

МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 533.9

**ОБ ОДНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ
ИНДУКЦИОННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В УСТАНОВКЕ ТС-3DM**А. Г. Франк¹, И. Р. Нугаев¹, Д. В. Суходолова^{1,2}

Рассмотрена возможность локального увеличения индукционного электрического поля тэта-разряда, что существенно для создания плазмы в сильном магнитном поле. Показано, что при концентрации тока в части соленоида тэта-разряда электрическое поле должно возрастать. Для этого необходимо отключение большей части витков соленоида.

Ключевые слова: токовый слой, плазма, эксперимент, численное моделирование, тэта-разряд, соленоид, индукционное электрическое поле, пробой газа.

Введение. Для осуществления в лабораторной плазме процессов вспышечного типа на основе эволюции токовых слоёв требуется тщательный подбор начальных условий, в которых происходит формирование токового слоя. Это связано как с необходимостью выполнения условия вмороженности магнитного поля в вещество [1], так и с обеспечением условий для разрыва слоя [2], т. е., собственно, для реализации процесса вспышки. Таким образом, при исследовании структуры и динамики токовых слоев необходимо варьировать начальные условия в достаточно широком диапазоне.

В экспериментах с использованием установок “Токовый слой” [3] начальные условия включают: структуру квазистационарных 2D или 3D магнитных полей с особой линией X-типа; давление и род газа, наполняющего вакуумную камеру, и, соответственно, концентрацию и массовый состав начальной плазмы; метод создания плазмы; амплитуду электрического тока в слое.

Одна из основных проблем состоит в создании начальной плазмы нужной концентрации в сильном неоднородном магнитном поле с особой линией X-типа, для чего

¹ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: gfnov@mail.ru.

² НИЯУ “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

используется пробой нейтрального газа с помощью высоковольтного тэта-разряда. При этом магнитное поле препятствует пробое, и в результате начальная плазма может быть создана лишь в ограниченном диапазоне начальных условий. Как показали предыдущие эксперименты [4], диапазон начальных условий кардинально зависит от напряженности электрического поля тэта-разряда E_Θ и существенно расширяется с ростом E_Θ [5].

Очевидно, что увеличение E_Θ возможно при локализации пробоя не во всём объеме вакуумной камеры, а в некоторой её части так, чтобы вся энергия, предварительно запасенная в накопителе тэта-разряда, была сосредоточена в меньшем объёме. Однако вопрос о том, можно ли таким образом увеличить E_Θ при существующих технических и конструктивных параметрах установки ТС-3DM [6] оставался открытым.

Для выяснения этого вопроса в данной работе были проведены непосредственные измерения электрического поля при различных вариантах включения тэта-разряда, а также выполнены численные расчеты в условиях, максимально приближенных к экспериментальным. Это позволило дать трактовку полученным результатам и, главное, сформулировать предложения, направленные на увеличение электрического поля тэта-разряда в последующих экспериментах.

Установка “Токовый слой” ТС-3DM. Исходная магнитная конфигурация с особой линией X-типа на оси z :

$$\mathbf{B} = \{h \cdot y; h \cdot x; B_z^0\} \quad (1)$$

формируется в установке ТС-3DM [6] путем суперпозиции двух квазистационарных магнитных полей, обладающих различными типами симметрии. 2D магнитное поле с нулевой линией на оси z , магнитными силовыми линиями в плоскости (x, y) и градиентом $h \leq 1.0$ кГс/см возбуждается с помощью токов в системе прямых проводников, параллельных оси z . Аксиально-симметричное магнитное поле $B_z^0 \leq 8.0$ кГс возбуждается с помощью токов в шести одинаковых соосных катушках.

Особая линия магнитного поля (1) совмещена с осью цилиндрической кварцевой вакуумной камеры диаметром 18 см и длиной 100 см, как показано на рис. 1. После предварительной откачки камера заполняется одним из исследуемых газов (Ar, He, Kr или Xe) до давления $10^{-3} \div 10^{-1}$ Торр. Начальная плазма с концентрацией $N_e \approx 10^{14} \div 10^{16}$ см $^{-3}$ создается в магнитном поле (1) при пробое нейтрального газа электрическим полем тэта-разряда E_Θ , рис. 1. Для облегчения пробоя используется предварительная ионизация газа, которая осуществляется четырьмя плазменными инжекторами.

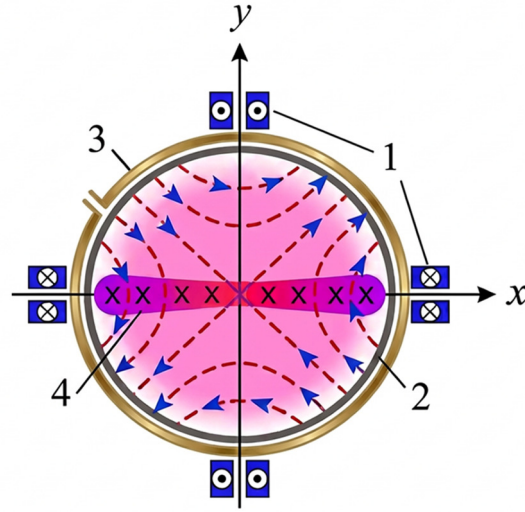


Рис. 1: Схема установки TC-3DM, поперечное сечение. 1 – проводники с токами для возбуждения 2D магнитного поля с нулевой линией на оси z ; силовые линии поля показаны штриховыми линиями со стрелками; 2 – вакуумная камера; 3 – соленоид тэта-разряда; 4 – токовый слой.

Затем между двумя электродами, расположенными у торцов вакуумной камеры на расстоянии 60 см друг от друга, включается импульсное напряжение $U_z \approx 10$ кВ, что приводит к возбуждению в подготовленной плазме электрического тока J_z . Зависимость тока от времени близка к синусоидальной $J_z \approx J_z^0 \sin(\omega t) e^{-\delta t}$ с полупериодом $T/2 \approx 6$ мкс и амплитудой $J_z^0 \approx 46 \div 50$ кА. В результате возбуждения тока J_z происходит деформация исходной магнитной конфигурации (1) и формируется токовый слой.

Система тэта-разряда для создания начальной плазмы. Соленоид тэта-разряда длиной $L_z \approx 46$ см расположен непосредственно у внешней поверхности вакуумной камеры, рис. 1. Соленоид состоит из 12 соединенных параллельно витков диаметром 20 см, ширина каждого витка $\Delta z = 2$ см, зазор между соседними витками также 2 см. Витки подсоединены к двум шинам, на которые с помощью трёх параллельных двухпроводных подводов подается напряжение от батареи конденсаторов и разрядника, рис. 2.

При включении разрядника в витках соленоида возникает электрический ток, создающий в вакуумной камере магнитное поле $B_z(r, z, t)$ и вихревое азимутальное электрическое поле $E_\Theta(r, z, t)$, величина которого максимальна у стенки камеры. Поле E_Θ используется для пробоя нейтрального газа и создания начальной плазмы, а напряже-

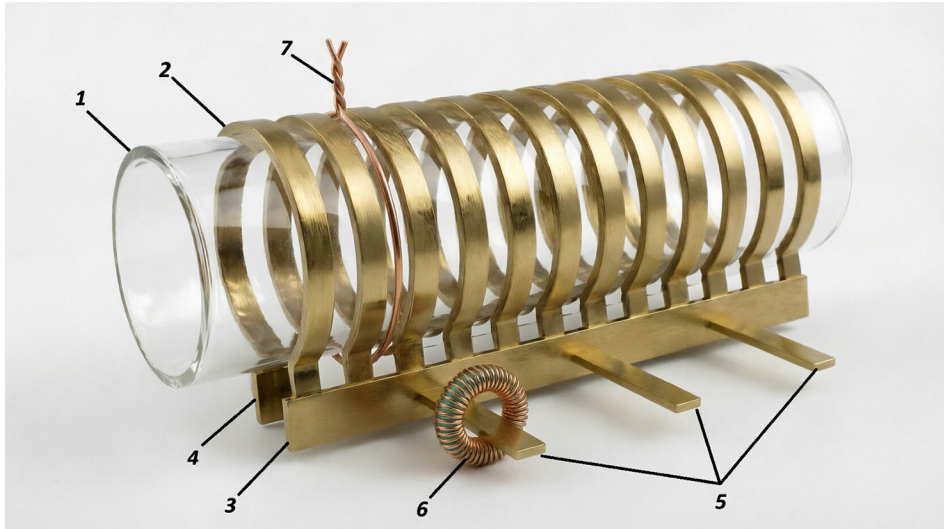


Рис. 2: Конструкция тэта-разряда установки TC-3DM. (1) вакуумная камера; (2) соленоид тэта-разряда; (3), (4) плоские шины, соединяющие витки соленоида; (5) три двухпроводных подвода, соединяющих соленоид с разрядником; (6) пояс Роговского; (7) виток для измерения напряжения на обходе камеры.

ние U_c у стенки согласно закону Фарадея определяется скоростью изменения потока магнитного поля в сечении камеры:

$$U_c(z, t) = \oint E_\Theta(r, z, t) dl = -1/c \{ \partial/\partial t [2\pi \int B_z(r, z, t) r dr] \} \quad 0 \leq r \leq R_c, \quad (2)$$

где R_c – радиус вакуумной камеры.

На рис. 1 показаны силовые линии 2D магнитного поля, откуда видно, что наряду с областями, где направление электрического поля E_Θ совпадает с направлением магнитного поля, имеются области, в которых поле E_Θ направлено перпендикулярно магнитному полю. Это существенно затрудняет пробой газа даже при создании предварительной ионизации, поэтому весьма актуальна проблема увеличения поля E_Θ .

Моделирование магнитных полей соленоида тэта-разряда. Из элементарных расчетов следует, что если в соленоиде тэта-разряда весь ток протекает не в 12-ти параллельно включенных витках, а в 4-х витках, расположенных на одной трети длины, то в этой части соленоида магнитное поле в приосевой области (с учетом конечной длины обоих соленоидов) возрастает более, чем в два раза. В этой области должен увеличиться поток магнитного поля и электрическое поле E_Θ .

Распределения магнитных полей, создаваемых соленоидами из 12-ти и 4-х витков, рассчитывались численными методами на языке Python с использованием модуля

scipy.special для вычисления эллиптических интегралов, см., напр., [7]. Поток магнитного поля в пределах вакуумной камеры был получен численным интегрированием, которое проводилось методом трапеций.

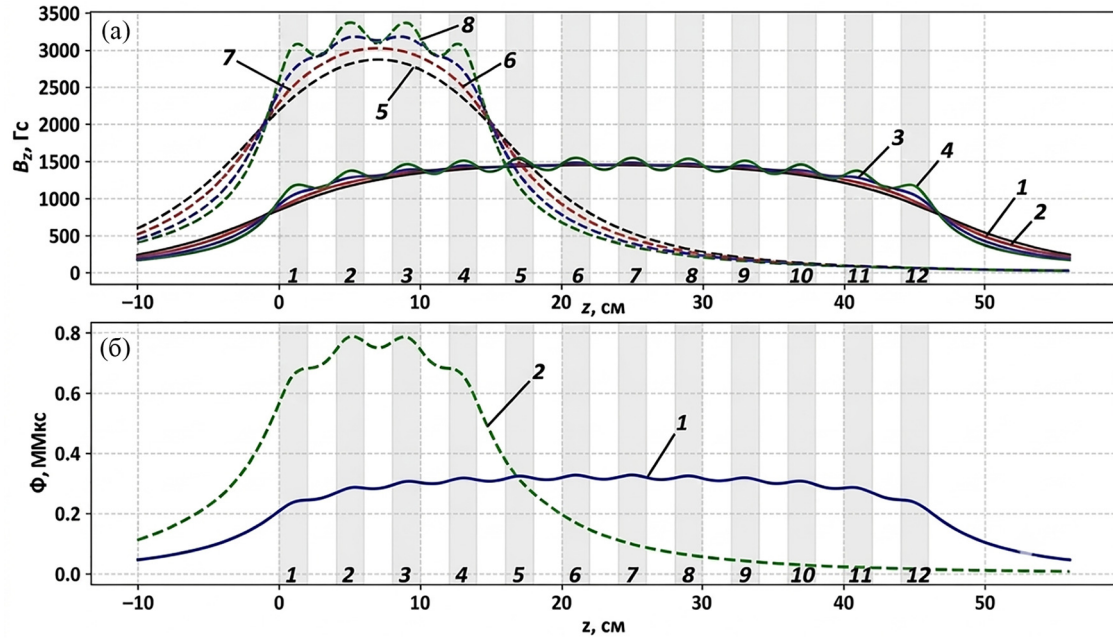


Рис. 3: (а) зависимости аксиальной B_z компоненты магнитного поля соленоида тэта-разряда от координаты z для нескольких радиусов, для двух случаев. Сплошные линии (1 – 4) – в соленоиде 12 витков; пунктирные линии – в соленоиде 4 витка. В обоих случаях ток тэта-разряда $J_\Theta = 60$ кА распределён равномерно по виткам соленоида. (1), (5) – $r = 0$; (2), (6) – $r = 5$ см; (3), (7) – $r = 7$ см; (4), (8) – $r = 8$ см; (б) распределения магнитного потока в пределах вакуумной камеры для соленоидов из 12-ти витков (1) и из 4-х витков (2), при равномерном распределении тока $J_\Theta = 60$ кА по виткам соленоида.

На рис. 3(а) приведены зависимости аксиальной компоненты магнитного поля B_z вдоль оси z для нескольких радиусов при суммарном токе тэта-разряда $J_\Theta = 60$ кА. Вычисления $B_z(z)$ проводились для двух случаев: ток распределен равномерно либо по всем 12-ти виткам соленоида, по 5 кА (кривые 1-4), либо только по первым 4-м виткам слева, по 15 кА (кривые 5-8). В первом случае магнитное поле составляло $B_z \approx 1.5$ кГс в центральной области соленоида, и было практически однородным в пределах ≈ 36 см вдоль оси системы. Во втором случае на левом краю возникал локальный максимум $B_z \geq 3$ кГс, но магнитное поле становилось существенно неоднородным.

Затем для обоих случаев вычислялся поток магнитного поля в пределах вакуумной камеры, рис. 3(б). В варианте 4-х витков максимальное значение магнитного потока составляло (0.75 ± 0.02) ММкс, что более, чем в 2 раза превышало магнитный поток в случае 12-ти витков (0.35 ± 0.01) ММкс. Таким образом, при уменьшении числа витков и том же суммарном токе должно происходить значительное увеличение магнитного потока в локальной области и увеличение электрического поля E_Θ .

Экспериментальные результаты при различных вариантах тэта-разряда. Для апробации предложенного способа локального увеличения поля E_Θ был поставлен предварительный эксперимент. Основные конструктивные особенности установки ТС-3DM оставались неизменными, но при этом можно было отключать два из трёх двухпроводных подводов, соединяющих соленоид с разрядником и батареей конденсаторов. Предполагалось, что частичное отключение подводов могло бы обеспечить увеличение тока в части соленоида и, соответственно, привести к локальному увеличению магнитного потока и усилению индукционного электрического поля тэта-разряда.

Напряжение (2) у внешней стенки камеры, возникающее при возбуждении тока тэта-разряда, регистрировалось с помощью измерительного витка, который охватывал камеру снаружи. Напряжение $U_c(t)$ поступало на делитель напряжения (1:1300) и затем на цифровой осциллограф. Ток тэта-разряда регистрировался поясом Роговского с интегрирующей L/R цепочкой и делителем напряжения (1:80).

В стандартном режиме, когда ток тэта-разряда протекал равномерно по всем 12-ти виткам соленоида, и амплитуда тока была $J_\Theta \approx 57.3$ кА, амплитуда напряжения на обходе вакуумной камеры, в области между 2-м и 3-м витками соленоида, составляла $U_c \approx (4.1 \pm 0.2)$ кВ.

Затем были отключены два из трёх подводов, соединявших соленоид с разрядником, что привело к увеличению индуктивности и уменьшению частоты колебательного контура тэта-разряда. В результате произошло уменьшение амплитуды тока до значения $J_\Theta \approx 43.5$ кА. Можно было ожидать, что этот ток будет протекать преимущественно в 4-х витках на левом краю соленоида, и при этом увеличится как магнитный поток, так и напряжение U_c в районе расположения измерительного витка. Однако этого не произошло: амплитуда напряжения не выросла и осталась на том же уровне $U_c \approx (4.0 \pm 0.3)$ кВ. Отсюда можно было сделать вывод, что, несмотря на частичное отключение подводов к соленоиду, ток тэта-разряда не был сосредоточен только в 4-х витках на левом краю соленоида, но протекал также и в остальных витках.

Эта версия была подтверждена в результате измерения напряжения на правом краю соленоида, между 10-м и 11-м витками. Хотя в этой области амплитуда напряжения U_c оказалась меньше, чем на левом краю, она составила заметную величину $U_c \approx (2.0 \pm 0.3)$ кВ, что указывало на присутствие токов во всех витках соленоида. При этом амплитудные значения U_c на обоих краях соленоида достигались практически в один и тот же момент времени.

Отсюда следовало, что в разных витках соленоида величины токов различались, т.е. распределение тока было неравномерным. Очевидно, что структура магнитного поля и величина магнитного потока значительно отличались от тех значений, которые были рассчитаны для случая, когда весь ток тэта-разряда сосредоточен в 4-х витках соленоида, см. выше, рис. 3(а),(б).

Моделирование магнитных полей тэта-разряда с неравномерным распределением тока. Магнитное поле, создаваемое тэта-разрядом при неравномерном распределении тока по виткам соленоида, численно рассчитывалось следующим образом. Величины токов в каждом из витков характеризовались коэффициентами k , которые различались для разных витков. Считалось, что $k = 1$ для витков №№ 1-4, тогда как для витка № 10, в соответствии с результатом эксперимента $k = 0.46$. Для остальных витков значения k вычислялись методом линейной интерполяции. Полученное в результате распределение тока по виткам соленоида показано на рис. 4(а),(б) в виде ступенчатой линии при суммарном токе тэта-разряда 45 кА.

На рис. 4(а) показаны зависимости аксиальной компоненты магнитного поля $B_z(z)$ для трёх радиусов, рассчитанные при неравномерном распределении тока тэта-разряда (45 кА) по 12-ти виткам соленоида, в соответствии с коэффициентами k . Для сравнения показаны также зависимости $B_z(z)$ при равномерном распределении тока (60 кА) по 12-ти виткам. Как и следовало ожидать, эти распределения значительно отличаются друг от друга. Однако именно в области между вторым и третьим витками, где измерялось напряжение U_c , величины магнитных полей практически совпадают для обоих случаев $B_z \approx 1.3$ кГс.

Аналогичные выводы следуют из сопоставления потоков магнитного поля в пределах вакуумной камеры, которые вычислялись при неравномерном и равномерном распределениях тока тэта-разряда. Хотя распределения магнитных потоков в z -направлении сильно различаются, но в той области, где измерялось U_c , величины потоков имеют одинаковые значения ≈ 0.30 ММкс.

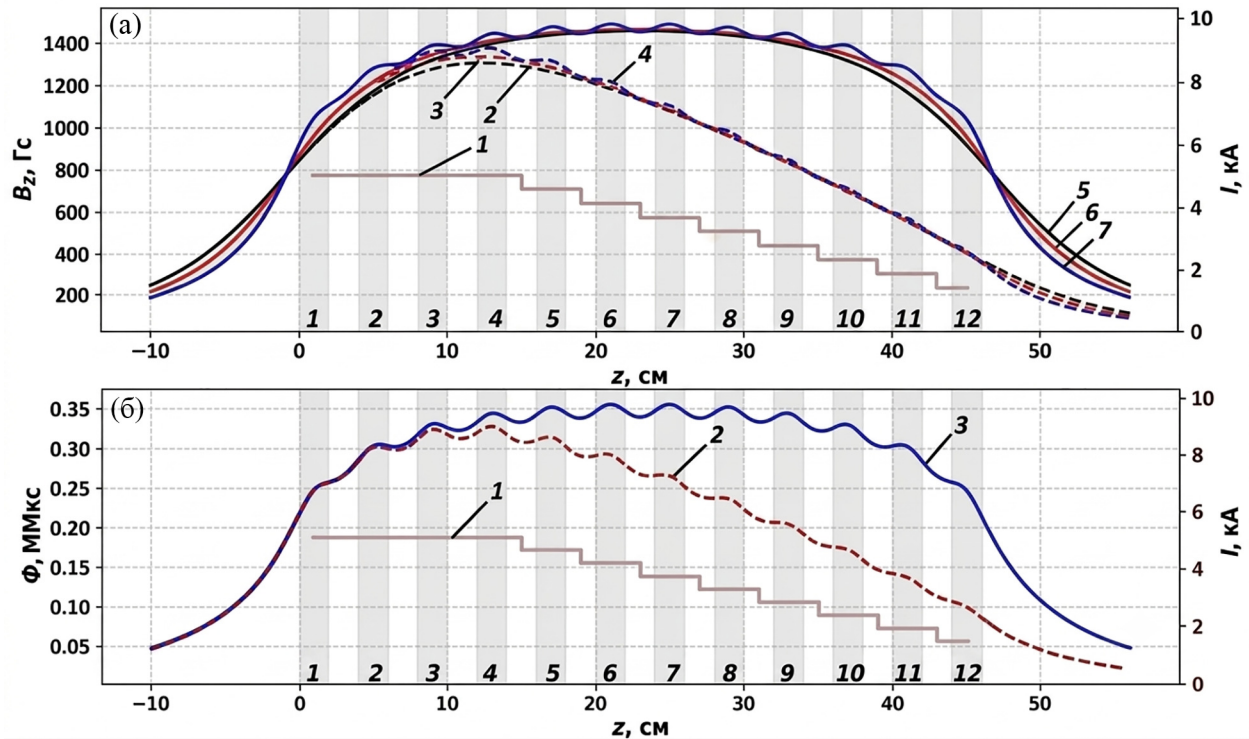


Рис. 4: (а) распределение тока тэта-разряда $J_\Theta = 45$ кА по 12-ти виткам соленоида, рассчитанное пропорционально коэффициентам k (1), и соответствующие зависимости аксиальной B_z компоненты магнитного поля от координаты z для нескольких радиусов, пунктирные линии (2 – 4); зависимости $B_z(z)$ при равномерном распределении тока $J_\Theta = 60$ кА по виткам соленоида, сплошные линии (5 – 7). (2), (5) – $r = 0$; (3), (6) – $r = 5$ см; (4), (7) – $r = 7$ см; (б) распределение тока тэта-разряда $J_\Theta = 45$ кА по 12-ти виткам соленоида, рассчитанное пропорционально коэффициентам k (1), соответствующая зависимость магнитного потока в пределах вакуумной камеры пунктирная линия (2), а также магнитный поток при равномерном распределении тока $J_\Theta = 60$ кА по виткам соленоида, сплошная линия (3).

Отсюда следует, что результаты численного моделирования позволяют объяснить экспериментальные результаты, полученные при различных модификациях системы тэта-разряда, и находятся в хорошем согласии с результатами измерения индукционного электрического поля.

Выводы. Результаты расчетов показывают, что при концентрации электрического тока в некоторой части, а не во всех витках соленоида тэта-разряда, возможно значительное локальное увеличение индукционного электрического поля, что имеет важное

значение для пробоя нейтрального газа и создания начальной плазмы в установке ТС-3DM.

Результаты предварительных экспериментов, проведенных при сохранении основных конструктивных особенностей установки, не позволили зарегистрировать этот эффект. Дополнительные измерения указывали, что, по всей вероятности, ток тэта-разряда не был сосредоточен в части соленоида, а протекал по всему соленоиду, при этом распределение тока по виткам было неравномерным.

Численное моделирование магнитного поля тэта-разряда с неравномерным распределением тока подтвердило эту версию, и, что существенно, было получено количественное согласие с результатами измерений индукционного электрического поля при различных модификациях системы тэта-разряда.

Отсюда следует, что для реального увеличения индукционного электрического поля необходимо изменение конструкции, а именно, надежное отключение большей части витков соленоида тэта-разряда.

Данное исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 10 “Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика”. Этап 2026-2027.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. И. Сыроватский, *Астрономический журнал* **43**, 340 (1966).
- [2] S. I. Syrovatskii, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **19**(1), 163 (1981). DOI: 10.1146/annurev.aa.19.090181.001115.
- [3] А. Г. Франк, *УФН* **195**(8), 875 (2025). <https://doi.org/10.3367/UFNr.2025.03.039938>.
- [4] А. Г. Франк, *Тр. ФИАН* **74**, 108 (1974).
- [5] Ю. П. Райзер, *Физика газового разряда* (М., Физматлит, 1987).
- [6] А. Г. Франк, Н. П. Кирий, С. А. Савинов и др., *Астрономический журнал* **101**(4), 366 (2024). DOI: 10.31857/S0004629924040075.
- [7] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред* (М., Физматлит, 2005).

Поступила в редакцию 21 мая 2026 г.

После доработки 13 июня 2026 г.

Принята к публикации 14 июня 2026 г.