

*В. И. ЧУМАКОВ, канд. физ.-мат наук, М. А. ОСТРИЖНОЙ,
Ю. Я. ВОЛКОЛУПОВ, канд. физ.-мат. наук, В. М. ВАНЦАН, канд. физ.-мат. наук,
В. Г. НЕСТЕРЕНКО, О. И. ХАРЧЕНКО*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛЬНОТОЧНОГО РАЗРЯДА МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО КОМПРЕССОРА В АТМОСФЕРЕ

Введение.

Плазменные источники электромагнитного излучения обладают высокими электрическими показателями эффективности. Известно, что мощность излучения, плотность и температура плазмы в таких источниках зависит от энергии, вкладываемой в разряд, и, следовательно, от разрядного тока [1-4]. В экспериментальных установках по генерации и ускорению плотной плазмы в качестве энергопитания используются емкостные накопители. В этом случае максимальная величина тока ограничивается влиянием индуктивности конденсаторов и паразитной индуктивности монтажа (шинопроводов, связывающих электроды конденсаторов и плазменного ускорителя). Минимизация индуктивности позволяет реализовать режим разряда накопителя, близкий к апериодическому, и приблизиться к максимально возможным величинам разрядных токов экспериментальных установок.

В данной работе рассмотрены результаты исследований источника мощного импульсного излучения на основе коаксиального магнитоплазменного компрессора (МПК) торцевого типа. Приведены экспериментальные зависимости параметров экспериментальной установки, собранной по схеме безшинного типа, что позволяет получить высокие показатели эффективности излучения. Показаны также зависимости параметров излучения и результаты исследований характеристик излучения в оптическом диапазоне волн.

Описание экспериментальной установки.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Электроды коаксиального МПК располагались на металлических листах, которые соединялись с соответствующими электродами конденсаторов накопителя. Заряд накопителя от мощного выпрямителя позволял получать напряжения в диапазоне 2-4,5 кВ. Запуск установки производился от вспомогательного источника плазмы (фор-плазмы), электрод которого располагался аксиально внутри центрального электрода МПК. При разряде на него дополнительного конденсатора $C_{\text{фн}} = 60$ мкФ фор-плазма, образующаяся внутри камеры К1, под действием газокINETического давления выбрасывается через отверстия в центральном электроде МПК в виде отдельных струй в разрядный промежуток. Энергия заряженных частиц фор-плазмы достаточна для перекрытия разрядного промежутка, так что в результате происходит разряд емкостного накопителя. Из отдельных плазменных струй формировалась однородная плазменная шайба, из которой затем образовывалась токово-плазменная оболочка, характерная для МПК торцевого типа. Полярность электродов МПК выбиралась в соответствии с рекомендациями [3].

Таблица
Параметры экспериментальной установки

Емкость накопителя, мкФ	Зарядное напряжение, кВ	Разрядный ток, кА	Индуктивность разрядного контура, нГн	Максимальная мощность излу- чения, МВт	Длительность импульса тока, мкс
1400	2-3,6	200-400	8,75	55	22

В соответствии с принципиальной схемой МПК, разрядный ток в нагрузке складывается из тока емкостного накопителя C_n , ограниченного действием индуктивности конденсаторов, и тока разряда емкости монтажа C_n , которую можно считать подключенной параллельно нагрузке. Поскольку $C_n \gg C_n$, то начальный бросок тока в результате разряда C_n очень мал и не дает вклада в разогрев фор-плазмы на переднем фронте импульса. Отметим, что искусственное увеличение C_n путем включения безындуктивных конденсаторов параллельно нагрузке приведет к укорочению переднего фронта импульса и является одним из направлений повышения мощности излучателей на основе МПК.

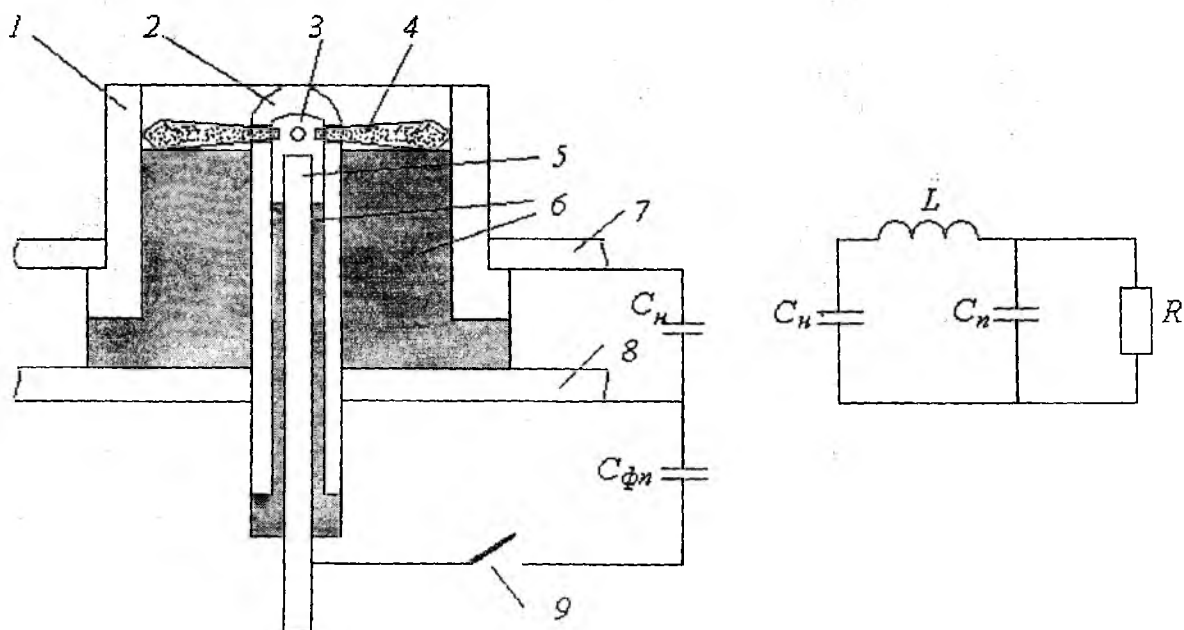


Рис.1 – Схема МПК с напуском фор-плазмы.

- 1 – внешний электрод; 2 – центральный электрод; 3 – камера формирования фор-плазмы;
 4 – плазменные струи; 5 – дополнительный электрод; 6 – фторопластовые изоляторы;
 7 – листовой электрод накопителя – анод; 8 – листовой электрод накопителя – катод; 9 – разрядник.

Результаты экспериментальных исследований.

Рассмотрим результаты измерений характеристик источника. На рис. 2 приведены временные диаграммы разрядного тока емкостного накопителя (а) и напряжения на электродах МПК (б). Как видно, разряд носит колебательный характер с большим декрементом затухания, значение которого составляет $\ln I_m(t) / I_m(t + T) \cong 1,39$. На основании временных диаграмм $i(t)$ и $u(t)$ можно построить зависимости мгновенной мощности $p(t) = u(t)i(t)$, вкладываемой в разряд, и сопротивления разрядного промежутка $r(t) = u(t)/i(t)$ (рис. 2, в, г). При их построении была сделана коррекция искажений, вносимых параметрами резистивно-емкостного делителя напряжения, постоянная времени которого ($\tau \sim 10$ мкс) соизмерима с длительностью исследуемых процессов. В этом случае, мгновенная мощность остается положительной, следовательно, сопротивление в процессе разряда имеет активный характер.

Зависимости тока разряда от напряжения зарядки накопителя U_n и от величины накопленной энергии, $W_n = \frac{1}{2}CU_n^2$, приведены на рис. 3. Ток возрастает линейно с напряжением, т. е. можно считать, что интегральное сопротивление разрядного контура, равное $R = \Delta U / \Delta I \cong 9,4 \cdot 10^{-3}$ Ом, и средняя мощность потерь в исследуемом диапазоне энергий остаются постоянными. Величину тока можно также оценить, интегрируя первый полупериод осциллограммы тока см. рис. 2, а, и сравнивая результат с зарядом, накопленным в емкости. Отсюда

$$I_m = \frac{CU_n}{\tau_1 \int_0^1 f(t) dt},$$

где τ_1 – длительность первого полупериода тока, $f(t)$ – функция, описывающая временную зависимость тока. Значения, рассчитанные для выбранных величин зарядного напряжения в предположении, что первый полупериод тока имеет вид $i(t) = I_m \sin \omega t$, также показаны на рис. 3.

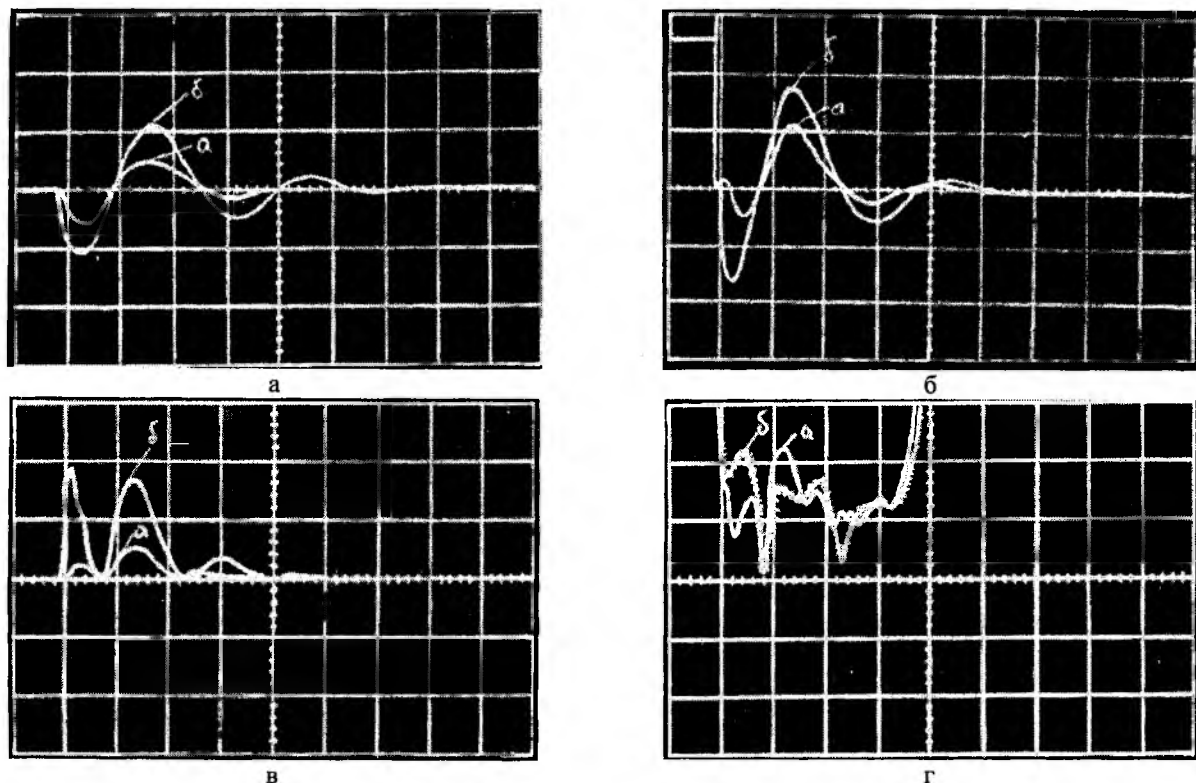


Рис. 2 – Типовые осциллограммы:

а) тока разряда (325 кА/дел, 20 мкс/дел); б) напряжения на нагрузке (0,75 кВ/дел, 20 мкс/дел);
в) мгновенной мощности (250 МВт/дел, 20 мкс/дел); г) сопротивления (2,35 мОм/дел, 20 мкс/дел) при напряжениях накопителя 2,0 и 3,2 кВ ([соответственно а и б на графиках]).

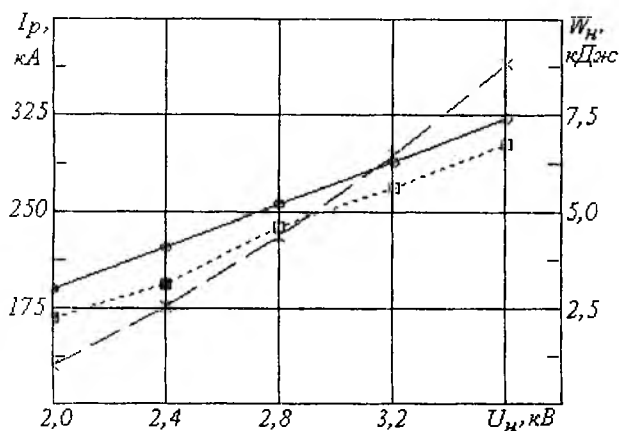


Рис. 3 – Зависимости тока нагрузки (расчет – сплошная, эксперимент – точки) и накопленной энергии от зарядного напряжения (пунктир).

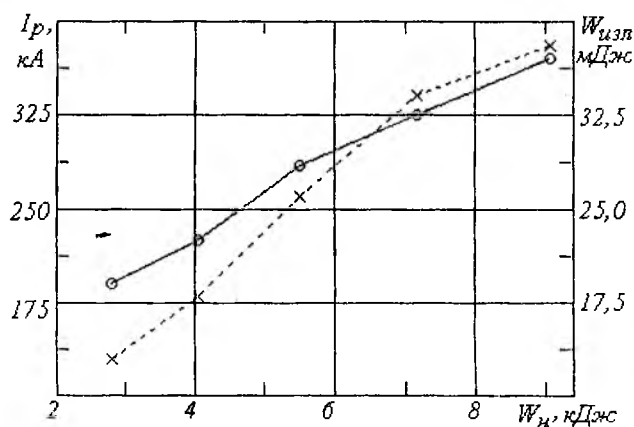


Рис. 4 – Зависимость тока нагрузки и плотности потока энергии оптического излучения от накопленной энергии.

Регистрация энергии излучения в диапазоне $0,3 \text{ мкм} \leq \lambda \leq 10,2 \text{ мкм}$ осуществлялась с помощью измерителя мощности лазерного излучения ИМО-2Н. На рис. 4 приведена зависимость плотности потока энергии излучения на расстоянии 1 м от источника. Перегиб кривой и снижение степени роста энергии излучения можно объяснить сдвигом максимума кривой Планка распределения температуры излучающего плазменного образования в ультрафиолетовую область и выходом за пределы полосы пропускания прибора при увеличении энергии, вкладываемой в разряд, что приводит к соответствующему росту температуры плазмы. Значение разрядного тока при этом составляет $I_p \cong 260 \text{ кА}$.

При таком токе магнитное давление $\frac{\mu H^2}{2}$ (H – магнитное поле, создаваемое током) значительно превышает газокINETическое давление плазменного столба $\sim 2nkT$ (n – концентрация электронов в

разрядном столбе; k – постоянная Больцмана, T – температура), что приводит к образованию перетяжек и неустойчивости и формированию плазменного фокуса (ПФ) [1-4]. Оценку температуры можно получить, используя соотношение Беннета для равновесного случая при наличии только азимутального магнитного поля, создаваемого разрядным током

$$\frac{\mu H_p^2}{2} = 2nkT,$$

где предполагается равномерное распределение плотности заряженных частиц по сечению плазменного столба; $H_p = I_p / 2\pi r_p$ – магнитное поле границе плазменного столба радиусом r_p . Подставляя $r_p = 1$ см, $n = 5 \cdot 10^{18}$ см⁻³, получим $T \cong 7,8 \cdot 10^4$ К.

Энергия излучения высокотемпературной области для данной температуры и плотности составляет величину порядка 102 Дж. Оценка полной энергии излучения получается интегрированием плотности потока по пространственной диаграмме направленности излучателя и составляет $W_{\text{полн макс}} = 1,744$ кДж, таким образом, КПД излучателя равен 0,17. При этом предполагалось, что распределение излучения пропорционально площади сечения ПФ в азимутальной и меридиональной плоскостях в 2π пространстве.

Пространственное распределение температуры в области разряда и эффекты, сопровождающие сильноточный разряд МПК, можно оценить на основании фотографий, выполненных с применением оптических фильтров (рис.5). Как видно (см. рис. 5, а, б, в, г), наиболее высокотемпературная область разряда локализована вблизи торца центрального электрода и имеет веретенообразную форму, характерную для образования ПФ [2, 3]. Верхняя граница полосы пропускания фильтра УФС-6 равна 390 нм, поэтому реализация ПФ представляется весьма вероятной. Кроме того, разряд сопровождается мощной ударной волной на выходе плазменного ускорителя.

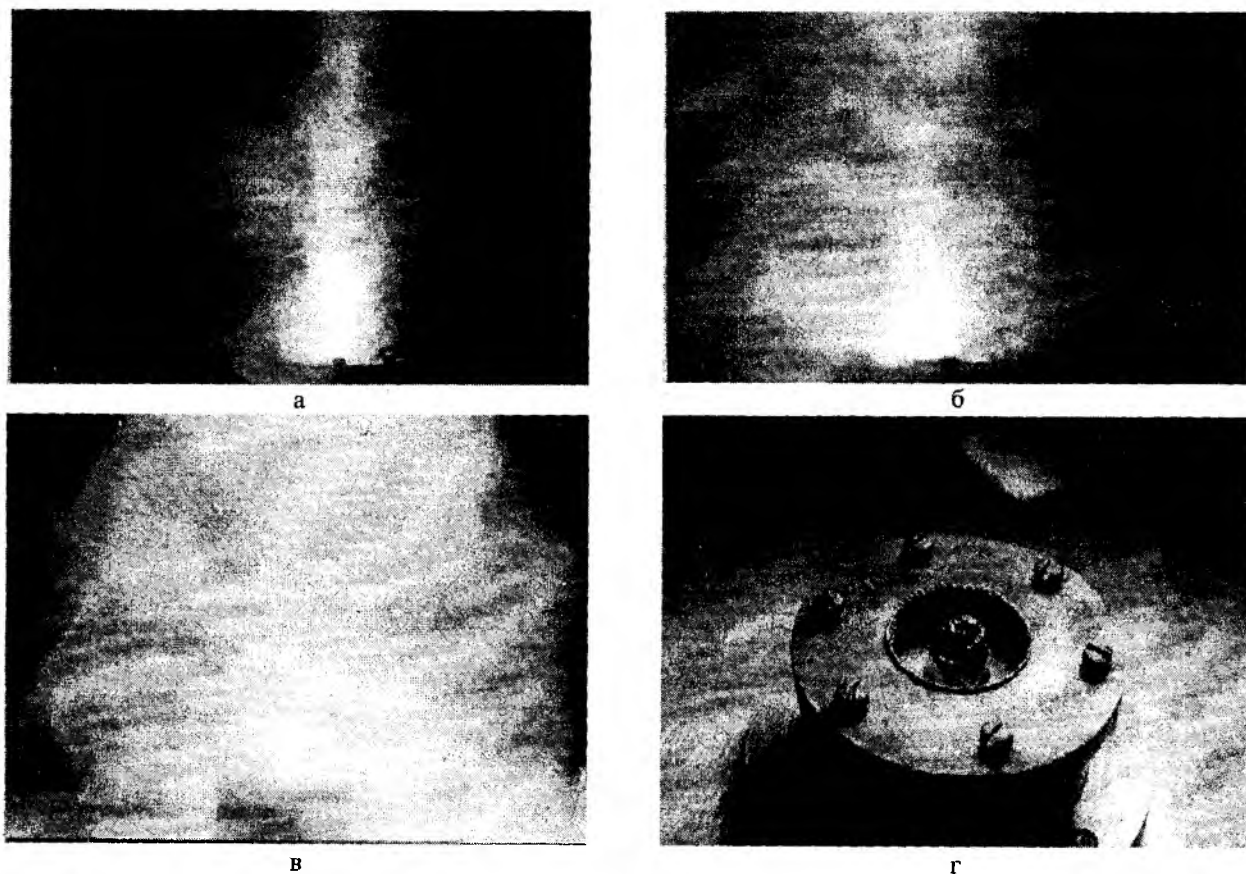


Рис. 5 – Фотографии сильноточного разряда МПК, выполненные с применением оптических фильтров а) ТС-2; б) НС-10; в) НС-13; г) внешний вид электродов МПК.

Использование фильтров с более низкочастотной характеристикой пропускания показывает, что области с меньшей температурой имеют большие размеры и в красной области спектра разряд носит диффузный характер. На рис. 5, г отмечаются эффекты интенсивной эрозии центрального электрода, т.е. температура металла, выбрасываемого при эрозии $T_m < 5500$ К. В некоторых случаях разряд имел асимметричную форму в результате неоднородного выброса фор-плазмы в разрядный промежуток. Наиболее отчетливо пространственное распределение температуры в области разряда видно на рис. 5, а. Можно выделить четыре характерные области: 1) высокотемпературную область ПФ на торце центрального электрода, примерно равную его диаметру d и имеющую высоту порядка $(2 \div 2,5)d$; 2) внутреннюю область в межэлектродной части, занимающую наибольший объем и охватывающую ПФ; 3) область токово-плазменной оболочки и 4) внешнюю низкотемпературную область разогретого газа, состоящего в основном из нейтральных молекул.

Заключение.

Разработанный и созданный источник широкополосного оптического излучения плазмы при сильноточном разряде в атмосфере позволяет получать импульсы мощностью до 20 МВт. Эффективность источника составляет величину порядка 17 % энергии, вкладываемой в разряд. Применение безшинной схемы соединения электродов МПК с конденсаторами накопителя позволило реализовать короткие импульсы тока ~ 20 мкс и повысить мощность излучения. Получены результаты фотографических исследований излучения сильноточного разряда в различных областях оптического спектра, что позволяет проводить анализ пространственного распределения излучения области разряда и оценить распределение температуры. Полученные результаты могут служить основой достаточно простой методики качественной оценки распределения температуры плазмы при сильноточных высоковольтных импульсных разрядах.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллективу ПНИЛ РТ ХТУРЭ и лично Кашееву Б.Л. и Хоповой И. П. за предоставленную техническую помощь при подготовке экспериментов.

Список литературы: [1] Козлов Н.И. Плазменный фокус как источник плотной плазмы // ТВТ. – 1973. – Вып.11. – №1. – С.191-193. [2] Исследования излучения плазменного фокуса в ВУФ области ионизационными камерами / Зворыкин В.Д., Камруков А.С., Клементов А.Д. и др. // Квантовая электроника. – 1977. – Т.4. – № 2. – С.290-300. [3] Камруков А.С., Козлов Н.П., Протасов Ю.С. Письма в ЖТФ. – 1975. – Т.1. – №9. – С.419-422. [4] Плазменные ускорители и ионные инжекторы / Под ред. И.П.Козлова, А.И.Морозова. – М., 1984. – 271 с. [5] Экспериментальные исследования воздействия мощного широкополосного оптического излучения на оптико-электронные приборы / Шостко С.Н., Шостко И.С., Лонин Ю.Ф., Чумаков В.И., Шостко О.С. // Матер. 7-й Международной Крымской конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо97). – Т. 1. – Севастополь (Крым, Украина). – С.271-274.

Харьковский государственный технический
университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 27.06.2000