



Исследование коаксиальных инжекторов для создания импульсных плазменных струй в электромагнитном ускорителе

Н. В. Батрак, М. В. Кутырев, Н. Г. Копалейшвили

Было спроектировано, изготовлено и испытано нескольких вариантов коаксиальных инжекторов с целью создания компактного, стабильно работающего коаксиального инжектора импульсной плазменной струи. Проведены эксперименты с диэлектрической вставкой из силикатного стекла и из фторопласта. Продемонстрированы основные преимущества коаксиальной конструкции: простота ее исполнения и, следовательно, дешевизна и точность исполнения, а также возможность согласованного режима и возможность «симметризации» разряда внутри камеры при уединенном радиальном стримере инициации по поверхности диэлектрической вставки.

Ключевые слова: коаксиальный магнитоплазменный ускоритель, инжектор, плазменная струя, электромагнитный ускоритель.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-18-22

Введение

В последнее время большой интерес представляют теоретические и экспериментальные исследования нестационарных процессов в импульсных радиационно-магнитогазодинамических системах. К таким системам могут быть отнесены плазменные источники излучения и генераторы ударных волн, термоядерные системы, системы предварительного электромагнитного ускорения мишеней, магнитоплазменные компрессоры и плазменные ускорители, импульсные плазгодинамические системы управления высокоскоростными потоками газа, а также системы плазменно-стимулированного поджига и горения топливных смесей [1–5].

Далее ниже разговор пойдет о плазменных ускорителях, а конкретно о коаксиальных

магнитоплазменных ускорителях (КМПУ), для которых выполнено экспериментальное исследование плазгодинамических процессов в каналах инжекторов. Подобные системы находят свое применение в физике плазмы, управляемом термоядерном синтезе, физике высоких плотностей энергии, при создании электроракетных двигателей и во многих других направлениях науки и техники [6–10].

Варианты коаксиальных инжекторов различались по нескольким параметрам:

- размерами и конструкциями разрядных камер;
- профилем сопловых отверстий в разрядных камерах;
- материалом плазмообразующих (диэлектрических) вставок;
- энергоемкостными и токовыми характеристиками;
- материалом центрального электрода и т. д.

Преимуществами коаксиальной конструкции являются:

1. Простота и следовательно дешевизна и точность исполнения.
2. Возможность самосогласованного режима (пробой на первой стадии процесса происходит в наиболее благоприятном месте).

Батрак Никита Витальевич, студент.
Кутырев Михаил Витальевич, лаборант.
Копалейшвили Никита Гелаевич, студент.
 E-mail: nikitakopaleishvili@mail.ru
 МГТУ им. Н. Э. Баумана.
 Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5.

Статья поступила в редакцию 22 сентября 2022 г.

© Батрак Н. В., Кутырев М. В., Копалейшвили Н. Г., 2022

3. Возможность «симметризации» разряда внутри камеры при уединённом радиальном стримере инициации (пробое) по поверхности диэлектрической вставки [11–15].

Экспериментальный стенд и конструкция инжектора

Во всех исследованных конструкциях применялась коаксиальная схема расположения электродов, диаметр центрального электрода инжектора составлял 3 мм. В различных экспериментальных конструкциях центральный электрод изготавливался из Al (сплава АМГ), Cu (электродной меди), нержавеющей стали (12Х18Н10Т) и вольфрама (ВМ ТУ48-19-39-88, электродный пруток для дуговой сварки). Наилучшие результаты (наименьшее распыление в разряде) показал вольфрам, поэтому практически все представленные эксперименты проводились с вольфрамовым осевым электродом. В качестве материала диэлектрической (межэлектродной) вставки использовался плавленный кварц, силикатное стекло, фторопласт. Экспериментальные исследования проводились с разными значениями ёмкости батареи: 5 и 10 мкФ.

В общем, можно отметить, что все инжекторы представляют собой конструкции коаксиального типа с разрядной камерой. Подобная конструкция предполагает вращение разряда (в его сильноточной стадии) вокруг оси симметрии. Однако при вкладываемых объемных плотностях энергии в разряде, происходящем в плотной среде (воздух атмосферного давления), надежда на «симметризацию» (размазывание разряда по поверхности диэлектрической вставки) довольно слабая. Визуальный анализ применяемых диэлектрических вставок из фторопласта, силикатного стекла и плавленного кварца показал, что в данной конструкции вращения разряда в сильноточной стадии не происходит. Разряд загорается в одном определённом месте на

поверхности, образуя «стримерную дорожку» и уже в газовой (плазменной) фазе заполняя разрядную камеру.

На рис. 1 представлена конструкционная схема инжектора. Объём разрядной камеры составляет 248 мм³. Электродержатель может быть изготовлен из латуни, меди или АМГ, изолятор также двух видов (фторопласт, капрон). Корпус выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, а диэлектрическая вставка представляет собой один из трех вариантов (силикатное стекло, плавленный кварц, фторопласт). Приведенная конфигурация указана без цилиндрической разрядной камеры.

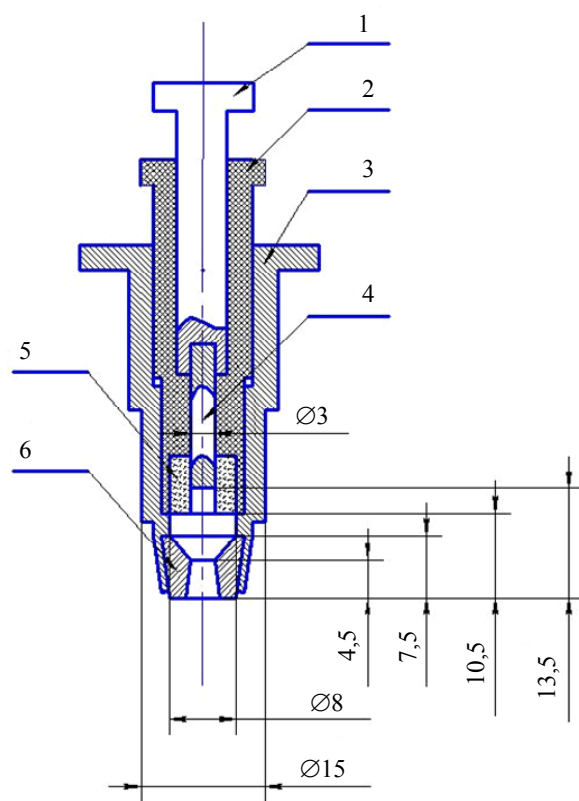


Рис. 1. Коаксиальный инжектор для плазменного ускорителя: 1 – электрододержатель; 2 – изолятор; 3 – корпус; 4 – центральный электрод; 5 – диэлектрическая вставка; 6 – сопловая вставка

Основные электротехнические параметры представлены в таблице.

Таблица

Электротехнические параметры разрядной цепи инжектора

Дифференциальные параметры				
	1 ^й полупериод	2 ^й полупериод	3 ^й полупериод	4 ^й полупериод
Ток I_{max} , А	762	457	239,5	87,1
Полная энергия W_{Σ} , Дж	2,23	0,8	0,22	0,029

Окончание табл.

Дифференциальные параметры					
	1 ^й полупериод	2 ^й полупериод	3 ^й полупериод	4 ^й полупериод	
W_p , Дж	1,92	0,691	0,19	0,025	
Заряд q , Кл	$7,28 \times 10^{-3}$	$4,36 \times 10^{-3}$	$2,29 \times 10^{-3}$	$0,83 \times 10^{-3}$	
Интегральные параметры					
Электрическая энергия $W_{эл}$, Дж	3,38	Емкость C_0 , Ф	4×10^{-6}	$T/2$, с	15×10^{-6}
Изменение энергии ΔW_t^p , Дж	2,61	Напряжение U_0 , В	1300	Δt , с	5×10^{-6}
Заряд Q , Кл	$5,2 \times 10^{-3}$	Индуктивность L , Гн	5,44	t , с	35×10^{-6}
Полное сопротивление R_{Σ} , Ом	0,511	Сопротивление R_p , Ом	0,441	$\ln I_1/I_3$	1,41

Описание работы принципиальной схемы и эксперимента

Подключение инжекторов выполнялась по последовательной схеме для импульсных ксеноновых ламп (с последовательным введением в разрядный контур повышающего импульсного трансформатора, где вторичная обмотка на сильнотоочной стадии разряда становится индуктивным балластным сопротивлением (дресселем), но необходима на стадии пробоя (инициации первой слабotoочной стадии разряда).

Если для импульсных ламп большое внутреннее омическое сопротивление имеет положительный эффект, то для инжектора это становится источником потерь. Оценить на данный момент в процентном отношении эти потери не представляется возможным, поскольку неизвестно собственное омическое сопротивление инжектора. Преимущество

этой схемы перед схемой «раздельной инициации» с введением иницирующих электродов непосредственно на рабочую поверхность диэлектрической вставки инжектора – конструктивная простота и, следовательно, дешевизна изготовления. Основным недостатком этой схемы подключения является наличие в разрядном контуре индуктивно-омического сопротивления в виде вторичной обмотки импульсного трансформатора.

В ходе проведенных экспериментов исследовались отдельные процессы и стадии формирования плазменных струй. На рис. 2 представлена типичная осциллограмма для токового импульса – осциллограмма разрядного тока при ёмкости силового конденсатора $C1 = 4 \text{ мкФ}$ и напряжением 1300 В при использовании конструкции дроссель-трансформатора TR-1A. Развёртка осциллографа – 10 мкс на одно деление.

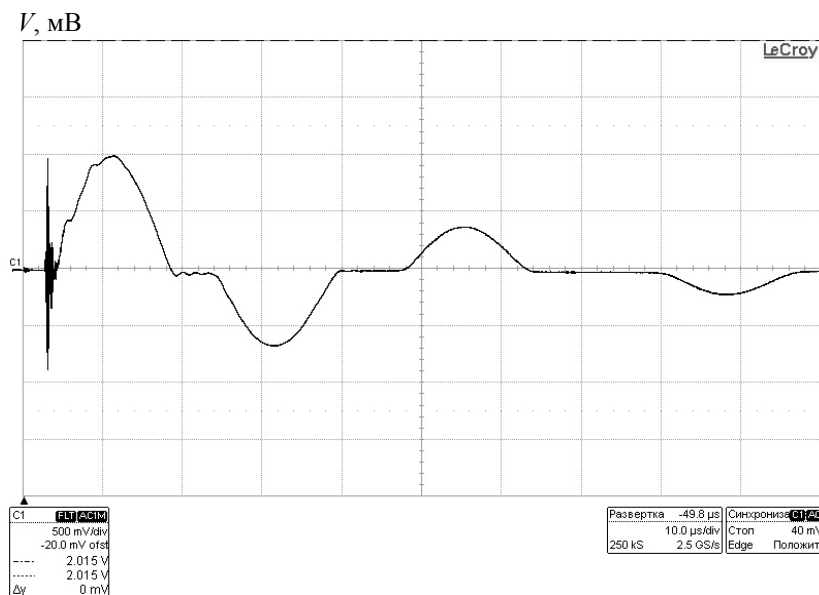


Рис. 2. Характерная осциллограмма токового импульса

Серия экспериментов проводилась с напряжением зарядки ёмкости 1100–1300 Вольт. Ёмкость батареи выбиралась – 5 мкФ либо 10 мкФ. Период токовой синусоиды 165–250 мкс. Выявлено, что основное энерговыделение в разряде ~65 % от первоначально запасённой электрической энергии в конденсаторе.

Заключение

Проведено несколько серий экспериментов с различными конструкционными схемами инжекторов. Проведены эксперименты с диэлектрической вставкой из силикатного стекла или плавленого кварца и с диэлектрической вставкой из фторопласта. Выявлено, что разряд загорался локально на поверхности, формируя стримерную дорожку, а затем в плазменной фазе заполнял разрядную камеру. Получены основные токовые характеристики, представлены осциллограммы разрядного тока в индукторе для разрядного процесса. Продемонстрированы основные преимущества коаксиальной конструкции: простота её исполнения (только токарные работы) и, следовательно, дешевизна и точность исполнения; возможность самосогласованного режима (пробой на первой стадии процесса происходит) и возможность «симметризации» разряда внутри камеры при уединённом радиальном стримере инициации (пробое) по поверхности диэлектрической вставки. Также зафиксировано, что энерговыделение в самом разряде достигает 60–65 % от первоначальной запасённой электрической энергии в конденсаторе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Astashynski V. M., Dzahnidze H. M., Kostyukovich E. A., Kuzmitski A. M., Shoronov P. N., Shymanski V. I., Uglov V. V.* / High Temp. Material Processes: An Int. Quarterly of High-Technology Plasma Processes. 2020. Vol. 24(2). P. 99.
2. *Bakhtin V. A., Zakharov D. A., Kozlov A. N., Kononov V. S.* / CEUR Workshop Proc. 2020. Vol. 2543. P. 59.
3. *Кузенов В. В., Фролко П. А., Шумаев В. В.* / ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. Вып. 2. С. 105.
4. *Garkusha I. E., Solyakov D. G., Chebotarev V. V., Makhlay V. A., Kulik N. V.* / Plasma Physics Reports. 2019. Vol. 45. P. 166.
5. *Кузенов В. В., Рыжков С. В.* / Прикладная физика. 2015. № 2. С. 37.
6. *Solyakov D. G., Volkova Y. Y., Ladygina M. S., Marchenko A. K., Merenkova T. M., Garkusha I. E., Petrov Y. V., Chebotarev V. V., Makhlay V. A., Kulik N. V. et al.* / Eur. Phys. J. Plus. 2021. Vol. 136. P. 566.
7. *Кузенов В. В., Рыжков С. В., Фролко П. А., Шумаев В. В.* / Труды МАИ. 2015. № 82.
8. *Voronin A. V., Goryainov V. Y., Gusev V. K., Minaev V. B., Novokhatskii A. N., Petrov Yu. V., Sakharov N. V., Zhilin E. G., Chektybaev B. Zh., Sarsembaev E. A., Sadykov A. D., Kusainov A. T.* / Plasma Physics Reports. 2021. Vol. 47. P. 763.
9. *Кузенов В. В., Рыжков С. В.* / Прикладная физика. 2014. № 3. С. 26.
10. *Shanenkov I. I., Pak A. Ya., Sivkov A. A., Shanenkova Yu. L.* / MATEC Web of Conferences. 2014. Vol. 19. P. 01030.
11. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* / Computational Thermal Sciences. 2021. Vol. 13. P. 45.
12. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V.* / Symmetry. 2021. Vol. 13. P. 927.
13. *Ivanov I. A., Batkin V. I., Burdakov A. V., Kuklin K. N., Mekler K. I., Rovenskikh A. F., Sidorov E. N.* / Plasma Physics Reports. 2021. Vol. 47. P. 938.
14. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Frolko P. A.* / Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 830. P. 012049.
15. *Kuzenov V. V., Ryzhkov S. V., Varaksin A. Yu.* / Applied Sciences. 2022. Vol. 12. P. 3610.

Investigation of different versions of coaxial injectors for creating pulsed plasma jets in an electromagnetic accelerator

N. V. Batrak, M. V. Kuttyrev and N. G. Kopaleishvili

Bauman Moscow State Technical University
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia
E-mail: nikitakopaleyshvili@mail.ru

Received September 22, 2022

In order to create a compact, stably operating coaxial injector of a pulsed plasma jet (ionized gas), several design variants of coaxial injectors were designed, manufactured and tested. Experiments were carried out with a dielectric insert made of silicate glass or fused quartz and with a dielectric insert made of fluoroplast.

Keywords: coaxial magnetoplasma accelerator, injector, plasma jet, electromagnetic accelerator.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-18-22

REFERENCES

1. V. M. Astashynski, H. M. Dzahnidze, E. A. Kostyukevich, A. M. Kuzmitski, P. N. Shoronov, V. I. Shymanski and V. V. Uglov, High Temp. Material Processes: An Int. Quarterly of High-Technology Plasma Processes **24**(2), 99 (2020).
2. V. A. Bakhtin, D. A. Zakharov, A. N. Kozlov and V. S. Konovalov, CEUR Workshop Proc. **2543**, 59 (2020).
3. V. V. Kuzenov, P. A. Frolko and V. V. Shumaev, Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion **41**, 115 (2018).
4. I. E. Garkusha, D. G. Solyakov, V. V. Chebotarev, V. A. Makhlay and N. V. Kulik, Plasma Physics Rep. **45**, 166 (2019).
5. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, Applied Physics, No. 2, 37 (2015) [in Russian].
6. D. G. Solyakov, Y. Y. Volkova, M. S. Ladygina, A. K. Marchenko, T. M. Merenkova, I. E. Garkusha, Y. V. Petrov, V. V. Chebotarev, V. A. Makhlay, N. V. Kulik et al., Eur. Phys. J. Plus. **136**, 566 (2021).
7. V. V. Kuzenov, S. V. Ryzhkov, P. A. Frolko and V. V. Shumaev, Trudy MAI **82** (2015).
8. A. V. Voronin, V. Y. Goryainov, V. K. Gusev, V. B. Minaev, A. N. Novokhatskii, Yu. V. Petrov, N. V. Sakharov, E. G. Zhilin, B. Zh. Chektybaev, E. A. Sarsembaev, A. D. Sadykov and A. T. Kusainov, Plasma Physics Rep. **47**, 763 (2021).
9. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, Applied Physics, No. 3, 26 (2014) [in Russian].
10. I. I. Shanenkov, A. Ya. Pak, A. A. Sivkov and Yu. L. Shanenkova, MATEC Web of Conferences **19**, 01030 (2014).
11. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, Computational Thermal Sciences **13**, 45 (2021).
12. V. V. Kuzenov and S. V. Ryzhkov, Symmetry **13**, 927 (2021).
13. I. A. Ivanov, V. I. Batkin, A. V. Burdakov, K. N. Kuklin, K. I. Mekler, A. F. Rovenskikh and E. N. Sidorov, Plasma Physics Rep. **47**, 938 (2021).
14. V. V. Kuzenov, S. V. Ryzhkov and P. A. Frolko, J. Phys.: Conf. Ser. **830**, 012124 (2017).
15. V. V. Kuzenov, S. V. Ryzhkov and A. Yu. Varaksin, Applied Sciences **12**, 3610 (2022).