

## Разработка быстрого затвора для защиты от побочных продуктов имплозии лайнера

*А. Жигалин\*, А. Русских, В. Орешкин*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*Zhigalin@ovpe2.hcei.tsc.ru*

**Абстракт.** В статье описана конструкция быстрого электрического затвора, основанного на сжатии тонкостенного металлического цилиндра магнитным полем соленоида. Данный затвор позволяет защитить диагностическое оборудование или тестовый объект, используемые в эксперименте от побочных продуктов имплозии лайнера.

**Ключевые слова:** генератор тока, электрический взрыв проводников, имплозия лайнера.

### 1. Введение

Интерес к исследованию лайнеров объясняется возможностью их практического применения. Z-пинч является одним из первых кандидатов для нагрева дейтерий-тритиевой смеси до условий, в которых возможно протекание реакции термоядерного синтеза. Исследование возможности решения проблемы термоядерного синтеза с применением лайнерных систем продолжается многие годы [1, 2]. Активно ведутся эксперименты в рамках концепции MagLIF [3, 4]. Одним из важных приложений имплозии лайнеров на сегодняшний день является также создание источников рентгеновского излучения [5, 6]. С различными приложениями связан и интерес к электрическому взрыву проводников (ЭВП) в вакууме в режиме скинирования тока [7].

Как следствие используемого способа получения плазмы, в экспериментах с Z-пинчем генерируется множество побочных продуктов. Эти побочные продукты могут включать в себя материал, разлетающийся с электродов, твердые и расплавленные части вещества нагрузки, взрывообразно расширяющийся горячий газ, заряженные частицы. Все эти побочные продукты могут вызвать разрушение диагностики и/или тестового объекта, используемых в эксперименте. Самыми простыми и дешевыми способами защиты диагностики являются расположение диагностики на достаточном удалении для уменьшения потока побочных продуктов, использование диафрагм (если это позволяет диагностическая методика), использование фильтров, прозрачных для рентгеновского излучения, но достаточно плотных, чтобы остановить распространение побочных продуктов в диагностическом канале. Однако, в некоторых случаях данных мер может быть недостаточно, либо их нельзя применить из-за особенностей диагностической методики. В таких случаях решением проблемы может быть применение быстрых затворов, перекрывающих диагностический канал до прихода побочных продуктов имплозии лайнера.

### 2. Методика эксперимента

Если диагностика или тестовый объект располагаются достаточно близко к z-пинчу и требуется перекрыть отверстие большого диаметра, то это накладывает достаточно жесткие технические требования к конструкции затвора. Типичная скорость разлета побочных продуктов составляет  $10^4$  м/с. Целью данной работы были разработка и исследование характеристик быстрого затвора для защиты от побочных продуктов имплозии лайнера. При этом затвор должен удовлетворять следующим техническим требованиям:

- время закрытия затвора должно быть 100 мкс или меньше;
- диаметр перекрываемого отверстия 50 мм;
- затвор должен обеспечивать полное перекрывание апертуры и отсутствие побочных продуктов в объеме за затвором;

- затвор должен работать в вакууме;
- должна быть предусмотрена система синхронизации затвора с сильноточным генератором тока;
- разброс времени закрытия затвора должен быть не более 10% от времени закрытия затвора.
- габариты оборудования должны быть по возможности минимальными, так как предполагается их размещение вблизи узла нагрузки сильноточного генератора.

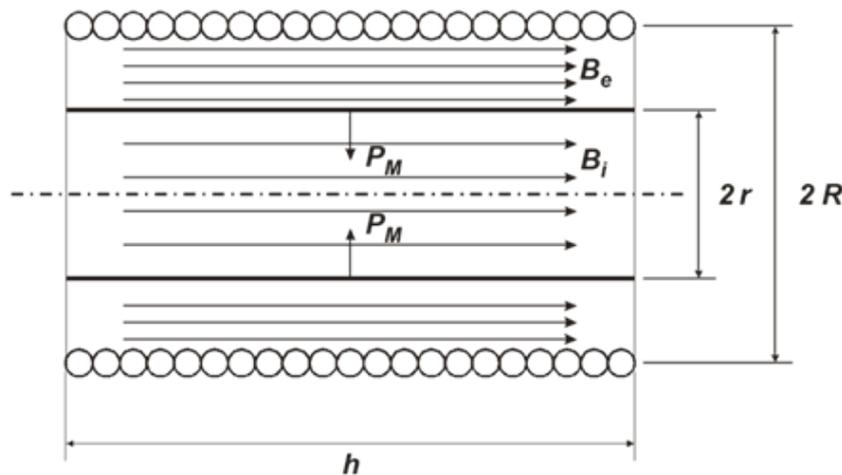


Рис. 1. Схема соленоида с цилиндром.  $P_M$  – величина магнитного давления на поверхности цилиндра;  $B_e$  и  $B_i$  – магнитная индукция на внешней и внутренней поверхности цилиндра;  $2R$  – диаметр соленоида;  $2r$  – диаметр цилиндра,  $h$  – длина соленоида.

Работа затвора осуществляется следующим образом. Соленоид затвора соединен с накопителем энергии (которым является, как правило, конденсатор) через управляемый разрядник. Накопитель энергии заряжается до рабочего напряжения  $Vch$  с помощью зарядного устройства. В этом состоянии затвор готов к работе. При поступлении сигнала с генератора импульсов срабатывает управляемый разрядник, и накопитель энергии начинает разряжаться через цепь затвора. При прохождении электрического тока в соленоиде создается аксиальное магнитное поле, которое начинает сжимать металлический цилиндр внутри соленоида. По мере сжатия цилиндра происходит перекрытие апертуры диагностического канала. Все элементы затвора за исключением соленоида располагаются вне вакуумного объема. Единственной частью, находящейся в вакууме, является соленоид с цилиндром, которые будут устанавливаться в диагностическом канале между пинчем и защищаемым объектом. Тестирование затвора проводилось при остаточном давлении в вакуумной системе менее  $10^{-4}$  Торр.

### 3. Экспериментальные результаты

В качестве материала цилиндра необходимо выбрать металл, обладающий высокой проводимостью, пластичностью и малой плотностью. Необходимыми свойствами обладает алюминий. Поэтому все эксперименты проводились с алюминиевыми цилиндрами. В качестве рабочего тела затвора использовались стандартные алюминиевые банки от прохладительных напитков (рис. 2б). Толщина стенок таких банок составляет 100 мкм (погонная масса – 0.56 г/см). С одной стороны банка обрезалась. Дно банки вырезалось, но оставлялся буртик для обеспечения жесткости. Это приводит к некоторому ограничению апертуры затвора по сравнению с внутренним диаметром алюминиевой банки. В данных экспериментах апертура затвора составляла 58 мм. Перед использованием цилиндры

обжигались в печи при температуре 450 градусов Цельсия. После этого печь выключалась и цилиндры медленно охлаждались. Такая предварительная обработка делает цилиндры более пластичными, уменьшая вероятность образования мелких порывов в шляпке цилиндра в результате сжатия. В торцах цилиндра, находящихся вне катушки помещались алюминиевые кольца толщиной 3 мм, которые предотвращали смятие концов цилиндра и обеспечивали более надежное перекрытие апертуры затвора. Несомненным преимуществом использования таких банок является то, что они изготавливаются по единой технологии и практически идентичны. Это позволяет снизить или полностью устранить один из возможных факторов разброса времени срабатывания быстрого затвора.

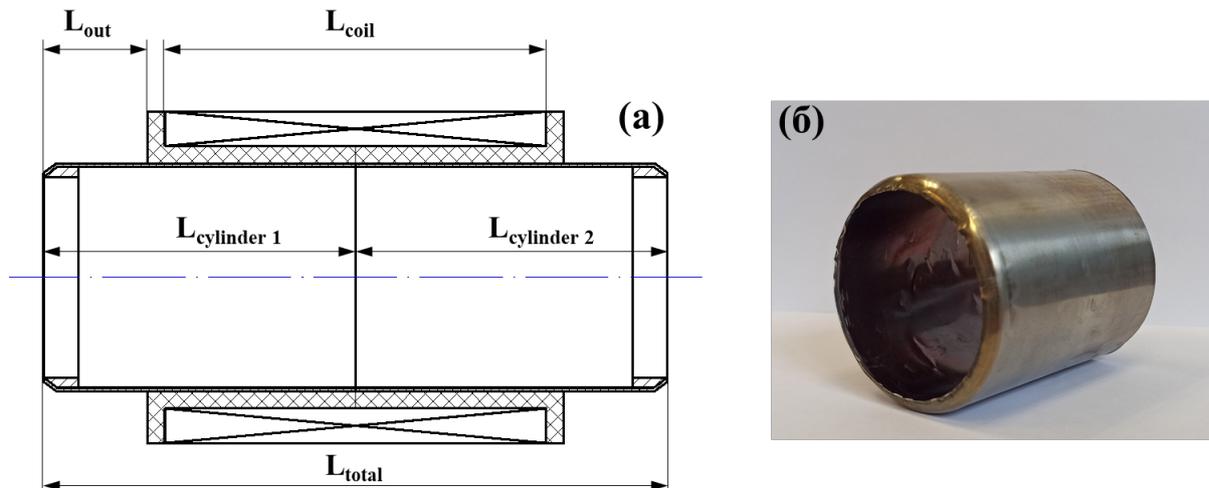


Рис. 2. Двухсторонняя конфигурация затвора (а) и внешний вид тонкостенного цилиндра (б).

Параметры цепи затвора при проведении экспериментов:  $C = 30$  мкФ,  $V_{ch} = 25$  кВ,  $R_{charge} = 0.6$  Ом.

При данных параметрах время закрытия затвора составило 100 мкс при средней скорости перекрытия апертуры диагностического канала 330 м/с.

В ходе экспериментов было решено улучшить конструкцию затвора с точки зрения надежности путем использования двух цилиндров с двух сторон катушки (рис. 2а). Преимущество данной конструкции в том, что диагностический канал перекрывается двумя шторками. В случае возникновения порывов в одной из них паразитные продукты будут остановлены второй шторкой. В случае генерации побочных продуктов самим затвором, они останутся внутри тела затвора.

В результате сжатия тонкостенного цилиндра на оси образуется сильно сжатая ножка и формируется шляпка, которая обычно выдавливается наружу из области катушки (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид цилиндра с начальным диаметром 66 мм после срабатывания затвора.

После того как затвор сработал, в систему напускается воздух и из соленоида извлекаются сжавшиеся цилиндры. Отработавшие цилиндры достаточно заменить на новые и затвор вновь готов к работе.

#### 4. Заключение

Разработанный затвор дает возможность перекрытия апертуры диаметром 58 мм при среднем времени закрытия затвора 100 мкс (средняя скорость перекрытия апертуры диагностического канала 330 м/с). Предложенная двухсторонняя конфигурация затвора позволяет обеспечить надежную защиту диагностики или тестовых объектов, используемых в эксперименте, от побочных продуктов имплозии лайнера.

#### Признательность

Данная работа поддержана Российским научным фондом (проект № 22-19-00686).

#### 5. Литература

- [1] M.K. Matzen, C. Deeney, R.J. Leeper, J.L. Porter, R.B. Spielman, G.A. Chandler, M.S. Derzon, M.R. Douglas, D.L. Fehl, D.E. Herbron, T.J. Nash, R.E. Olson, L.E. Ruggles, T.W.L. Sanford, J.F. Seaman, K.W. Struve, W.A. Stygar, D.L. Peterson, Fast z-pinch as dense plasma, intense x-ray source for plasma physics and fusion applications, *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. **41**, A175, 1999, doi: 10.1088/0741-3335/41/3A/011
- [2] F.J. Wessel, B. Moosman, N. Rostoker, Y. Song, A. Van Drie, P. Nay, H.U. Rahman, UCI staged Z-pinch facility, *IV Int. Conf. on Dense Z-pinchs*, Vancouver, Canada, 1997.
- [3] S. Slutz, M. Herrmann, R. Vesey, A. Sefkow, D. Sinars, D. Rovang, K. Peterson, and M. Cuneo, Pulsed-power-driven cylindrical liner implosions of laser preheated fuel magnetized with an axial field, *Phys. Plasmas*, **17**(5), 056303, 2010, doi: 10.1063/1.3333505
- [4] M.R. Gomez, S.A. Slutz, A.B. Sefkow, D.B. Sinars, K.D. Hahn, S.B. Hansen, E.C. Harding, P.F. Knapp, P.F. Schmit, and C.A. Jennings, Experimental Demonstration of Fusion-Relevant Conditions in Magnetized Liner Inertial Fusion, *Phys. Rev. Lett.* **113**(15), 155003, 2014, doi: 10.1103/PhysRevLett.113.155003
- [5] C. Deeney, C.A. Coverdale, and M.R. Douglas, A review of a long-implosion-time z-pinch as efficient and high-power radiation source, *Laser and Particle Beams*, vol. **19**, 497, 2001, doi: 10.1017/S0263034601193079
- [6] G.A. Mesyats, T.A. Shelkovenko, G.I. Ivanenkov, A.V. Agafonov, et al., X-pinch source of subnanosecond soft X-ray pulses based on small-sized low-inductance current generator, *J. Exp. Theor. Phys.* **111**(3), 363, 2010, doi: 10.1134/S1063776110090049
- [7] V.I. Oreshkin, R.B. Baksht., S.A. Chaikovsky, R.K. Cherdizov, V.A. Kokshenev, N.E. Kurmaev, G.A. Mesyats, E.V. Oreshkin, N.A. Ratakhin, A.G. Roussikh, A.A. Zherlitsyn, and A.S. Zhigalin, Generation of magnetosonic waves by the electrical explosion of conductors driven by megaampere current pulses, *Physics of Plasmas*, vol. **30**(11), 113508, 2023, doi: 10.1063/5.0166729