

Взаимодействие прямого плазменного шнура с переменным магнитным полем квадрупольной конфигурации

Д. В. Орлинский

С помощью простейших методов исследуется взаимодействие прямого плазменного шнура с током до 4 ка с высокочастотным (~1,3 Мгц) квадрупольным магнитным полем (~100 э).

Длинноволновые возмущения прямого или тороидального самосжатого разряда можно стабилизировать, как это впервые показал С. М. Осовец [1] (см. также [2]), с помощью высокочастотного поперечного магнитного поля. Это поле может быть создано системой токов, текущих через два, четыре или более прямых стержней, и иметь соответственно дипольную, квадрупольную или еще более сложную конфигурацию. Действие такого поля на плазменный шнур, удерживаемый в сжатом состоянии извне протекающего через него тока, до некоторой степени аналогично действию магнитного поля с переменным в пространстве показателем спада на пучок частиц в ускорителе с жесткой фокусировкой.

Цель настоящей работы — качественное выяснение основных особенностей протекания прямого разряда в ВЧ-магнитном поле квадрупольной конфигурации. Для этого использовались простейшие диагностические средства — фотографирование разряда, измерение магнитного поля и регистрация продольного магнитного потока.

Импульсный разряд в дейтерии создавался в стеклянной трубке диаметром 8 см и длиной 30 см. Расстояние между молибденовыми цилиндрическими электродами, имевшими диаметр 1,4 см, было равно 60 см. Разряд питался от искусственной линии, позволявшей получать прямоугольный импульс тока через газ длительностью 120 мксек с временем нарастания 4 мксек. Обратный провод был выполнен в виде шести стержней, расположенных симметрично относительно оси разрядной камеры. Благодаря этому разрядная трубка оставалась открытой для фотографирования. Большинство снимков проводилось при начальном напряжении между электродами $U_0 = 10 \div 30$ кВ (при этом ток через газ составлял $1,2 \div 3,6$ ка) и начальном давлении дейтерия $p_0 = 0,02 \div 0,15$ мм рт. ст.

Для создания ВЧ-поля использовалась система, состоящая из четырех стержней, которые включались в колебательный контур таким образом, что в каждый момент времени ток в диаметрально противоположных стержнях был направлен в одну сторону. Вместе с последовательно включенными емкостями и соединительными элементами система представляла собой контур с собственной резонансной частотой 1465 кгц и добротностью $Q = 200$. Контур составлял часть резонансной системы двухтактного автогенератора, работавшего на частоте 1278 кгц. С возникновением в разрядной камере ВЧ-разряда частота возрастала до 1292 кгц, а добротность падала до $Q = 50 \div 70$. Отдаваемая в контур импульсная мощность при $p_0 \approx 0,06$ мм рт. ст. составляла 200 квт.

Конфигурация магнитного поля, создаваемая системой из четырех стержней, позволяет в принципе стабилизировать плазменный шнур, находящийся на оси разрядной трубки. Условия стабилизации гармонической составляющей возмущения с длиной волны λ в этом случае имеют вид [1]

$$\omega > \frac{2I_0}{c} \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\ln \frac{\lambda}{\pi r_0}}{2MN}}; \quad (1')$$

$$\frac{\partial \tilde{H}}{\partial r} > \frac{2I_0}{c} \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \ln \frac{\lambda}{\pi r_0}, \quad (1'')$$

где M — масса иона; N — число ионов в сечении шнура на единицу его длины; r_0 — радиус плазменного шнура; \tilde{H} — напряженность ВЧ-поля; I_0 — ток через газ.

Опыты проводились при одном и том же режиме ВЧ-генератора. Ток через каждый стержень был равен $\tilde{I} \approx 800$ а, а $\partial \tilde{H} / \partial r \approx 25$ э/см. При этом условие (1') выполняется для любых значений λ . Для выполнения условия (1'') необходимо, чтобы $I_0 < I_{0кр}$. Ниже приведены значения $I_{0кр}$ для различных λ при $r_0 = 1$ см:

λ , см	120	60	30	15	7,5
$I_{0кр}$, ка	13	4	1,3	0,5	0,2

Разряд фотографировался лупой времени (СФР) с интервалом между кадрами 4 мксек.

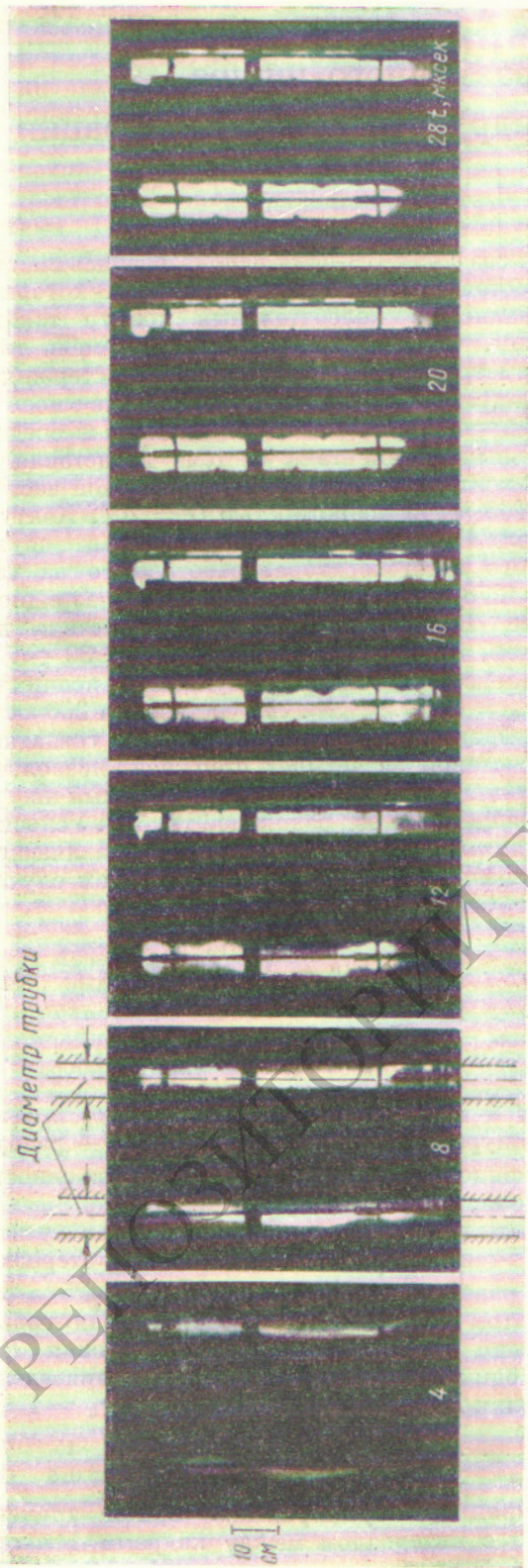


Рис. 1. Фотография разряда без ВЧ-поля при $r_{p0} = 0,07$ мм рт. ст., $U_0 = 15$ кВ ($U_{\text{макс}} = 1,6$ кВ).

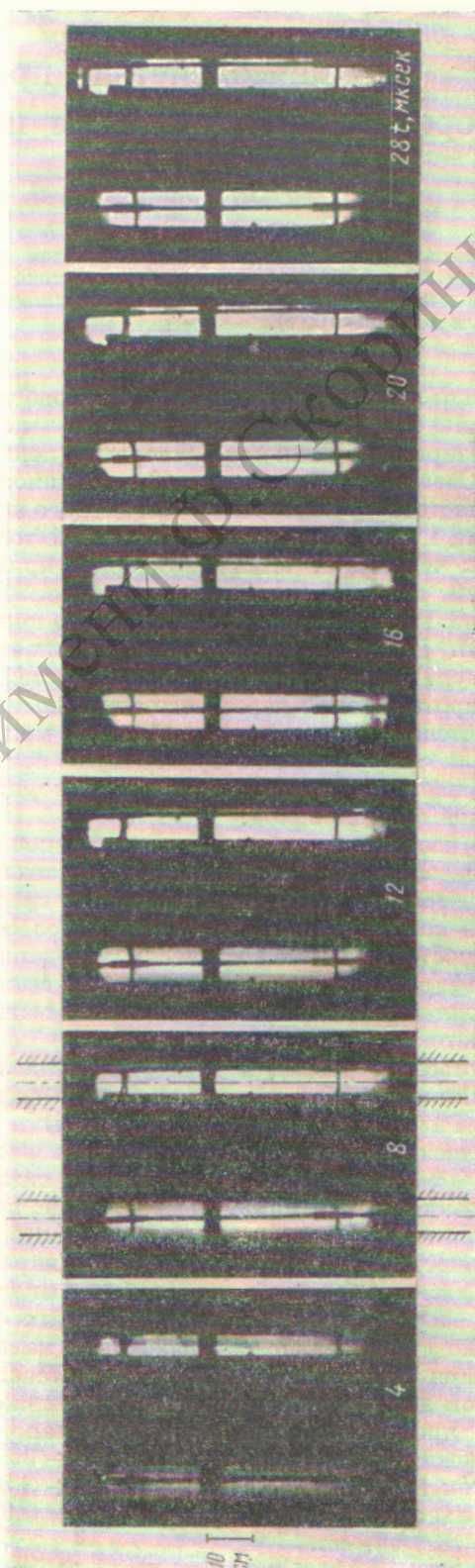


Рис. 2. Фотография разряда. Высокочастотный пробой происходит одновременно с началом импульса тока через газ: $p_0 = 0,07$ мм рт. ст., $U_0 = 15$ кВ ($U_{\text{макс}} = 1,6$ кВ).

Как показала многократная проверка с помощью фотоумножителя, помещавшегося за экспонируемой пленкой, первый кадр на фотографии соответствует началу разряда. Разряд фотографировался одновременно с двух сторон, для чего около разрядной камеры ставилось зеркало. Токи через стержень и через газ измерялись с помощью поясов Роговского.

Если разряд между электродами происходит без ВЧ-поля, то плазменный шнур, возникающий после пробоя на оси трубки, сразу же начинает завиваться в спираль (рис. 1). Шаг спирали, сначала примерно равный расстоянию между электродами, быстро уменьшается до размера порядка диаметра трубки и через 20—50 мксек шнур разваливается*.

Другая картина разряда наблюдается в случае, когда пробой между электродами осуществляется при одновременном наложении ВЧ-поля (рис. 2).

Плазменный шнур, как и в случае $\tilde{J} = 0$, появляется на оси камеры, но уже не завивается, а постепенно расширяется, заполняя все сечение трубки. Если ВЧ-разряд начинается несколько раньше (на 10—20 мксек), чем прикладывается напряжение к электродам, то шнур на оси не наблюдается, а разряд с самого начала заполняет все сечение трубки.

О протекании разряда можно судить также по характеру изменения распределения ВЧ-поля вдоль радиуса трубки.

Напряженность ВЧ-поля измерялась магнитными зондами, вводимыми в стеклянную трубку с наружным диаметром 3 мм. Отдельно измерялись радиальная составляющая поля \tilde{H}_r и азимутальная составляющая \tilde{H}_ϕ в двух направлениях: вблизи стержня (где $\tilde{H}_\phi \gg \tilde{H}_r$) и между стержнями ($\tilde{H}_r \gg \tilde{H}_\phi$).

Распределение ВЧ-поля вдоль диаметра разрядной трубки снималось путем поочередного измерения поля на различных расстояниях от оси камеры. Интервал между соседними положениями зонда составлял 0,5 см. Таким образом, кривая распределения усреднялась приблизительно по 20 разрядам.

На рис. 3 приведены две характерные осциллограммы \tilde{H}_r , полученные при $r_0 = 0,06$ мм от ст. Расстояние от зонда до оси равно ~1,5 см. Одна осциллограмма (см. рис. 3, а) получена при $U_0 = 0$, а другая (см. рис. 3, б) — при $U_0 = 12$ кв ($I_{\text{макс}} = 1,4$ ка). В первом

случае после ВЧ-пробоя поле некоторое время (~ 6 мксек) не изменяется, а затем уменьшается до некоторого уровня, на котором и сохраняется в течение всего ВЧ-импульса. Уменьшение поля объясняется повышением проводимости плазмы и соответственно вытеснением поля из центральной области разряда. Во втором случае почти сразу после ВЧ-пробоя

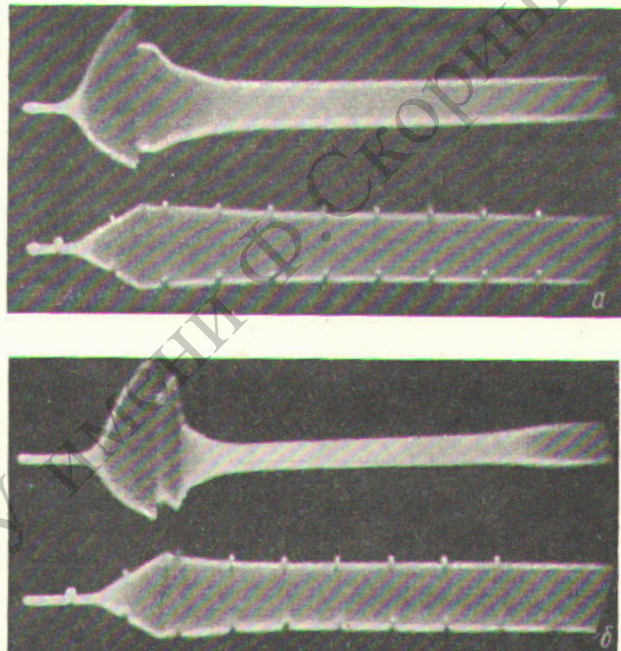


Рис. 3. Осциллограммы тока через стержни (нижний луч) и магнитного поля \tilde{H}_z (верхний луч); метки времени через 20 мксек:
а — $U_0 = 0$; б — $U_0 = 12$ кв ($I_{\text{макс}} = 1,4$ ка).

вдоль оси трубки начинает протекать продольный ток. Магнитный зонд оказывается вблизи границы плазмы. Около границы шнура ВЧ-поле больше (за счет поля индукционных токов), чем в том случае, когда этот шнур отсутствует, поэтому сигнал с зонда возрастает. Однако, после того как зонд при расширении плазмы попадает внутрь шнура, сигнал резко уменьшается.

Типичные кривые распределения ВЧ-поля вдоль радиуса трубки показаны на рис. 4 (\tilde{H}_r между стержнями). Для удобства сравнения все кривые приведены к одному значению тока через стержень ($\tilde{J} = 830$ а). Вскоре после появления плазменного шнура ($t_1 = 5$ мксек) поле в центральной части трубки становится заметно больше по сравнению с тем случаем,

* Здесь под «развалом» шнура понимается заполнение всей камеры почти равномерным свечением, на фоне которого шнур становится неразличимым.

когда $I_0 = 0$ (пунктирная кривая). Но уже в следующий момент времени ($t_2 = 10$ мксек) вследствие перераспределения плазмы «развала» разница между кривыми распределения при $U_0 = 12$ кэ и $U_0 = 0$ становится меньше и в дальнейшем (например, в момент времени $t_3 = 50$ мксек) магнитное поле при $U_0 = 12$ кэ вытесняется из плазмы в большей степени, чем в случае $U_0 = 0$. Это объясняется, по-видимому, тем, что продольный ток через плазму вызывает увеличение как степени ионизации, так и температуры. Подобный же характер изменения распределения поля наблюдается и при других условиях разряда. Проводимость плазмы σ , оцененная по толщине скин-слоя (как видно из рис. 4, толщина скин-слоя равна ~ 1 см), составляет приблизительно $2 \cdot 10^{13}$ CGSE. Если считать, что преобладают столкновения электронов с нейтральными атомами, то при $\sigma = 2 \cdot 10^{13}$ концентрация элект-

тронов $n_e \approx 2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ и степень ионизации $\eta < 1\%$.

Распределение магнитного поля H_{φ_0} продольного тока I_0 вдоль радиуса трубки измерялось магнитным зондом, отличавшимся от зонда для измерения ВЧ-поля только большим числом витков измерительной катушки. Чувствительность зонда составляла $\sim 2,5$ кэ/в.

По измеренному распределению $H_{\varphi_0}(r)$ вычислялось распределение по сечению трубки плотности тока через газ $j_0(r)$. При этом предполагалось, что аксиальная симметрия распределения тока разряда сохраняется до тех пор, пока наблюдается удовлетворительная повторяемость осциллограмм $H_{\varphi_0}(t)$. На рис. 5 приведены кривые относительного распределения $j_0(r)$ для разных моментов времени от начала импульса тока через газ. Как видно из кривых $j_0(r)$ рис. 5, а, при $\bar{J} = 0$ пробой

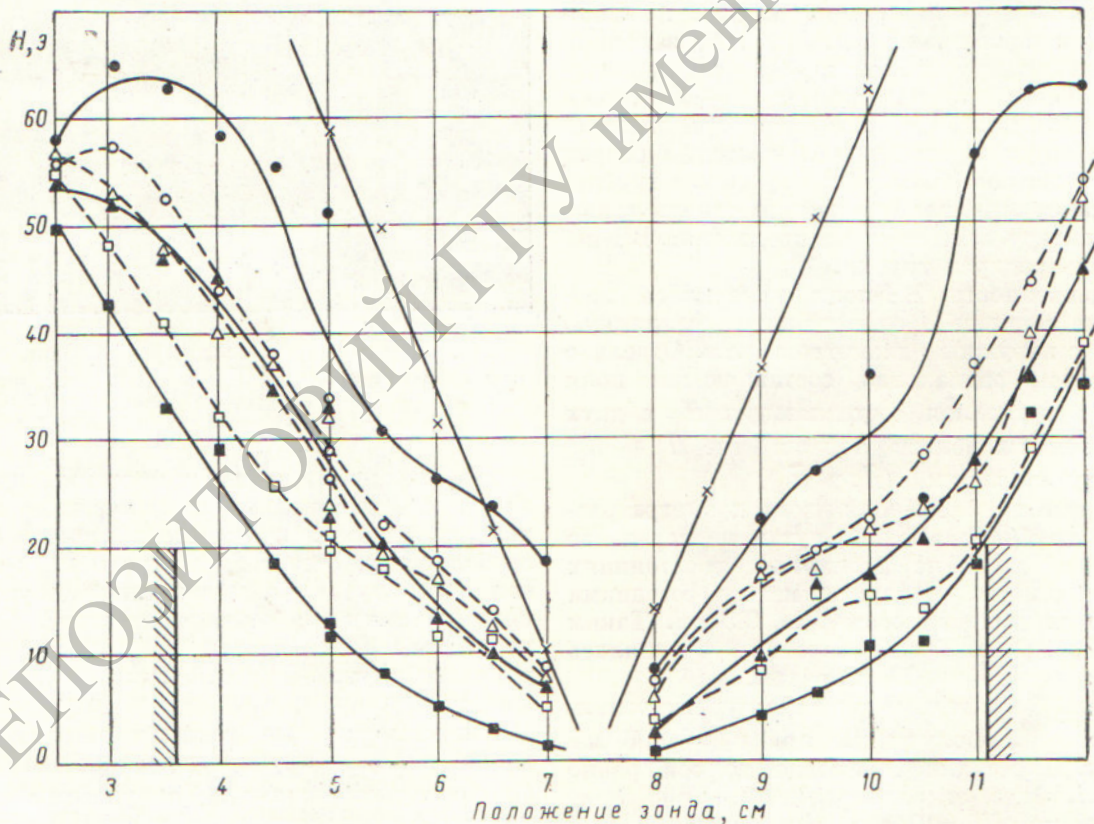


Рис. 4. Распределение $\tilde{H}_r(r)$ в различные моменты времени после начала разряда (между стержнями, где $\tilde{H}_r \gg \tilde{H}_\varphi$) при $I_0 = 1400$ а:

При $p_0 = 0,06$ мм рт. ст.: \circ, \bullet — U_0 равно 0 и 12 кэ соответственно, $t_1 = 5$ мксек; Δ, \blacktriangle — U_0 равно 0 и 12 кэ соответственно, $t_2 = 10$ мксек; \square, \blacksquare — U_0 равно 0 и 12 кэ соответственно, $t_3 = 50$ мксек; \times — $p_0 = 2 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.

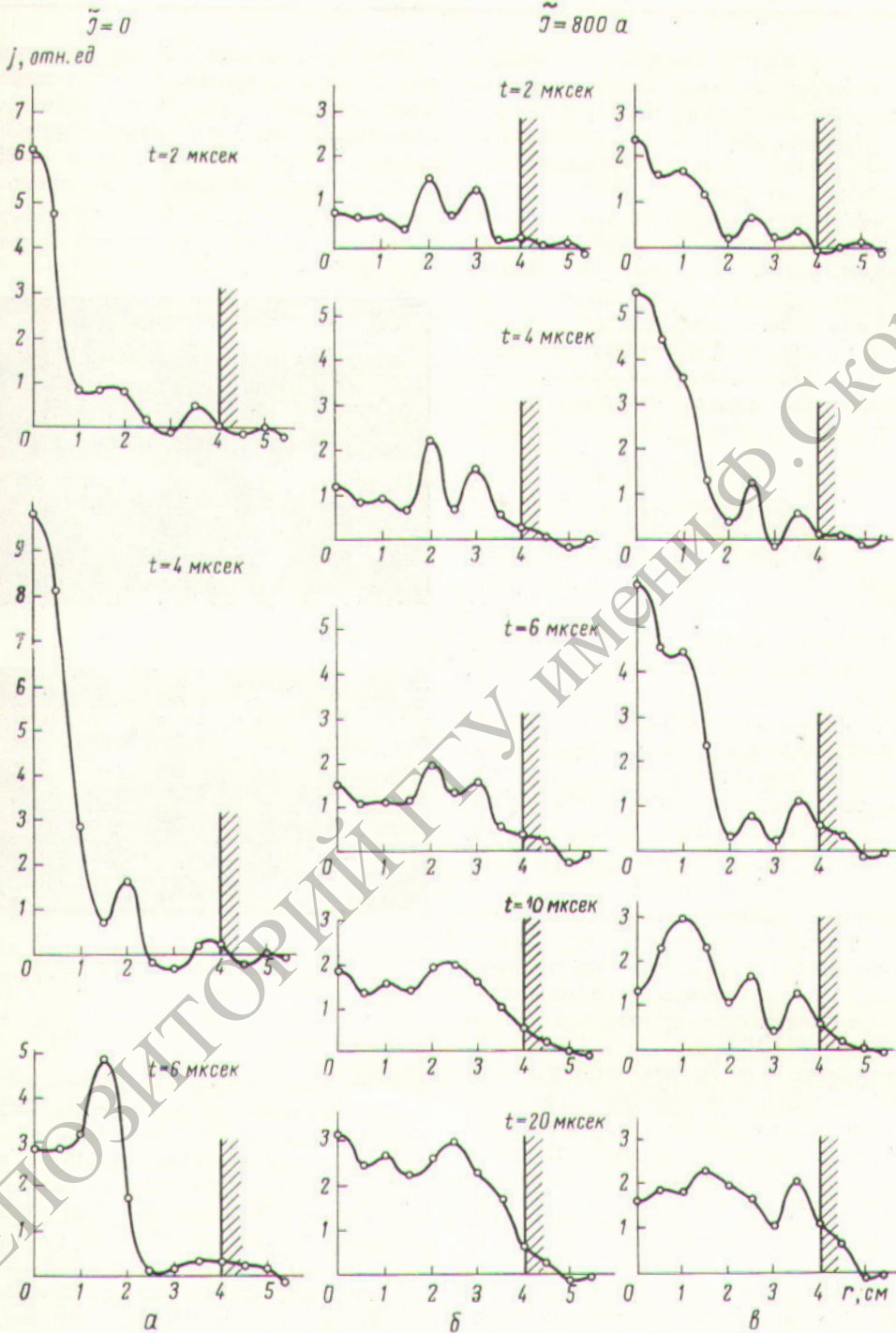


Рис. 5. Кривые распределения плотности прямого тока $j_0(r)$ через газ в различные моменты времени от начала тока:

a — ВЧ-поле отсутствует, $\tilde{J} = 0$, при $t > 6$ мксек симметрии разряда нарушается; *б* — разряд между электродами начинается после того, как зажгется ВЧ-разряд, ток все время течет около стенок, и шнур отсутствует; *в* — ВЧ-поле накладывается на сформированный шнур через 0–6 мксек после начала прямого разряда; наблюдается перераспределение тока из центральной области разрядной трубки в периферийную.

происходит на оси камеры, после чего шнур постепенно расширяется. Уже через 6 мксек после начала разряда симметрия $j_0(r)$ нарушается. Если пробой происходит после того, как зажегся ВЧ-разряд, ток появляется сразу же у стенок камеры (см. рис. 5, б) и, возрастая, продолжает там оставаться все время. Наконец, в том случае, когда ВЧ-поле включается после пробоя (см. рис. 5, в), симметрия распределения $j_0(r)$ относительно оси сохраняется, но ток постепенно перераспределяется. Доля тока, текущего около оси, уменьшается, а доля тока у стенок трубки увеличивается. Таким образом, приведенные кривые указывают, вопреки, на то, что скорость увеличения тока ($\frac{dI_0}{dt} \approx 10^8$ а/сек) недостаточна для вытеснения разряда на начальной стадии к периферии трубки с последующим стягиванием и сгребанием нейтрального газа к оси (толщина скин-слоя, определяемая производной dI_0/dt , превышает радиус трубки) [3], и, во-вторых, на то, что величина тока I_0 , ограничиваемая условием устойчивости (1"), т. е. величиной \bar{J} , недостаточна для стягивания, в том случае, когда прямолинейный разряд начинается позже высокочастотного и ток I_0 течет около стенок трубки. К сожалению, увеличение диаметра трубки приводит к уменьшению $\partial \bar{H} / \partial r$, а увеличение I_0 вызывает необходимость одновременного увеличения \bar{J} , т. е. мощности ВЧ-генератора*.

При изгибании сжавшегося плазменного шнура магнитное поле протекающего через него тока искажается и появляется продольная составляющая. По изменению величины этой составляющей также можно судить о стабилизирующем влиянии ВЧ-поля.

Для регистрации потока продольного магнитного поля на разрядную трубку надевалась катушка из 20 витков. Сигнал с катушки интегрировался на собственной ее индуктивности и шунтирующем сопротивлении (постоянная

* При $r_0 = 0,02$ мм рт. ст. и температуре электронов $T = 15$ эв ток I_0 , необходимый для стягивания плазмы, должен быть больше $\sqrt{4c^2 NkT} \approx 25$ ка, что соответствует (согласно критерию устойчивости при $\lambda = 60$ см) току $\bar{J} \approx 5$ ка. Чтобы получить такой ток, надо увеличить мощность генератора почти в 40 раз. Специальные меры, принятые для согласования генератора с низкочастотной «плазменной» нагрузкой, позволили увеличить мощность, поглощаемую плазмой, до 2 Мвт и ток через стержень до $\bar{J} = 2,5$ ка. Однако желаемого изменения протекающих процессов получить не удалось. При пропорциональном увеличении I_0 качественная картина разряда осталась прежней.

времени $\sim 0,1$ мсек). Из приведенных на рис. 6 осциллограмм видно, что при наложении ВЧ-поля сигнал с катушки резко уменьшается. Максимальный поток, зарегистрированный поясом без ВЧ-поля, составляет ~ 250 мкс, что при диаметре спирали плазменного шнура 4 см соответствует $H_z \approx 20$ э. Однако, несмотря на малую величину магнитного потока, приве-

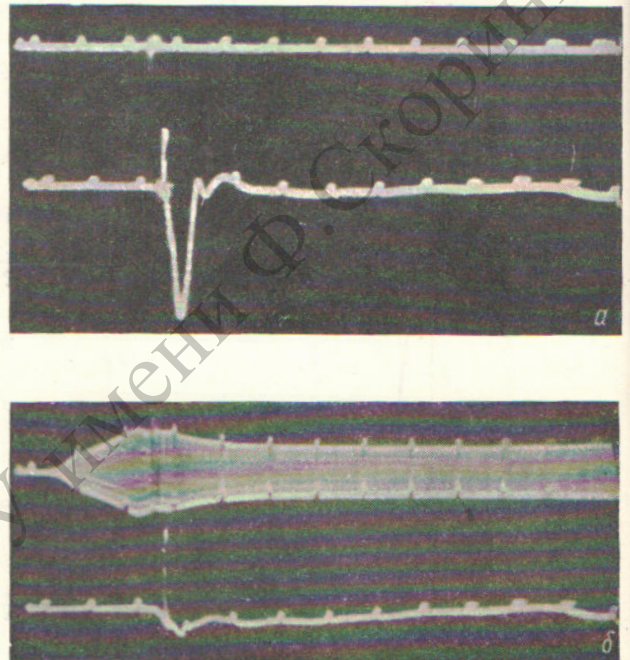


Рис. 6. Осциллограммы продольного потока Φ_z при $r_0 = 0,05$ мм рт. ст., $U_0 = 15$ кв ($I_{0 \text{ макс}} = 1,6$ ка), метки времени через 20 мксек. Масштаб 100 мкс/см: а — $\bar{J} = 0$; б — $\bar{J} \neq 0$.

денные осциллограммы указывают на пригодность этого метода регистрации неустойчивости плазменного шнура в подобных экспериментах.

Результаты предварительного исследования взаимодействия прямого самосжатого разряда с ВЧ-магнитным полем квадрупольной конфигурации свидетельствуют о стабилизирующем влиянии ВЧ-поля (см. рис. 1, 2 и 6), хотя и остаются некоторые сомнения, связанные с тем, что самое ВЧ-поле (независимо от его конфигурации) может влиять на протекание прямого разряда. Однако проверять это целесообразнее при больших токах I_0 и соответственно \bar{J} .

Из фотографий разряда видно, что в том случае, когда ВЧ-поле отсутствует, плазменный

шнур завивается в спираль постепенно. Для стабилизации возмущения с минимальной наблюдаемой длиной волны $\lambda \approx 7,5$ см ток через газ не должен превышать 200 а. В наших опытах устойчивое, хотя и непродолжительное, существование оторванного плазменного шнура наблюдалось при $I_0 \leq 3000$ а, в то время как, согласно условию устойчивости, возмущения могут быть подавлены лишь с $\lambda \geq 60$ см. В связи с этим напрашивается предположение, что при стабилизации длинноволновых возмущений развитие коротковолновых возмущений также затрудняется. В случае стабилизации плазменного шнура постоянным магнитным полем этот эффект нельзя обнаружить, так как при выполнении условия стабилизации для больших длин волн условие стабилизации коротковолновых возмущений выполняется автоматически.

Как фотографии разряда, так и кривые распределения плотности тока $j_0(r)$ вдоль радиуса

разрядной трубки указывают на кратковременность существования устойчивого шнура. Для более длительного удержания плазмы необходимо, по нашему мнению, значительно увеличить ток через газ, а следовательно, и ток через стержни.

Автор считает своим долгом выразить признательность С. М. Осовцу и Ю. Ф. Наседкину за советы и обсуждение результатов, а также В. М. Атаманову, Г. М. Балкову, В. П. Мокшанцеву, В. Г. Николаевскому и А. Я. Чермошцеву за помощь в работе.

Поступила в Редакцию 22/V 1964 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Осовец. ЖЭТФ, 39, 311 (1960).
2. М. Л. Левин, М. С. Рабинович. ЖТФ, 33, 164 (1963).
3. Н. А. Борзунов, Д. В. Орлинский, С. М. Осовец. «Атомная энергия», 4, 149 (1958).



УДК 533.9

Экспериментальное исследование инъекции плазмы в программированное магнитное поле

О. И. Федянин

Приведены результаты экспериментальных исследований возможности захвата инжектируемой плазмы расширяющимся магнитным полем. Показано, что при этом образуется долгоживущий плазменный шнур, локализованный вдали от стенок вакуумной камеры; плотность плазмы $\sim 10^{12}$ см $^{-3}$.

Заполнение магнитных ловушек плазмой является одной из основных задач при исследовании и изучении горячей плазмы. Большинство работ по инъекции плазмы в ловушки посвящено изучению вопросов, связанных с рассмотрением взаимодействия плазма — плазма, плазма — магнитное поле, пучок — плазма в магнитном поле и т. п. [1—4]. В настоящей работе исследовалась возможность применения необратимых процессов в плазме, сжимаемой быстро возрастающим магнитным полем, для инъекции в магнитную ловушку.

Экспериментальная установка

Основная цель эксперимента — изучение возможности поперечной инъекции в программированное магнитное поле.

На рис. 1 показана топография магнитного поля в различные моменты времени. Магнитное поле однородное, квазипостоянное во времени, имеющее временную и пространственную «яммы».

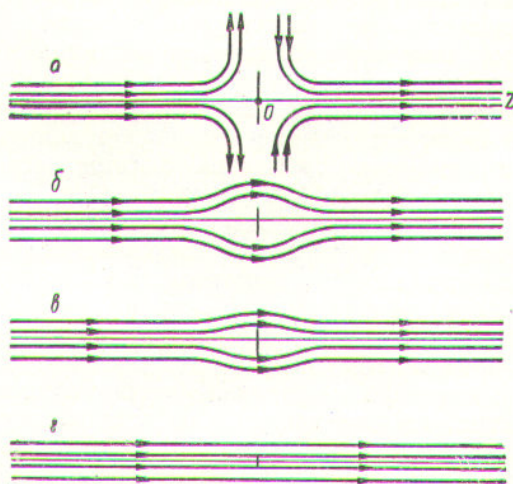


Рис. 1. Топография магнитного поля.

