

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА ОТ КУМУЛЯТИВНЫХ СРЕДСТВ ПОРАЖЕНИЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

С.В. Федоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: sergfed-64@mail.ru

На основе разработанной методики расчета пробивного действия кумулятивных зарядов в условиях пропускания по кумулятивной струе мощного импульса электрического тока выполнены оценки возможных параметров электродинамической защиты для противодействия кумулятивным средствам поражения с различным могуществом действия. В качестве источника электрической энергии рассмотрена конденсаторная батарея. Установлена зависимость снижения пробивного действия различных типов кумулятивных боеприпасов от энергии емкостного накопителя. Показано, что наиболее реалистичным является применение электродинамического воздействия на кумулятивные струи для защиты объектов от кумулятивных средств ближнего боя с глубиной пробития по гомогенной броне в пределах 500. . . 600 мм. Необходимая в этом случае энергия емкостного накопителя оценивается значением на уровне 500 кДж. Проведен краткий анализ состояния разработок по созданию электродинамической защиты объектов у нас в стране и за рубежом.

Ключевые слова: взрыв, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, пробивное действие, электрический ток, электродинамическая защита.

ELECTRODYNAMIC PROTECTION AGAINST SHAPED-CHARGE WEAPONS: PROSPECTS OF PRACTICAL IMPLEMENTATION

S.V. Fedorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: sergfed-64@mail.ru

Possible parameters of electrodynamic protection for counteraction to shaped-charge weapons with different power of action are estimated on the basis of the developed computational procedure for determining shaped-charge penetrative action under conditions of passing a powerful electric-current pulse through a shaped-charge jet. As a source of electric energy the capacitor bank is considered. The dependence of a decrease in penetrative action of shaped charges of various types on the energy of the capacitor bank is found. It is shown that application of electrodynamic action on shaped-charge jets for protection of objects against shaped-charge close-combat weapons characterized by a penetration depth of 500. . . 600 mm (for homogeneous armor) is most realistic at present. The capacitor-bank energy required for this case is estimated by a value at the level of 500 kJ. The status of developments in the field of creating electrodynamic protection of the objects in our country and abroad is briefly analyzed.

Keywords: explosion, shaped charge, shaped-charge jet, penetrating action, electric current, electrodynamic protection.

Важной задачей является обеспечение защиты различных объектов от кумулятивных средств поражения [1]. В тех случаях, когда на защищаемом объекте невозможна по каким-либо причинам установка динамической защиты [2] со взрывным метанием металлических

пластин, “сбивающих” кумулятивную струю (КС), может быть использована так называемая электродинамическая защита (ЭДЗ), принцип действия которой основан на разрушении КС мощным импульсом электрического тока [2–4]. Устройство ЭДЗ достаточно просто. В конструктивном отношении ее основными элементами являются две металлические пластины, разделенные слоем диэлектрика, и подающий на них напряжение источник электрической энергии, в качестве которого наиболее реальной с точки зрения технического воплощения выглядит конденсаторная батарея (рис. 1, а). Разделенные диэлектриком пластины-электроды устанавливаются перед защищаемой преградой и после их замыкания при пробитии диэлектрика КС подводится электрическая энергия к участкам струи, движущимся в межэлектродном промежутке [5].

Эксперименты свидетельствуют, что при достаточной интенсивности электродинамическое воздействие (ЭДВ) действительно способно приводить к существенному снижению пробивного действия КС. Однако вопрос о возможности и целесообразности применения этого способа защиты от кумулятивных средств поражения на реальных объектах бронетехники до сих пор остается открытым [6]. Как представляется, главная причина этого состоит в том, что проведенные до настоящего времени исследования не позволяют определить рациональные режимы ЭДВ применительно к конкретному кумулятивному боеприпасу (КБП) и требуемому с учетом противокумулятивной стойкости защищаемой преграды уровню снижения его пробивного действия. Без решения же этой задачи нельзя сформулировать требования к главной части ЭДЗ — источнику электрической энергии, который должен быть установлен на бронеобъекте, и к системе его электрооборудования.

Согласно экспериментальным данным именно габаритно-массовые характеристики источника энергии могут являться основным препятствием на пути реального воплощения ЭДЗ — в экспериментах с кумулятивными зарядами диаметром 100 мм заметный эффект разрушения КС достигался при энергии конденсаторной батареи в 1 МДж и более [7], что при существующем сегодня в нашей стране уровне удельной энергоемкости импульсных емкостных накопителей в десятки доли джоуля на кубический сантиметр практически исключает возможность использования ЭДЗ на самоходных автономных бронеобъектах. Более благоприятная ситуация с применением ЭДЗ на объектах бронетехники может сложиться при переходе к использованию уже существующих за рубежом перспективных емкостных накопителей с удельной энергоемкостью на уровне 1 Дж/см³ [3]. Однако и в этом случае размещение мегаджоульной конденсаторной батареи на бронеобъекте остается достаточно проблематичным: такая батарея будет занимать объем более 1 м³ и увеличит массу бронеобъекта на несколько тонн.

В то же время следует учитывать, что реализованные при проведении экспериментов параметры электродной системы (удаление от кумулятивного заряда h , межэлектродный промежуток δ_e , см. рис. 1, а) и режимы токовых воздействий (амплитуда и продолжительность токового импульса) выбирались без достаточного обоснования и совсем необязательно являются оптимальными с точки зрения достижения заданного эффекта разрушения КС при минимальных затратах энергии. Имеющихся экспериментальных данных недостаточно также и для того, чтобы выявить степень влияния различных параметров ЭДВ на снижение пробития КС.

Таким образом, при решении вопросов, связанных с практическим применением ЭДЗ, актуальной является проблема минимизации энергозатрат для достижения требуемого уровня снижения пробивного действия КБП на основе оптимизации параметров токовых воздействий. Исследования проводились на основе разработанной в МГТУ им. Н.Э. Баумана расчетной методики [8], в которой в качестве возможных физических механизмов снижения проникающей способности КС при мощном ЭДВ рассматривались развитие магнитогидродинамической (МГД) неустойчивости КС перетяжечного типа и диспергирование ее материала с радиальным рассеиванием [9–11]. Первый из указанных механизмов приводит к уменьшению эффективной длины КС вследствие ее ускоренного распада на отдельные элементы, которые при достаточной мощности ЭДВ могут дополнительно сжиматься в осевом направлении с увеличением своего поперечного размера (так называемое, явление “дискообразования”) [10]. Второй механизм может реализовываться при выходе участков КС из межэлектродного промежутка, когда происходит резкое прекращение действия на струю сжимающих электромагнитных сил, в результате чего создаются предпосылки для диспергирования ее материала (к этому моменту сильно нагретого электрическим током за счет выделения джоулевой теплоты и потому практически полностью лишенного прочности) [11]. Диспергирование материала КС, сопровождаемое его радиальным рассеиванием, приводит к уменьшению средней плотности струи. Поскольку пробивное действие КС определяется ее длиной и плотностью материала, оба рассматриваемых фактора (развитие МГД-неустойчивости и радиальное рассеивание материала) ведут к снижению глубины проникания КС в преграду.

Согласие с результатами экспериментов [7, 9] дало основания провести на базе разработанной методики расчета функционирования КБП при ЭДВ на струю исследования по определению рациональных параметров ЭДЗ, способной противодействовать штатным кумулятивным средствам поражения объектов бронетехники. Номенклатура КБП, применяемых для борьбы с бронеобъектами,

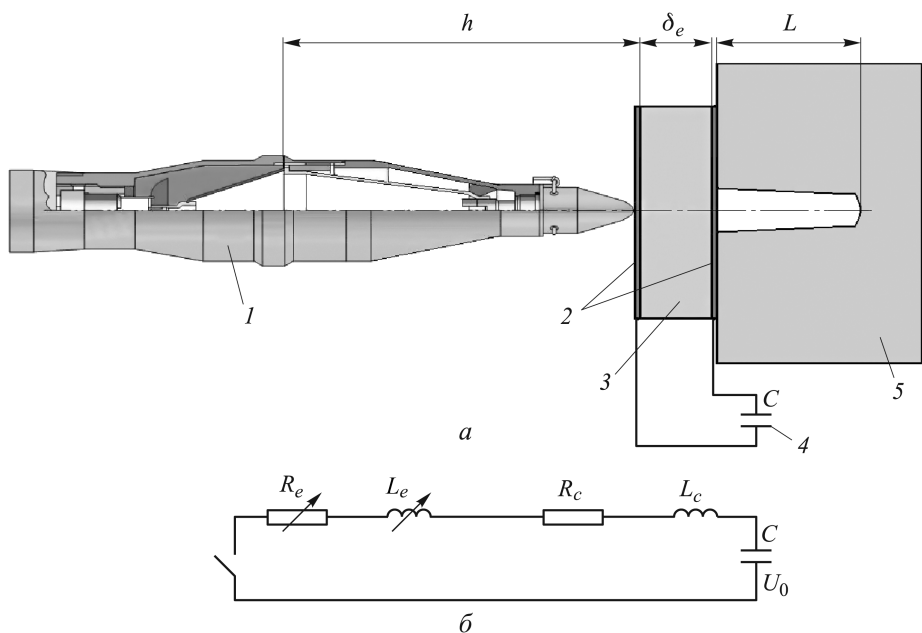


Рис. 1. Электродинамическая защита от кумулятивных средств поражения:
а — схема реализации токового воздействия на кумулятивные струи (*1* — кумулятивный боеприпас; *2* — пластины-электроды; *3* — диэлектрик; *4* — емкостной накопитель энергии; *5* — защищаемая преграда; *L* — остаточное пробитие кумулятивного боеприпаса); *б* — эквивалентная схема разрядного контура двухэлектродного элемента электродинамической защиты с емкостным накопителем энергии

чрезвычайно широка: противотанковые гранаты, кумулятивные артиллерийские снаряды и мины, кумулятивные каскадные элементы авиабомб и реактивных систем залпового огня, противотанковые управляемые ракеты (ПТУР) [1]. При определении возможных параметров ЭДЗ из этого многообразия кумулятивных средств были выбраны КБП с различным могуществом действия: противокумулятивная стойкость ЭДЗ оценивалась для боевой части гранаты РПГ-26 (РФ) (калибр гранатомета около 73 мм, глубина пробития по однородной бронепреграде $L_0 \approx 440 \dots 500$ мм), а также боевых частей ПТУР “Милан-2” (Франция, Германия) (диаметр ракеты 115 мм, $L_0 \approx 700 \dots 750$ мм) и “Хот-2” (Франция, Германия) (диаметр ракеты 150 мм, $L_0 \approx 950 \dots 1100$ мм) [1]. В дальнейшем будем использовать для этих КБП следующие обозначения: КБП1 (РПГ-26), КБП2 (“Милан-2”) и КБП3 (“Хот-2”).

Конструкция элемента ЭДЗ предполагалась двухэлектродной (см. рис. 1, *а*). Как уже отмечалось, именно с использованием такой конструкции были получены все экспериментальные результаты. Предложенные в [4] варианты многоэлектродных схем ЭДЗ рассматривались лишь в теоретическом плане и требуют экспериментального подтверждения своей работоспособности. Кроме того, очевидно, не имеет смысла усложнять конструкцию ЭДЗ до тех пор, пока до конца не вы-

яснены возможности простейшей двухэлектродной схемы. В качестве источника электрической энергии, обеспечивающего функционирование ЭДЗ, рассматривалась конденсаторная батарея.

Эквивалентная схема разрядной цепи замкнутого участком КС двухэлектродного элемента ЭДЗ, запитываемого от конденсаторной батареи, приведена на рис. 1, б, где L_c и R_c — индуктивность и активное сопротивление внешней части цепи (включая конденсаторную батарею), L_e и R_e — индуктивность и активное сопротивление межэлектродного промежутка. Полные индуктивность $L_s = L_c + L_e$ и активное сопротивление $R_s = R_c + R_e$ разрядной цепи влияют на форму токового импульса и, соответственно, на эффективность токового воздействия на КС. С увеличением индуктивности и активного сопротивления цепи сила разрядного тока уменьшается. Очевидно, что при разработке системы ЭДЗ составляющие полных индуктивности и активного сопротивления L_c и R_c , определяемые системой подвода тока к элементу ЭДЗ, должны быть минимизированы настолько, насколько позволяют технические возможности используемого электрооборудования.

При оценке индуктивности L_e межэлектродного промежутка шириной δ_e можно воспользоваться формулой для индуктивности уединенного цилиндрического проводника [12]:

$$L_e \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{2\delta_e}{r} \right) - 1 \right) \delta_e,$$

где r — радиус участка КС, замыкающего промежуток, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная. При расстоянии между электродами δ_e до 100 мм и радиусе струи в несколько миллиметров (для кумулятивного заряда диаметром 100 мм) индуктивность L_e оценивается значением в диапазоне от 0,05 до 0,1 мкГн. Полная индуктивность L_s всей системы токового воздействия на КС в целом, как показывает анализ параметров лабораторных установок, использованных в экспериментах [7], может составлять несколько десятых долей микрогенри. Таким образом, индуктивность L_c системы подвода тока получается несколько превышающей индуктивность L_e межэлектродного промежутка.

Активное сопротивление R_e замкнутого КС межэлектродного промежутка, измерявшееся в экспериментах [7], составляло около 0,01 Ом. Как показывают простейшие оценки, это значение более чем на порядок превышало сопротивление заключенного между электродами участка струи. Отсюда вытекает, что основной вклад в межэлектродное сопротивление вносит, по-видимому, сопротивление плазменных контактов между КС и электродами: КС пробивает в обкладках элемента ЭДЗ отверстия с диаметром, существенно превышающим ее поперечные размеры, и замыкание тока с электродов на участок КС

между ними происходит в форме газового разряда [13]. Сопротивлением R_c системы токоподвода к элементу ЭДЗ, которое может быть реализовано в пределах 0,001 Ом, в этих условиях можно пренебречь.

На основе анализа экспериментальных данных и проведенных оценок, в качестве опорных значений индуктивности L_s и активного сопротивления R_s разрядного контура при проведении расчетов были приняты $L_s = 0,25$ мкГн и $R_s = 0,01$ Ом. Изменениями индуктивности L_e и активного сопротивления R_e межэлектродного промежутка при движении через него различных участков КС в процессе токового разряда пренебрегалось, так как эти изменения относительно невелики. При постоянных значениях L_s и R_s характер изменения тока в контуре (см. рис. 1, б) при разряде конденсаторной батареи с емкостью C зависит от значения безразмерного параметра $\gamma = 0,5R_s\sqrt{C/L_s}$ [12]. При $\gamma < 1$ реализуется колебательный режим разряда, описываемый соотношением

$$J = \frac{U_0}{\sqrt{1-\gamma^2}} \sqrt{\frac{C}{L_s}} \exp\left(-\frac{R_s}{2L_s}t\right) \sin\left(\sqrt{\frac{1-\gamma^2}{L_s C}}t\right),$$

где U_0 — начальное напряжение на конденсаторной батарее. При этом сила тока J_m в первом (главном) максимуме и время его достижения t_m определяются выражениями

$$J_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L_s}} \exp\left[-\frac{\gamma}{\sqrt{1-\gamma^2}} \arcsin\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right)\right];$$

$$t_m = \sqrt{\frac{L_s C}{1-\gamma^2}} \arcsin\left(\sqrt{1-\gamma^2}\right).$$

В случае $\gamma \geq 1$ разряд является аperiodическим и выражения для силы тока J в цепи, его максимального значения J_m и времени выхода на максимум t_m имеют вид

$$J = \frac{U_0}{L_s} t \exp\left(-\frac{R_s}{2L_s}t\right); \quad J_m = \frac{U_0}{e} \sqrt{\frac{C}{L_s}}; \quad t_m = \sqrt{L_s C}$$

при $\gamma = 1$,

$$J = \frac{U_0}{\sqrt{\gamma^2-1}} \sqrt{\frac{C}{L_s}} \exp\left(-\frac{R_s}{2L_s}t\right) \operatorname{sh}\left(\sqrt{\frac{\gamma^2-1}{L_s C}}t\right);$$

$$J_m = U_0 \sqrt{\frac{C}{L_s}} \left[\gamma + \sqrt{\gamma^2-1}\right]^{-\frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2-1}}}; \quad t_m = \sqrt{\frac{L_s C}{\gamma^2-1}} \ln\left(\gamma + \sqrt{\gamma^2-1}\right)$$

при $\gamma > 1$ ($e = 2,718\dots$). Таким образом, со стороны электротехнических параметров установки эффективность токового воздействия на

КС определяется начальным напряжением U_0 и емкостью C конденсаторной батареи, а также индуктивностью L_s и активным сопротивлением R_s разрядного контура.

К числу конструктивных параметров элемента ЭДЗ, определяющих эффективность ЭДВ на КС, относятся ширина δ_e межэлектродного промежутка и удаление h электродной системы от кумулятивного заряда (см. рис. 1, а). Расчеты были проведены для трех межэлектродных расстояний: $\delta_e = 50, 75$ и 125 мм. При задании удаления электродов от кумулятивного заряда рассматривались два варианта — с наличием экрана перед элементом ЭДЗ и без экрана. При экранированном элементе ЭДЗ предполагалось, что срабатывание КБП происходит при

его взаимодействии с экраном, и расстояние h от лицевого электрода до основания КЗ определялось в данном случае как $h = F_c + h_s$, где h_s — расстояние от лицевого электрода до экрана, F_c — конструктивное фокусное расстояние соответствующего КБП. В расчетах был рассмотрен случай, когда защитный экран расположен на расстоянии $h_s = 100$ мм от элемента ЭДЗ. При отсутствии экрана ($h_s = 0$) расстояние h совпадало с конструктивным фокусным расстоянием КБП. Во всех случаях предполагалось, что ось КБП в момент подрыва перпендикулярна плоскости электродов.

Более подробно влияние различных факторов на эффективность ЭДВ было рассмотрено на примере занимающего промежуточное положение по могуществу действия КБП2. На рис. 2 показано, как снижается глубина пробития КБП2 в зависимости от энергии $W = CU_0^2/2$ емкостного накопителя при различных емкостях батареи (при неэкранированном межэлектродном промежутке $\delta_e = 75$ мм и параметрах разрядной цепи $L_s = 0,25$ мкГн, $R_s = 0,01$ Ом). В реальных условиях при разработке системы ЭДЗ бронеевекта могут возникнуть ограничения по используемым напряжениям и максимально допустимым токам, связанные

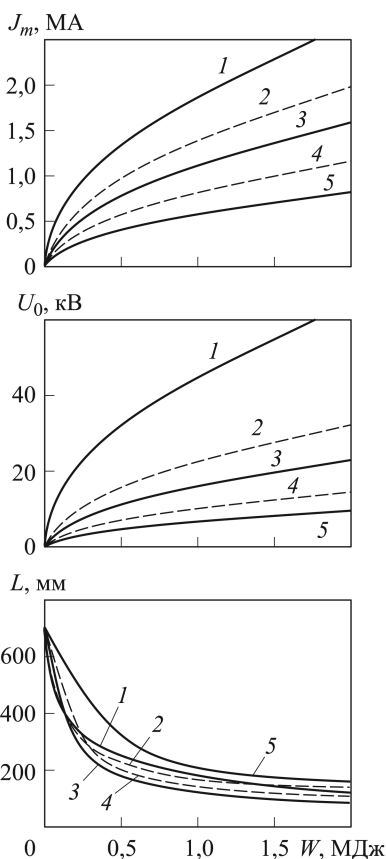


Рис. 2. Зависимости снижения глубины пробития КБП2, начального напряжения на емкостном накопителе и максимума разрядного тока от энергии батареи при различных значениях ее емкости (1 — $C = 1$ мФ; 2 — $C = 4$ мФ; 3 — $C = 8$ мФ; 4 — $C = 20$ мФ; 5 — $C = 50$ мФ)

с техническими возможностями электрооборудования и обеспечении электробезопасности экипажа, поэтому на рис. 2 приведены также кривые роста начального напряжения U_0 на емкостном накопителе и максимума J_m разрядного тока с увеличением энергии системы.

Как следует из рис. 2, при заданных межэлектродном промежутке и параметрах разрядного контура наилучший результат по снижению пробивного действия достигается при емкости батареи $C = 8$ мФ. При емкостях, меньших или больших этого значения, эффективность ЭДВ снижается. Наличие оптимума связано с изменением степени синхронизации токового импульса с временем прохождения через межэлектродный промежуток различных участков КС при изменении емкости накопителя. Как показывает анализ вклада различных элементов КС в пробивное действие, реализация ЭДВ с накопителем оптимальной емкости позволяет наиболее рациональным образом распределить энергию токового импульса на разрушение головной и хвостовой частей КС.

Последовательное нарастание глубины пробития от действия элементов КС в отсутствие токового воздействия и при ЭДВ, осуществляемом от конденсаторной батареи с энергией $W = 1$ МДж при различных ее емкостях, проиллюстрировано для КБП2 на рис. 3 (где z — координата элементов облицовки, формирующих различные участки КС, отсчитываемая от вершины облицовки вдоль ее оси, h_0 — высота облицовки). Как видно на рис. 3, при емкостях накопителя, меньших оптимальной ($C = 4$ мФ), происходит быстрое нарастание тока и эффективно поражаются элементы КС, примыкающие к ее головной части. Однако при этом в силу кратковременности разряда оказываются “не затронутыми” токовым воздействием хвостовые элементы струи, сохраняющие свою пробивную способность. При чересчур большой емкости накопителя ($C = 20$ мФ, см. рис. 3), напротив, полностью “выбивается” хвостовая часть КС, но из-за недостаточно быстрого нарастания тока успевает “проскочить” через межэлектродный промежуток неразрушенным слишком большой участок “головы” струи.

Анализируя динамику снижения глубины пробития в зависимости от энер-

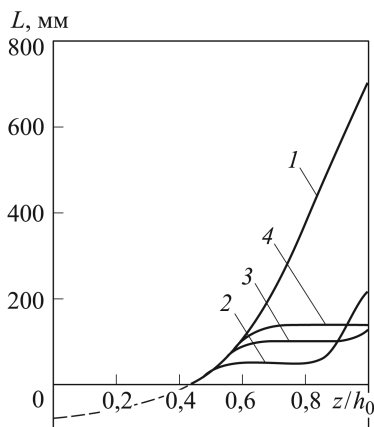


Рис. 3. Последовательное нарастание глубины пробития КБП2 при проникании элементов КС, формируемых из различных частей кумулятивной облицовки, в естественных условиях (1) и при ЭДВ, осуществляемом от конденсаторной батареи с энергией 1 МДж (2 — $C = 4$ мФ; 3 — $C = 8$ мФ; 4 — $C = 20$ мФ)

гии накопителя (см. рис. 2), следует отметить существенную неравномерность достигаемого эффекта по мере роста энергозатрат. Увеличение энергии батареи существенно повышает эффективность ЭДВ лишь до определенного предела. Так, при оптимальной емкости батареи $C = 8$ мФ пробивное действие КБП2 можно снизить более чем в 3 раза (с 700 до 200 мм), имея запас энергии $W = 350 \dots 400$ кДж. Начальное напряжение U_0 на накопителе при этом будет составлять около ~ 10 кВ, а максимальное значение J_m разрядного тока — в пределах 750 кА. Дальнейшее же пятикратное увеличение энергии накопителя до 2 МДж ($U_0 \approx 20$ кВ, $J_m \approx 1,5$ МА) дополнительно снижает глубину пробития всего лишь на 100 мм.

Таким образом, с ростом энергии батареи происходит “насыщение” эффекта снижения пробивного действия КС и его полной ликвидации не достигается. С выходом остаточного пробития КБП на уровень примерно диаметра заряда дальнейшая “закачка” энергии в накопитель крайне малоэффективна: глубина пробития падает очень слабо. Обусловлено “насыщение” остаточного пробития действием по преграде головного участка КС, который практически невозможно полностью разрушить токовым воздействием, так как он имеет высокую скорость и “проскакивает” межэлектродный промежуток в самом начале токового разряда, пока еще сила тока не достигла “разрушающего” значения.

Оптимальная емкость конденсаторной батареи, обеспечивающая максимально возможную эффективность “вложения” энергии батареи в разрушение КС, изменяется с изменением условий осуществления ЭДВ (конструктивных параметров элемента ЭДЗ и электротехнических параметров разрядной цепи). На рис. 4 проиллюстрировано снижение глубины пробития КБП2 в зависимости от энергии и емкости накопителя при размещении элемента ЭДЗ за экраном ($h_s = 100$ мм,

остальные параметры ЭДЗ те же, что и для графиков на рис. 2). С удалением электродов от кумулятивного заряда возрастает время попадания элементов КС в межэлектродный промежуток от момента начала разряда. За счет связанного с этим увеличения общего времени прохождения всей КС через область воздействия требуются более длительные токовые импульсы для того, чтобы эффективно воздействовать на хвостовую часть струи. Поэтому для экранированного элемента ЭДЗ оптимальная емкость батареи смещается в сторону

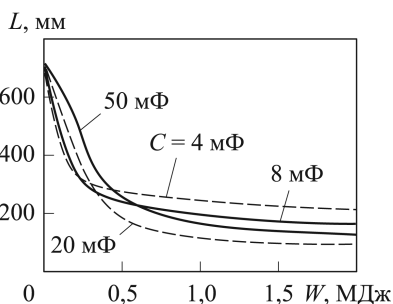


Рис. 4. Снижение глубины пробития КБП2 в зависимости от энергии и емкости конденсаторной батареи при размещении элемента ЭДЗ за экраном

ее увеличения. При $h_s = 100$ мм из рассмотренных вариантов емкостей накопителя наилучший результат по снижению пробития достигается при $C = 20$ мФ, и этот результат несколько выше, чем для данного накопителя с неэкранированным элементом ЭДЗ (см. рис. 2). Повышение эффективности ЭДВ с удалением электродной системы от кумулятивного заряда наблюдается также для накопителя с емкостью $C = 50$ мФ. При емкостях же $C = 4$ и 8 мФ введение экрана перед элементом ЭДЗ, напротив, приводит к ослаблению эффекта разрушения КС: токовые импульсы становятся слишком короткими, чтобы “охватить” всю струю.

Одновременно с изменением временного интервала воздействия экранировка электродной системы должна способствовать облегчению токового разрушения КС за счет уменьшения с удалением от кумулятивного заряда поперечных размеров струи вследствие ее растяжения. Однако поскольку КС в процессе растяжения распадается на отдельные безградиентные элементы, то при выборе разнесения электродов и экрана необходимо иметь в виду возможность входа в межэлектродное пространство уже разорвавшихся участков струи. Наличие промежутков между элементами разорванной КС увеличивает межэлектродное сопротивление R_e и может привести к срыву токового разряда. Специального рассмотрения требует и поведение отдельных безградиентных кусочков струи с относительно небольшим удлинением при протекании по ним тока. В разработанной расчетной методике при естественном распаде участка струи до входа в область ЭДВ предполагалось проявление лишь механизма объемного разрушения безградиентных элементов. Однако в проведенных расчетах по определению возможных параметров ЭДЗ варианты с реализацией ЭДВ на уже разорвавшуюся КС не рассматривались.

Ширина межэлектродных промежутков практически во всех экспериментах по разрушению КС импульсом тока составляла около половины диаметра кумулятивного заряда [7, 9]. С ориентировкой на это значение задавались межэлектродные расстояния δ_e и при проведении расчетов. Были рассмотрены также варианты ЭДВ с межэлектродными промежутками несколько большей ширины (до диаметра заряда). При увеличении межэлектродного расстояния возрастает время пребывания участков КС под токовым воздействием, что позволяет рассчитывать на усиление эффекта разрушения струи. Однако одновременно при этом могут ухудшаться условия протекания разряда, особенно если разрушение КС происходит непосредственно между электродами. В расчетной методике влияние состояния КС в межэлектродном промежутке на параметры разряда и возможность его срыва не учитывались, поэтому очень большие отклонения по ширине промежутка от условий проведения экспериментов не рассматривались. Как видно

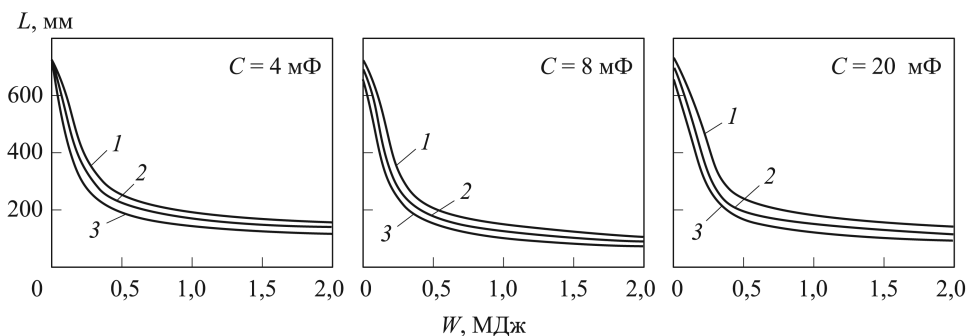


Рис. 5. Влияние ширины межэлектродного промежутка на снижение пробивного действия КБП2 при различных емкостях конденсаторной батареи (1 – $\delta_e = 50$ мм; 2 – $\delta_e = 75$ мм; 3 – $\delta_e = 125$ мм)

на рис. 5, где показано влияние на пробивное действие КБП2 межэлектродного расстояния, его увеличение с $\delta_e = 50$ мм до $\delta_e = 125$ мм приводит к повышению эффективности ЭДВ, примерно одинаковому для всех рассмотренных вариантов емкостей накопителя.

Выбор рациональных параметров ЭДЗ бронеобъекта зависит от типа применяемых КБП и требуемого уровня снижения их пробивного действия. Если, например, рассматривать танки, то их броневая защита со стороны лобовой проекции существенно мощнее бортового бронирования [2]. Для защиты танка от действия кумулятивных средств поражения со стороны боковой проекции устанавливаемая по бортам ЭДЗ должна обеспечивать снижение пробивного действия КБП до уровня порядка $L = 50$ мм. При защите же танка со стороны лобовой проекции допустимым является остаточное пробитие КБП в несколько сотен миллиметров.

Для рассматриваемых кумулятивных средств поражения КБП1, КБП2 и КБП3 были проведены расчеты по определению возможных параметров ЭДЗ, обеспечивающей снижение их пробития до уровней $L = 50$; 100 и 200 мм (рис. 6). Варьируемым параметром являлась емкость конденсаторной батареи. Для каждого значения емкости определялось начальное напряжение U_0 на накопителе (а следовательно, и запасенная в нем энергия $W = CU_0^2/2$), позволяющие снизить глубину пробития соответствующего КБП до заданного уровня.

Как следует из рис. 6, для различных условий ЭДВ существует оптимальная емкость накопителя, обеспечивающая достижение заданной эффективности воздействия при минимальной энергии. С ужесточением требований по снижению пробития КБП минимум на кривых зависимости энергии накопителя от его емкости заостряется: даже небольшие отклонения емкости батареи от оптимальной приводят к существенным дополнительным затратам энергии. С увеличением межэлектродного промежутка и при его размещении за экраном оптимальная емкость накопителя возрастает, что, очевидно, связано

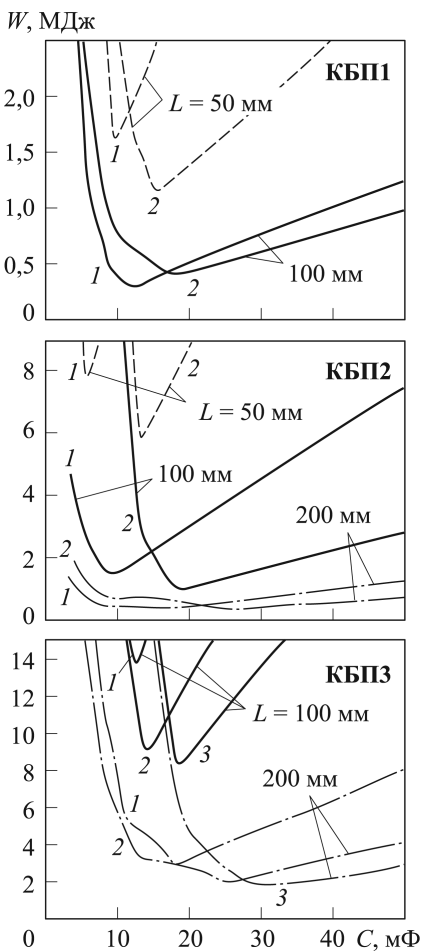


Рис. 6. Соотношение энергии и емкости конденсаторной батареи для достижения заданного уровня остаточного пробития КБП1 (1 – $\delta_e = 50$ мм, $h_s = 0$; 2 – $\delta_e = 50$ мм, $h_s = 100$ мм), КБП2 (1 – $\delta_e = 75$ мм, $h_s = 0$; 2 – $\delta_e = 125$ мм, $h_s = 100$ мм) и КБП3 (1 – $\delta_e = 75$ мм, $h_s = 0$; 2 – $\delta_e = 125$ мм, $h_s = 0$; 3 – $\delta_e = 125$ мм, $h_s = 100$ мм)

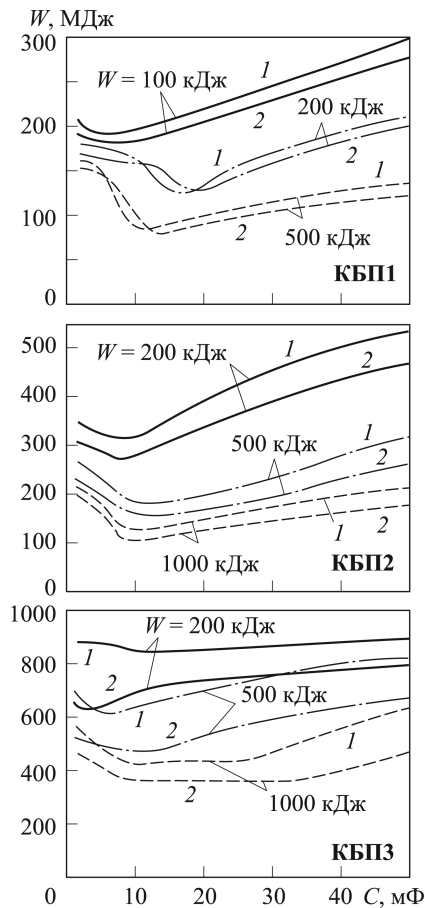


Рис. 7. Снижение пробивного действия КС элементом ЭДЗ без экрана при заданной энергии емкостного накопителя для КБП1 (1 – $\delta_e = 50$ мм; 2 – $\delta_e = 75$ мм), КБП2 и КБП3 (1 – $\delta_e = 75$ мм; 2 – $\delta_e = 125$ мм)

с возрастанием промежутка времени, за который вся КС проходит электродную систему. Одновременно за счет использования этих конструктивных факторов можно добиться снижения потребной энергии накопителя с оптимальной емкостью. Для КБП1 при элементе ЭДЗ с межэлектродным расстоянием $\delta_e = 50$ мм без экрана ($h_s = 0$) остаточное пробитие $L = 50$ мм достигается при энергии накопителя $\sim 1,6$ МДж и его емкости $C = 10$ мФ. Наличие экрана ($h_s = 100$ мм) при емкости батареи $C = 15$ мФ позволяет уменьшить эту энергию более чем на 0,5 МДж. Для обладающего максимальным могуществом действия КБП3 уровень остаточного пробития $L = 200$ мм обеспечи-

вается ЭДЗ с электродами, разнесенными на расстояние $\delta_e = 125$ мм, и с накопителем емкостью 25...35 мФ при его энергии чуть более 2 МДж. Достичь уровня остаточного пробития $L = 100$ мм для КБП3 практически нереально: для этого необходима конденсаторная батарея с энергией около 10 МДж. В то же время для снижения пробития КБП2 до такого же уровня требуется накопитель с энергией 1,2...1,5 МДж, а до уровня $L = 200$ мм — с энергией 300...400 кДж.

Полезную информацию при разработке ЭДЗ могут дать кривые снижения глубины пробития КБП при ЭДВ, осуществляемом от накопителя с фиксированной энергией. Такие кривые были рассчитаны для рассматриваемых КБП при уровнях энергии батареи 100; 200; 500 кДж и 1 МДж (рис. 7). В проведенных расчетах варьировалась емкость батареи и рассматривались элементы ЭДЗ с различным межэлектродным расстоянием (без экрана).

Как следует из рис. 7, выбирая соответствующим образом емкость накопителя, можно добиться максимально возможного при заданном значении его энергии снижения пробития КБП. Эффект снижения пробития при одной и той же энергии батареи может быть усилен за счет увеличения межэлектродного промежутка. Для КБП1 при энергии накопителя 100 кДж минимально возможное пробитие составляет около 200 мм ($L/L_0 = 0,4$). Имея батарею с энергией 200 кДж, пробитие КБП1 и КБП2 можно снизить до уровней, соответственно, 125...150 мм ($L/L_0 = 0,25...0,3$) и 300...350 мм ($L/L_0 = 0,43...0,5$). Снижения пробития КБП3 при данной энергии накопителя и межэлектродном промежутке $\delta_e = 75$ мм практически не достигается. При $\delta_e = 125$ мм остаточное пробитие КБП3 для $W = 200$ кДж может быть снижено до 650...700 мм ($L/L_0 = 0,68...0,74$), причем при относительно малых емкостях накопителя (в пределах 5 мФ). Батарея с энергией 500 кДж дает возможность ослабить пробивное действие КБП1, КБП2 и КБП3 до значений, соответственно, $L = 75...100$ мм ($L/L_0 = 0,15...0,2$), $L = 150...200$ мм ($L/L_0 = 0,21...0,29$) и $L = 500...600$ мм ($L/L_0 = 0,53...0,63$).

При разработке ЭДЗ бронеобъекта необходима оценка эффективности одной и той же системы ЭДЗ (с фиксированными параметрами) против различных кумулятивных средств поражения. В расчетах был рассмотрен вариант ЭДЗ танка с конденсаторной батареей емкостью $C = 30$ мФ (параметры разрядной цепи $L_s = 0,25$ мкГн, $R_s = 0,01$ Ом). Предполагалось, что КБП с различным могуществом действия (КБП1, КБП2, КБП3) противодействует элемент ЭДЗ с межэлектродным промежутком $\delta_e = 75$ мм, размещенный либо за экраном ($h_s = 100$ мм), либо без экранировки. На основе кривых снижения данным элементом пробития рассматриваемых КБП в зависимости от энергии батареи

были оценены энергетические характеристики накопителя, способного обеспечить противоккумулятивную защиту танка. Если считать, что вероятность применения для поражения танка КБП2 и КБП3 со стороны бортовой проекции мала, то необходимая энергия накопителя с принятым значением емкости ($C = 30$ мФ) оценивается значением ~ 2 МДж (напряжение зарядки $U_0 \approx 11,5$ кВ). При данной энергии остаточное пробитие КБП1, который может быть использован для атаки танка сбоку, не превышает 50 мм. Пробитие же КБП3 (с наибольшим могуществом действия) снижается до уровня 300 мм, не позволяющего преодолеть лобовое бронирование.

Как уже отмечалось, даже при использовании лучших на сегодняшний день образцов емкостных накопителей с удельной энергоемкостью 1 Дж/см³ конденсаторная батарея, запаасающая энергию 2 МДж, получается очень громоздкой. В связи с этим задача поиска новых путей повышения эффективности ЭДЗ сохраняет свою актуальность [14].

С учетом выполненных ранее оценок возможных параметров системы ЭДЗ, наиболее реалистичным на данный момент времени представляется применение ЭДЗ для противодействия кумулятивным средствам ближнего боя [15]. К этому классу КБП относятся противотанковые кумулятивные гранаты, характерным представителем которых является один из рассматриваемых КБП (КБП1). Кумулятивные средства ближнего боя обладают меньшим могуществом действия по сравнению с ПТУР (КБП2, КБП3) [1]. Соответственно, для снижения их пробивного действия требуется меньшая мощность электрического разряда, которая может быть обеспечена источником электрической энергии с приемлемыми габаритно-массовыми характеристиками. В то же время кумулятивные средства ближнего боя в силу их относительной доступности и простоты применения могут достаточно широко использоваться террористическими группировками, что выдвигает на первый план разработку методов защиты объектов, причем не только военных, но и гражданских (например, хранилищ и контейнеров для перевозки горючих, радиоактивных и ядовитых материалов), именно от этого класса КБП [16].

В связи с данным обстоятельством была дополнительно более подробно рассмотрена возможность построения системы ЭДЗ для противодействия кумулятивным средствам ближнего боя. Для КБП1, являющегося их представителем, были проведены расчеты по определению возможных параметров системы ЭДЗ, обеспечивающей снижение его пробития в стальной преграде до уровней $L = 100$ мм (рис. 8, а) и $L = 50$ мм (рис. 8, б), в зависимости от параметров разрядной цепи (см. рис. 1, а). Варьируемым параметром, как и для кривых на рис. 6, являлась емкость конденсаторной батареи. Для каждого ее значения определялась энергия батареи, необходимая для достижения заданного уровня остаточного пробития КБП1. В расчетах рассматривались

элементы ЭДЗ с различным межэлектродным расстоянием δ_e (30, 50 и 70 мм). Для индуктивности разрядного контура были рассмотрены варианты с ее значениями $L_s = 0,2$ мкГн и $L_s = 0,1$ мкГн (согласно выполненным ранее оценкам второе из указанных значений близко к индуктивности межэлектродного промежутка, замкнутого КС). Диапазон изменения активного сопротивления контура R_s составлял от 0,002 до 0,02 Ом.

Анализируя данные на рис. 8 по необходимой энергии емкостно-накопителя, по-прежнему будем ориентироваться на оптимальное значение его емкости, позволяющее достичь заданной эффективности

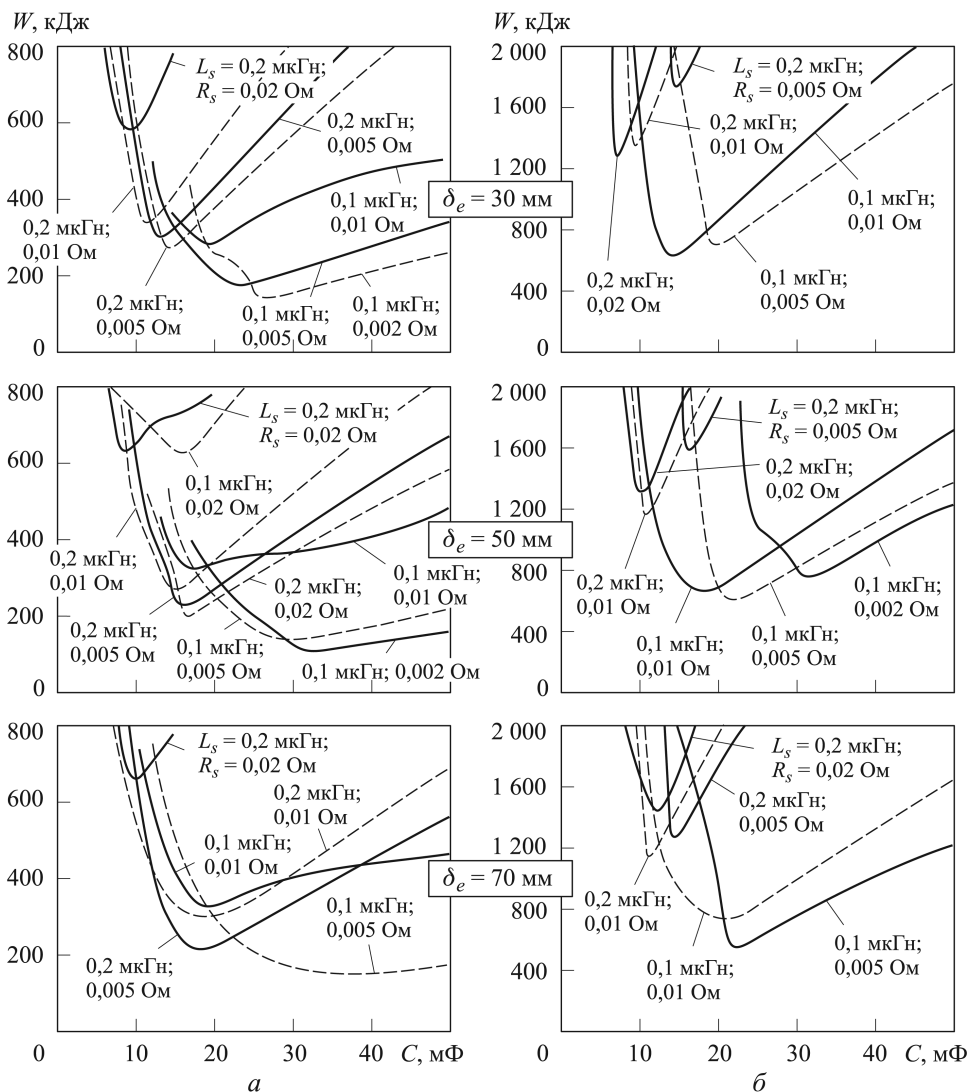


Рис. 8. Соотношение энергии и емкости конденсаторной батареи для обеспечения уровней остаточного пробоя КБП1 в стальной преграде $L = 100$ мм (а) и $L = 50$ мм (б) при различных размерах межэлектродного промежутка и параметрах разрядного контура

токового воздействия на КС при минимальной энергии. Минимальная энергия накопителя для снижения пробития КБП1 до $L = 100$ мм составляет 150... 200 кДж (см. рис. 8, а), причем этот уровень энергии обеспечивается при различных межэлектродных расстояниях. Верхнее значение минимальной энергии соответствует индуктивности контура $L_s = 0,2$ мкГн, нижнее — $L_s = 0,1$ мкГн. Оптимальное значение емкости накопителя составляет при этом 20... 30 мФ ($U_0 = 3... 4,5$ кВ). Существенно более высокий выигрыш в энергоэффективности ЭДЗ дает уменьшение индуктивности контура при необходимости снизить пробитие КБП1 до уровня $L = 50$ мм (см. рис. 8, б). Если при $L_s = 0,2$ мкГн минимальная потребная энергия накопителя составляет около 1,2 МДж ($C \approx 10$ мФ, $U_0 \approx 15$ кВ), то при уменьшении L_s до 0,1 мкГн ее значение снижается примерно вдвое — до 500... 600 кДж ($C = 15... 20$ мФ, $U_0 = 7... 9$ кВ).

Как следует из проведенных оценок, для создания ЭДЗ, способной эффективно противодействовать противотанковым кумулятивным гранатам, необходима конденсаторная батарея с запасаемой энергией порядка 0,5 МДж. При достигнутой за рубежом удельной энергоемкости импульсных емкостных накопителей 1 Дж/см³ [3] система ЭДЗ с такой энергетикой вполне может быть реализована на стационарном объекте. Оснащение такой системой мобильных автономных объектов может стать возможным уже в ближайшем будущем, если учесть быстрый прогресс в разработке за рубежом емкостных накопителей энергии. Согласно [3] в ближайшей перспективе для импульсных емкостных накопителей нового поколения может быть достигнут уровень удельной энергоемкости 10... 20 Дж/см³ (вместо 1 Дж/см³ для существующих в настоящее время лучших образцов). Создание накопителей с такими характеристиками вселяет оптимизм во взгляде на проблему практического применения ЭДЗ.

Необходимо отметить, что представленные в настоящей работе результаты по оценке возможных параметров ЭДЗ, полученные в рамках простой “инженерной” методики расчета, должны рассматриваться лишь как первое приближение к решению проблемы и нуждаются в дальнейшем уточнении и экспериментальном подтверждении. Как показывает анализ публикаций по проблеме снижения пробивного действия КС посредством мощного электроразряда [7, 9, 17, 18], достаточно активные исследования в этом направлении проводились в нашей стране примерно до середины 1990-х годов. Достигнутые к этому моменту времени результаты по своему уровню превышали уровень аналогичных исследований, проводившихся зарубежными специалистами [19]. Однако последние полтора десятка лет работы по созданию ЭДЗ в России в связи с отсутствием финансирования практически полностью свернуты. В то же время, как можно судить по

данным литературных источников [20], за рубежом подобные работы активно продолжаются и близки к переходу от исследовательской стадии к опытно-конструкторской. Таким образом, в настоящее время намечилось существенное отставание нашей страны в области разработки систем противокумулятивной защиты объектов, основанных на использовании электрической энергии.

Исследования по созданию ЭДЗ, проводимые зарубежными специалистами, являются составной частью обширных разработок, выполняемых в рамках прорабатываемой в США, Англии, Франции, Германии концепции полностью электрического танка АЕТ (All Electrical Tank) как основной боевой машины XXI в. [3, 21]. На таком танке планируется установка системы электромагнитного гиперзвукового метания, способной разгонять бронебойные снаряды (сердечники) массой около 3 кг до скорости 2...3 км/с, он должен иметь электромеханическую трансмиссию и систему электромагнитной защиты, действующую на различных принципах (в том числе и на принципе мощного электроразряда через КС для снижения ее пробивного действия). Создание опытного образца танка АЕТ возможно к 2020 г. По оценкам американских военных специалистов появление перспективного танка АЕТ будет означать научно-технический прорыв в танкостроении. О привлечении к проработке данной проблемы за рубежом значительных научных сил свидетельствует регулярное проведение международных конференций по полностью электрическим боевым машинам АЕСV (All Electric Combat Vehicle).

Работы в рамках концепций АЕТ и АЕСV базируются на достижениях разработчиков импульсных емкостных накопителей энергии [22]. За 20 лет с 80-х годов прошлого века и до начала нынешнего показатель плотности запасаемой энергии конденсаторов импульсного разряда, серийно производимых зарубежными фирмами, увеличился более чем в 10 раз (примерно с 0,08 до 1,0 Дж/см³). Продолжающиеся исследования по использованию новых материалов и технологий позволяют рассчитывать в ближайшем будущем на дальнейшее десятикратное увеличение плотности запасаемой энергии. Например, специальные разработки мирового лидера конденсаторостроения фирмы “Maxwell Laboratories, Inc.” (США) еще в 1990 г. позволили создать конденсаторы с плотностью энергии 5,6 Дж/см³. Специалистами данной фирмы ставится задача доведения удельной энергоемкости конденсаторов до 50 Дж/см³ [22].

Успехи в области создания емкостных накопителей энергии с высокими удельными характеристиками позволили американским специалистам разработать и испытать демонстрационную малогабаритную мобильную энергосистему ЭДЗ, смонтированную на транспортном средстве [20]. Ее основой является конденсаторная батарея, состоящая из 16 конденсаторов с напряжением зарядки 10 кВ и запасаемой

энергией 12,5 кДж (удельная энергоемкость около 0,7 Дж/см³). Разрядная цепь емкостного накопителя состоит из включаемых в параллель токопроводящих шин специальной конструкции, что позволяет снизить общую индуктивность токоподвода до уровня 7 нГн/м. В состав энергосистемы входит также триггерный вакуумный разрядник (тригатрон), осуществляющий коммутацию заряженной конденсаторной батареи на внешнюю нагрузку. Применение подобного коммутатора обеспечивает электробезопасность энергосистемы, так как напряжение в цепях за ее пределами отсутствует, пока коммутатор не замкнут. Полная запасаемая системой энергия составляет 200 кДж, масса системы 640 кг, занимаемый объем 0,65 м³. Описанная энергосистема была испытана в полевых условиях на Абердинском полигоне [20]. Как следует из представленных результатов расчетов (см. рис. 8), система ЭДЗ, запитываемая от емкостного накопителя с энергией 200 кДж, способна достаточно эффективно противодействовать кумулятивным средствам ближнего боя с глубиной пробития по гомогенной броне на уровне 500...600 мм, обеспечивая снижение их пробивного действия примерно на 85 % [23].

Разработка и испытание демонстрационной энергосистемы ЭДЗ свидетельствует о том, что за рубежом применение ЭДЗ для обеспечения противокумулятивной стойкости различных объектов в ближайшем будущем может стать реальностью. Для устранения наметившегося отставания России в разработке подобных систем необходимо, в первую очередь, решить проблему создания и собственного производства современных импульсных конденсаторов с высокими удельными характеристиками – поставка таких конденсаторов в нашу страну из-за рубежа не допускается, так как они отнесены к разряду стратегической продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Средства поражения и боеприпасы / под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
2. Защита танков / под ред. В.А. Григоряна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 327 с.
3. *Ogorkiewicz R.M.* Future tank armors revealed // *Janes Int. Defense Review*. 1997. No. 5. P. 50–51.
4. *Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В.* Электрическая защита перспективной боевой машины XXI века // *Оборонная техника*. 2000. № 1–2. С. 19–25.
5. *Федоров С.В.* Электроразряд укрощает кумулятивную струю // *Вооружение. Политика. Конверсия*. 2012. № 1 (103). С. 30–34.
6. *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.
7. *Павловский А.И., Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Бродский А.Я.* Исследование некоторых особенностей процесса разрушения кумулятивной струи в сильноточном режиме // *Журнал технической физики*. 1994. Т. 64. Вып. 5. С. 43–48.

8. Федоров С.В. Электродинамическая защита объектов от кумулятивных средств поражения // Сб. докл. VII науч. конф. Волжского регионального центра РАН "Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения". В 2-х т. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. Т. 2. С. 1158–1183.
9. Швецов Г.А., Матросов А.Д., Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Поведение металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 3. С. 19–25.
10. Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В. Развитие магнитогидродинамической неустойчивости на подвергающейся электродинамическому воздействию кумулятивной струе // Оборонная техника. 1998. № 1–2. С. 49–56.
11. Федоров С.В., Ладов С.В. Влияние параметров токового воздействия на радиальное рассеивание металлических кумулятивных струй // Оборонная техника. 2011. № 2–3. С. 34–49.
12. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 392 с.
13. Федоров С.В., Бабкин А.В., Иванов Ю.А. Особенности газового разряда в устройствах электродинамического воздействия на металлические кумулятивные струи // Оборонная техника. 2003. № 3–4. С. 77–85.
14. Федоров С.В. Анализ схем электродинамической защиты с повышенной эффективностью токового воздействия на кумулятивные струи // Боеприпасы и высокоэнергетические конденсированные системы. 2008. № 2. С. 81–87.
15. Федоров С.В. О возможных характеристиках электродинамической защиты для противодействия кумулятивным средствам ближнего боя // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2012. № 2 (72). С. 87–96.
16. Федоров С.В., Ладов С.В. Мощный электроразряд как средство противокумулятивной защиты объектов // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2012. № 9–10. С. 41–52.
17. Павловский А.И., Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Бродский А.Я. Экспериментальные исследования разрушения кумулятивной струи импульсом тока // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 2. С. 76–82.
18. Матросов А.Д., Швецов Г.А. Экспериментальное исследование токовой неустойчивости кумулятивных струй // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37. № 4. С. 9–14.
19. Pollock C.E. Electromagnetic effect of the natural hydrodynamic instability of stretching, high velocity, metallic jets // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications / Ed. M. Cowan and R.B. Spielman. N.Y.: Nova Sci. Publ., 1994. P. 309–316.
20. Ford M.D., Dorr G.B., Toepfer A.J. Design and testing of a compact electromagnetic armor power system // Proc. of the 11th Annual US Army Ground Vehicle Survivability Symp. 2000.
21. Иванов О. Американский электрический танк АЕТ // Зарубежное военное обозрение. 1997. Вып. 4. С. 25–29.
22. Взрывные генераторы мощных импульсов электрического тока / под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2002. 399 с.
23. Fedorov S.V., Ladov S.V. Powerful electric discharge as method of anti shaped-charge protection // Proc. of the 27th Int. Symp. on Ballistics / Ed. M. Wickert and M. Salk. DEStech Publications, Inc., 2013. Vol. 2. P. 1723–1734.

REFERENCES

- [1] Selivanov V.V. Sredstva porazhenija i boepripasy [Destruction means and explosives]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2008. 984 p.

- [2] Grigorijan V.A. Zashhita tankov [Protection for tanks]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2007. 327 p.
- [3] Ogorkiewicz R.M. Future tank armors revealed. *Jane's Int. Defense Review*, 1997, vol. 30, no. 5, pp. 50–51.
- [4] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Electrical protection advanced technology combat vehicle of the XXI century. *Oboronnaja tehnika* [Defence Technology], 2000, no. 1–2, pp. 19–25 (in Russ.).
- [5] Fedorov S.V. Electric discharge tames the shaped-charge jets. *Vooruzhenie. Politika. Konversiya* [Armament. Policy. Conversion], 2012, no. 1 (103), pp. 30–34 (in Russ.).
- [6] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Shvecov G.A., Matrosov A.D. Parameters selection of electrodynamic protection against shaped-charge destruction means of tanks. *Oboronnaja tehnika* [Defence Technology], 2002, no. 1–2, pp. 26–36 (in Russ.).
- [7] Pavlovskij A.I., Pljashkevich L.N., Shuvalov A.M., Brodskij A.Ja. Some peculiarities investigation of the destruction process of the shaped-charge jet in a heavy-current mode *Zh. Tekh. Fiz.* [Technical Physics. The Russ. J. Appl. Phys.], 1994, vol. 64, iss. 5, pp. 43–48 (in Russ.).
- [8] Fedorov S.V. Electrodynamic protection of objects against shaped-charge destruction means. *Sb. Dokl. VII Nauchn. konf. Volzhskogo regional'nogo centra RARAN "Sovremennye metody proektirovaniya i otrabotki raketno-artillerijskogo vooruzhenija"*. V 2-h tomah [Proc. of 4th Sc. Conf. of Volga Regional Center of Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences "Advanced methods of design and development of missile and artillery weapons". In two volumes], Sarov, FGUP "RFJaC-VNIIJeF" Publ., 2012, vol. 2, pp. 1158–1183 (in Russ.).
- [9] Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. Behavior of metallic shaped-charge jets with passage of a pulsed electric current through them. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [J. Appl. Mech. Tech. Phys.], 2000, vol. 41, no. 3, pp. 394–400 (in Russ.).
- [10] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ladov S.V. Formation of magnetohydrodynamic instability of the shaped-charge jet exposing electrodynamic impact. *Oboronnaja tehnika* [Defence Technology], 1998, no. 1–2, pp. 49–56 (in Russ.).
- [11] Fedorov S.V., Ladov S.V. Influence of parameters of the current impact on the radial dispersion of metallic shaped-charge jets. *Oboronnaja tehnika* [Defence Technology], 2011, no. 2–3, pp. 34–49 (in Russ.).
- [12] Knopfel G. Pulsed High Magnetic Fields. Amsterdam, North-Holland Publ. Company, 1970, 373 p. (Russ. Ed.: Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. Moscow, Mir Publ., 1964. 392 p.)
- [13] Fedorov S.V., Babkin A.V., Ivanov Yu.A. Features of gas discharge in devices of electrodynamic impact on metallic shaped-charge jets. *Oboronnaja tehnika* [Defence Technology], 2003, no. 3–4, pp. 77–85 (in Russ.).
- [14] Fedorov S.V. Analysis schemes of electrodynamic protection with enhanced efficiency of current impact on shaped-charge jets. *Boepripsy i vysokoenergeticheskie kondensirovannye sistemy* [Explosives and high energy condensed systems], 2008, no. 2, pp. 81–87 (in Russ.).
- [15] Fedorov S.V. On the possible characteristics of electrodynamic protection for countermeasures the shaped-charge means of the melee. *Izvestiya Rossijskoy akademii raketnykh i artillerijskikh nauk* [Proc. Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences], 2012, no. 2 (72), pp. 87–96 (in Russ.).
- [16] Fedorov S.V., Ladov S.V. Powerful electric discharge as a means of anti shaped-charge protection of the objects. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu* [Questions of defense technology. Ser. 16. Technical means to combat terrorism], 2012, no. 9–10, pp. 41–52 (in Russ.).

- [17] Pavlovskij A.I., Pljashkevich L.N., Shuvalov A.M., Brodskij A.Ja. Experimental researches of the destruction of the shaped-charge jet by pulsed electric current. *Zh. Tekh. Fiz.* [Technical Physics], 1994, vol. 64, iss. 2, pp. 76–82 (in Russ.).
- [18] Matrosov A.D., Shvecov G.A. Experimental research of the current instability of shaped-charge jets. *Prikl. Mekh. Tekh. Fiz.* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 1996, vol. 37, no. 4, pp. 9–14 (in Russ.).
- [19] Pollock C.E. Electromagnetic effect of the natural hydrodynamic instability of stretching, high velocity, metallic jets. In book: *Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications*. Ed. Cowan M., Spielman R.B. N.Y., Nova Sci. Publ., 1994, pp. 309–316.
- [20] Ford M.D., Dorr G.B., Toepfer A.J. Design and testing of a compact electromagnetic armor power system. *Proc. of the 11th Annual US Army Ground Vehicle Survivability Symp.*, 2000.
- [21] Ivanov O. American electric tank AET. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review], 1997, iss. 4, pp. 25–29 (in Russ.).
- [22] Fortov V.E. *Vzryvnye generatory moshchnykh impul'sov elektricheskogo toka* [Explosive generators of powerful pulses of electric current]. Moscow, Nauka Publ., 2002. 399 p.
- [23] Fedorov S.V., Ladov S.V. Powerful electric discharge as method of anti shaped-charge protection. *Proc. 27th Int. Symp. on Ballistics*. Ed. M. Wickert and M. Salk. DEStech Publications, Inc., 2013, vol. 2, pp. 1723–1734.

Статья поступила в редакцию 13.11.2013

Федоров Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области физики взрыва и высокоскоростного удара.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

S.V. Fedorov – senior teacher of “High Precision Airborne Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 250 publications in the field of physics of explosion and high velocity impact.
Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.