

УСТРОЙСТВО ИМПУЛЬСНОЙ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ДИСКОВОГО ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА ДВМГ240 С ВЗРЫВНЫМ РАЗМЫКАТЕЛЕМ ТОКА

PULSED POWER DEVICE BASED ON DISK MAGNETO-CUMULATIVE GENERATOR DMCG240 WITH EXPLOSIVE CURRENT OPENING SWITCH

*Ю. В. Власов, В. А. Демидов, А. С. Борискин, С. А. Казаков, О. М. Таценко, А. П. Романов,
А. В. Филиппов, Е. А. Бычкова, С. Н. Голосов, А. Н. Моисеенко, Е. И. Щетников, В. А. Яненко,
С. В. Кутумов, Н. Р. Казакова, С. И. Володченков, Р. Р. Юсупов, А. С. Севастьянов,
В. В. Костин, А. С. Пикарь, П. В. Королев*

*Yu. V. Vlasov, V. A. Demidov, A. S. Boriskin, S. A. Kazakov, O. M. Tatsenko, A. P. Romanov, A. V. Filippov,
E. A. Bychkova, S. N. Golosov, A. N. Moiseenko, E. I. Schetnikov, V. A. Yanenko, S. V. Kutumov,
N. R. Kazakova, S. I. Volodchenkov, R. R. Yusupov, A. S. Sevastyanov, V. V. Kostin, A. S. Pikar, P. V. Korolev*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Во ВНИИЭФ ведется разработка дисковых взрывомагнитных генераторов и взрывных размыкателей тока (ВРТ), формирующих многомегаамперные импульсы тока с субмикросекундным фронтом в z-пинч нагрузках. Представлены результаты исследований, выполненных при разработке устройства на основе 15-элементного дискового взрывомагнитного генератора ДВМГ240 и взрывного размыкателя тока с ребристой преградой. Для получения в лайнерных нагрузках тока ~20 МА с характерным временем нарастания менее 1 мкс разрываемый проводник (медная фольга) расположен на диаметре ~600 мм. Это устройство является уменьшенной в два раза моделью энергетического модуля комплекса ЭМИР.

RFNC-VNIIEF develops disk magneto-cumulative generators and explosive current opening switches (EOS). The devices form multi-megampere current pulses with sub-microsecond front into z-pinch loads. This paper presents investigation results of the device based on 15-element disk magneto-cumulative generator DMCG240 and explosive current opening switch with ribbed barrier. The breaking conductor (copper foil) is located on the diameter of ~600 mm to obtain the current of ~20 MA with characteristic rise time of less than 1 μ s into the liner loads. This device is twice reduced model of EMIR facility power module.

Введение

Во взрывных размыкателях тока, способных формировать в нагрузках импульсы тока с фронтом менее 1 мкс линейная плотность тока в разрываемом проводнике (фольге) должна быть ограничена величиной 0,2 – 0,3 МА/см [1, 2]. Максимальная магнитная энергия в дисковом генераторе с зарядами ВВ диаметром 240 мм (ДВМГ240) достигается при токе 40-60 МА. Исходя из этого для обострения импульса тока 15-элементного ДВМГ240 (ДВМГ240-15) был разработан ВРТ с медной фольгой, свернутой в цилиндр диаметром ~600 мм. Количество дисковых элементов в генераторе выбрано исходя из заданной величины тока

в нагрузке и ее индуктивности.

Устройство предназначено для формирования в лайнерной нагрузке с начальной индуктивностью ~15 нГн импульса тока ~20 МА с характерным временем нарастания менее 1 мкс. В докладе представлены результаты исследований, выполненных при разработке этого устройства.

Описание устройства

На рис. 1 приведен эскиз устройства с характерными размерами ДВМГ и ВРТ. Для упрощения изготовления и обеспечения необходимой электрической прочности изолятор 2 передающей ли-

нии ДВМГ – ВРТ выполнен из полиэтилена в виде цилиндра с внутренним диаметром 600 мм. Соединение выхода дисковых элементов с наружным токопроводом обеспечивается радиальными передающими линиями 16 [3].

Как показала практика работы с ВРТ, изготовление диэлектрических с металлическими вставками на ребрах [4, 5] преград большого диаметра весьма затруднено. В связи с этим в размыкателе ВРТ600 разрушение проводника (медной фольги) производится на преграде, выполненной в виде проволочного соленоида из стальной проволоки [6, 7].

Взрывной размыкатель тока (см. рис. 1) состоит из разрушаемой фольги 3, соленоида из проволоки 5, подложки 6, разрывного заряда ВВ 4 и системы его инициирования 10–14. Толщина медной фольги составляет 0,2 мм. Внутренний диаметр цилиндрической поверхности, на которой расположена фольга, равен 624 мм. Соленоид длиной 750 мм наматывается поверх фольги стальной проволокой диаметром 2 мм с шагом витков 4 мм. Подложка из пенополистирола плотностью $\sim 0,2 \text{ г/см}^3$ устанавливается на соленоид. Она играет роль дугогасящего элемента при разрушении фольги. Разрушение фольги происходит при ее ускорении в зазорах между витками соленоида под воздействием продуктов детонации разрывного заряда.

Разрывной заряд толщиной 6 мм для ВРТ600 изготовлен из пластического ВВ. Для формирования в размыкателе такого заряда и последующей намотки проволочного соленоида необходима

прочная основа. Поэтому в качестве материала для изолятора передающей линии ДВМГ – ВРТ используется блочный полиэтилен. Поскольку напряжение на выходе ДВМГ при срабатывании ВРТ достигает $\sim 150 \text{ кВ}$, толщина изолятора выбрана равной 6 мм.

Одним из элементов системы инициирования разрывного заряда является многоканальный детонационный распределитель (ДР). Распределитель состоит из 77 пенополистироловых дисков 12 толщиной 10 мм. Внутри них размещен цилиндрический заряд ВВ 11, по оси которого располагается многоэлементное устройство осевого инициирования (УИ) 10 с электродетонаторами. На одной из торцевых поверхностей каждого диска 12 выполняются пазы 14, заполняемые пластическим ВВ. Имеются 4 группы пазов, расходящихся в радиальном направлении и по окружности (вид А на рис. 1).

Каналы детонационного распределителя инициируют заряд 13 толщиной 8 мм в 14784 точках. Он формирует расходящуюся ударную волну, которая после прохождения по токопроводу 15 и изолятору 2 возбуждает детонацию в разрывном заряде 4.

Предварительные расчеты

Предварительные электротехнические расчеты работы устройства проведены при следующих начальных условиях. В ДВМГ240 с пятнадцатью дисковыми элементами (см. рис. 1), начальная ин-

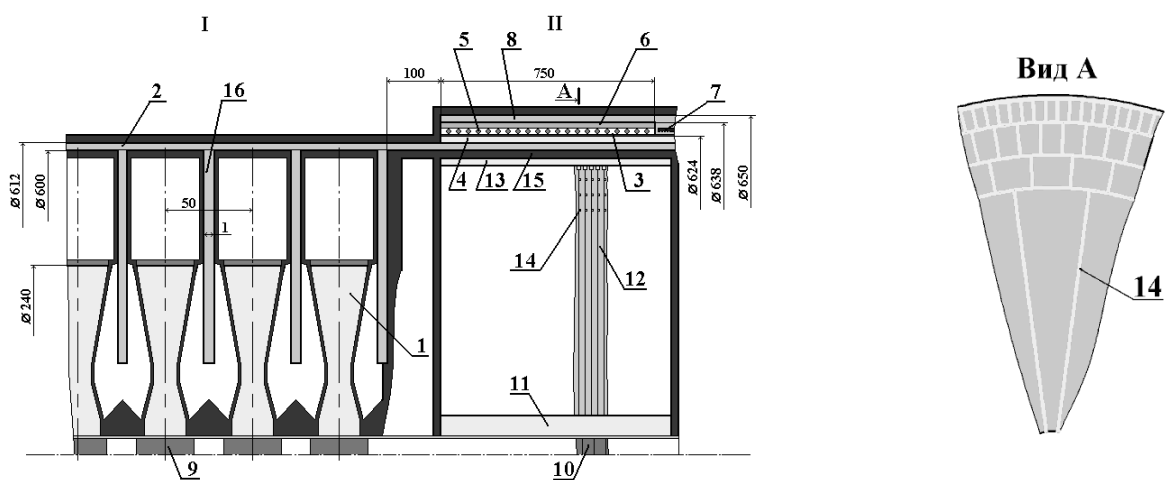


Рис. 1. Эскиз устройства ДВМГ240-15 – ВРТ600. I – ДВМГ, II – ВРТ, 1 – дисковый элемент, 2 – изолятор передающей линии ДВМГ – ВРТ, 3 – фольга ВРТ, 4 – разрывной заряд ВРТ, 5 – проволочный соленоид, 6 – подложка, 7 – замыкающий ключ, 8 – передающая линия к нагрузке, 9, 10 – элементы устройств осевого инициирования ДВМГ и ВРТ, 11 – заряд ВВ, 12 – диски из пенополистирола, 13 – заряд ВВ, 14 – каналы детонационного распределителя, 15 – токопровод, 16 – радиальная передающая линия

дуктивность контура составляет 114 нГн, индуктивность передающей линии от ДВМГ до фольги ВРТ – 13,6 нГн, суммарная индуктивность передающей линии из ВРТ в нагрузку и лайнерной камеры равна 15 нГн. Сопротивление ВРТ при срабатывании взято из экспериментов по размыканию тока спирального ВМГ-100 взрывным размыкателем тока диаметром 100 мм с преградой в виде соленоида из стальной проволоки [7] и скорректировано с учетом размеров фольги и линейной плотности разрываемого тока.

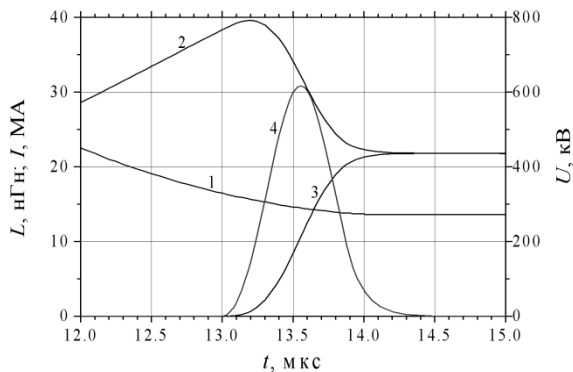


Рис. 2. Коммутация тока ДВМГ240-15 на индуктивную нагрузку 15 нГн при $I_0 = 5,5$ МА: 1 – индуктивность контура ДВМГ, 2 – ток ДВМГ, 3 – ток в нагрузке, 4 – напряжение на размыкателе

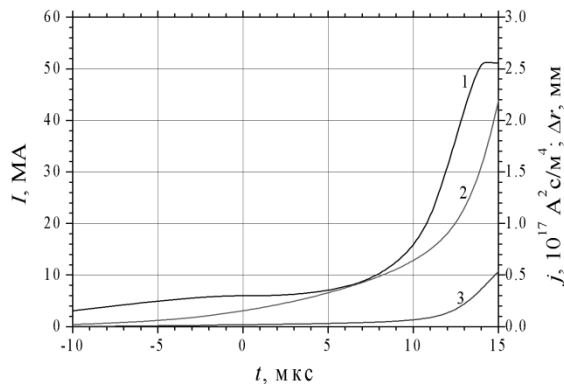


Рис. 3. Тепловое и механическое воздействие тока ДВМГ240-15 на медную фольгу ВРТ толщиной 0,2 мм при $I_0 = 6$ МА: 1 – ток, 2 – радиальное смещение фольги, 3 – удельный интеграл действия тока

Как показали расчеты, ток ~ 20 МА в нагрузке 15 нГн реализуется при запитке ДВМГ240 током более 5,5 МА. На рис. 2 построены графики токов и напряжения в нагрузке при токе запитки 5,5 МА и линейной плотности разрываемого тока 0,2 МА/см. Графики смещения фольги под действием сил магнитного поля и удельного интеграла

ла действия тока для этого случая представлены на рис. 3.

Как видно из расчетных данных, проектируемое устройство способно формировать в индуктивной нагрузке ~ 15 нГн импульс тока амплитудой свыше 20 МА. Ток запитки дискового ВМГ с начальной индуктивностью ~ 130 нГн на уровне 5,5–6 МА можно обеспечить спиральными ВМГ диаметром 240 мм. Выбор диаметра расположения разрушаемого проводника 624 мм позволяет применять в ВРТ относительно тонкую медную фольгу ($\sim 0,2$ мм), что способствует формированию импульса тока с фронтом $\sim 0,5$ мкс. При этом линейная плотность тока в размыкателе близка к оптимальной (0,2–0,25 МА/см), перегрева фольги под действием тока не происходит (удельный интеграл действия тока $\sim 0,6 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{cm}^{-4}$), а смещение фольги в пазы преграды в $\sim 1,5$ раза меньше допустимого значения. Получаемое напряжение на выходе ВРТ ~ 600 кВ предъявляет высокие требования к электрической прочности линии передачи энергии в нагрузку.

Устройство инициирования детонационного распределителя

В используемом устройстве осевого инициирования дисковых зарядов (поз. 9 на рис. 1) при одновременности срабатывания соседних элементов устройства, не превышающей 0,1 мкс, разновременность внутри одного элемента при подрыве заряда ВВ с наружным диаметром 65 мм достигает $\Delta t_m \sim 1$ мкс (рис. 4а). При выходе детонационной волны на наружную поверхность дисковых зарядов большого диаметра разновременность снижается. Длина элемента устройства инициирования дисковых зарядов составляет 40 мм. Поэтому разновременность подрыва с помощью такого УИ детонационного распределителя ВРТ с элементами, расположенными с шагом 10 мм, будет слишком велика.

Тем не менее, даже при использовании этого устройства осевого инициирования можно сократить разновременность инициирования каналов ДР, сместив его вдоль оси симметрии на расстояние, равное половине толщины пластин ДР (рис. 4б). В этом случае разновременность инициирования каналов ДР будет примерно в 2 раза меньше разновременности одного элемента УИ.

Этот результат можно получить, аппроксимируя распределение времени выхода детонационной волны на наружную поверхность инициируемого заряда по длине z устройства

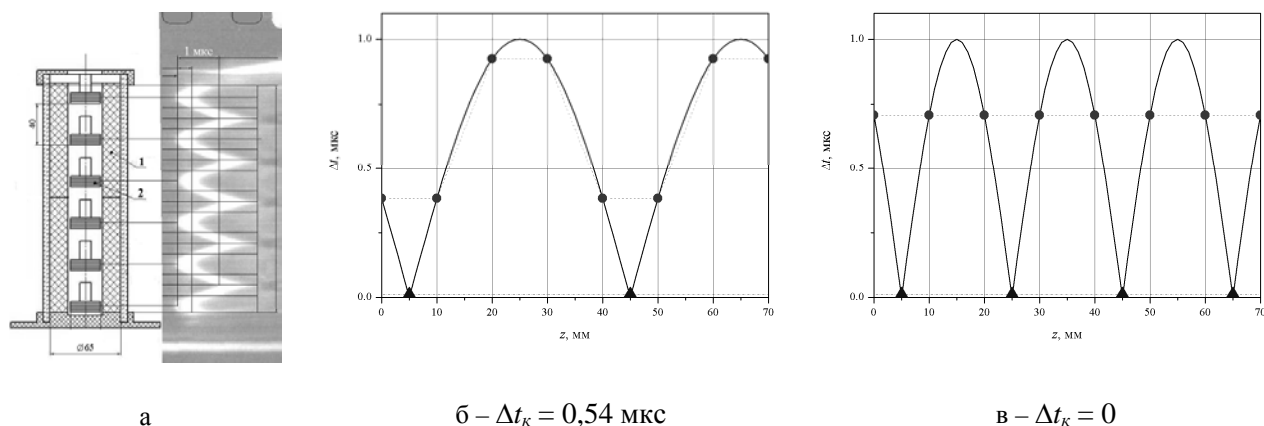


Рис. 4. Фотохронограмма инициирования заряда ВВ с наружным диаметром 65 мм (1) шестиэлементным УИ (2) с элементами длиной 40 мм (а) и расчетные зависимости $\Delta t(z)$ для УИ с элементами длиной 40 мм (б) и 20 мм (в). Треугольники – границы элементов УИ, точки – границы дисков ДР. Элементы УИ и диски ДР смещены на $s = 5$ мм друг относительно друга, $\Delta t_m = 1$ мкс

инициирования (см. рис. 4а) функцией $\Delta t(z) = \Delta t_m \left| \sin \frac{\pi(z-s)}{l} \right|$, где l – длина элемента

УИ, s – осевое смещение элементов УИ и дисков ДР друг относительно друга, Δt_m – максимальная разновременность выхода детонационной волны в пределах элемента. Для определения максимальной разновременности Δt_k инициирования каналов ДР нужно вычислить значения функции $\Delta t(z)$ в точках $z_i = ih$, где h – толщина пластины, $i = 0, 1..([l/h]-1)$, в пределах одного периода этой функции (равного длине элемента УИ), и найти разность между максимальным и минимальным значениями $\Delta t(z_i)$.

Если использовать УИ с элементом длиной 20 мм (в 2 раза больше толщины дисков ДР), то сместив устройство инициирования вдоль оси симметрии на расстояние, равное половине толщины дисков ДР, можно добиться практически одновременного подрыва каналов ДР (рис. 4в). Для обеспечения разновременности $\sim 0,1$ мкс при $\Delta t_m = 1$ мкс допустимое отклонение от заданного расположения элементов УИ и дисков ДР должно быть не более 1 мм.

Опыты с плоской моделью детонационного распределителя

Экспериментальное определение времени от импульса тока в электродетонаторах до момента выхода ударной волны на внутреннюю поверхность разрываемого проводника ВРТ600 проводилось с использованием плоской модели детонационного

распределителя. В модели имитировалась структура и длина детонационных каналов распределителя для ВРТ600 и толщина конструкционных материалов. Определялась также разновременность выхода ударной волны на поверхность разрываемого проводника. Устройство инициирования, которое использовалось в модели ДР, обеспечивает разновременность $\Delta t_m = 0,3$ мкс в пределах одного элемента длиной 20 мм.

Помимо скоростной фотографической регистрации выхода ударной волны применялась контактная методика. Контактный датчик представляет собой два скрученных изолированных провода диаметром 0,32 мм. Датчики приклеивались к поверхности заряда. Сигнал с датчиков подавался на осциллографы.

Результат первого эксперимента с пластинами ДР из ПММА показал, что фронт детонации выходит на поверхность разрывного заряда в момент времени, близкий к расчетному, но с большой разновременностью (более 1 мкс). Возможной причиной большой разновременности могло являться воздействие ударной волны, распространяющейся по пластине, на которой выполнены каналы детонационной разводки, на ВВ, расположенное в этих каналах. Результатом воздействия в зависимости от параметров ударной волны может быть либо преждевременная детонация ВВ, либо ее отсутствие из-за деформации каналов разводки. Расчеты показали, что в пластине из ПММА воздействие ударной волны на каналы детонационной разводки может иметь место, а в пластине из пенополистирола с плотностью менее $0,7$ г/см³ оно исключено.

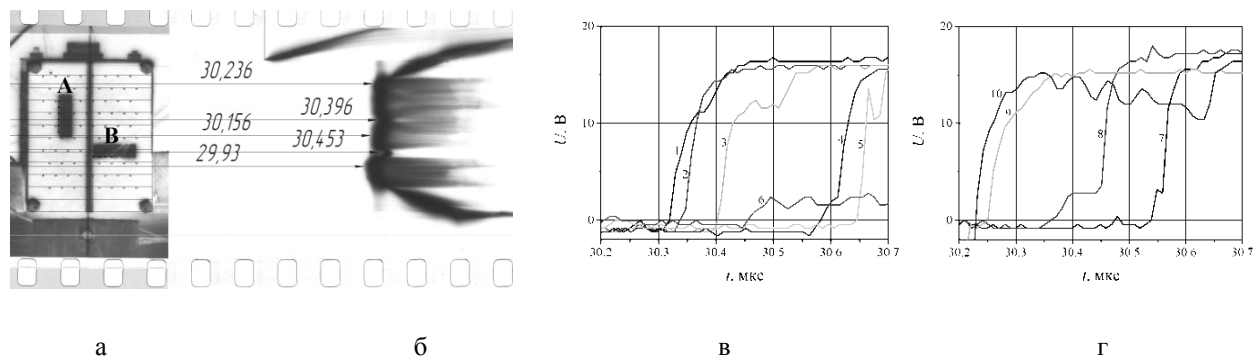


Рис. 5. Рабочий (б) и предварительный (а) кадры с пленки СФР. Число над линией – время выхода ударной волны в данной точке регистрируемой линии. Осциллограммы с контактных датчиков (в, з). Группа А – датчики 1–6, группа В – датчики 7–10

Следующий опыт проводился с использованием пластин из пенополистирола плотностью $0,3 \text{ г/см}^3$. Точки выхода каналов ДР были расположены в шахматном порядке путем соответствующего смещения соседних пластин друг относительно друга. Такое расположение точек выхода каналов ДР снижает время распространения детонации от них по поверхности подрываемого заряда, т.е. уменьшает разновременность его подрыва. Была также увеличена до 6 мм ширина и глубина детонационных каналов на выходе ДР. Пластины ДР были смещены на половину их толщины относительно границ элементов УИ.

Рабочий и предварительный кадры с пленки скоростного фоторегистратора (СФР) представлены на рис. 5 а, б. Разновременность в этом опыте снизилась до 0,5 мкс. Кроме того, суммарная длина участков, где разновременность не превышает 0,2 мкс, составила ~60% от суммарной толщины пластин в модели ДР. Результаты измерений контактной методикой рис. 5 в, з соответствуют результатам, полученным с использованием СФР.

Таким образом, результаты расчетов и экспериментов с моделью ДР показали, что при изготовлении пластин, в которых выполняются каналы ДР, из пенополистирола плотностью менее $0,7 \text{ г/см}^3$, расположении точек выхода каналов ДР в шахматном порядке и увеличении в них количества ВВ, а также при смещении пластин ДР на половину их толщины относительно границ элементов УИ удастся снизить разновременность инициирования каналов ДР до величины, необходимой для работы ВРТ-600.

Расчеты электрического поля на границе «изолятор–вакуум»

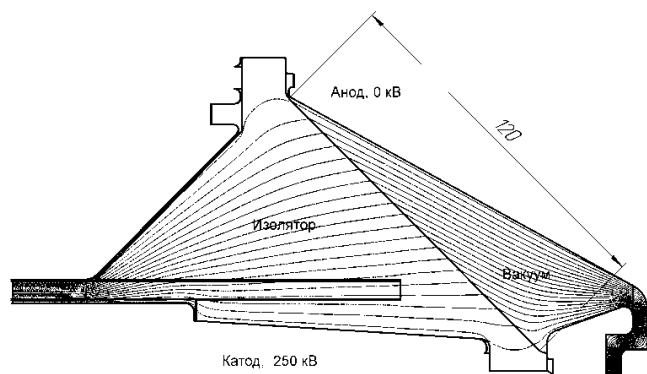
В электрофизических установках, имеющих вакуумные нагрузки, переход твердотельного изо-

лятора в вакуум должен обладать достаточной электрической прочностью по поверхности изолятора. Электропрочность перехода зависит от площади поверхности изолятора, от максимальной напряженности электрического поля вдоль поверхности изолятора в вакууме, от равномерности распределения этой напряженности по поверхности изолятора. Увеличение длины изолятора на границе «изолятор–вакуум» может привести к увеличению индуктивности линии подвода энергии к нагрузке. Численные расчеты позволяют оптимизировать переход «изолятор–вакуум» по этим параметрам.

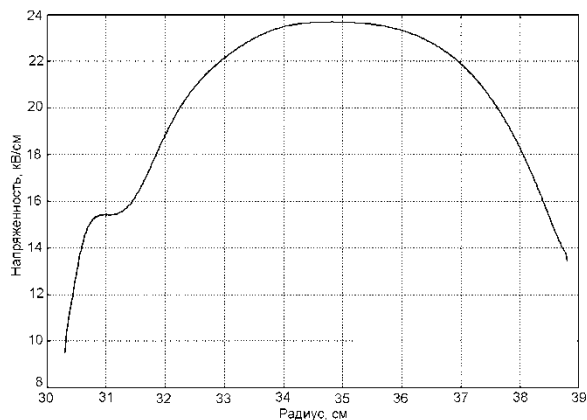
В ходе выполнения расчетов решалась двумерная осесимметричная задача электростатики. На поверхности внутреннего электрода задавался постоянный электрический потенциал. Поверхность внешнего электрода находится под нулевым потенциалом. Исходя из результатов предварительных расчетов, с учетом индуктивного деления напряжения по элементам цепи, расчетный потенциал внутреннего электрода достигает 250 кВ.

Для получения оптимальной геометрии на границе «изолятор–вакуум» были проведены численные расчеты нескольких вариантов перехода с углом наклона поверхности изолятора к оси электродов, равным 45° . Диэлектрическая проницаемость изолятора $\epsilon = 4$. В расчете перехода, выполненного по аналогии с устройством [5] и масштабированного на диаметр, соответствующий диаметру расположения фольги в ВРТ600, максимальная напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора достаточно велика и составляет 34 кВ/см.

Для уменьшения напряженности электрического поля рассчитана модель с увеличенной длиной перехода «изолятор–вакуум». В этом варианте также изменена геометрия анодной и катодной



а



б

Рис. 6. Геометрия, распределение эквипотенциалей (а) и напряженность электрического поля (б) вдоль поверхности изолятора в переходе «изолятор-вакуум» ВРТ600

тройных точек, что привело к исчезновению скачков напряженности на изгибах изолятора. Индуктивность перехода «изолятор-вакуум» при такой геометрии на 2 нГн больше индуктивности исходной модели и составляет 5,3 нГн. Геометрия перехода и распределение в нем эквипотенциалей приведены на рис. 6а. Напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора, показанная на рис. 6б, не превышает 24 кВ/см. Данная геометрия взята за основу при разработке устройства ДВМГ240-15 – ВРТ-600.

Заключение

Разработан источник для исследования лайнерных систем, предназначенный для формирования в нагрузке ~ 15 нГн импульса тока ~ 20 МА с характерным временем нарастания менее 1 мкс на основе 15-элементного дискового ВМГ с зарядами ВВ диаметром 240 мм и взрывного размыкателя диаметром ~ 600 мм. Запитка дискового генератора током 5–6 МА обеспечивается спиральным ВМГ диаметром 240 мм. Во взрывном размыкателе тока применяется преграда в виде проволочного соленоида из стальной проволоки. Разрушение фольги происходит при детонации заряда из пластического ВВ. Подрыв этого заряда происходит при воздействии ударной волны, формируемой с помощью многоканального детонационного распределителя. В передающих линиях между ДВМГ и ВРТ и между ВРТ и нагрузкой применяются изоляторы из полиэтилена. Устройство содержит ~ 80 кг ВВ. Его длина $\sim 3,5$ м, максимальный диаметр $\sim 0,7$ м, масса ~ 350 кг.

Результаты расчетов и экспериментов с моделью детонационного распределителя показали, что при изготовлении дисков, в которых выполняются каналы распределителя, из пенопласта плотностью менее $0,7$ г/см³, расположении точек выхода каналов в шахматном порядке, а также при смещении дисков распределителя на половину их толщины относительно границ элементов устройства инициирования удается достичь заданной одновременности выхода ударной волны на фольгу.

Проведены расчеты электрического поля на границе «твердотельный изолятор-вакуум» в передающей линии между взрывным размыкателем и лайнерной камерой. Расчетно выбрана конфигурация узла «твердотельный изолятор-вакуум», обеспечивающая напряженность электрического поля вдоль поверхности изолятора не выше 24 кВ/см.

Список литературы

1. Chernyshev V. K., Demidov V. A., Veselov V. N. et al. Investigation of the Speed Response Dependence of the Explosive Current Opening Switch on Initial Conditions // *Megagauss Fields and Pulsed Power Systems* / Ed. V.M.Titov and G.A.Shvetsov. N.Y.: Nova Science Publishers. 1990. P. 527–531.
2. Demidov V. A., Selemir V. D. Explosive Pulsed Power for Controlled Fusion // *Megagauss Magnetic Fields and High Energy Liner Technology* / Ed. by G.F. Kiuttu, P.J. Turchi, R.E Reinovsky. The Institute of Electrical and Electronic Engineers. 2007. P. 245–254.
3. Пат. 2548021 RU МПК Н02Н 11/00. Взрывная система для генерирования мощного импульса

энергии / А. С. Борискин, В. А. Демидов, С. А. Казаков // Открытия. Изобретения. 2015. № 10.

4. Пат. 2399111 RU МПК Н01Н 39/00. Взрывной формирователь импульса тока / А. С. Борискин, Ю. В. Власов, В. А. Демидов, С. А. Казаков, Е. В. Шаповалов // Открытия. Изобретения. 2010. № 25.

5. Демидов В. А., Борискин А. С., Казаков С. А. и др. Дисковый взрывомагнитный генератор с взрывным размыкателем тока // ПМТФ. 2015. № 1. С. 24–30.

6. Пат. 2438206 RU МПК Н01Н 39/00. Взрывной размыкатель тока / В. А. Демидов,

С. А. Казаков // Открытия. Изобретения. 2011. № 36.

7. Демидов В. А., Казаков С. А., Борискин А. С. и др. Размыкание мегаамперных токов взрывным размыкателем с преградой в виде проволочного соленоида // Мощная импульсная электрофизика. Международная конференция XIV Харитоновские тематические научные чтения. Сборник докладов. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». 2013. С. 208–212.