

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВНОГО РАЗМЫКАТЕЛЯ ТОКА С РЕБРИСТОЙ ПРЕГРАДОЙ НА ОСНОВЕ СОЛЕНОИДА ИЗ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

INVESTIGATION OF EXPLOSIVE OPENING SWITCH WITH RIBBED BARRIER BASED ON STEEL WIRE SOLENOID

В. А. Демидов, С. А. Казаков, Ю. В. Власов, С. И. Володченко, А. А. Агапов, А. С. Борискин, С. Н. Голосов

V. A. Demidov, S. A. Kazakov, Y. V. Vlasov, S. I. Volodchenkov, A. A. Agapov, A. S. Boriskin, S. N. Golosov

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Проведены расчетные исследования взрывного размыкателя тока (ВРТ) с ребристой преградой в виде соленоида из стальной проволоки. Варьировались диаметр проволоки и шаг витков соленоида. Выбраны параметры ВРТ для экспериментов по размыканию электрического контура многоэлементного дискового взрывомагнитного генератора.

Представлены результаты газодинамических расчетов и эксперимента с моделью 1:6 натурногоразмыкателятока.

The calculated study of the explosive opening switch (EOS) with a ribbed barrier based on the steel wire solenoid was carried out. The wire diameter, pitch of the solenoid rings. The EOS parameters were chosen for the experiments of the electrical circuit opening of the multi-element disk magneto-cumulative generator.

The gas-dynamic calculation results and results of the experiment with the 1:6 model of the full-scale opening switch were provided.

Введение

Одним из способов формирования мегаамперных импульсов тока является переключение тока из индуктивного накопителя в нагрузку с помощью размыкателя. Для коммутации мегаамперных токов наиболее распространенными являются размыкатели, работающие на основе механического разрушения проводника продуктами взрыва заряда взрывчатого вещества – взрывные размыкатели тока (ВРТ) [1, 2]. Коммутация энергии в таких размыкателях основана на увеличении активного сопротивления участка токового контура. Применение ВРТ наиболее актуально для коммутации тока взрывомагнитных генераторов, которые в настоящее время являются самыми мощными источниками электромагнитной энергии.

Во ВНИИЭФ применяются ВРТ для преобразования тока дисковых взрывомагнитных генераторов (ДВМГ) с зарядами ВВ диаметром 240 и 480 мм в быстронарастающие импульсы с фронтом микросекундного диапазона [3,4]. Разрушение

проводников в этих размыкателях производится на ребристых преградах диаметром 290 и 560 мм при линейной плотности тока ~ 200 кА/см. С увеличением амплитуды тока и сохранением его линейной плотности автоматически увеличивается диаметр преграды. Однако изготовлением преград большого диаметра, ребра которых облицованы стальными кольцами, связано с технологическими трудностями. В частности, это проявилось при подготовке к испытанию ВРТ диаметром 560мм.

Для упрощения конструкции и технологии изготовления ВРТ было предложено заменить ребристую преграду проволочным соленоидом [5, 6]. Здесь проводник разрушается в пазах между витками соленоида. Такой размыкатель (ВРТ-600) создан для экспериментов с 15-элементным ДВМГ диаметром 240 мм [7]. В нем соленоид диаметром 626 мм изготавливается из стальной проволоки диаметром 2 мм, намотанной с шагом 4 мм.

В докладе представлены результаты расчетов по изменению диаметра проволоки и шага витков в соленоиде ВРТ-600. Определена толщина изоля-

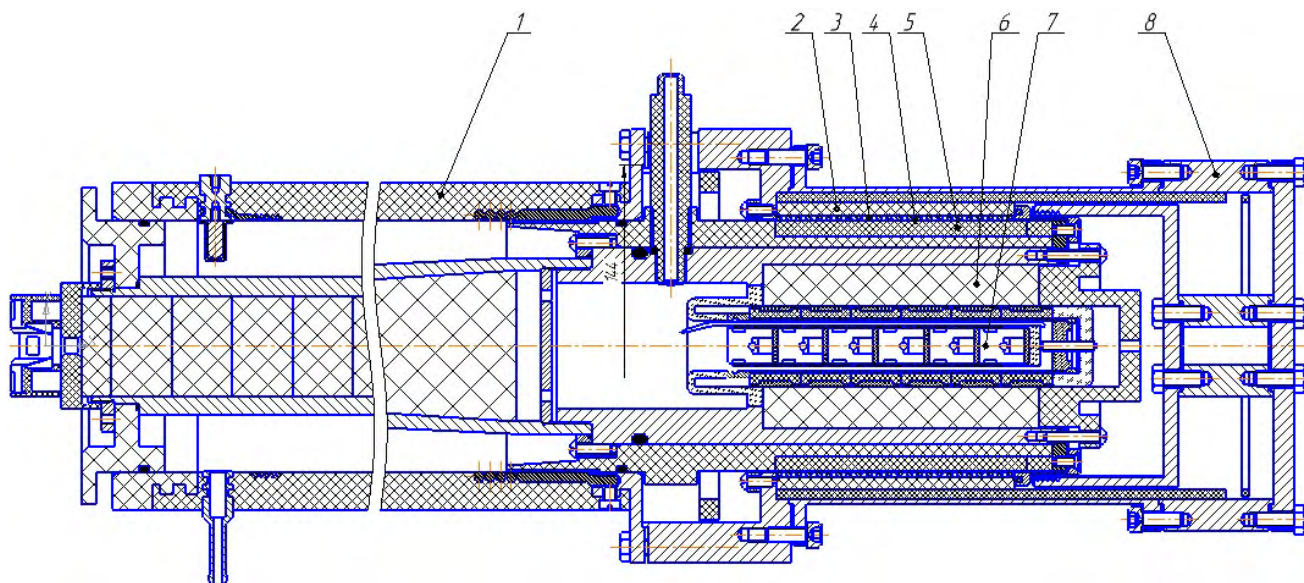


Рис. 1. Общий вид экспериментального устройства: 1 – спиральный ВМГ, 2 – диэлектрическая подложка, 3 – соленоид, 4 – разрушаемый проводник (фольга), 5 и 6 – заряды ВВ, 7 – устройство инициирования, 8 – нагрузка

тора передающей линии от ВРТ к нагрузке, при которой обеспечивается «живучесть» устройства во время срабатывания взрывного размыкателя. Приводятся результаты эксперимента с моделью ВРТ-600, выполненной в масштабе $\sim 1:6$.

1. Описание устройства

Общий вид устройства, состоящего из источника энергии в виде спирального взрывомагнитного генератора, ВРТ с проволочным соленоидом и индуктивной нагрузки, представлен на рис. 1. Внутренний диаметр соленоида ВМГ равен 100 мм, его длина ~ 600 мм. Диаметр расположения разрушаемого проводника (фольги) 4 в ВРТ равен 100 мм, длина – 90 мм.

По разные стороны фольги от которого расположены заряд взрывчатого вещества 5 и проволочный соленоид 3. Витки соленоида выполняют функцию упоров, сдерживающих движение проводника в радиальном направлении. Под воздействием продуктов детонации заряда ВВ5 происходит разгон участков фольги в зазорах между витками соленоида. При вылете этих участков фольги за пределы витков соленоида происходит многократное (по числу витков соленоида) разрушение проводника. Для разрыва фольги применяется цилиндрический заряд взрывчатого вещества 5 диаметром 100 мм и длиной 90 мм, инициируемый одновременно по всей внутренней поверхности. Проводник 4 выполнялся из медной фольги толщиной 0,3 мм.

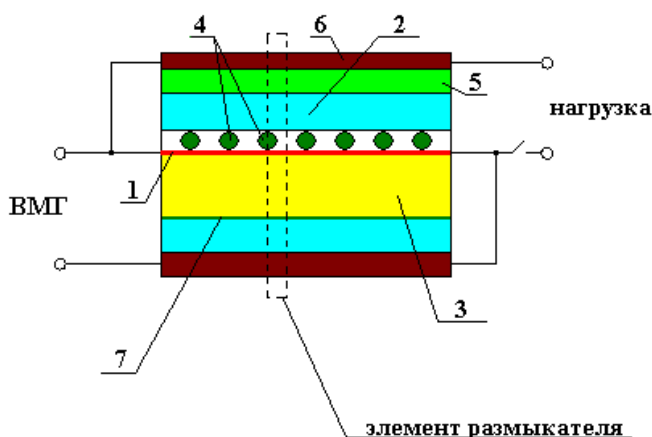
2. Расчеты размыкающего элемента ВРТ

Из рис. 2 видно, что размыкатель представляет собой периодическую структуру из повторяющихся элементов в виде упоров шириной, равной диаметру проволоки d , навитой на фольгу с шагом h и зазоров между витками. Поэтому областью для газодинамических расчетов движения фольги под действием продуктов детонации будет являться его элемент, обозначенный пунктиром на рисунке 2. Отсюда же следует условие «жесткая стенка» для правой и левой границ расчетной области.

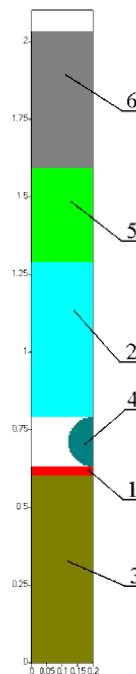
Спад сопротивления ВРТ может быть вызван за счет контакта проводящих областей соседних элементов размыкателя, а также за счет разрушения изолятора 5 (см. рис. 2) движущимися фрагментами фольги. Эти особенности исследовались в газодинамических расчетах.

Расчеты размыкателя с проволочным соленоидом проводились с использованием программы ЭГИДА-2D [8]. Свойства материалов описывались уравнением состояния в форме Ми – Грюнайзена [9]. Для продуктов детонации использовалось кубическое уравнение состояния [10]. Уругопластические свойства металлов определялись пределом текучести и коэффициентом Пуассона [11]. Параметры уравнения состояния для материалов, входящих в расчетную область, представлены в табл. 1.

Инициирование ВВ производилось одновременно по всей внутренней поверхности заряда. На этой поверхности ставилось граничное условие



1 – фольга, 2 – подложка, 3 – заряд ВВ, 4 – виток соленоида, 5 – изолятор передающей линии к нагрузке, 6 – обратный токопровод, 7 – поверхность, по которой инициируется заряд ВВ



Размеры в сантиметрах.

Рис. 2. Эскиз размыкателя с проволоочным соленоидом (слева) и его элемента (справа)

«жесткая стенка». На противоположной границе расчетной области ставилось условие «свободное вытекание».

Таблица 1
Параметры уравнения состояния Ми – Грюнайзена и прочностные свойства материалов, используемых в ВРТ

Материал	ρ_0 , г/см ³	c_0 , мм/мкс	Γ	n	Y , ГПа	ν	Источник
Медь	8,96	3,92	1,43	4,0	0,7	0,3	[12]
Железо	7,85	4,65	2	3	0,5	0,27	[12]
Пенопласт	1,05	2,3	0,597	4,5	-	-	[13]*
Полиэтилен	0,92	3,0	1,0	4,6	-	-	[13]*

Обозначения: ρ_0 – плотность сплошного вещества, c_0 – скорость звука, Γ – коэффициент Грюнайзена, n – параметр в формуле для упругой составляющей давления, Y – предел текучести, ν – коэффициент Пуассона; * – параметры Γ и n получены из зависимости скорости ударной волны от массовой скорости.

В первой серии расчетов фиксировался шаг h витков соленоида, диаметр проволоки d варьировался от 1 до 2 мм. Наилучшие результаты по времени механического разрушения фольги $t_p \sim 1,5$ мкс были получены для соленоидов, изготовленных из стальной проволоки диаметром от 1,2 до 1,6 мм.

Во второй серии расчетов был взят элемент соленоида, изготовленного из стальной проволоки

(железа) диаметром 1,6 мм. Медная фольга имела толщину 0,3 мм, материал подложки – пенопласт толщиной 5 мм с плотностью 0,2 г/см³ материал изолятора – полиэтилен толщиной 3 мм, ВВ – ТГ 30/70 с плотностью 1,72 г/см³, calorийностью 5,3 кДж/г и скоростью детонации 8,1 мм/мкс [14]. В расчетах варьировался шаг h витков соленоида. В первом расчете $h = 3,2$ мм, во втором – $h = 4$ мм. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и на рис. 3. Размеры на рисунке 3 – в сантиметрах. Время – от момента начала воздействия продуктов детонации на фольгу.

Таблица 2
Условия и результаты расчетов

№ расчета	d , мм	h , мм	t_p , мкс	t_n , мкс	$t_{n'}$, мкс	t_k , мкс	$z_{\min ПД}$, мм
1	1,6	3,2	1,5	1,8	2,4	3,5	0,4
2	1,6	4,0	1,5	1,8	2,5	3,6	1,0

Обозначения: d, h – диаметр проволоки и шаг витков соленоида, t_p – время до видимого разрыва фольги, t_n – время до выхода ударной волны на внутреннюю поверхность изолятора передающей линии, $t_{n'}$ – время до выхода ударной волны на внутреннюю поверхность обратного токопровода, t_k – время до момента контакта разрушенных фрагментов фольги с обратным токопроводом, $z_{\min ПД}$ – минимальное расстояние между растянутыми участками фольги, измеренное по продуктам детонации после разрыва и до контакта с обратным токопроводом.

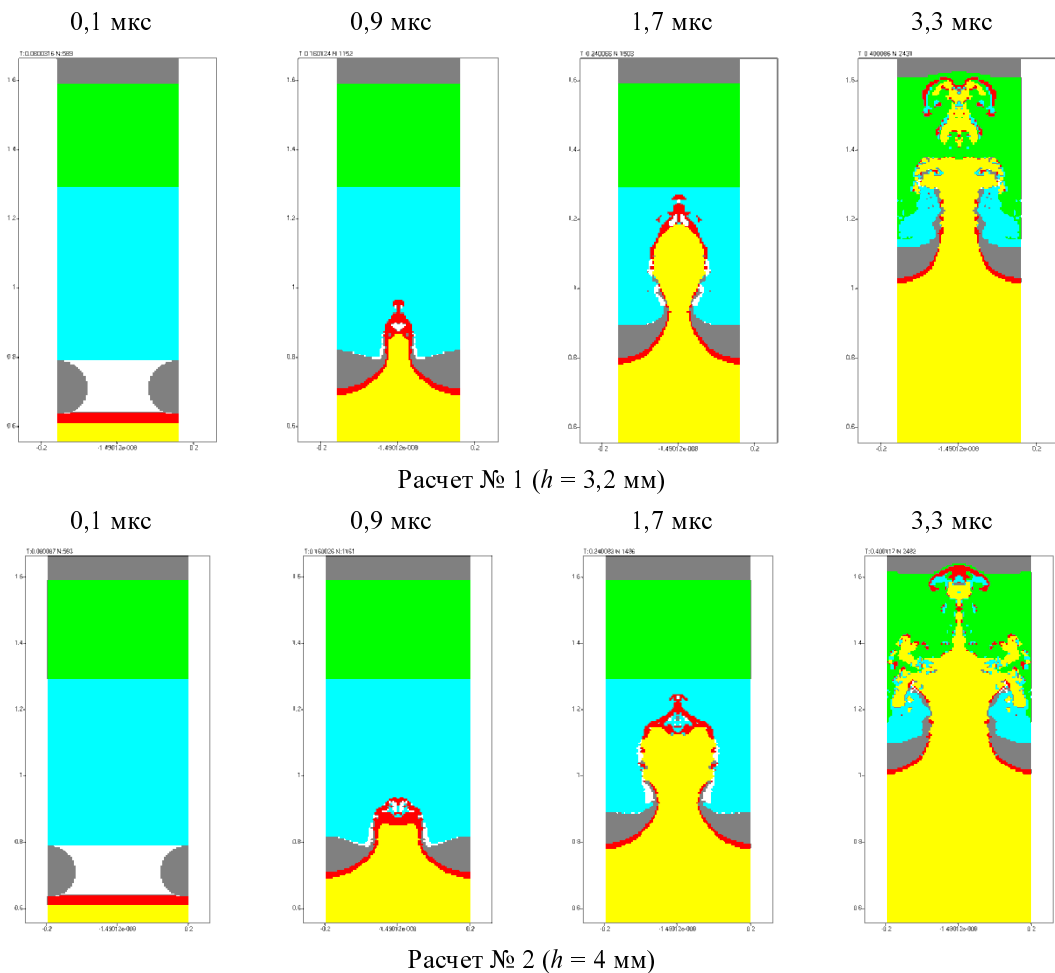


Рис. 3. Результаты газодинамических расчетов

Время от момента выхода детонационной волны на поверхность фольги до ее видимого разрыва определялось по распределению плотности меди. Время от выхода детонационной волны на поверхность фольги до выхода ударной волны на внутреннюю поверхность изолятора 5 (см. рис. 2) определялось по распределению давления в полиэтилене. Время от выхода детонационной волны на поверхность фольги до выхода ударной волны на внутреннюю поверхность обратного токопровода 6 определялось по распределению давления в железе.

С увеличением шага h (зазора между витками) возрастает минимальное расстояние по продуктам детонации между растянутыми участками фольги $z_{\min ПД}$, что способствует увеличению сопротивления разрываемого контура.

Ударная волна начинает воздействовать на изолятор передающей линии к нагрузке через ~ 2 мкс после начала срабатывания ВРТ. Выход ударной волны на внутреннюю границу обратного токопровода наблюдается через 2,4 мкс начала

воздействия продуктов детонации на фольгу, а контакт разрушенных фрагментов фольги с обратным токопроводом – примерно через 3 мкс.

Из этих расчетов следует, что для обеспечения надежной работы устройства толщина изолятора передающей линии от ВРТ к нагрузке должна составлять более 3 мм.

3. Экспериментальные результаты

В эксперименте разрывался токовый контур ВМГ диаметром 100 мм. Индуктивность коаксиальной нагрузки ВРТ составляла 20 нГн. Запитка ВМГ осуществлялась от конденсаторной батареи. Производная тока в спиральном ВМГ и в нагрузке измерялась дифференцирующими катушками. Сигналы с датчиков регистрировались цифровыми приборами TDS и ADS. Преграда ВРТ представляла собой соленоид из стальной проволоки диаметром 1,2 мм, намотанный с шагом 3,8 мм на медную фольгу. Полезная длина соленоида равна

90 мм. Разрушаемый проводник выполнен из медной фольги М1 толщиной 0,28 мм.

При запитке спирального ВМГ магнитным потоком 0,8 Вб ($L_0 = 123$ мкГн) в контуре ВРТ зарегистрирован максимальный ток амплитудой ~ 3 МА при характерном времени нарастания $\sim 7,3$ мкс. Индуктивность контура составляла ~ 110 нГн, в том числе – остаточная индуктивность спирального ВМГ 90 нГн. Энергия, запасенная в спиральном генераторе, составила ~ 500 кДж, коэффициент усиления энергии –190. Максимальное значение производной тока $\sim 3,7 \cdot 10^{11}$ А/с. Осциллограмма производной тока ВМГ представлена на рис. 4. Здесь и далее за начало отсчета принято время срабатывания схемы подрыва.

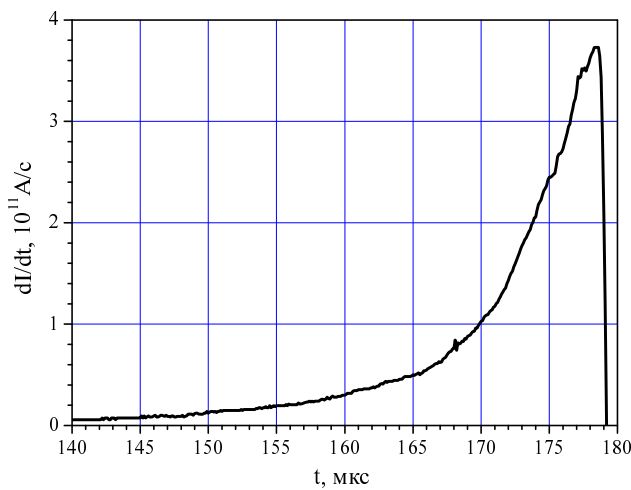


Рис. 4. Осциллограмма производной тока спирального ВМГ

На рис. 5 приведена осциллограмма производной тока в нагрузке. Значения токов в устройстве представлены на рис. 6.

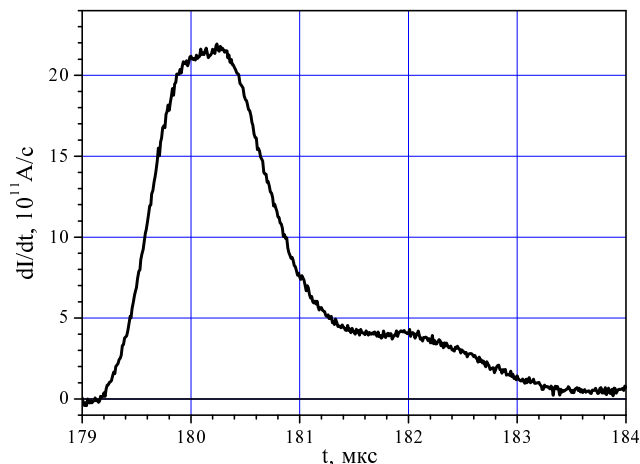


Рис. 5. Осциллограммы производной тока в нагрузке

Максимальная линейная плотность тока через фольгу ВРТ составила 92 кА/см. В нагрузке индуктивностью 20 нГн сформирован импульс тока $\sim 2,5$ МА за время 1,5 мкс. Характерное время нарастания тока между уровнями 0,1 и 0,9 амплитуды составляет 1 мкс. Максимальная производная тока в нагрузке равна $2,2 \cdot 10^{12}$ А/с, что соответствует напряжению на ВРТ ~ 44 кВ.

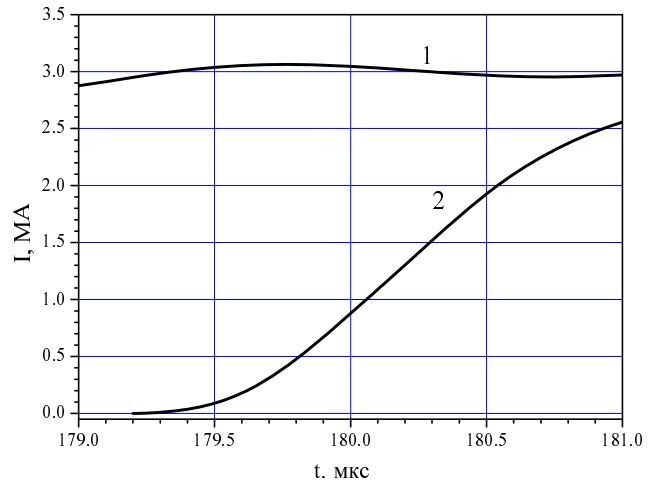


Рис. 6. Зависимости изменения тока (1) ВМГ и тока (2) в нагрузке от времени

За время работы ВРТ влияния продуктов детонации разрывного заряда ВВ на нагрузку не наблюдается.

Заключение

Проведен цикл расчетов по обоснованию параметров спиральных ВМГ и ВРТ. При этом показано, что при начальном магнитном потоке 0,8 Вб (энергия $\sim 2,7$ кДж) спиральный ВМГ обеспечивает ток ~ 3 МА, магнитную энергию ~ 500 кДж. Расчеты размыкающего элемента ВРТ показали, что толщина изолятора передающей линии от ВРТ к нагрузке спирального ВМГ должна быть более 3 мм.

При размыкании электрического контура ВМГ взрывным размыкателем тока с проволочным соленоидом, выполненным из стальной проволоки диаметром 1,2 мм с шагом 3,8 мм, в нагрузке индуктивностью 20 нГн сформирован импульс величиной 2,5 МА с характерным временем нарастания $\tau_{0,1-0,9} = 1$ мкс.

Результаты испытания модели ВРТ-600 показывают возможность применения испытанного устройства в полномасштабных экспериментах.

Список литературы

1. Chernyshev V. K., Volkov G. I., Ivanov V. A., Vakhrushev V. V. Study of Basic Regularities of Formation of Multi-MA-Current Pulses with Short Risettime by EMG Circuit Interruption // In: *Mega-gauss Physics and Technology* / Ed. P.J.Turchi. – N.Y.-L.: Plenum Press. 1980. P. 663–675.
2. Demidov V. A. Explosive Current Opening Switches // *IEEE Trans. PlasmaScience*. 2017. V. 45. N 12. P. 3356–3363.
3. Демидов В. А., Борискин А. С., Казаков С. А. и др. Дисковый взрывомагнитный генератор с взрывным размыкателем тока / в кн.: *Мощная импульсная электрофизика, международная конференция XVI Харитоновские тематические научные чтения. 21-25 апреля 2014 года* // Сборник докладов. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. С. 94–101.
4. Голосов С. Н., Демидов В. А., Борискин А. С. и др. Испытание устройства на основе дискового взрывного генератора ДВМГ-480 с взрывным размыкателем тока / В кн.: *Проблемы физики высоких плотностей энергии. Под ред. С. Г. Гаранина, Н. В. Завьялова, В. Д. Селемира, В. П. Соловьева* // Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения». Сборник докладов, - Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2017. С. 223–228.
5. Патент 2438206 RUMPK NOIN 39/00. Взрывной размыкатель тока / В.А. Демидов, С.А. Казаков // БИ. 2011. №36.
6. Демидов В. А., Казаков С. А., Борискин С. А. и др. Размыкание мегаамперных токов взрывным размыкателем с преградой в виде проволочного соленоида. / В кн.: *Мощная импульсная электрофизика. // Международная конференция XVI Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов, - Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2013. С. 208–212.*
7. Власов Ю. В., Демидов В. А., Борискин А. С. и др. Устройство импульсной мощности на основе дискового взрывного генератора ДВМГ240 с взрывным размыкателем тока/ В кн.: [4]. С. 216–222.
8. Код ЭГИДА-2D для моделирования двумерных задач: Учебное пособие / Под ред. Ю. В. Янилкина. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2008. Т. 1. С. 343.; Т. 2. С. 320.
9. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. В. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966.
10. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1997. ISBN 5-85165-327-2.
11. Глушак Б. Л. Начала физики взрыва: Учебное издание. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2011. С. 308.
12. Орленко Л. П. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко, в 2 т. Т. 1. М.: Физматлит, 2002. С. 832.
13. Трунин Р. Ф., Гударенко Л. Ф., Жерноклетов М. В., Симаков Г. В. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ: Научное издание / Под ред. Р. Ф. Трунина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2006. С. 531.
14. Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. Т. 1. С. 438.