс в диоде генерируется пучок электронов; после чего происходит замыкание диодного промежутка плазмой, это инициирует переполюсовку тока в  $\sim 400$  нс. После замыкания диода плазмой наблюдается знакопеременный ток, амплитуда которого уменьшается. Замыкание диода происходит за счет его заполнения плазменными

потоками с катода и анода. На катоде появление плазмы обусловлено взрывом поверхности (взрывная эмиссия), а на аноде взаимодействием пучка высокоэнергетичных электронов с поверхностью мишени. Наличие тока в диодном промежутке означает, что плазма, замыкающая диод, обладает высокой проводимостью.

### Математическое моделирование

Для определения диапазона параметров, при которых диодная плазма влияет на генерацию ударных волн внутри мишени, была сформулирована задача о моделировании процессов, происходящих в цилиндрическом плазменном канале с током. Стадия формирования плазменного канала не рассматривалась. Данная задача решалась в рамках одномерной (координата  $r$  направлена параллельно поверхности мишени; начало отсчета расположено в точке, соответствующей оси пучка электронов) однотемпературной магнитной гидродинамики (МГД) в цилиндрической системе координат. Ниже записана система МГД уравнений в Ланранжевых переменных:

$$\frac{dm}{dt} = 0, \tag{1}$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{1}{2\mu_0 r^2} \cdot \frac{\partial (r^2 B_\phi^2)}{\partial r}, \tag{2}$$

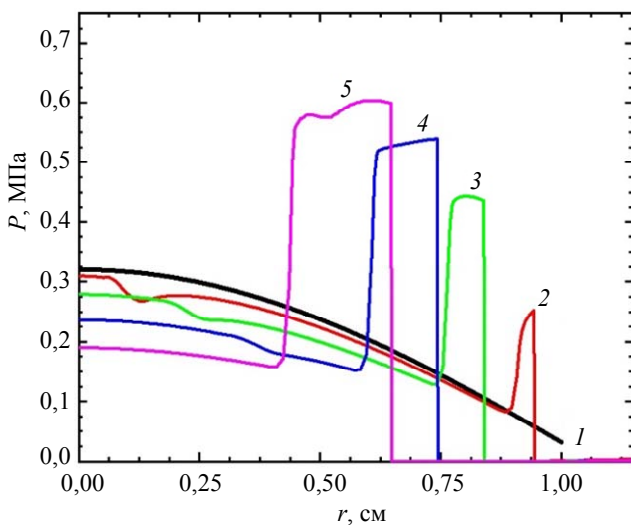
$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = -P \frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{j^2}{\sigma}, \tag{3}$$

$$\frac{d(\mu B_\phi)}{dt} = \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{\sigma r} \cdot \frac{\partial (r B_\phi)}{\partial r} \right], \tag{4}$$

где  $m$  – масса;  $\rho = m_c n$  – плотность;  $m_c$  – масса атома углерода;  $v$  – скорость;  $P$  – гидродинамическое давление;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $B_\phi$  – индукция магнитного поля;  $j = \frac{1}{\mu_0 r} \frac{\partial (r B_\phi)}{\partial r}$  – плотность тока;  $\sigma$  – проводимость;  $T$  – температура;  $n$  – концентрация. Для описания термодинамических свойств среды использовалась модель идеальной плазмы и Спитцеровская модель проводимости. При записи начальных и граничных

условий для описанной задачи использовались результаты, полученные при обработке экспериментальных данных: максимальное значение концентрации плазмы в начальный момент  $n_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , начальный радиус цилиндрического плазменного столба  $r_0 = 1 \text{ см}$ , начальная температура плазмы  $T_0 = 10 \text{ эВ}$ , индукция магнитного поля на внешней границе ( $r_{\text{вн}}$ ) плазменного канала  $B_{\phi}(r_{\text{вн}}, t) = \mu_0 I(t) / \{2\pi r_{\text{вн}}(t)\}$ ; магнитное поле и поле скоростей в начальный момент времени задавались нулевыми. В модели рассматривалась однократно ионизованная плазма; начальное распределение концентрации плазмы в зависимости от радиуса – косинусоидальное. Значение полного тока определялось синусоидальной зависимостью  $I(t) = I_{\text{max}} \sin(\omega t)$ ,  $\omega = (2\pi/400) \text{ нс}^{-1}$ .

На рисунке 3 представлен график радиальной зависимости давления в плазменном столбе, полученного при численном моделировании с  $I_{\text{max}} = 100 \text{ кА}$ .



**Рис. 3.** Радиальная зависимость давления в плазменном столбе. Цифрами указаны моменты времени, которые отсчитываются от момента начала тока проводимости (равному 400 нс на рис. 2): 1 – 0 нс, 2 – 100 нс, 3 – 200 нс, 4 – 300 нс, 5 – 400 нс

На рисунке 3 видно, что давление нарастает вблизи внешней поверхности плазменной цилиндрической оболочки и со временем область повышенного давления смещается к оси симметрии. Это происходит из-за поджатия магнитным давлением периферийной плазмы низкой плотности к оси и одновременного расталкивания газодинамическим давлением

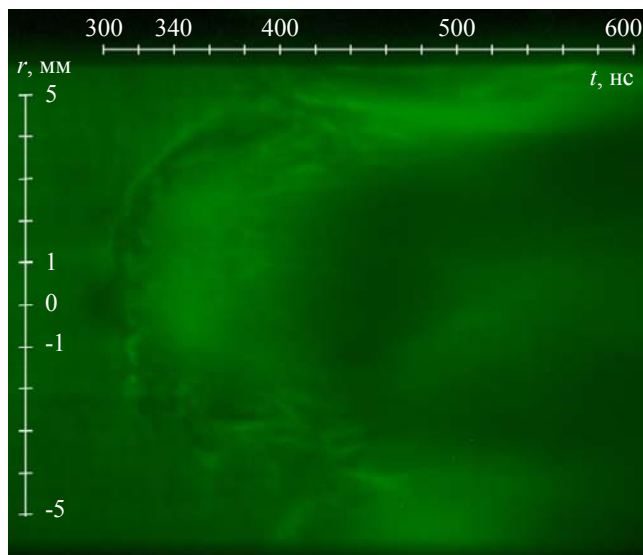
вещества с высокой плотностью от оси; в результате чего формируется область с повышенной плотностью, а следовательно, и давлением на периферии плазменной области.

## Обсуждение результатов

При взаимодействии пучка электронов с поверхностью мишени формируется факел анодной плазмы, а при прохождении токов большой мощности по электродам с катода срывается поток плазмы, сформированный взрывной электронной эмиссией. В некоторый момент времени эти два потока перекрывают диод (см. на рис. 1 нижнюю часть хронограммы, на которой видно собственное свечение плазмы в диоде ускорителя), в результате чего в диоде формируется канал проводимости для тока, проходящего после импульса субрелятивистского пучка электронов, т. е. после 400 нс в соответствии с рис. 2.

На рисунке 4 представлена поперечная хронограмма: развернуто во времени изображение центральной части диодного промежутка, перпендикулярного оси диода. На рисунке 4 видно, что плазма анодного факела достигает области, в которой происходит регистрация, к  $\sim 300$ -й наносекунде; далее в течение  $\sim 100$  нс диодный зазор заполняется почти однородной плазмой, поперечный размер которой увеличивается от 0,5 см до  $\sim 1$  см к 400 нс, т. е. радиальная скорость на внешней наблюдаемой границе равна  $\sim 3 \times 10^4 \text{ м/с}$ . После момента времени 440 нс наблюдается поджатие излучающей плазмы по её внешней видимой границе, в этой же области (её толщина  $\sim 1 \text{ мм}$ ) собственное свечение плазмы более интенсивное. В соответствии с результатами моделирования (рис. 3) на моменты времени 200–300 нс от момента начала тока проводимости в плазменном канале образуется область поджатия такого же размера и с такой же скоростью поджатия  $\sim 10^4 \text{ м/с}$ , давление в этой области выше, чем в других частях плазмы. Увеличение давления плазмы приведет к увеличению давления на торцах плазменного столба, это может вызвать формирование дополнительных волн сжатия или ударных волн, которые не связаны непосредственно с воздействием пучка электронов на

поверхность мишени. Таким образом, учет процессов, происходящих в плазме диода, может оказать существенное влияние на изучение динамики формирования и прохождения волн сжатия и ударных волн в твердых мишенях.



**Рис. 4.** Хронограмма, зарегистрированная методом теневого фотографирования с одновременной регистрацией собственного свечения плазмы. Времениализирующая щель ориентирована поперек оси пучка. Энергия пучка электронов в данном выстреле составляла 460 Дж

Хотелось бы также отметить, что в соответствии с рис. 1, у некоторых из таких волн как бы изменяется скорость распространения – они соответствуют потемнениям, у которых со временем изменяется наклон. Причиной изменения наклона мог бы быть процесс формирования волн не в той поверхностной области мишени, которая соответствует оси пучка, а например, вблизи внешней границы области взаимодействия пучка с мишенью. В этом случае волны сжатия будут приходить в область находящейся на продолжении оси пучка с разной временной задержкой, зависящей от координаты вдоль толщины мишени, что и приведет к появлению тени с меняющимся по толщине мишени наклоном.

### Заключение

Таким образом и экспериментальные результаты, и моделирование в рамках одномерной магнитной гидродинамики подтверждают

необходимость учета процессов, происходящих в плазме диода, при изучении динамики формирования и распространения волн сжатия и ударных волн в мишенях. Причем, учитывая достаточно экстремальные параметры плазмы в диодном зазоре она может также оказывать существенное воздействие на степень разрушения поверхности исследуемых материалов при испытаниях. Для развития представленных исследований предполагается выполнить более детальный анализ экспериментальных данных в том числе и с помощью результатов моделирования, которые мы планируем получить в рамках усовершенствованной модели.

*Математическое моделирование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 23-21-00248).*

*Эксперименты на установке «Кальмар» проведены в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт»*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В. А., Кондратьев А. В. / *Авиационно-космическая техника и технология*. 2011. № 5. С. 14–20.
2. Рудаков Л. И., Бабыкин М. В., Гордеев А. В. и др. Генерация и фокусировка сильнооточных релятивистских электронных пучков. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Грабовский Е. В., Воробьев О. Ю., Дяблин К. С., Лебедев М. Е., Острик А. В., Смирнов В. П., Фортвов В. Е. / *Письма в ЖЭТФ*. 1984. Т. 60. № 1. С. 3–6.
4. Ломов С. А. Введение в общую теорию сингулярных возмущений. – М.: Наука, 1981.
5. Kanel' G., Fortov V., Razorenov S. / *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177. № 8. С. 809–831.
6. Диденко А. Н., Лигачев А. Е., Куракин И. Б. Воздействие пучков заряженных частиц на поверхности металлов и сплавов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Канель Г. И., Разоренов С. В., Уткин А. В., Фортвов В. Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. – М.: «Янус-К», 1996.
8. Рябинин Ю. Н. / *Журнал технической физики*. 1956. Т. 26. С. 2661.
9. Кривошеев С. И. / *Журнал технической физики*. 2005. Т. 75. № 3. С. 49–55.
10. Демидов Б. А., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г. / *Приборы и техника эксперимента*. 2020. № 3. С. 90–95.
11. Демидов Б. А., Казаков Е. Д., Калинин Ю. Г. и др. / *Прикладная физика*. 2018. № 6. С. 74–78.
12. Ананьев С. С., Багдасаров Г. А., Гасилов В. А. и др. / *Физика плазмы*. 2017. Т. 43. № 7. С. 608–615.

13. Демидов Б. А., Ивкин М. В., Петров В. А., Фанченко С. Д. / Атомная энергия. 1979. Т. 46. № 2. С. 101.

14. Казаков Е. Д. и др. / Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 8. С. 716–727.

PACS: 52.75Fk; 41.75Fr; 41.75Ht; 62.50Ef

## Evaluation of the influence of plasma processes in the vacuum diode of the high-current electron accelerator "Kalmar" on the development of shock-wave processes in targets

E. D. Kazakov<sup>1,2,3,4</sup>, M. Yu. Orlov<sup>1</sup>, A. R. Smirnova<sup>1,3,4</sup>, M. G. Strizhakov<sup>1</sup>,  
K. A. Sunchugashev<sup>1</sup>, L. M. Yusupova<sup>1,2</sup> and S. I. Tkachenko<sup>1,3,4,5</sup>

<sup>1</sup> National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, 123182 Russia

<sup>2</sup> National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, 111250 Russia

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701 Russia

<sup>4</sup> Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, 125047 Russia

<sup>5</sup> Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

Received 11.11.2024; revised 13.01.2025; accepted 14.02.2025

*The issue of the influence of diode plasma on the formation and propagation of compression waves and shock waves inside targets is considered in the study of the impact of high-current electron beams on solid targets. Experimental studies were conducted on the Kalmar setup generating a high-current electron beam. To obtain estimates, numerical modeling of the processes occurring in a diode filled with plasma was performed within the framework of one-dimensional magnetohydrodynamics. The obtained modeling results confirm that plasma can provide pressure sufficient to create secondary compression waves observed in the experiment.*

*Keywords:* diode plasma; high-current electron beam; transparent targets; shock wave processes.

### REFERENCES

1. Kovalenko V. A. and Kondratyev A. V., Aviation and space equipment and technology, № 56 14–20 (2011) [in Russian].
2. Rudakov L. I., Babykin M. V., Gordeev A. V. et al. Generation and focusing of high-current relativistic electron beams. Moscow, Energoatomizdat, 1990 [in Russian].
3. Grabovsky E. V., Vorobyov O. Yu., Dyabilin K. S., Lebedev M. E., Ostrik A. V., Smirnov V. P. and Fortov V. E., JETP Letters **60** (1), 3–6 (1984).
4. Lomov S. A. Introduction to the General Theory of Singular Perturbations. Moscow, Nauka, 1981.
5. Kanel' G., Fortov V and Razorenov S., Physics-Uspekhi **50** (8), 771–791 (2007).
6. Didenko A. N., Ligachev A. E. and Kurakin I. B. Effect of charged particle beams on the surfaces of metals and alloys. Moscow, Energoatomizdat, 1987 [in Russian].
7. Kanel G. I., Razorenov S. V., Utkin A. V. and Fortov V. E. Shock-wave phenomena in condensed media. Moscow, "Yanus-K", 1996 [in Russian].
8. Ryabinin Yu. N., Technical Physics, № 26, 2661 (1956).
9. Krivosheev S. I., Technical Physics **75** (3), 49–55 (2005).
10. Demidov B. A., Kazakov E. D. and Kalinin Yu. G., Instruments and Experimental Techniques, № 3, 90–95 (2020) [in Russian].
11. Demidov B. A., Kazakov E. D., Kalinin Yu. G. et al., Applied Physics, № 6, 74–78 (2018) [in Russian].
12. Ananyev S. S., Bagdasarov G. A., Gasilov V. A. et al., Plasma Physics Reports **43** (7), 608–615 (2017).
13. Demidov B. A., Ivkin M. V., Petrov V. A. and Fanchenko S. D., Atomic Energy **46** (2), 101 (1979).
14. Kazakov E. D. et al., Plasma Physics Reports **47** (8), 608–615 (2021) [in Russian].

**Об авторах**

**Казаков Евгений Давидович**, заместитель руководителя отделения, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 14). Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 4). E-mail: kazakov\_ed@nrcki.ru. SPIN-код РИНЦ 2936-1306, Author ID 184827

**Орлов Михаил Юрьевич**, инженер-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). E-mail: mosgotron@gmail.com.

**Смирнова Анна Романовна**, младший научный сотрудник, аспирант, НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 4). E-mail: anyu4113@gmail.com. SPIN-код РИНЦ 8607-4923, Author ID 1254979

**Стрижаков Михаил Геннадьевич**, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). E-mail: strizhakov\_mg@nrcki.ru. SPIN-код РИНЦ 1430-1600, Author ID: 824117

**Сунчугашев Кирилл Александрович**, лаборант-исследователь, НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). E-mail: 1032182603@pfur.ru.

**Юсупова Лилия Маратовна**, лаборант-исследователь, студент, НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, Москва, Красноказарменная ул., д. 14). E-mail: yusupova\_lilia\_m@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 6695-1237, Author ID 1289155

**Ткаченко Светлана Ивановна**, профессор, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» (123182, Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1). Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН (125047, Россия, Москва, Миусская пл., д. 4). Объединенный институт высоких температур РАН (125412, Россия, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2). E-mail: tkachenko@phystech.edu. SPIN-код РИНЦ 8352-8420, Author ID 108014