

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ И ЭЛЕКТРОФИЗИКА

УДК 533.9

СТРУКТУРА ТОКА ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ
ТОНКИХ ПРОВОДНИКОВ

А. Г. Мозговой, А. В. Огинов, И. Н. Тиликин, К. В. Шпаков

Представлены результаты экспериментов по измерению магнитного поля от азимутальной составляющей тока при взрыве тонких проволок при сильноточных импульсах. Разряд возбуждался высоковольтными импульсами напряжения 20 кВ, 500 нс, с током до 8 кА. Приведены лазерные, рентгеновские тенеграммы и из других похожих экспериментов. Дано объяснение появления страт в таких разрядах появлением винтовой составляющей тока в разряде, что, в свою очередь, ведет к разбиению плазменного столба разряда на страты под действием сил Ампера между возникшими витками с током.

Ключевые слова: взрывающиеся проволочки, физика плазмы, стратификация.

Взрывающие под воздействием электрического тока проводники (проволочки, фольги) давно исследуются как экспериментально, так и теоретически. Одним из свойств таких взрывов является образование страт – чередующихся полос как при просвечивании лазерным излучением, так и при использовании теневой рентгенографии [1–3]. На рис. 1 приведены характерные изображения взрыва проволок. Изображения получены как с помощью теневого лазерного зондирования [4] (рис. 1(а)), так и с помощью проекционной рентгенографии [5] (рис. 1(б),(в)). Также удается наблюдать страты на установках с широким диапазоном параметров тока от нескольких килоампер [6] до мегаампер [7], со временем нарастания тока от 100 нс до нескольких микросекунд.

В некоторых работах, например [8], уже отмечалось, что в “момент начала взрыва” образуется мелкомасштабная структура, напоминающая “винтовую нарезку”, однако

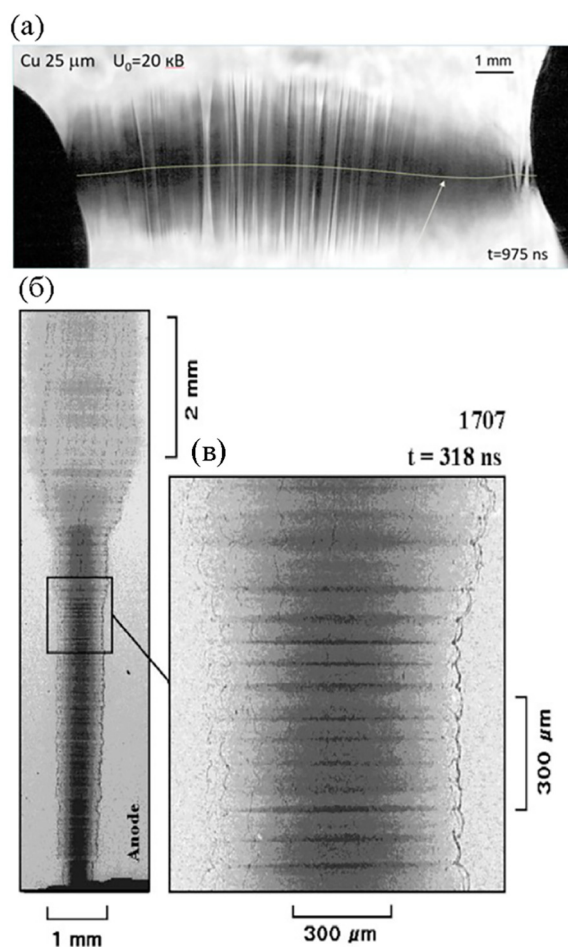


Рис. 1: Теневое изображение (а) взрыва медной проволоочки диаметром 25 мкм и тенеграмма (б), и ее увеличенный фрагмент (в) взрыва серебряной проволоочки диаметром 25 мкм в рентгеновском излучении X-пинча.

приведенное объяснение заключается в зарождении турбулентности. В данной работе приводится описание механизма образования страт из подобных структур.

При электрическом взрыве диаметр проволоочки увеличивается в десятки раз, что должно вести к уменьшению ее индуктивности, поскольку она логарифмически уменьшается с ростом диаметра проводника. Предполагается, что происходит обратное – в образованной плазме носители заряда начинают закручиваться в спирали, создавая винтообразную “соленоидальную” форму, увеличивая индуктивность цепи разряда. Таким образом, ток разряда должен состоять из двух главных составляющих – прямолинейного тока на месте исходной проволоочки, создающего круговое магнитное поле, и винтообразного тока, создаваемого электронами, движущихся по силовым линиям

такого магнитного поля. На рис. 2 приведено схематичное изображение возникающих токовых каналов.

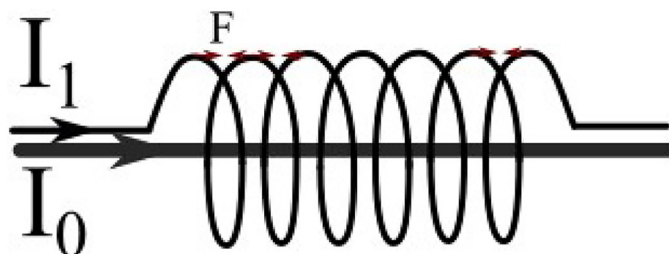


Рис. 2: Характерные токовые каналы в случае протекания тока прямолинейно (I_0) и винтообразно (I_1). F – направление силы, возникающей между витками тока.

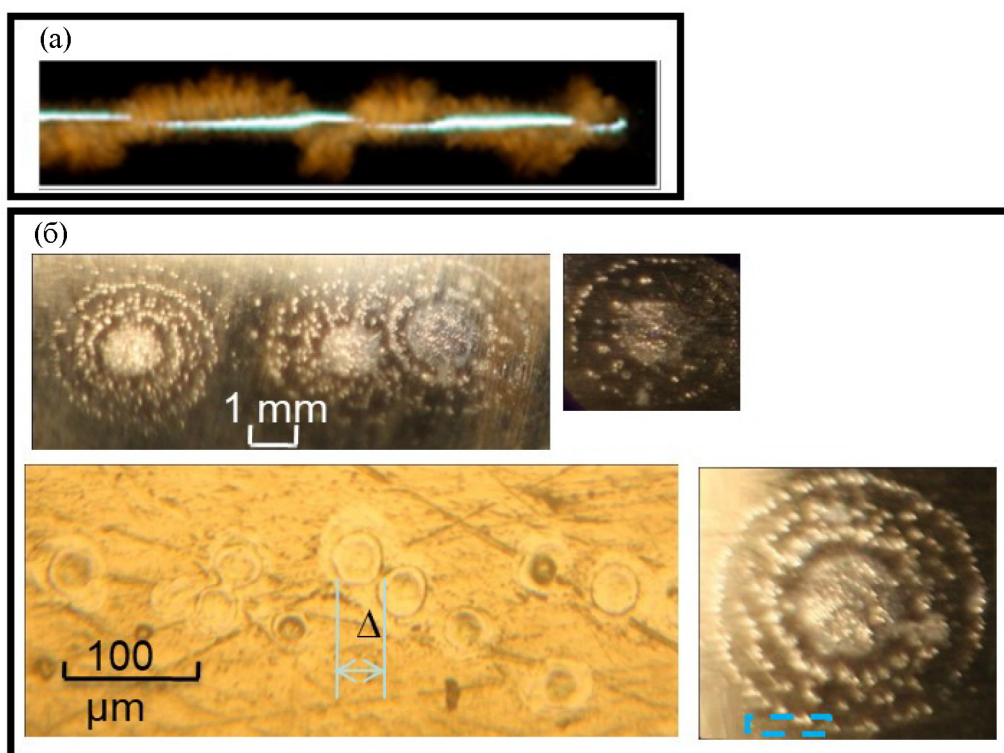


Рис. 3: Интегральная фотография взрыва медной проволочки диаметром 130 мкм длиной 700 мм на воздухе в зазоре сильноточного генератора ЭРГ (а) и поверхность анода-шара ($D = 90$ мм) из нержавеющей стали после нескольких разрядов в воздухе (1 МВ, ~ 14 кА, ~ 50 см), полученные с помощью фотоаппарата с макрообъективом, а также микроскопа (б).

Как известно, однонаправленные токи притягиваются, поэтому между витками возникают силы притяжения, отмеченные на рис. 2 буквой F . Это ведет к разбиению образовавшейся плазмы на так называемые “страты”. Таким образом возникает филаментация тока в продольном направлении в осесимметричной геометрии, что ведет к образованию микросолоноида, который способен запастись магнитную энергию. В момент спада общего тока до нуля часть этой энергии может оставаться в соленоиде в режиме закорачивания начала и конца обмотки. Экспериментальное изображение взрыва проволоочки, иллюстрирующее вышесказанное, было получено на генераторе ЭРГ (14 кА, 1 МВ). На рис. 3(а) приведены интегральные изображения электровзрыва медной проволоочки диаметром 130 мкм и длиной 500 мм. На данном изображении видно образование плазмы, закрученной “винтом” вокруг проволоочки. На рис. 3(б) приведены изображения анода-шара ($D = 90$ мм) из нержавеющей стали после нескольких разрядов в воздухе, полученные с помощью фотоаппарата с макрообъективом, а также микроскопа, на которых видно образование кольцевых структур.

Измерять винтовой ток можно, измеряя распределение магнитных полей в непосредственной близости от взрывающегося проводника. Подобные эксперименты были выполнены на установке “Ангара” [9], где в экспериментах по измерению распределения магнитных полей проволоочными лайнерами уже были обнаружены различные составляющие, включая азимутальные.

Для подтверждения предположения были проведены эксперименты на генераторе для исследования взрывающихся проволоочек ГВП с максимумом напряжения до 20 кВ, током до 8 кА и временем нарастания тока 350 нс. На рис. 4 приведена схема эксперимента и нагрузки.

Генератор состоит из конденсаторной батареи и разрядника, подключаемых низкоиндуктивными подводами к нагрузке. Для контроля тока используются пояса Роговского. Для измерения компоненты магнитного поля вдоль поверхности взорванной проволоочки использовались катушки из нескольких витков (3 и 6 на рис. 4), намотанные на изолятор (5 на рис. 4) и расположенные таким образом, чтобы взрывающаяся проволоочка (4 на рис. 4) проходила по нормали к поверхности витка в катушке. В отличие от поясов Роговского магнитный поток не пересекает площадь витка и сигнал от продольного тока через проволоочку будет мал (из-за невозможности точно расположить плоскость витков катушки перпендикулярно проволоочке). Появление азимутального тока будет вызывать усиление сигнала. Фактически это работает как трансформатор, где роль первичной обмотки играет азимутальный ток.

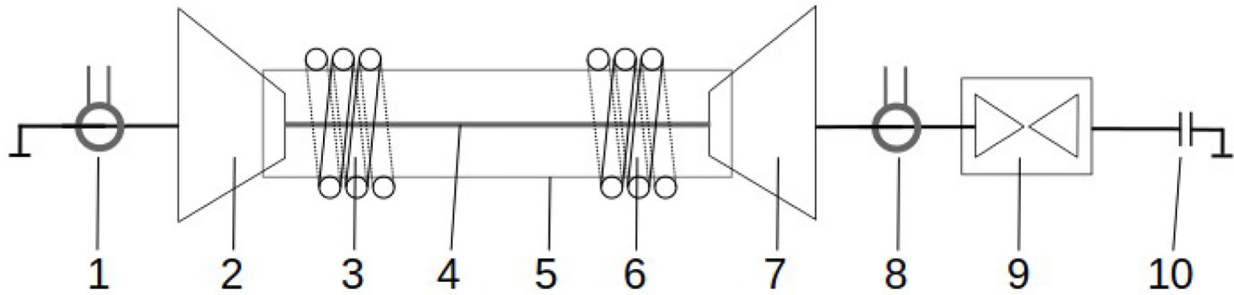


Рис. 4: Схема эксперимента по измерению компоненты магнитного поля вдоль взрывающейся проволочки на генераторе ГВП: 1, 8 – пояса Роговского; 2 – катод; 3, 6 – катушки измерения магнитного поля вдоль проволочки; 4 – взрывающаяся проволочка; 5 – изоляционный цилиндр диаметром 10 мм; 7 – анод; 9 – разрядник; 10 – конденсатор 0.2 мкФ, 20 кВ.

Применение измерительной катушки ведет к необходимости использования прочной электрической изоляции на катушке. Это ведет к увеличению геометрических размеров как самой катушки, так и длины взрывающейся проволочки. Вместо обычной длины 1 см взрывающейся проволочки мы использовали 3–4 см. Это привело к необходимости увеличения энергозапаса конденсаторной батареи до 0.2 мкФ (10 на рис. 4).

Первые эксперименты проведены с использованием накоротко замкнутого межэлектродного промежутка. Характерные сигналы приведены на рис. 5(а). Калибровка катушек не производилась, поэтому стоит рассматривать лишь относительные амплитуды и формы сигналов. Из рис. 5 видно, что в данном случае азимутальная составляющая если и есть, то ее вклад минимален и форма сигнала совпадает с сигналами тока с пояса Роговского.

В случае взрыва медной проволочки (см. рис. 5(б)), для которой характерно образование страт, видно, что после окончания общего тока в цепи, когда сигнал 1 на рис. 5(б) уходит в ноль, сигналы с катушек 3 и 6 (сигнал 3 и 2) продолжают существовать и имеют характерный вид экспоненты с показателем L/R . Это говорит о наличии замкнутых витков с током на месте взорвавшейся проволочки. При этом видна разница сигналов с разных датчиков, так как они расположены на разном расстоянии от катода и анода. Наличие сигнала в катушках после окончания общего тока говорит о наличии замкнутых витков с током на месте взорвавшейся проволочки.

В следующей серии экспериментов для измерения азимутального тока была использована также одиночная петля диаметром 3 мм в изоляции, располагаемая в непосред-

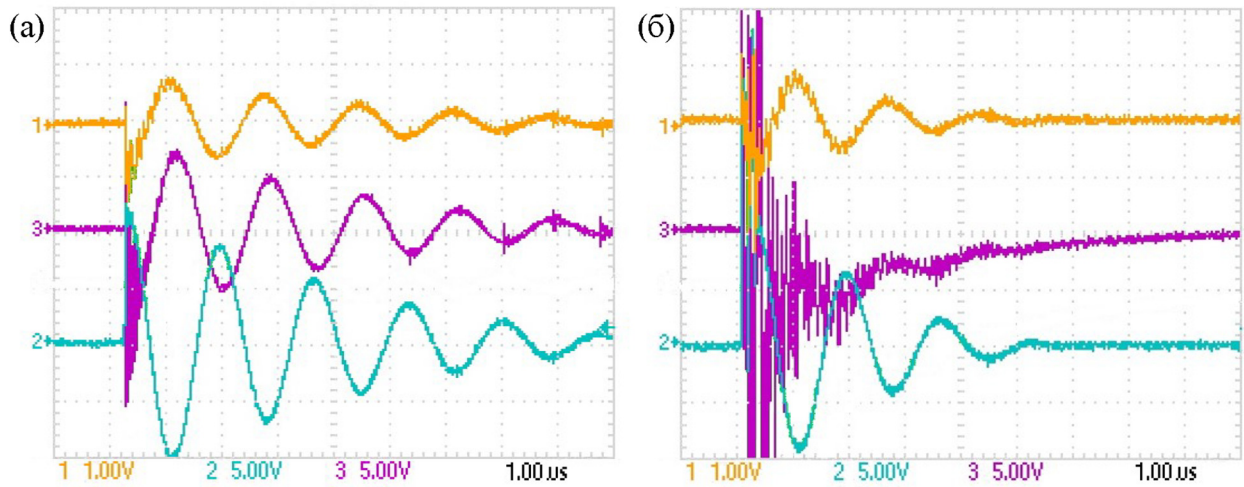


Рис. 5: Характерные сигналы с пояса Роговского (1) и катушек вокруг взрывающейся проволочки (2 и 3) в положениях 3 и 6 на рис. 4, соответственно: (а) сигналы с датчиков с закороткой между катодом и анодом, (б) сигналы в случае взрыва медной проволочки.

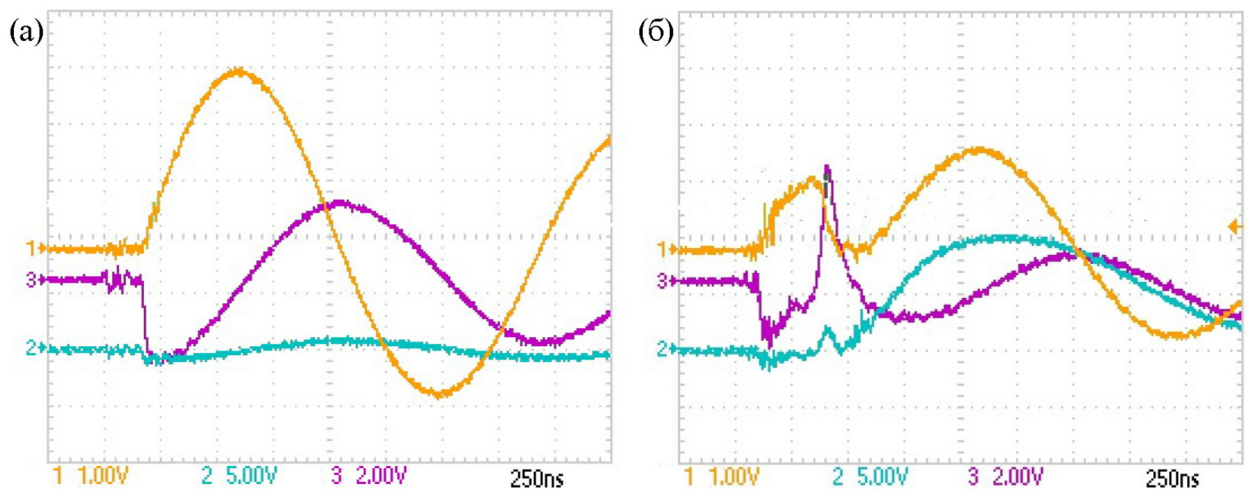


Рис. 6: Характерные сигналы токоизмерительного шунта (1) и маленьких петель для измерения азимутальной составляющей тока рядом со взрывающейся проволочкой (2 и 3): (а) сигналы с датчиков с закороткой между катодом и анодом, (б) в случае взрыва медной проволочки.

ственной близости от взрывающейся проволочки. При этом плоскость петли ориентирована поперек оси проволочки таким образом, чтобы чувствовать лишь азимутальную

составляющую тока. Характерные сигналы приведены на рис. 6. Калибровка петель также не производилась, поэтому стоит сравнивать только относительную амплитуду и форму сигналов. При этом между разными выстрелами положение петель не менялось и положение закоротки (толстой проволоочки) и тонкой проволоочки также не менялось. Видно (рис. 6(а)), что в случае закоротки сигнал с петель практически отсутствует, что говорит о правильном расположении петли. В случае взрыва проволоочки (рис. 6(б)) сигналы с петель увеличиваются по амплитуде, при этом видно, что скачок сигнала наблюдается в момент спада тока через проволоочку. Как раз в этот момент происходит активное стратообразование. На одной из петель (рис. 6(б) 2) видно, что сигнал не меняет полярность при изменении полярности общего тока, что также свидетельствует о наличии замкнутых токовых витков.

Такое же распределение тока характерно не только для взрывающихся проволочек, но и для фольг. Подобные картины образования страт наблюдались при взрыве фольги [10], снятые в двух взаимно-перпендикулярных проекциях, на сильноточном генераторе МИГ 1, расположенном в Институте Сильноточной электроники РАН (г. Томск). Максимум тока 1 МА, время нарастание тока 100 нс. При этом было показано, что со временем количество страт уменьшается, что и свидетельствует о механизме притяжения между стратами.

Из приведенных измерений можно сделать предположение, что ток в проводнике имеет винтообразный характер. Подобное течение тока между катодом и анодом препятствует его пинчеванию к оси разряда, это ведет к переоценке возможностей Z -pinch установок, таких как Z -machine и Ангара.

Далее произведена оценка тока, запасаемого в витках с током. Движение заряженной частицы с энергией E и зарядом e в магнитном поле B по окружности с радиусом R описывается уравнением

$$evB = mv^2/R, \quad (1)$$

из которого следуют соотношения для произведения B на радиус кривизны траектории R :

$$B * R = mv/e. \quad (2)$$

В ускорительной технике это называется “жесткостью” магнитной системы, зависящей только от энергии (импульса) частицы.

Энергию движущейся частицы можно выразить формулой:

$$E = mv^2/2, \quad (3)$$

подставляя выражение скорости движения из (3) в (2), получим:

$$B * R = \sqrt{2mE/e}. \quad (4)$$

На рис. 7 приведена зависимость (4) “жесткости” магнитной системы $B * R$ для электронов низких энергий.

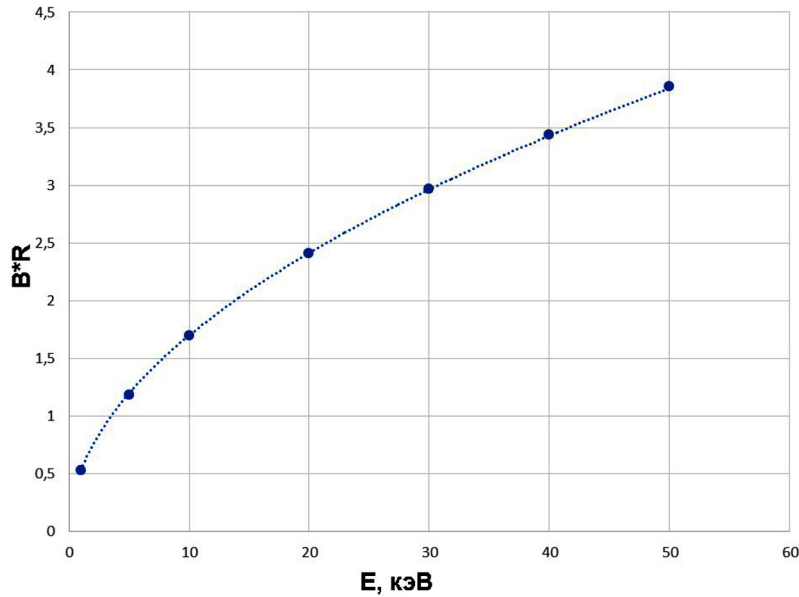


Рис. 7: Зависимость жесткости магнитной системы $B * R$ от энергии электронов.

Магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля H соотношением $B = \mu_0 H$, где $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ Гн/м. Для прямолинейного проводника с током: $H = I/2\pi R$, таким образом получаем $B * R = 2 * 10^{-7} * I$, где I – ток в амперах.

Измеряя в эксперименте в какой-либо момент ток, а затем и радиус расширенного изображения, можно вычислить энергию электронов, являющихся основными переносчиками заряда.

Для значений, характерных для наших экспериментов, R в сотни микрон прямолинейный ток I будет достигать сотен ампер, а это означает, что большая часть общего тока имеет винтообразную структуру, приводящую к росту индуктивности цепи.

Заключение. В работе показано наличие азимутальной составляющей тока в случае взрыва тонких проводников. Сделано предположение, что появление страт в таких разрядах вызвано именно появлением винтовой составляющей тока в разряде, что, в свою очередь, ведет к разбиению плазменного столба разряда на страты. Это, в свою очередь, ограничивает возможности использования Z -пинчей для линейного пинчевания

тока с целью получения высокотемпературной плазмы выше нескольких кэВ (хорошо для получения рентгена), но недостаточно для термоядерных исследований.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] R. B. Baksht, S. I. Tkachenko, V. M. Romanova, et al., *Technical Physics* **58**, 1129 (2013). DOI: 10.1134/S1063784213080021.
- [2] В. М. Романова, А. Р. Мингалеев, А. Е. Тер-Оганесян и др., *ВАНТ* 1(83), 284 (2013).
- [3] А. В. Агафонов, И. С. Байдин, А. В. Огинов и др., Книга абстрактов XLIV Международной Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, стр. 243 (2017).
- [4] T. A. Shelkovenko, D. B. Sinars, S. A. Pikuz, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 667 (2001). DOI: 10.1063/1.1323252.
- [5] H. Liu, X. Guo, X. Pang, et al., *AIP Advances* **12**(6), 065210 (2022). DOI: 10.1063/5.0095749.
- [6] S. A. Chaikovsky, I. M. Datsko, N. A. Labetskaya, et al., *Physics of Plasmas* **29**(10), 103501 (2022).
- [7] Н. Б. Волков, А. М. Искольдский, *Письма в ЖЭТФ* **51**(11), 560 (1990).
- [8] И. В. Глазырин, А. В. Карпеев, Е. В. Грабовский и др., *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез* (2), 67 (2009).
- [9] S. A. Chaikovsky, I. M. Datsko, N. A. Labetskaya, et al., *Physics of Plasmas* **29**(10), 103501 (2022). DOI: 10.1063/5.0098206.

Поступила в редакцию 16 октября 2024 г.

После доработки 6 ноября 2024 г.

Принята к публикации 7 ноября 2024 г.