

зволяют получить необходимую (в соответствии с ГОСТ) освещенность на участке оценки. Из представленных трехваттных светодиодов (700 mA) только светодиод LUXEON LXHL-LW3C с диаграммой направленности Side Emitting обеспечивает необходимую освещенность на участке оценки. Однако в угле 120° у этого светодиода сила света ниже 1 кд (см. п. 2). Для решения этой проблемы необходимо применить диаграмму направленности светового потока типа Side Emitting, у которой в центральной части диаграммы для углов от -60° до $+60^\circ$ световой поток составляет не менее 0.5 световой энергии светодиода.

Применение отражателя-радиатора с углом $\alpha < 120^\circ$, а именно: $\alpha = 68^\circ$ (табл. 3), и с тем же фокусом увеличивает освещенность на участке оценки и в угле 68° примерно в два раза, но за пределами этого угла освещенность равна 0.

4. Выводы. Авторами получены оптимальные параметры оптической системы головного шахтного светодиодного светильника, а именно:

- 1) фокусное расстояние параболического отражателя $F = 3,1$ мм;
- 2) максимальный угол выхода прямых лучей от светодиода из отражателя $\alpha = 120^\circ$;
- 3) площадь поверхности полученного отражателя обеспечивает оптимальный тепловой режим работы светодиода;
- 4) для светодиода LUXEON LXHL-LW3C с диаграммой направленности Side Emitting значения освещенности на участке оценки (см. табл. 2) удовлетворяют требованиям ГОСТ P52066-2003 (см. п. 1). Для получения силы света в 1 кд в угле 120° необходимо применить диаграмму направленности Side Emitting, у которой для $-60^\circ \leq \alpha \leq +60^\circ$ световой поток составляет не менее 0.5 световой энергии светодиода;
- 5) размещение кристалла светодиода в фокус параболического отражателя обеспечивает хорошую фокусировку лампы;
- 6) для применения трехваттного светодиода с использованием батареи Li-In необходима емкость батареи 9 А·ч, которая обеспечит непрерывное свечение лампы не менее 10 ч с учетом 20% падения емкости батареи в течение ее жизненного срока работы;
- 7) спектр излучения (5500К) светодиодной лампы LUXEON LXHL-LW3C White, для которого выполнены расчеты освещенности, близок к спектру „теплого” солнечного света.

Список литературы: 1. Бурняшев А. Современные мощные светодиоды и их оптика // Современная электроника. – 2006. - № 1. – С.24-27. 2. ГОСТ 24471 „Приборы световые рудничные нормальные. Общие технические условия”. – 24 с. 3. ГОСТ P52066-2003 „Светильники головные рудничные взрывозащищенные. Часть 2. Эксплуатационные требования”. – 2003. – 8 с. 4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Оптика. – М.: Наука, 1980. – 752 с. 5. Полищук А. Обеспечение теплового режима мощных светодиодных ламп при разработке светотехнических устройств // Современная электроника. – 2006. – № 3. – С.52-57. 6. Винокуров А. Тепловые режимы мощных светодиодов DORADO // Компоненты и технологии. – 2006. – №5. – С.68-71. 7. Матвеев А.Н. Оптика. – М.: Высшая школа, 1985. – 351 с. 8. <http://www.luxeon.com>.

Поступила в редколлегию 20.04.2007

А.Ю. ЛАРИН, А.В. МАРТЫНЕНКО, НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАРТИНЫ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В УСТРОЙСТВЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ ПОМОЩИ ПАКЕТА ANSYS/EMAG

Запропоновано нову методику розробки систем електродинамічного захисту. Вона полягає в тому, що за допомогою узагальненого параметричного підходу проводиться моделювання електромагнітних явищ, виникаючих у процесі взаємодії бійка та елементів захисту, за допомогою сучасних САПР. Отримані чисельні результати порівняні з експериментальними дослідженнями, проведеними раніше. Зроблено висновки.

The new method of the electrodynamic defence systems development is offered. Generalized parametric approach for modeling of the electromagnetic phenomena in modern CAD/CAE systems is used. Numerical results are done and compared with the experimental researches taken earlier. Conclusions are done.

Введение. Повышение бронестойкости является одной из наиболее важных задач как при создании, так и при модернизации боевых машин. При этом конструкторы вынуждены удовлетворять еще целому набору ограничений, из которых наиболее серьезным является минимизация веса конструкции. Поэтому наряду с изготовлением корпуса из «легких» металлов и сплавов широко применяются дополнительные защитные системы. Среди дополнительных защитных систем одной из самых перспективных является электродинамическая защита (ЭДЗ), откуда следует, что исследование возможности ее применения является актуальной задачей.

1. Состояние вопроса. В настоящее время достаточно тщательно исследовано и теоретически обосновано взаимодействие элементов ЭДЗ с кумулятивными боеприпасами [1, 2, 3]. Имеющиеся данные относительно снижения бронепробивной способности этих средств поражения свидетельствуют о том, что ЭДЗ по своим возможностям не уступает системам активной и динамической защиты. С ее помощью представляется возможным разрешить проблему дальнейшего повышения уровня защиты бронетехники без значительного увеличения веса.

В соответствии с приведенными в работах [1, 2] зависимостями, эффективность электродинамического воздействия (ЭДВ) на кумулятивную струю (КС) определяется следующими электротехническими параметрами установки ЭДЗ: начальным напряжением U_0 ; емкостью C конденсаторной батареи; индуктивностью L_S и активным сопротивлением R_S разрядного контура.

К числу конструктивных параметров элемента ЭДЗ, определяющих эффективность воздействия на КС, относятся (рис. 1): ширина δ межэлектродного промежутка; удаление h электродной системы от кумулятивного заряда.

Благодаря особенностям КС, а именно: ее высокой электропроводности и наличием градиентности в движении частей струи, т.е. эффекту растягивания

струи в пространстве, при постановке экспериментов исследователи имели возможность в широких пределах изменять ширину межэлектродного промежутка. В опытах, результаты которых приведены в работе [1], при исследовании возможностей снижения бронепробивной способности 115 мм кумулятивного боеприпаса параметр d изменялся от 50 до 125 мм, т.е. увеличивался на 150%. Максимальное значение конструктивного параметра d при реализации токового воздействия на кумулятивную струю в соответствии со схемой, представленной на рис. 1, ограничивается лишь длиной кумулятивной струи до момента потери ее сплошности, т.е. до тех пор, пока в теле КС не начнут возникать разрывы, приводящие к полной потере электрического контакта. В случае использования ЭДЗ с целью создания ЭДВ на кинетические боеприпасы диапазон изменения ширины межэлектродного промежутка значительно сужается.

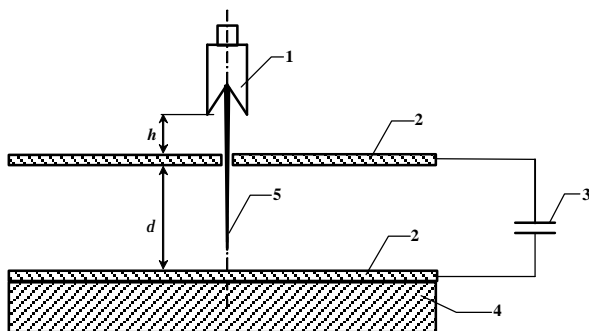


Рис. 1. Двухэлектродная схема реализации токового воздействия на внедряющееся тело:
1 – кумулятивный заряд;
2 – электроды;
3 – источник электрической энергии;
4 – преграда;
5 – кумулятивная струя

2. Анализ проведенных экспериментальных исследований. В работе [4] проведен подробный анализ процесса прохождения бойком межэлектродного зазора устройства ЭДЗ. По итогам исследований сделан вывод, что максимальная величина d , гарантирующая срабатывание системы определяется следующими составляющими (рис. 2): длиной лепестков пробойны, создаваемой бойком в лицевой пластине ЭДЗ; длиной самого бойка; воздушным зазором, который пробивается электрическим разрядом вследствие наличия высокого напряжения на источнике электрической энергии.

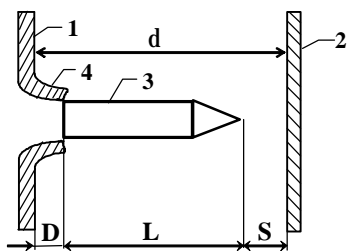


Рис. 2. Определение максимальной ширины межэлектродного промежутка при известной величине пробиваемого воздушного зазора:
1 – лицевая пластина ЭДЗ;
2 – тыльная пластина ЭДЗ;
3 – боек; 4 – лепестки пробойны;
 L – длина бойка; S – воздушный зазор;
 D – длина лепестков;
 d – межэлектродный зазор

Основываясь на лабораторных экспериментах по моделированию пробоя воздушного промежутка в межэлектродном зазоре элемента ЭДЗ [4], можно сделать вывод, что параметр d зависит в первую очередь от длины боеприпаса и от напряжения на источнике электрической энергии. Так, для условий взаимодействия с бойком диаметром 7,62 мм, межэлектродный зазор может превышать длину бойка на 30 % при напряжении на электродах $U = 26,9$ кВ. Однако экспериментальные данные были получены лишь для условий, когда пробой электродов ЭДЗ осуществлялся по нормали к их поверхности, что не полностью отражает возможные случаи. Покажем, что на силу тока, необходимого для противодействия бойку значительное влияние оказывает как расстояние между пластинами (межэлектродный промежуток d), так и угол нутации бойка γ .

В известных формулах, которые описывают электродинамическое воздействие на проводник с током со стороны других проводников, влияние силы электрического тока представлено в виде квадратичной зависимости. В соответствии с этим, энергия, переданная бойку, значительно зависит от величины тока, а также от длительности воздействия. Проведем сравнительный анализ полученных экспериментально графиков изменения величины силы электрического тока, протекающего через боек в условиях различного максимального значения d (рис. 3). На рисунке цифрами обозначено: 1 – измеренное изменение силы тока $I(t)$ для системы ЭДЗ с источником энергии емкостного типа $C=50$ мкФ; 2 – измеренное изменение силы тока $I(t)$ для системы ЭДЗ с источником энергии емкостного типа $C=150$ мкФ; 3 – момент окончания силового воздействия на боек; 4 – момент металлического касания тыльного электрода. Для первого случая (рис. 3, а) максимальное значение d определялось только по длине боеприпаса; а для второго (рис. 3, б) – по длине боеприпаса и значению воздушного промежутка, пробиваемого электрическим разрядом (см. рис.2).

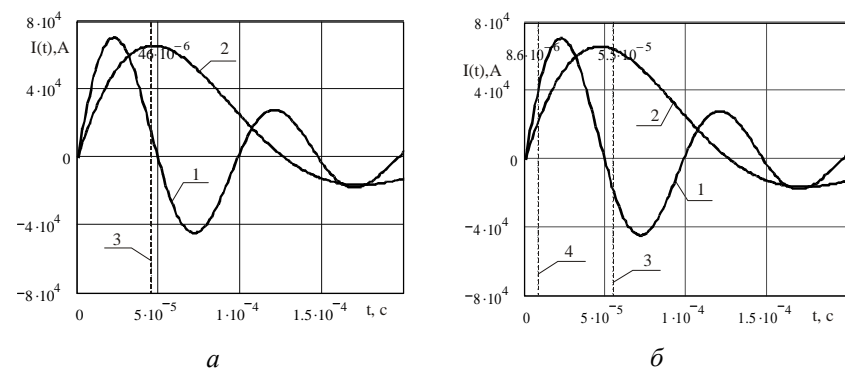


Рис. 3. Зависимость изменения силы электрического тока, протекающего через боек, от времени при различном максимальном d

Конец электродинамического воздействия для различных вариантов определения начала процесса следует определять по моменту прохождения донной частью бойка тыльной пластины ЭДЗ. Если начало воздействия определять по металлическому касанию тыльного электрода ЭДЗ (рис. 3, а), то для бойка длиной 38 мм при скорости его движения 815 м/с, длительность ЭДВ составляет 46 мкс (соответствует линии 3 на рис. 3, а и 3, б). В случае, если начало воздействия определялось по моменту пробоя воздушного промежутка длиной 7 мм, то длительность воздействия увеличивается на 18 % (рис. 3, б) по сравнению с предыдущим вариантом отсчета момента начала процесса. Этот пример подтверждает важность определения момента замыкания электрической цепи ЭДЗ как для расчета продолжительности электродинамического воздействия боеприпаса, так и для выбора максимального межэлектродного зазора.

3. Методика численного определения параметров ЭДЗ. Как отмечалось в [4], возможность пробоя воздушного промежутка (как и любого газобразного диэлектрика) электрическим разрядом при наличии системы электродов, создающих резко неоднородное электрическое поле, определяется условием достижения такого уровня напряженности, при котором обеспечиваются условия развития короны и перехода ее в стример. Существующие методики численного расчета напряженности электрического поля достаточно трудоемки. Обусловлено это, в первую очередь, сильным влиянием формы электродов на создаваемое вокруг них поле.

При рассмотрении промежутков, образующихся между бойком и тыльным электродом ЭДЗ, в первую очередь следует учитывать случаи, когда ось средства поражения не совпадает с нормалью электрода защиты. Такая ситуация может возникнуть вследствие отличного от нормального угла обстрела, а также в результате наличия угла нутации γ у средства поражения при подлете к тыльному электроду ЭДЗ. Как показывает практика, такой случай и является наиболее вероятным в условиях реальной эксплуатации средств защиты.

Многими исследователями в качестве способа, позволяющего избежать трудоемких расчетов при построении картины электрического поля для системы электродов сложной формы, предлагается получение экспериментальных зависимостей значений пробоя воздушных промежутков от подаваемого на них напряжения. Однако этот способ требует специального оборудования и значительного объема лабораторных исследований, что в современных реалиях труднодостижимо.

Предлагается для исследования перспективной ЭДЗ применять возможности современного численного моделирования, в частности, общеизвестный метод конечных элементов [5] в применении к решению электромагнитных задач [6]. В ранних работах [7, 8] неоднократно приводились примеры использования современных программных продуктов систем автоматизированного проектирования (САПР) для моделирования различных процессов.

4. Проведенные численные исследования и их результаты. В данном исследовании использовались Computer Aided Design (CAD) система Solid-

Works и Computer Aided Engineering (CAE) система ANSYS. В комплексе SolidWorks предварительно было выполнено построение геометрической модели пули Б-32 калибра 7,62 мм. (рис. 4). Далее на ее основе строилась трехмерная модель взаимодействия средств ЭДЗ с бойком и с учетом окружающего воздушного пространства (рис. 5).

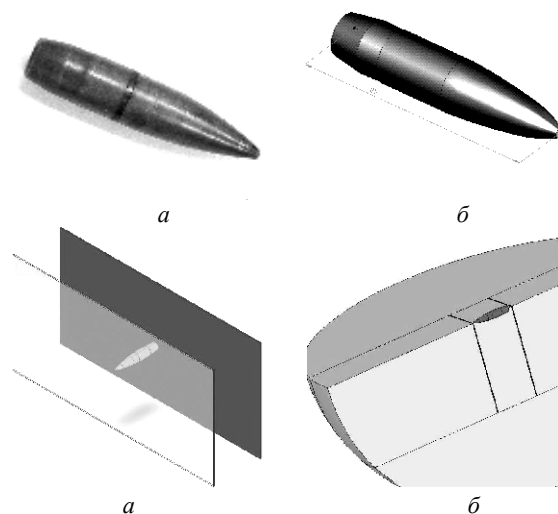


Рис. 4. Геометрическая модель пули и ее прототип: а – реальная пуля Б-32 7,62 мм, б – геометрическая модель

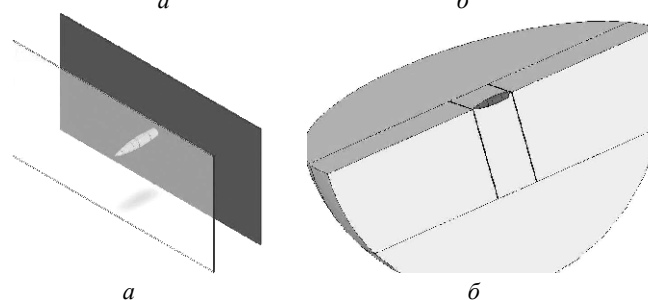


Рис. 5. Численная модель процесса взаимодействия ЭДЗ и бойка в SolidWorks: а – взаимное положение проводников и бойка; б – учет воздушного пространства

Для непосредственного проведения расчета напряженности поля, возникающего при данном взаимодействии, использовался программный комплекс ANSYS, а именно его модуль Multiphysics [9]. Построенная модель экспортировалась в препроцессор, где она проходила дополнительные необходимые подготовительные процедуры: задание реальных констант, типов конечных элементов (КЭ), внесение необходимых изменений в модель, разбиение на конечные элементы и пр. Некоторые этапы построения конечно-элементных моделей (КЭМ) приведены на рис. 6.

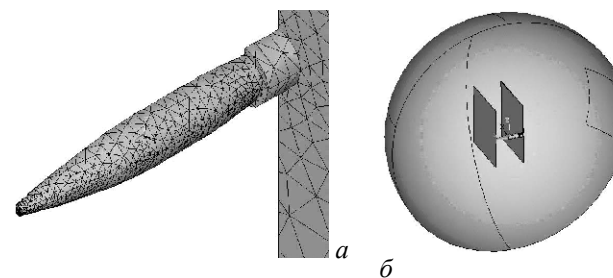


Рис. 6. Численная модель процесса взаимодействия ЭДЗ и бойка в ANSYS: А – КЭМ, учитывающая лепестки пробойны; б – учет воздушного пространства в КЭМ

Создаваемая численная модель выполнена с необходимой параметризацией с целью применения обобщенного параметрического подхода [10]. Дан-

ный подход позволяет производить всесторонние исследования механических систем любой сложности с помощью современных систем САПР.

Далее была проведена серия расчетов с варьированием угла нутации γ и величины воздушного зазора S между острием бойка и тыльной пластиной ЭДЗ при напряжении на электродах ЭДЗ в 7 кВ. Результаты численных расчетов в виде картины напряженности электрического поля вокруг бойка (броневой пули Б-32 калибра 7,62 мм) в межэлектродном промежутке приведены на рис. 7.

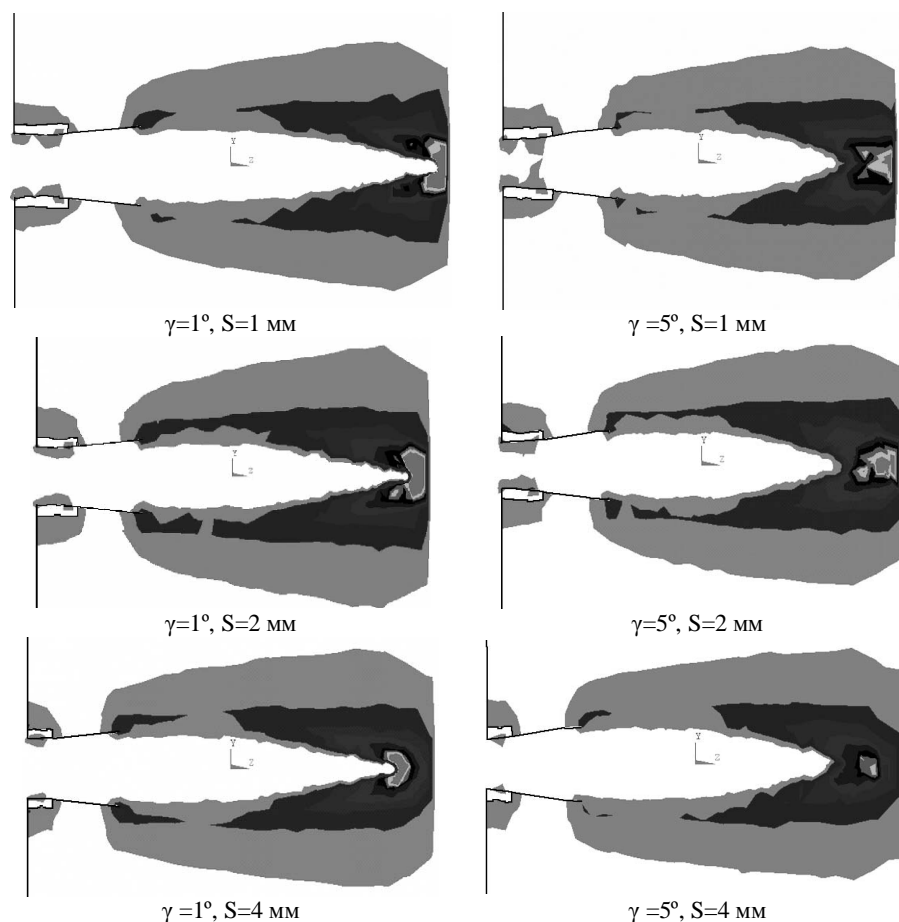


Рис. 7. Картины напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке электрической брони при различных значениях воздушного промежутка S и угла нутации γ при $H = 45$ мм и $U_0 = 7$ кВ.

На рис. 7 хорошо заметна зоны перед носком бойка, в которых напря-

женность поля достигает 30 кВ/м и выше, то есть места, где напряженность поля позволяет осуществлять ударную ионизацию молекул воздуха и тем самым создаются условия для пробоя газообразного диэлектрика электрическим разрядом.

По данным моделирования, наличие у электрода типа острие угла, отличного от нормали, приводит к значительному увеличению напряжения пробоя. Также видно, что чем ближе боек находится к пластине, тем больше область ионизации, а соответственно и сила сопротивления движению средства поражения. Это вызвано изменением геометрии электродов системы острие-плоскость, что, как уже отмечалось, оказывает сильное влияние на значение напряженности поля вокруг электрода, и в конечном итоге – на величину пробиваемого воздушного промежутка. Данные результаты соответствуют физике явления, что свидетельствует о правильности примененной математической модели взаимодействия.

5. Выводы. В данной статье предложена методика предварительной оценки возможности электрического пробоя воздушного промежутка в системе ЭДЗ, основанный на анализе картины напряженности электрического поля, построенной в программном комплексе ANSYS/Multiphysics с помощью обобщенного параметрического подхода. Сравнительный анализ картин напряженности электрического поля, построенных для бойков, имеющих разные углы нутации (при прочих равных условиях), свидетельствует о том, что угол, под которым боек находится в межэлектродном промежутке электрической брони, оказывает значительное влияние на возможность электрического пробоя воздушного промежутка. Данный метод может быть в дальнейшем использован при проектировании систем электродинамической защиты.

Список литературы: 1. Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В., Швецов Г.А., Матросов А.Д. Выбор параметров электродинамической защиты против кумулятивных средств поражения танков // Оборонная техника. – 2002. – № 1-2. – С.26-36. 2. Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Электрическая защита перспективной боевой машины XXI века // Оборонная техника. – 2000. – № 1-2. 3. Ogorkievich R. Future tank armors revealed // Janes Int. Defense Rev.– 1997. – № 5. 4. Ларин А.Ю., Стаховский О.В. Выбор напряжения источника питания устройства электродинамического воздействия на индентор // Механика та машинобудування, 2004. – №1. – С.67-73. 5. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с. 6. S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamentals, – New York: McGraw-Hill Book Co., Inc., 1985. 7. Васильев А.Ю., Ларин А.Ю., Ткачук Н.А., Шаталов О.Е., Мартыненко А.В. Использование современного программного обеспечения при моделировании процесса пробивания // Збірник наукових праць Військового інституту ВВ МВС України – Харків: Військ.ін-т ВВ МВС України, 2004.– № 1-2 (3-4). – С.55-58. 8. Ткачук А.Н., Шаталов О.Е., Ларин А.Ю., Васильев А.Ю. Расчет траектории полета пули и снарядов с учетом угла нутации, прецессии и собственного вращения. // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2005. – №3. – С.38-42. 9. ANSYS Release 7.0 Documentation. Low-Frequency Electromagnetic Analysis Guide. 10. Ткачук Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния элементов сложных механических систем // Вестник НТУ „ХПИ“: Тем. вып.: Динамика и прочность машин. – 2002. – №10. – С.126-132.

Поступила в редколлегию 12.05.2007