

10. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений // М.: Наука, 1966, 687с.
11. С. Ф. Гаранин, Физические процессы в системах МАГО-МТФ // Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012, 343 с.
12. NIST. CCCBDB Atomization Energies, see <https://cccbdb.nist.gov/ea1.asp>.
13. *LASL Shock Hugoniot Data*, edited by S. P. Marsh // University of California Press, Berkeley/Los Angeles, California, 1980.

## УЗЕЛ ОТКЛЮЧЕНИЯ ДИСКОВОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ОТ СПИРАЛЬНОГО

*Б.Е. Гриневич, Н.И. Ситникова, К.Н. Климущкин, К.С.Торопов*

РФЯЦ – ВНИИЭФ, Саров, Россия

Рассмотрены два варианта устройств отключения дискового взрывомагнитного генератора от спирального. Оба варианта не предусматривают наличия электродетонаторов для подрыва устройств и срабатывают автоматически при окончании работы спирального генератора. Описаны принцип действия и конструкция устройства отключения. Представлены результаты моделирования и экспериментов по модернизации стандартного устройства отключения.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, спиральный взрывомагнитный генератор, дисковый взрывомагнитный генератор, узел отключения,

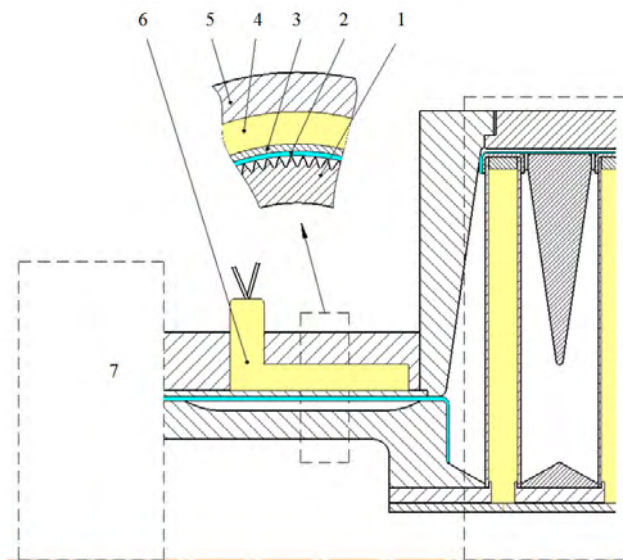
Введение. Дисковые взрывомагнитные генераторы (ДВМГ) представляют собой компактные источники электромагнитной энергии с энергозапасом в десятки и сотни мегаджоулей. ДВМГ предназначены для изучения свойств веществ и моделирования физических процессов, происходящих при высоких плотностях энергии [1, 2]. Коэффициент усиления энергии ДВМГ невелик и, как правило, не превышает двадцати [3]. Начальная энергии в ДВМГ вводится с помощью спиральных взрывомагнитных генераторов (СВМГ), коэффициент усиления энергии которых может достигать до тысячи и более [4]. Начальный магнитный поток в СВМГ вводится с помощью конденсаторной батареи. Для того, чтобы максимум энергии ДВМГ поступал в нагрузку, в момент начала работы дискового генератора с помощью специального устройства производится замыкание электрической цепи между спиральным и дисковым генераторами [5]. Это устройство получило название узла отключения (УО).

Конструкция стандартного узла отключения. В целом, конструкция узла отключения была отработана в начале 70-х годов прошлого века и с тех пор не подвергалась изменениям [6]. Конструкция используемого ранее в экспериментах УО ДВМГ от СВМГ, схематично представлена на рис. 1.

Система инициирования заряда 6, состоит из равномерно расположенных по окружности взрывных линий задержки и такого же количества последовательно соединенных электродетонаторов (ЭД). При срабатывании ЭД системы инициирования заряда происходит инициирование детонации в цилиндрическом заряде взрывчатого вещества ВВ 4, с последующим разгоном медного цилиндра-лайнера 3. Лайнер 3 вытесняет лавсановый изолятор 2 в канавки треугольного сечения с углом при вершине ~ 60°, проточенные продольно по образующей на поверхности медного цилиндра 1 и замыкает контур.

Недостатками данной конструкции являются: наличие большого числа ЭД, применение которых может привести в несанкционированному подрыву, связанному с возникновением

электрических наводок во время работы конденсаторной батареи или СВМГ и использование большого количества ВВ необходимого для работы УО. Большое число ЭД приводит к необходимости применения сложных подрывных установок, что не всегда возможно в полевых условиях. Электродетонаторы узла отключения должны срабатывать в строго заданный момент времени, в соответствии с моментами подрыва СВМГ и ДВМГ.



**Рисунок 1.** Схема стандартного узла отключения ДВМГ от СВМГ:

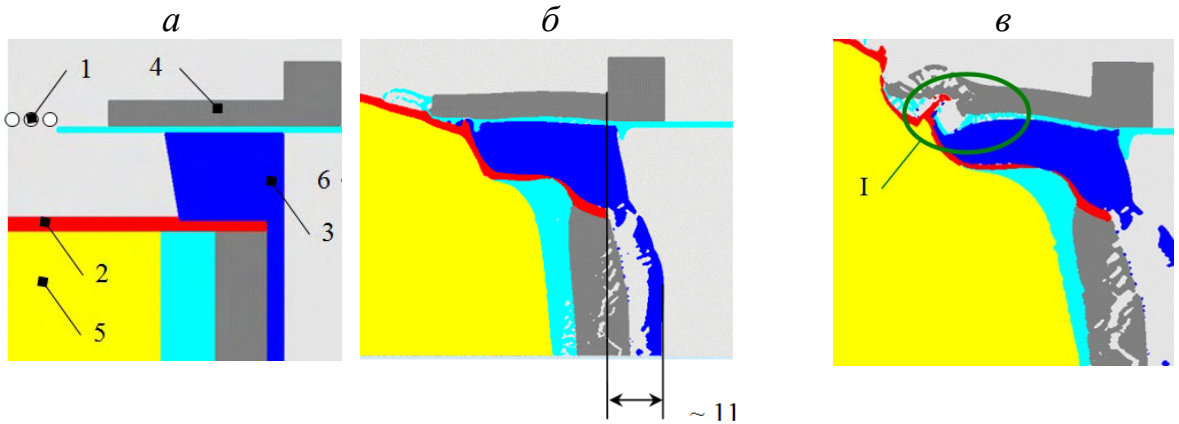
- 1 – медный цилиндр, 2 - лавсановый изолятор, 3 - медный цилиндр-лайнер,  
4 - цилиндрический заряд ВВ, 5 - стальной корпус, 6 - система инициирования заряда, 7 – СВМГ, 8 – ДВМГ

### Модернизированный узел отключения с использованием трубы СВМГ в качестве замыкающего элемента

В настоящей работе рассмотрены результаты расчётов и экспериментов по созданию УО, содержащего относительно небольшую массу ВВ, подрыв которого осуществляется автоматически без использования ЭД. Проведено компьютерное моделирование двух вариантов устройства УО – с использованием трубы СВМГ в качестве замыкающего элемента и с использованием заряда ВВ СВМГ для передачи детонации УО.

В обоих вариантах отсутствует дополнительная подрывная установка, а синхронизация работы СВМГ и УО осуществляется выбором взаимного расположением элементов ключа и конца спирали.

В первом варианте для замыкания выхода СВМГ используются выходные фланцы трубы и спирали, а роль переключающего элемента выполняет труба СВМГ. На рис. 2, а приведен эскиз генератора являющийся моделью для расчета работы УО. На рис. 2, б и 2, в приведены результаты расчета работы данного узла к моментам времени  $t=0$  (замыкание фланцев трубой - соответствует началу сжатия магнитного поля в ДВМГ) и  $t = 13$  мкс (окончание работы ДВМГ). Двумерные газодинамические расчёты моделирования работы различных вариантов узлов отключения, выполнены по программе ANSYS Autodyn [7].



**Рисунок 2.** Вид расчетной модели узла отключения токового контура от СВМГ:  
а – исходное положение, б –  $t = 0$ , в –  $t = 13$  мкс; 1 – катушка СВМГ;  
2 – труба СВМГ (медь); 3 – фланец трубы (сталь); 4 – фланец спирали (сталь);  
5 – заряд ВВ СВМГ; 6 – выходной изолятор СВМГ (полиэтилен)

Анализируя расчеты, можно увидеть, что:

- поверхность фланца трубы 3, обращенная к ДВМГ, к началу работы ДВМГ пролетает всего лишь 11 мм (рис. 2, б). Это позволяет располагать ДВМГ вблизи СВМГ.
- в области I (рис. 2, в) наблюдается сильное растяжение и утонение стенки

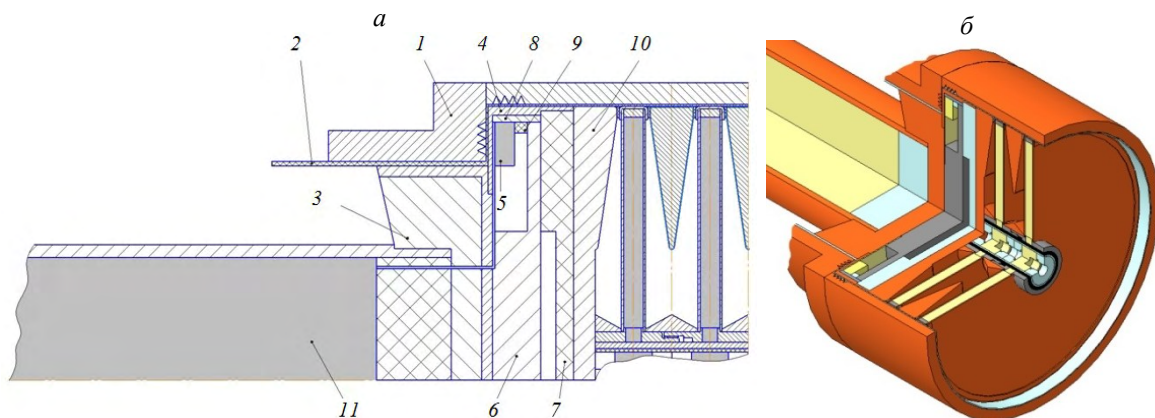
От заряда ВВ расположенного в трубе СВМГ 11, по трубе до толщины  $\sim 1$  мм, что в условиях эксперимента, при токе 50 МА, непременно приведет к её отрыву и, как следствие, к прерыванию контакта. Кроме этого, наблюдается расширение полости занимаемой выходным изолятором СВМГ, что в сумме с индуктивностью коаксиала занимаемого выходным изолятором СВМГ ( $\sim 0.2$  нГн) увеличивает нагрузку ДВМГ на  $\sim 0.4$  нГн.

### Модернизированный узел отключения с использованием заряда ВВ СВМГ для передачи детонации УО

В результате проведения предварительных расчетов, с различными вариациями материалов и геометрии, был предложен альтернативный вариант конструкции УО, представленный на рис. 3.

имеющимся в полиэтиленовом кольце и внутреннем медном токопроводе 3 отверстиям, заполненным пластическим составом ВВ, детонация передается пластине из того же состава ВВ толщиной 1 мм. Затем, распространяясь радиально, инициирует кольцевую шашку 5 (толщиной 9 мм) из состава ВВ на основе октогена. Продукты взрыва шашки разгоняют медный электрод 4 в осевом и радиальном направлениях. Замыкание токового контура происходит после разрушения фигурного полиэтиленового изолятора 2 на краях канавок треугольного сечения выполненных на внутренней поверхности медного корпуса 1, при движении электрода 4.

Для того, чтобы снизить интенсивность воздействия ударной волны при детонации кольцевой шашки 5 на детали УО, в стальном фланце 6 предусмотрена полость разгрузки. Между электродом и шашкой ВВ проложено алюминиевое кольцо 8, «смягчающее» действие ударной волны на электрод, обеспечивая тем самым целостность токового контура на всем протяжении времени работы дисковых элементов ДВМГ. Для защиты входного фланца ДВМГ 10 от ударного воздействия в результате распространяющейся детонации ВВ СВМГ, между ним и стальным фланцем проложена полиэтиленовая вставка 7, исполняющая роль демпфера. Толщина этой вставки выбрана таким образом, чтобы ударные волны, возникающие при детонации ВВ, расположенного в трубе СВМГ не достигали ДВМГ до момента начала работы дисковых элементов ДВМГ.



**Рисунок 3.** Схема (а) и общий вид (б) конструкции подрыва УО от СВМГ

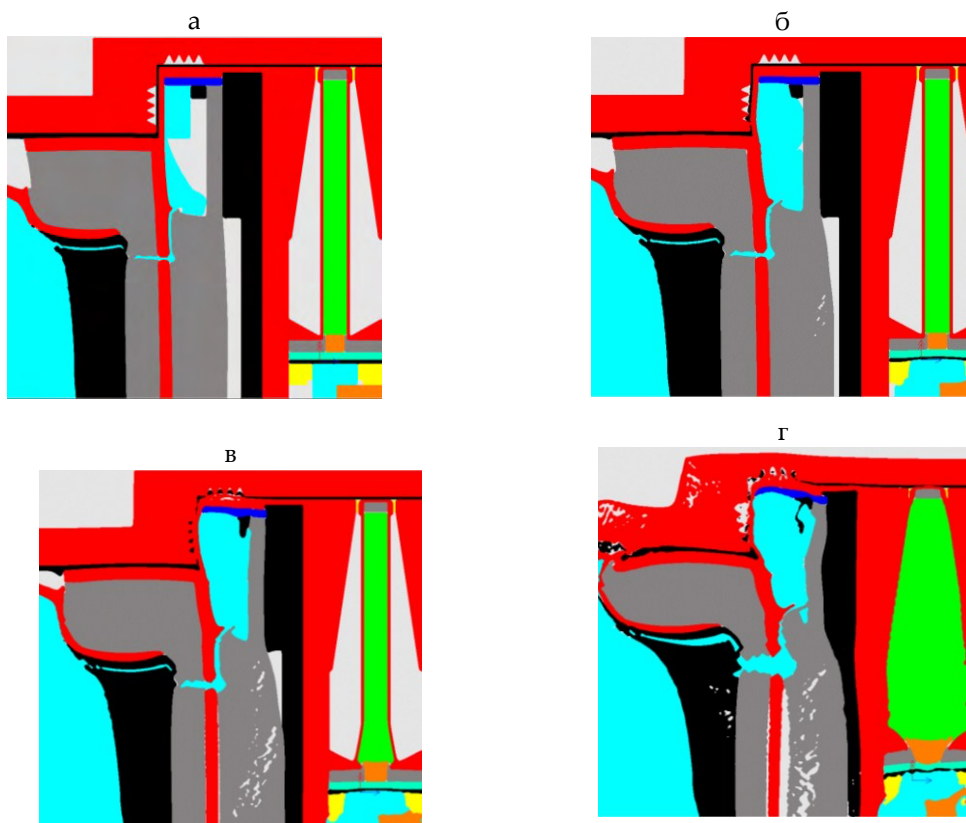
- 1 – медный корпус, 2 – фигурный изолятора, 3 – внутренний токопровод, 4 – медный электрод, 5 – кольцевая шашка ВВ, 6 – стальной фланец, 7 – полиэтиленовая вставка, 8 – алюминиевое кольцо, 9 – полиэтиленовое кольцо, 10 – входной фланец ДВМГ, 11 – ВВ СВМГ

При моделировании, особое внимание было уделено подбору материалов для деталей конструкции узла отключения, которые обеспечивали бы необходимый контакт его рабочих поверхностей на промежутке времени: от момента срабатывания УО и до вытеснения магнитного потока дисковыми элементами ДВМГ в передающую линию. Элементы конструкции, имеющие непосредственный контакт с изолятором, выполнены из одного материала – меди. Тем самым, обеспечивается надежный электрический контакт между токопроводящими частями конструкции.

В ходе моделирования был подобран момент времени для синхронного срабатывания УО с началом работы дисков элементов ВМГ. В момент достижения в ДВМГ максимальной величины начального тока запитки, полученного от предусилителя - СВМГ, узел отключения замыкается и отключает спираль от дисков. В тот же момент времени, под действием продуктов взрыва соседние дисковые элементы ДВМГ начинают схлопываться, сжимая магнитный поток во всех полостях одновременно, и вытесняют его из полостей сжатия через передающую линию в нагрузку. ДВМГ начинает усиливать ток.

На рис. 4 проиллюстрирован процесс работы данной конструкции УО в различные моменты времени.

Время  $t=0$  мкс соответствует моменту инициирования ВВ расположенного в центральной трубе СВМГ. Из рисунков видно, как под действием распространяющейся детонации ВВ трубы СВМГ происходит инициирование кольцевой шашки ВВ УО (см. рис.4, а). Происходит равномерное замыкание контура от меньшего радиуса к большему, на всем интервале времени работы УО. Моменты времени  $t=54$  мкс (см. рис. 4, б) соответствует началу работы УО (прокалывание изолятора о зуб, расположенный на  $\varnothing 213$  мм корпуса 1, в этот же момент дисковые элементы начинают двигаться и сжимать магнитный поток.),  $t= 57$  мкс - полному срабатыванию УО (см. рис. 4, в). Целостность токового контура во время работы УО и работы дисков не нарушается (см. рис.4, г). Оказываемое на входной фланец ДВМГ давление от стального фланца не приносит негативных изменений в работу близлежащего дискового элемента ДВМГ, благодаря полиэтиленовому вкладышу, проложенному между фланцами. Скорее, наоборот, благодаря незначительной деформации входного фланца, а также тому, что диск и фланец выполнены из одного материала - меди, обеспечивается равномерный плотный контакт их поверхностей, без образования полостей.



**Рисунок 4.** Моделирование подрыва УО от СВМГ на радиусе передающей линии:  
 а –  $t = 51$  мкс, б –  $t = 54$  мкс, в –  $t = 57$  мкс, г –  $t = 68,26$  мкс

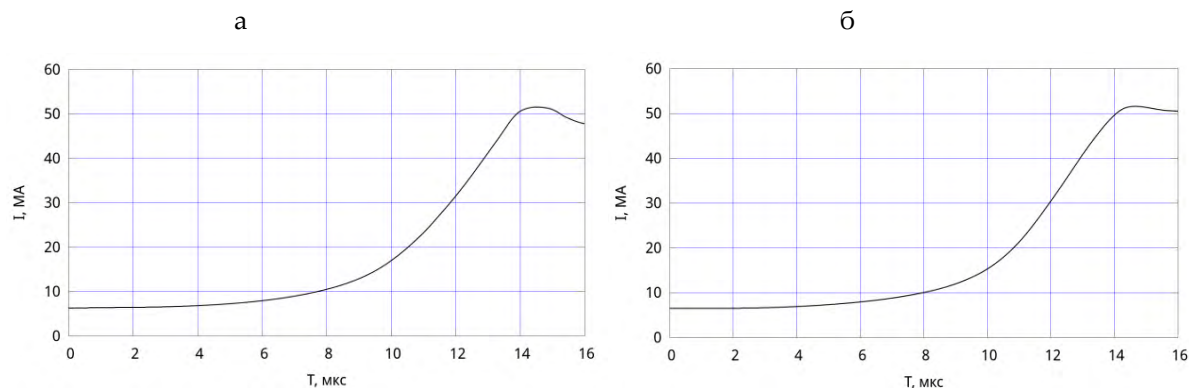
Моделирование показало, что данная конструкция удовлетворяет всем предъявленным к ней требованиям:

- отсутствие дополнительных ЭД для инициирования УО;
- подрыв УО осуществляется от СВМГ на радиусе передающей линии;
- наличие надежного контакта рабочих поверхностей узла отключения на промежутке времени: от момента передачи магнитного потока СВМГ в ДВМГ и до вытеснения потока дисками в передающую линию.
- одним из важных преимуществ конструкции, является малая индуктивность узла отключения  $L_{\text{собств.}} - 0.17$  нГн (во время работы УО);  $L_{\text{остаточн.}} - 0.04$  нГн (после срабатывания УО).
- небольшая масса кольцевой шашки заряда ВВ, выполненного на основе октогена – 223 г.
- простота конструкции.

Конструкция модернизированного УО показала успешную работу в ряде опытов. На рис. 5 приведены зависимости тока от времени для трёхэлементных ДВМГ Ø250мм со старым (см. рис. 5, а) и новым (см. рис. 5, б) узлами отключения. Ухудшений в работе ДВМГ не наблюдается.

## Заключение

В работе приведено описание конструкции стандартного устройства отключения ДВМГ от СВМГ. Обоснована целесообразность модернизации существующего узла отключения. Приведены результаты моделирования и экспериментальные данные работы усовершенствованного УО.



**Рисунок 5.** Зависимости тока от времени для трёхэлементных ДВМГ Ø250мм:  
а – стандартный УО, б – модернизированный УО

### Список литературы

1. Протасов М.С., Архипов Б.В., Петрухин А.А., Прокопов В.А. и др. Быстродействующий дисковый взрывомагнитный генератор // Сверхсильные магнитные поля: Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегатауссных магнитных полей и родственным экспериментам, новосибирск,
2. Труды Третьей Международной конференции по генерации мегатауссных магнитных полей и родственным экспериментам. 1983.
3. В.К. Чернышев, В.В.Вахрушев
4. Источник электромагнитной энергии на основе ДВМГ диаметром 250 мм
5. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Инв.№38/1, 1998.
6. Б.Е.Гриневич, В.Б.Куделькин
7. Источник электромагнитной энергии на основе 10-ти модульного дискового ВМГ Ø 250мм РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Инв.№38/233, 2006.
8. Ивановский А.В., Куделькин В.Б., Вахрушев В.В., Чернышёв В.К
9. Малогабаритный взрывомагнитный источник энергии на основе дискового ВМГ второго поколения Ø 250 мм
10. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 1994.
11. В.К. Чернышев, В.В.Вахрушев, В.И.Шпагин, В.Б.Куделькин, В.А.Логунов
12. Результаты поисковых исследований на моделях, направленных на повышение КПД дискового взрывомагнитного генератора.
13. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Инв.№38/136, 2001.
14. В.К. Чернышев, В.В.Вахрушев, А.Р.Гавриш, А.И.Кучеров, А.А.Петрухин
15. Исследование и разработка обострителя, способного при достигнутом уровне быстродействия 1,5-2 мкс работать с ВМГ, имеющим в 2-3 раза больший запас энергии (до 50-100 МДж). 1988.
16. ANSYS