

УСТРОЙСТВО ОСЕВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА

DEVICE FOR AXIAL INITIATION OF CYLINDRICAL HE-CHARGES

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

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

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

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

Разработано устройство, предназначенное для осевого инициирования протяженных цилиндрических зарядов взрывчатого вещества (ВВ), применяемых в экспериментах с взрывомагнитными генераторами (ВМГ). Устройство выполнено на основе широко применяемых электродетонаторов типа Д-22. Инициатор имеет наружный диаметр 32 мм, длину до ~1000 мм.

Представлены результаты газодинамических расчетов и экспериментальной отработки устройства. Приведены примеры использования осевых инициаторов.

The device was developed for an axial initiation of extended cylindrical high-explosive charges (HE) that are applied in the experiments with magneto-cumulative generators (MCG). The device is based on the widely used electrical detonators of the D-22 type. The initiator has an external diameter of 32 mm, length of ~1000 mm.

The results of the gas-dynamic calculations and experimental adjustment of the device are provided. The examples of the axial initiators usage are illustrated.

Введение

В основе построения мощных электрофизических систем лежит принцип накопления магнитной энергии и использования ее в течение интервала времени, существенно меньшего длительности накопления. Интерес к проблемам накопления и преобразования энергии магнитного поля с целью использования ее для генерирования мощных импульсов тока возник, главным образом, в связи с задачами управляемого термоядерного синтеза, когда потребовалось создание импульсных источников, обладающих высокой мощностью и значительным запасом энергии.

Одним из способов формирования мощных мегаамперных импульсов тока является переключение тока из индуктивного накопителя в нагрузку с помощью взрывных размыкателей тока (ВРТ) [1–2]. В настоящее время в устройствах импульсной мощности уже применяются ВРТ с разрушаемым проводником длиной ~750 мм, расположенным на диаметре ~600 мм [3]. В перспективе – применение ВМГ, генерирующих ток до 100 МА. При таких уровнях тока характерный диаметр цилиндрического ВРТ должен составлять ~1000 мм,

а длина ~1200 мм. Одним из необходимых условий эффективной работы таких ВРТ, является минимальная (~0,2 мкс) разновременность выхода фронта ударной волны на поверхность токопроводящей фольги. Ударная волна формируется с помощью протяженного разрывного заряда взрывчатого вещества (ВВ), расположенного под фольгой. Сейчас для инициирования разрывного заряда применяются многоканальные детонационные распределители со 192 точками инициирования, установленные внутри него на длине ~750 мм с шагом 10 мм. Одновременное инициирование ВВ в распределителях производится при подрыве пашки с наружным диаметром 65 мм.

Существуют ранее разработанные устройства осевого инициирования протяженных цилиндрических зарядов. Но из-за использования специальных электродетонаторов (ЭД) и сложности их конструкции стоимость этих устройств высока. Более дешевые аналоги не обеспечивают заданных требований по разновременности. Поэтому возникла необходимость разработки нового устройства инициирования (УИ), обеспечивающего заданную разновременность выхода детонационной волны

(ДВ) на наружной поверхности протяженного цилиндрического заряда ВВ.

1. Описание устройства

На рис. 1 представлена 3D-модель разработанного УИ для инициирования шашек ВВ длиной 120 мм. УИ состоит из шести элементов длиной по 20 мм. Фрагмент конструкции УИ из двух элементов в виде расчетной геометрии, показан на рис. 2.

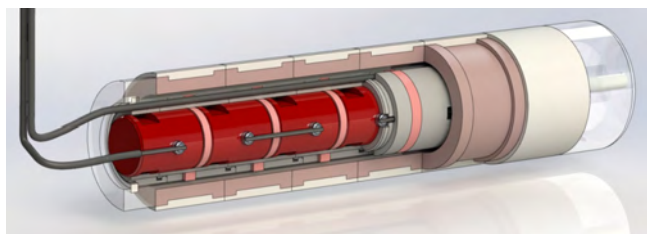


Рис. 1. 3D модель шести элементного УИ

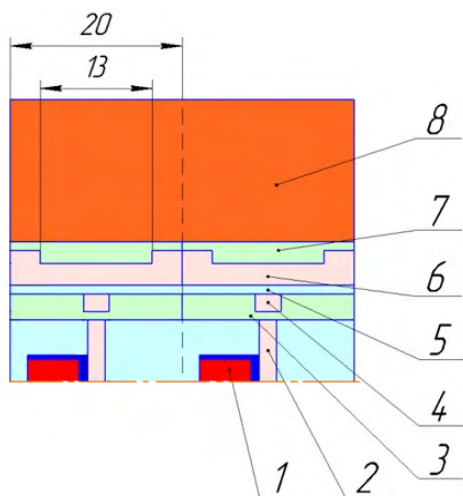


Рис. 2. Расчетная геометрия УИ: 1 – ЭД, 2 – диск ПВВ, 3 – слой полипропилена, 4 – кольцо ПВВ, 5 – слой оргстекла, 6 – ПВВ, 7 – полипропиленовая линза, 8 – инициируемая шашка ВВ

В основе УИ используются широко применяемые во ВНИИЭФ электродетонаторы типа Д-22 (поз. 1) соединённые электрически последовательно. В каждом элементе применяется по одному электродетонатору. ЭД расположены внутри полипропиленовой втулки (поз. 3) на оси устройства с шагом 20 мм и предназначены для подрыва диска из пластического взрывчатого вещества (ПВВ), установленного по центру элемента. Детонационная волна от ЭД передается по диску из ПВВ $\varnothing 14 \times 2$ мм (поз. 2) к кольцу ПВВ (поз. 4), расположенному в пазе втулки (поз. 3). Цанговое соединение втулок между собой позволяет изгото-

вить УИ необходимой длины, а паз в каждой втулке необходим для вывода обратного проводника цепи подрыва ЭД. Электрически последовательное соединение ЭД с минимальным сопротивлением обеспечивается за счет применения упругого материала при изготовлении контактов УИ. Снаряженные взрывчатым веществом втулки и ЭД помещаются в трубку, выполненную из органического стекла с толщиной стенки 1 мм (поз. 5). С наружной стороны трубки выполняется детонационная разводка или устанавливается цилиндрическая линзовая отсечка с ПВВ. Выбор материала, формы и размеров линзовой отсечки позволяют обеспечить разновременность до 0,2 мкс в пределах элемента устройства.

2. Газодинамические расчеты работы устройства и экспериментальная отработка

Для численного моделирования работы инициатора использовалась разработанная во ВНИИЭФ программа ЭГИДА-2D [4]. Она предназначена для моделирования двумерных нестационарных течений многокомпонентной сплошной среды, характерной особенностью которой является наличие больших деформаций.

Для оценки работы УИ проведены десятки газодинамических расчетов. В расчетах рассматривались различные формы полипропиленовых линз, применение вместо линз детонационных каналов, заполненных ПВВ или оболочек, ускоряемых продуктами детонации. Основными критериями выбора конструкции устройства инициирования кроме разновременности являлись простота изготовления, возможность монтажа и снаряжения УИ взрывчатыми материалами в условиях полигонных работ, а также надежность и безопасность устройства.

На рис. 2 показана расчетная схема устройства. Из-за наличия электродетонатора элемент инициатора несимметричен, поэтому расчетная область включает в себя два элемента. На оси симметрии, а также на левой и правой границах ставилось условие «жесткая стенка», на внешней границе – условие вытекания. Вещества, в том числе и ВВ, описывались уравнением состояния в форме Ми – Грюнайзена [4], продукты детонации описывались кубическим уравнением состояния [4]. Начальная плотность веществ равна их плотности при нормальных условиях, начальная скорость и давление равны нулю. Иницирование зарядов ВВ электродетонаторов осуществляется в точках на оси симметрии одновременно в момент начала расчета.

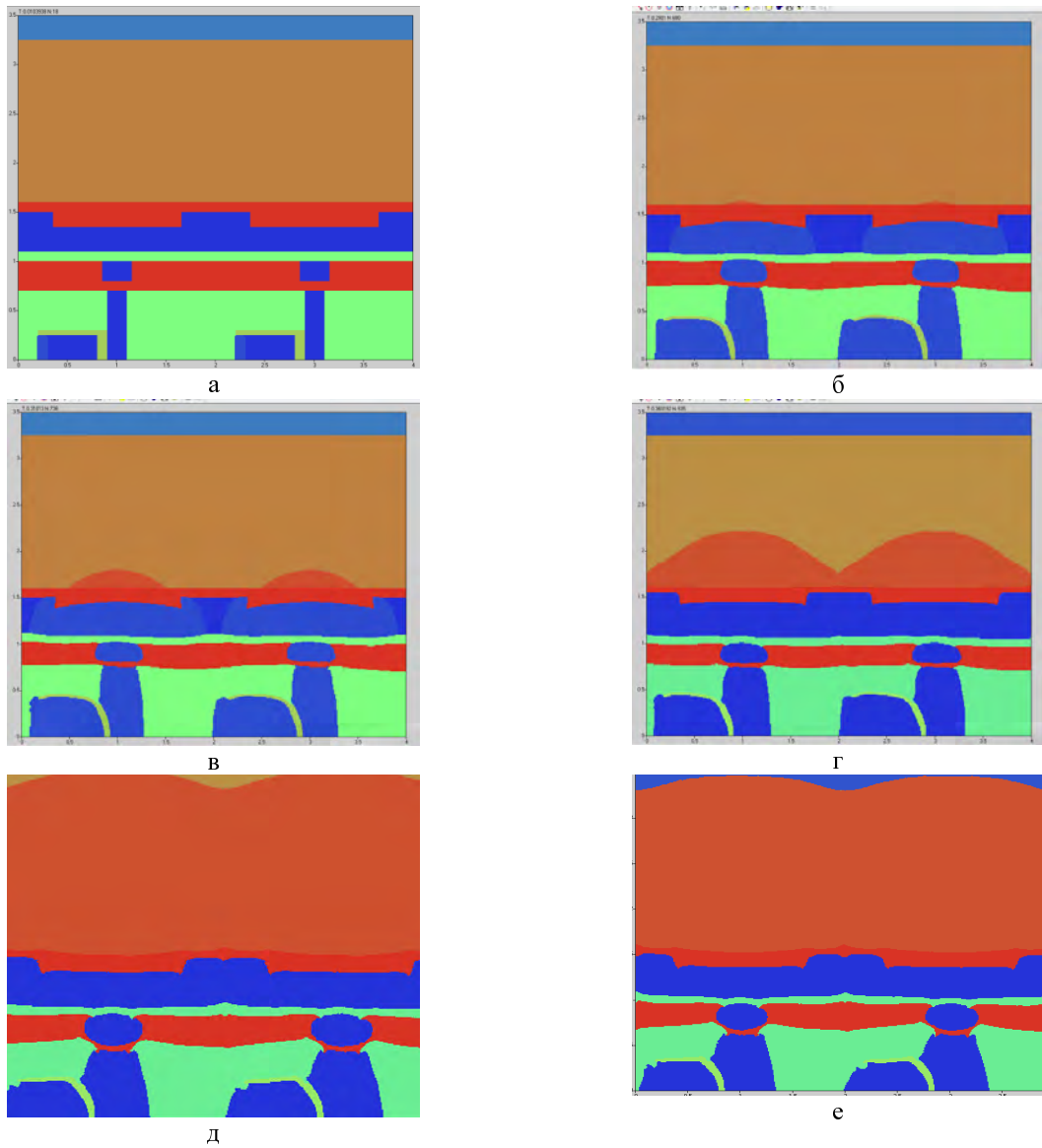


Рис. 3. Результаты газодинамического расчета работы инициатора: а) $t = 0$ мкс; б) $t = 4,0$ мкс; в) $t = 4,2$ мкс; г) $t = 4,7$ мкс; д) $t = 5,9$ мкс; е) $t = 6,1$ мкс

Результаты газодинамического расчета УИ представлены на рис. 3.

По результатам газодинамического расчета, время выхода фронта ДВ на поверхность иницируемого ВВ диаметром 65 мм по центру элемента инициатора (рис. 3, д) составляет 5,9 мкс от подачи подрывного импульса на ЭД. По краям сегмента фронт ДВ выходит на этот же диаметр на 6,12 мкс, т. е. с задержкой на 0,22 мкс (рис. 3, е).

Конструкция УИ отработывалась в трех опытах на моделях, содержащих по шесть элементов. Регистрация выхода фронта детонационной волны проводилась скоростным фоторегистратором.

В первом эксперименте в качестве иницируемого заряда использовалось ПВВ с наружным диаметром 36 мм. В опыте фронт ДВ выходит на

поверхность иницируемого пластического ВВ диаметром 36 мм через 4,36 мкс после подачи подрывного импульса на электродетонаторы, расчетное время 4,2 мкс (рис. 3, в). Разновременность работы инициатора в эксперименте составляет $\sim 0,5$ мкс, в расчете 0,55 мкс (рис. 3, г), при этом по центру элемента фронт ДВ выходит раньше, чем по краям, что согласуется с расчетом.

В двух других экспериментах, в качестве иницируемого ВВ применялась шашка диаметром 65 мм из состава КТГ. Фотохронограмма одного из экспериментов представлена на рис. 4. В опытах получены согласующиеся между собой результаты, но отличные от газодинамического расчета.

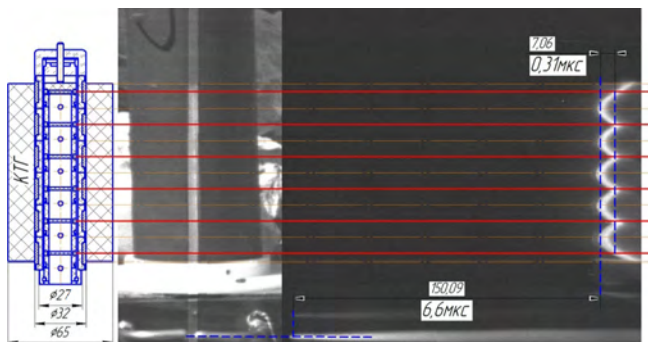
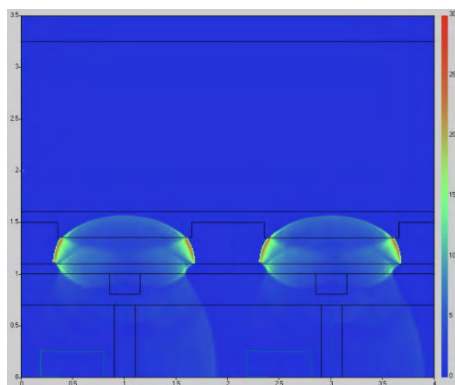


Рис. 4. Результат эксперимента с УИ с шашкой ВВ из состава КТГ и линзой с внутренним диаметром 27 мм

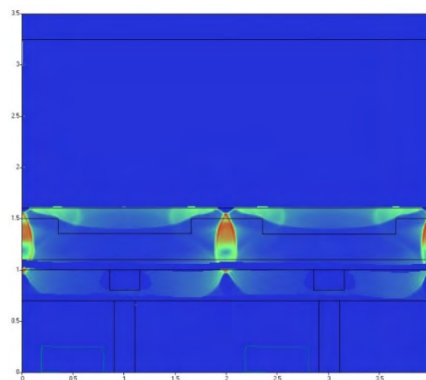
Из рис. 4 видно, что выход фронта ДВ на поверхность инициируемой шашки диаметром 65 мм из состава КТГ по краям элемента инициатора опережает выход ДВ в центре элемента на 0,3 мкс, что противоречит расчету.

Результаты опытов позволяют сделать заключение о значительном влиянии на работу инициатора чувствительности инициируемого ВВ. В программе ЭГИДА-2D чувствительность ВВ учитывается следующим образом: инициирование ВВ происходит, если массовая скорость ВВ в ударной волне, распространяющейся по заряду, превышает 0,5 мм/мкс. Таким образом, расчетная чувствительность ВВ не зависит ни от материала, из которого изготовлен заряд, ни от давления в инициирующей ударной волне. На рис. 5 представлено распределение давления на фронте ударной волны в полипропиленовой линзе в момент перед инициированием шашки ВВ по центру элемента (рис. 5, а, $t = 3,9$ мкс) и по краям элемента (рис. 5, б, $t = 4,5$ мкс).



а

Рис. 5. Давление на фронте ДВ, шкала в ГПа: а – $t = 3,9$ мкс; б – $t = 4,5$ мкс



б

Рис. 5. Окончание

При сравнении рис. 3, б; 3, в (время $t = 4$ мкс и $t = 4,7$ мкс) с рисунком 5, можно заметить, что, несмотря на разницу в значениях давления на фронте ударной волны в полипропиленовой линзе (по центру элемента $\sim 6,5$ ГПа, по торцам ~ 30 ГПа), в расчете инициирование шашки ВВ происходит без задержки в одно и то же время. Этим объясняется удовлетворительное совпадение расчета с экспериментом, в котором в качестве инициируемого ВВ применялось пластическое ВВ (энергии ударной волны по центру элемента вполне достаточно для возбуждения детонации в ПВВ). При использовании ВВ из состава КТГ, чувствительность которого на $\sim 20\%$ ниже чувствительности ПВВ, по центру элемента происходит значительная задержка возбуждения детонации, по сравнению с инициированием заряда ВВ по краям элемента.

В экспериментах с устройством импульсной мощности для получения импульса МРИ, планируется применять инициируемый заряд из состава КТГ. Под этот состав ВВ разработана конструкция УИ и испытана в нескольких экспериментах. Чтобы ускорить возбуждение детонации в шашке из состава КТГ по центру элемента УИ, внутренний диаметр полипропиленовой линзы (поз. 7 рис. 2) увеличен до 28 мм и соответственно увеличилась масса ПВВ под линзой. Результаты экспериментальной проверки работы такой конструкции показаны на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что за счет применения большей массы ПВВ в центре элемента УИ удалось сократить разновременность выхода фронта ДВ на поверхность инициируемой шашки $\varnothing 65$ мм из состава КТГ до 0,2 мкс. Также сократилось общее время работы устройства на $\sim 0,25$ мкс.

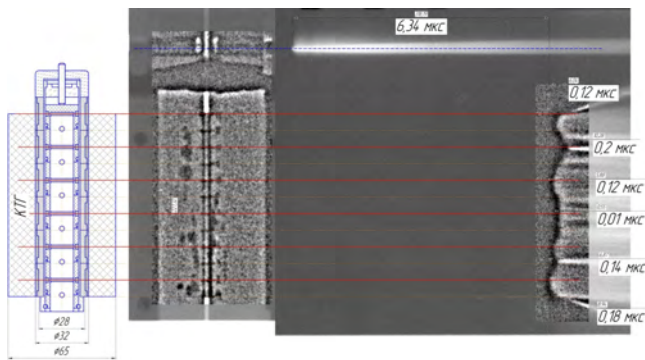


Рис. 6. Результат эксперимента с УИ с шашкой ВВ из состава КТГ и линзой с увеличенной толщиной заряда ПВВ в центре элемента

Для оценки оптимальной толщины полипропиленовой линзы проведен эксперимент с УИ, в котором применялась линза с внутренним диаметром 29 мм и заряд из состава КТГ. Результаты эксперимента представлены на рис. 7.

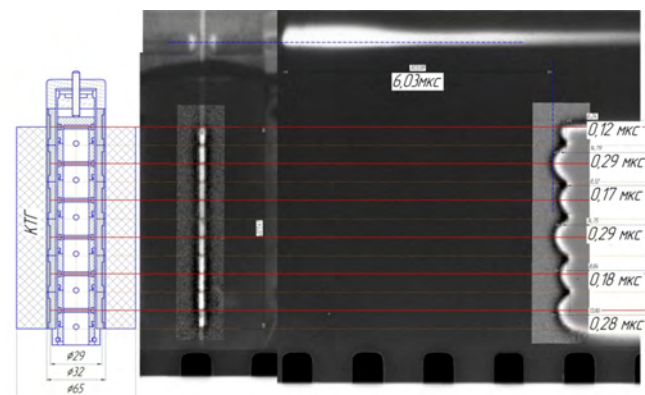


Рис. 7. Результат эксперимента с УИ с шашкой ВВ из состава КТГ и линзой с внутренним диаметром 29 мм

Увеличение внутреннего диаметра линзы на 1 мм привело к тому, что общее время работы устройства уменьшилось на $\sim 0,3$ мкс, но фронт детонационной волны по центру элемента стал заметно опережать фронт детонации по его краям. Следовательно, величина внутреннего диаметра линзы 28 мм в УИ для инициирования заряда из состава КТГ является оптимальной.

Испытание оптимизированного УИ с шашкой ВВ выполненной из более чувствительного, чем КТГ, состава О-6АВ, подтвердило выводы о влиянии чувствительности ВВ на работу устройства. На рис. 8 представлена фотохронограмма эксперимента устройства с шашкой ВВ из состава О-6АВ, в котором полипропиленовая линза имеет внутренний диаметр 28 мм.

Применение более чувствительного ВВ привело к тому, что фронт волны детонации, по центру элемента устройства стал опережать фронт волны детонации по его краям. А поскольку скорость детонации состава О-6АВ выше, чем в КТГ, то время выхода фронта детонационной волны на наружную поверхность шашки сократилось на $\sim 0,4$ мкс.

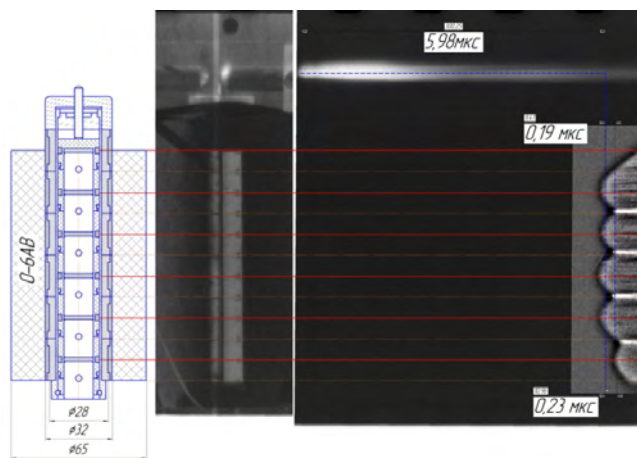


Рис. 8. Результат эксперимента с УИ с шашкой ВВ из состава О-6АВ

Увеличение наружного диаметра инициируемого заряда ВВ из состава КТГ до 125 мм позволило дополнительно сократить разновременность выхода фронта ДВ на его поверхность. В эксперименте с таким зарядом разновременность не превышает 0,15–0,17 мкс.

3. Применение устройства инициирования

Разработанный инициатор успешно применяется во всех экспериментах с устройствами импульсной мощности в качестве системы инициирования ВРТ. В опыте по обострению импульса тока спирального ВМГ-200 взрывным размыкателем диаметром 200 мм с ребристой преградой, применялся инициатор длиной 460 мм, содержащий 23 электродетонатора. На входе лайнерной камеры максимальная величина производной тока составила $\sim 6,5 \cdot 10^{12}$ А/с, ток ~ 4 МА. Время роста тока от нуля до максимума равно ~ 1 мкс, а характерное время нарастания тока $\tau_{0,1-0,9} = 0,45$ мкс.

В опыте по обострению импульса тока 15-ти элементного дискового ВМГ240-600 использовался ВРТ с проволочным соленоидом диаметром 600 мм с инициатором длиной 780 мм, содержащий 39 электродетонаторов. В нагрузке индуктивностью 18 нГн сформирован импульс тока 10,3 МА с характерным временем нарастания $\tau_{0,1-0,9} = 1$ мкс.

Заключение

Проведенные газодинамические расчеты и эксперименты с устройством осевого инициирования диаметром 32 мм, предназначенного для подрыва протяженных цилиндрических зарядов ВВ, показали, что в зависимости от чувствительности инициируемого ВВ необходимо подбирать размеры линзовой вставки.

Определена оптимальная толщина линзы для инициирования цилиндрических зарядов ВВ из состава КТГ. Модель устройства экспериментально отработана на зарядах с наружным диаметром 65 и 125 мм. В опытах зарегистрированная разновременность выхода фронта детонационной волны на наружную поверхность заряда диаметром 65 мм, не превышает 0,2 мкс. С увеличением наружного диаметра инициируемого заряда до 125 мм наблюдается снижение разновременности до 0,17 мкс.

Разработанный инициатор используется в экспериментах с устройствами импульсной мощности в качестве системы инициирования ВРТ. Рассматривается возможность его применения в качестве системы инициирования дисковых ВМГ.

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: Megagauss 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. PlasmaSci. 2017. V. 45 N 12. P. 3356–3363.

3. Власов Ю. В., Демидов В. А., Борискин А. С. и др. Устройство импульсной мощности на основе дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ240 с взрывным размыкателем тока // В кн.: Проблемы физики высоких плотностей энергии. Труды междунар. конф. «XVIII Харитоновские тематические научные чтения»: сб. докл. / Под ред. С. Г. Гаранина, Н. В. Завьялова, В. Д. Селемира, В. П. Соловьева. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2017. Т. 2. С. 216–222.

4. Янилкин Ю. В. Код ЭГИДА-2D для моделирования двумерных задач // Учебное пособие – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008. Т. 1. С. 343.; Т. 2. С. 320.