

03;04;05

Прогнозирование пробивной способности металлических кумулятивных струй при пропускании по ним мощного импульса электрического тока

© С.В. Федоров,¹ А.В. Бабкин,¹ С.В. Ладов,¹ Г.А. Швецов,² А.Д. Матросов²¹ Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 105005 Москва, Россия² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
e-mail: sm4@sm.bmstu.ru

(Поступило в Редакцию 6 декабря 2002 г.)

Разработана методика расчета пробивного действия кумулятивных зарядов в условиях пропускания по кумулятивной струе мощного импульса электрического тока. В качестве возможных механизмов снижения пробивной способности кумулятивной струи при токовом воздействии рассмотрены развитие магнитогидродинамической неустойчивости перетяжного типа и объемное разрушение материала струи. На основе разработанной методики для кумулятивных зарядов с различным уровнем пробития преграды выполнены расчеты по определению параметров электродинамического воздействия на кумулятивную струю, обеспечивающих существенное снижение ее проникающей способности.

Введение

Для снижения проникающего действия высокоскоростных металлических струй, формируемых при взрыве кумулятивных зарядов (КЗ) с металлической облицовкой кумулятивной выемки [1], может быть использовано высокоинтенсивное кратковременное электродинамическое воздействие (ЭДВ) на кумулятивную струю (КС) [2–6]. Такое воздействие осуществляется в форме пропускания по струе мощного импульса электрического тока непосредственно перед ее взаимодействием с преградой.

В простейшем варианте устройство ЭДВ представляет собой две металлических пластины (электрода), разделенных слоем диэлектрика и соединенных с источником электрической энергии (рис. 1). Такой элемент ЭДВ устанавливается перед преградой и после пробития струей слоя диэлектрика и замыкания электрической цепи осуществляет токовое воздействие на участки КС при их движении в межэлектродном промежутке.

Первые исследования по данному вопросу были выполнены более 20 лет назад в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН [7], где и было предложено использовать электродинамическое воздействие на КС для снижения ее пробивной способности. За прошедшие годы накоплен довольно обширный материал экспериментального характера [2–9]. В экспериментах исследовалась в основном двухэлектродная схема элемента ЭДВ (рис. 1), в качестве источника электрической энергии в большинстве случаев использовалась конденсаторная батарея. В [8] была также исследована возможность применения для токового воздействия на КС магнитокумулятивного генератора. Экспериментальные результаты получены для КЗ диаметром d_0 (рис. 1) от 30 до 100 мм и представляют в основном данные по

снижению пробивного действия зарядов в сочетании с фиксируемыми в экспериментах кривыми изменения разрядного тока в межэлектродном промежутке, а также рентгенограммы КС после мощного токового воздействия.

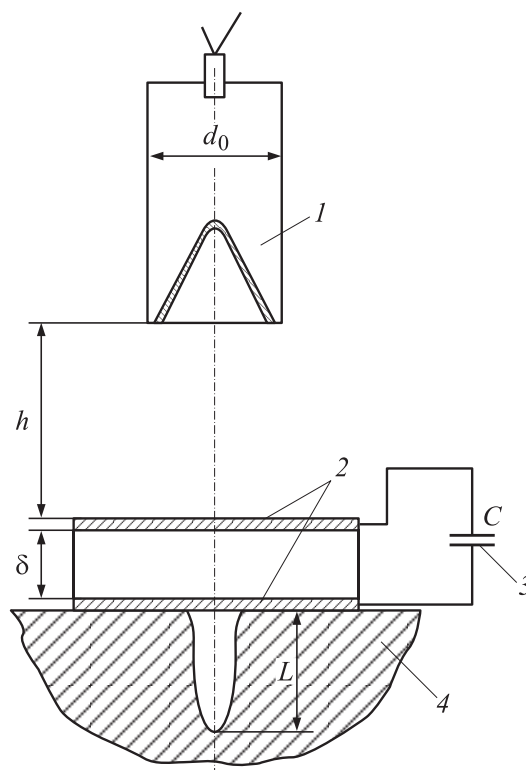


Рис. 1. Двухэлектродная схема реализации токового воздействия на кумулятивную струю. 1 — кумулятивный заряд, 2 — пластины-электроды, 3 — источник электрической энергии (конденсаторная батарея), 4 — преграда.

Однако известные экспериментальные данные явно недостаточны для выхода на какие-то практически значимые обобщения. Так, реализованные при проведении экспериментов параметры электродной системы (удаление от КЗ h , межэлектродный промежуток δ ; рис. 1) 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 (целенаправленных исследований по выявлению такого влияния фактически не проводилось).

В экспериментах с КЗ диаметром около 100 мм заметный эффект разрушения КС достигался при энергии конденсаторной батареи в 1 МДж и выше [5] (размеры емкостного накопителя с таким уровнем запасаемой энергии являются циклопическими). Очевидно, что при решении вопросов практического использования электродинамического способа снижения проникающей способности КС актуальной является проблема минимизации энергозатрат для достижения требуемого уровня снижения пробития на основе оптимизации параметров токовых воздействий. Такая оптимизация не может быть проведена без выявления физических причин уменьшения проникающей способности КС при пропусках через нее токового импульса, разработки соответствующих физико-математических моделей деформирования струи при ЭДВ и создания на этой основе расчетных методик для прогнозирования результатов токового воздействия на КС.

В настоящей работе предпринята попытка создания методики расчета функционирования КЗ при ЭДВ на струю и на ее основе проанализировано влияние некоторых параметров ЭДВ на проникающую способность КС ряда кумулятивных зарядов.

Физические модели

Эксперименты свидетельствуют, что при достаточной интенсивности ЭДВ способно приводить к существенному снижению пробивного действия КС. По данным рентгеновской съемки КС, испытавших достаточно мощное ЭДВ [2,5,7], наиболее вероятными механизмами снижения их пробивной способности являются развитие магнитогиродинамической (МГД) неустойчивости перетяжечного типа и объемное разрушение материала струи. Оба этих механизма обусловлены сжимающими пондеромоторными нагрузками, действующими на струю при протекании по ней тока, и тепловым действием тока.

Расчетно-теоретическое исследование развития МГД неустойчивости при протекании по КС тока проводилось

на основе модели [10], в которой элементы КС рассматривались как участки несжимаемого жесткопластического стержня переменного радиуса в предположении сохранения плоской формы его поперечных сечений в течение всего процесса деформирования. Силовое действие тока учитывалось заданием поверхностного магнитного давления. В модели принималось во внимание термическое разупрочнение материала стержня, при этом плотность тока полагалась распределенной равномерно по его сечениям.

Путем численных расчетов было установлено, что ЭДВ может не только ускорить развитие естественной пластической неустойчивости КС, приводя к ее ускоренному распаду на отдельные элементы, но и при достаточной интенсивности способно привести к явлению „дискообразования“ [9], при котором элементы струи сжимаются в осевом направлении с увеличением своего радиального размера. Следствием „дискообразования“ является существенное сокращение эффективной длины КС. Для количественного описания результатов токового воздействия, связанных с проявлением МГД неустойчивости, были введены в рассмотрение коэффициент формы, показывающей отклонение формы элемента КС от цилиндрической, и коэффициент скоростного инвертирования, характеризующий перераспределение осевой скорости по длине элемента [11]. Характер изменения этих коэффициентов находится в зависимости от трех безразмерных определяющих параметров процесса:

$$u = \frac{\rho \dot{\varepsilon}_{zb} R_b^2}{\sigma_{Y0}}, \quad s = \frac{\mu_0 J^2}{8\pi^2 R_b^2 \sigma_{Y0}},$$

$$q = \frac{J^2 \eta_0 (1 + \gamma(T_b - T_0))}{\pi^2 \dot{\varepsilon}_{zb} R_b^4 \rho c_v (T_s - T_b)},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная постоянная; ρ — плотность материала КС; R_b , $\dot{\varepsilon}_{zb}$ и T_b — соответственно радиус, осевая скорость деформирования и температура элемента КС на момент начала токового воздействия; σ_{Y0} — начальное значение предела текучести материала КС; J — сила тока; η_0 — удельное сопротивление материала КС при нормальной температуре T_0 ; γ — температурный коэффициент сопротивления; c_v и T_s — соответственно удельная теплоемкость и температура плавления материала КС.

Параметр u , равный отношению действующих в струе инерционных сил к пределу текучести, определяет процесс естественного деформирования КС [12]. Параметр s характеризует силовое действие тока (отношение магнитного давления к пределу текучести), а параметр q — термическое действие тока (отношение количества джоуля тепла, выделяющегося в стержне радиусом R_b за характерное время деформирования $1/\dot{\varepsilon}_{zb}$, к количеству теплоты, необходимому для нагрева стержня до температуры плавления).

Характерно, что при типичных режимах ЭДВ существенное изменение формы элементов струи с прибли-

жением ее к дискообразной происходит не в межэлектродном промежутке, а в силу инерционности материала КС уже после ее выхода из области воздействия. При этом динамика развития „дискообразования“, характеризуемая изменением коэффициента формы, после прекращения токового воздействия зависит от значения коэффициента скоростного инвертирования на момент окончания воздействия и степени термического разрушения материала струи. Коэффициент формы использовался для определения эффективной длины испытываемого токового воздействия элемента КС при расчете его пробивного действия в соответствии с гидродинамической теорией [13].

Условия для объемного разрушения КС возникают при ее выходе из межэлектродного промежутка вследствие резкого исчезновения сжимающего действия электромагнитных сил, что может повлечь за собой радиальное диспергирование термически разрушенного материала струи [3,14]. При рассмотрении этого механизма разрушения была использована модель равномерно удлиняющегося цилиндрического сжимаемого упруго-пластического стержня с линейным снижением предела текучести материала с ростом температуры [14,15]. По результатам численных расчетов было установлено, что скорость радиального рассеивания материала струи можно оценивать на основе простого энергетического соотношения в предположении, что потенциальная энергия объемного сжатия струи магнитным давлением после прекращения его действия расходуется на совершение работы по разрушению материала, „гашение“ кинетической энергии радиального сходящегося к оси симметрии движения частиц струи и, напротив, на придание им кинетической энергии радиального разлета. При этом работа разрушения материала струи принималась равной потенциальной энергии его всестороннего растяжения со средним напряжением, определяемым текущим значением предела текучести [11].

Пробивное действие объемно разрушенной части КС рассчитывалось на основе гидродинамической теории проникновения в сочетании с концепцией критической скорости проникания. Предполагалось, что после выхода из области ЭДВ средняя плотность материала струи непрерывно уменьшается с темпом, определяемым скоростью его радиального разлета, а с уменьшением плотности растет нижний порог скорости струи, необходимой для проникновения в преграду [13].

Факторы объемного разрушения и развития МГД неустойчивости начинают заметно проявляться при примерно одинаковых параметрах токового импульса [9]. Поэтому в расчетной методике определения пробивного действия КЗ при ЭДВ учитывалась возможность их совместного проявления. Расчет скорости радиального рассеивания объемно разрушающихся элементов КС производился с учетом изменения их формы и перераспределения скорости осевого деформирования, обусловленных развитием МГД неустойчивости. Геомет-

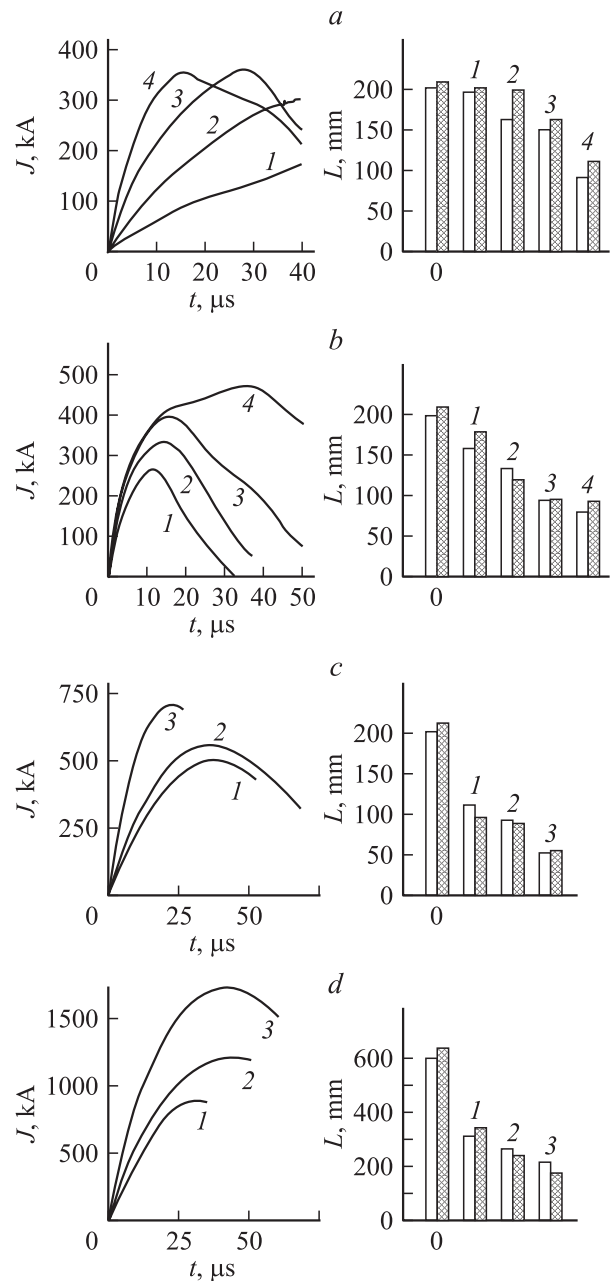


Рис. 2. Сравнение экспериментальных и расчетных данных снижения пробивного действия кумулятивных зарядов при различных режимах токовых воздействий на кумулятивную струю. *a, b* — $h = 40$; $\delta = 21$; *c* — $h = 50$, $\delta = 30$; *d* — $h = 115$, $\delta = 45$ (h и δ — в мм; цифры над диаграммами глубины пробития L соответствуют номерам кривых изменения разрядного тока, зафиксированных в экспериментах; индексом 0 отмечены диаграммы пробития в отсутствие токового воздействия).

рические и кинематические параметры КС при этом рассчитывались с помощью методики [16].

На рис. 2 проиллюстрировано сравнение расчетных данных снижения глубины пробития КЗ при ЭДВ на струю с результатами экспериментов, выполненных в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО

РАН [17,18] (рис. 2, *a, b*) и РФЯЦ–ВНИИЭФ (г. Саратов) [4,5] (рис. 2, *c, d*). Данные, приведенные на рис. 2, *a–c*, получены для КЗ диаметром 50 mm, на рис. 2, *d*, — для КЗ с диаметром основания облицовки 100 mm.

Характерные условия токового разряда

Достаточно близкое соответствие результатов расчетов с экспериментальными данными в широком диапазоне режимов токовых воздействий (рис. 2) дало основания провести на базе разработанной расчетной методики исследования по определению рациональных параметров ЭДВ для снижения проникающей способности КС, формируемых КЗ с различным уровнем пробивного действия. В качестве примера таких КЗ были выбраны заряды диаметром $d_0 = 70$ mm (глубина пробития по гомогенной стальной преграде $L_0 \approx 440 \dots 500$ mm), 115 mm ($L_0 \approx 700 \dots 750$ mm) и 150 mm ($L_0 \approx 950 \dots 1100$ mm). В дальнейшем будем использовать для этих кумулятивных зарядов обозначения КЗ₁ ($d_0 = 70$ mm), КЗ₂ ($d_0 = 115$ mm) и КЗ₃ ($d_0 = 150$ mm).

В качестве источника электрической энергии, обеспечивающего реализацию ЭДВ на КС, рассматривалась конденсаторная батарея. Конструкция элемента ЭДВ предполагалась двухэлектродной (рис. 1).

Эквивалентная электрическая схема разрядной цепи замкнутого участком КС двухэлектродного элемента ЭДВ, запитываемого от конденсаторной батареи, включает индуктивность L_c и активное сопротивление R_c внешней части цепи (включая конденсаторную батарею), а также индуктивность L_e и активное сопротивление R_e 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, поэтому составляющие L_c и R_c полных индуктивности и активного сопротивления, определяемые системой токоподвода к элементу ЭДВ, очевидно, должны быть минимизированы настолько, насколько позволяют технические возможности используемого электрооборудования.

При оценке индуктивности L_e межэлектродного промежутка шириной δ можно воспользоваться формулой для индуктивности уединенного цилиндрического проводника [19]

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

где r_c — радиус участка КС, замыкающего промежуток.

При расстоянии между электродами δ до 100 mm и радиусе струи в несколько миллиметров (для КЗ диаметром $d_0 \sim 100$ mm) индуктивность L_e оценивается

значением в диапазоне $0.05 \dots 0.1$ мкН. Полная индуктивность L_s всей системы токового воздействия на КС в целом, как показывает анализ параметров лабораторных установок, использованных в экспериментах [5], может составлять несколько десятых долей микрогенри. Таким образом, в реальных условиях индуктивность L_c системы токоподвода получается несколько превышающей индуктивность L_e межэлектродного промежутка.

Активное сопротивление R_e замкнутого КС межэлектродного промежутка, измеряющееся в экспериментах [5], 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 ЭДВ отверстия с диаметром, существенно превышающим ее поперечные размеры, и замыкание тока с электродов на участок КС между ними происходит в форме газового разряда. Сопротивлением R_c системы токоподвода к элементу ЭДВ, которое может быть реализовано в пределах 0.001 Ом, в этих условиях вообще 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 $L_s = 0.25$ мкН и $R_s = 0.01$ Ом. Изменениями индуктивности L_e и активного сопротивления R_e межэлектродного промежутка при движении через него различных участков КС (с различным поперечным сечением) в процессе токового разряда пренебрегалось, так как эти изменения относительно невелики.

При постоянных значениях L_s и R_s характер изменения тока в контуре при разрядке конденсаторной батареи с емкостью C зависит от значения безразмерного параметра $\gamma = 0.5R_s\sqrt{C/L_s}$: при $\gamma < 1$ реализуется колебательный режим разряда, в случае $\gamma \geq 1$ разряд является апериодическим. Изменение со временем силы тока J в цепи, его максимальное значение J_m и время t_m выхода на максимум определяются согласно известным соотношениям теории переходных процессов [19]. При этом со стороны электротехнических параметров установки эффективность токового воздействия на КС находится в зависимости от начального напряжения U_0 и емкости C конденсаторной батареи, а также индуктивности L_s и активного сопротивления R_s разрядного контура.

К числу конструктивных параметров элемента ЭДВ, определяющих эффективность разрушения КС, относятся ширина δ межэлектродного промежутка и удаление h электродной системы от КЗ (рис. 1). При задании удаления электродов от КЗ рассматривались два варианта: с наличием экрана перед элементом ЭДВ и без экрана. При экранированном элементе ЭДВ предполагалось, что срабатывание КЗ 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 [1,13] соответствующего КЗ (1,5...2 диаметра заряда). При отсутствии экрана полагалось, что $h = F_c$.

Следует отметить, что экранировка электродной системы должна способствовать облегчению токового разрушения КС за счет уменьшения с удалением от КЗ поперечных размеров струи вследствие ее растяжения. Однако, так как в конечном итоге КС в процессе растяжения распадается на отдельные безградиентные элементы [1,12,13], при выборе разнесения электродов и экрана необходимо иметь в виду возможность входа в межэлектродное пространство уже разорвавшихся участков струи [20]. Наличие промежутков между элементами разорванной КС увеличивает межэлектродное сопротивление R_e и может привести к срыву токового разряда. В связи с этим в расчетах был рассмотрен случай относительно небольшого разнесения защитного экрана и элемента ЭДВ ($h_s = 100$ мм).

Относительная ширина межэлектродных промежутков практически во всех экспериментах по разрушению КС импульсом тока лежала в пределах $\delta/d_0 = 0.4 \dots 0.6$ [5,17,18]. С ориентировкой на этот диапазон задавались межэлектродные расстояния δ и при проведении расчетов. Были рассмотрены также варианты ЭДВ с межэлектродными промежутками несколько большей относительной ширины (до $\delta/d_0 \approx 1$). 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.

Во всех проведенных расчетах предполагалось, что ось КЗ в момент подрыва перпендикулярна плоскости электродов, а преграда, расположенная за элементом ЭДВ, является стальной.

Результаты расчетов

Более подробно влияние различных факторов на эффективность ЭДВ было рассмотрено на примере занимающего промежуточное положение по уровню пробития КЗ₂. На рис. 2 проиллюстрировано снижение глубины пробития КЗ₂ в зависимости от энергии $W = CU_0^2/2$ емкостного накопителя для различных емкостей батареи (при неэкранированном межэлектродном промежутке $\delta = 75$ мм и параметрах разрядной цепи $L_s = 0.25$ мкН,

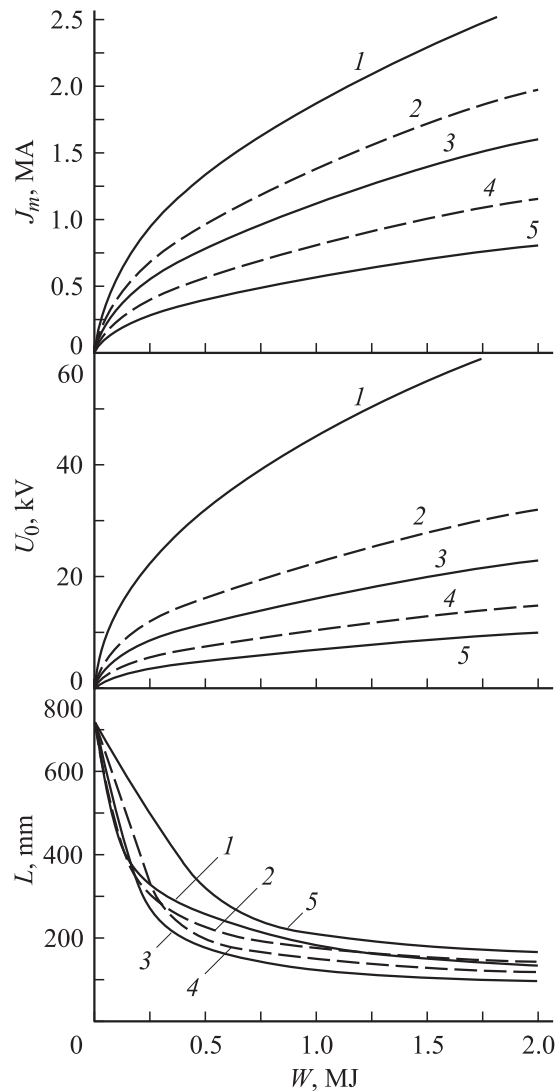


Рис. 3. Зависимости снижения глубины пробития КЗ₂, начального напряжения на емкостном накопителе и максимума разрядного тока от энергии батареи. C, mF : 1 — 1, 2 — 4, 3 — 8, 4 — 20, 5 — 50.

$R_s = 0.01 \Omega$). Здесь же приведены реализуемые при этом начальные напряжения U_0 на батарее и амплитудные значения J_m разрядного тока (в реальных условиях могут возникнуть ограничения по используемым напряжениям и максимально допустимым токам, связанные с техническими возможностями электрооборудования).

Как видно из рис. 3, при заданных межэлектродном промежутке и разрядном контуре существует оптимум по емкости батареи: наилучший результат по снижению пробивного действия достигается при $C = 8$ мФ. При емкостях, меньших или больших этого значения, эффективность ЭДВ снижается. Наличие оптимума связано с изменением в зависимости от емкости накопителя степени синхронизированности токового импульса со временем прохождения через межэлектродный промежуток различных участков КС. Как показывает анализ вклада

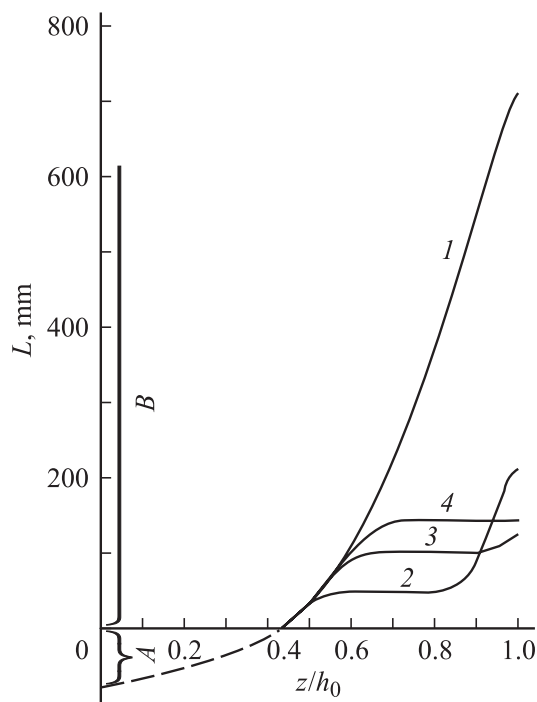


Рис. 4. Последовательное нарастание глубины пробития КЗ₂ от действия элементов кумулятивной струи, формируемых из различных частей кумулятивной облицовки (z — координата, отсчитываемая от вершины облицовки вдоль ее оси; h_0 — высота облицовки) в естественных условиях (1) и при токовом воздействии, осуществляемом от конденсаторной батареи. C , мФ: 2 — 4, 3 — 8, 4 — 20. А — элемент ЭДВ, В — преграда.

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. На рис. 4 проиллюстрировано нарастание глубины пробития КЗ₂ от последовательного срабатывания элементов КС в отсутствие токового воздействия и при ЭДВ от конденсаторной батареи с энергией $W = 1$ МДж при различных ее емкостях. Видно, что 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), напротив, полностью „выбивается“ хвостовая часть КС, но из-за недостаточно быстрого нарастания тока успевает „проскочить“ через межэлектродный промежуток неразрушенным слишком большой участок „головы“ струи.

При рассмотрении зависимости снижения глубины пробития от энергии накопителя (рис. 3) очевидна существенная наравномерность достигаемого эффекта по мере роста энергозатрат. Увеличение энергии батареи

значительно повышает эффективность ЭДВ лишь до определенного предела. Так, при оптимальной емкости батареи $C = 8$ мФ пробитие КЗ₂ можно снизить более чем в три 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 ($U_0 \approx 22$ кВ, $J_m \approx 1.6$ МА) дополнительно снижает глубину пробития всего лишь на 100 мм (интересно отметить, что полная кинетическая энергия КС, формируемой КЗ₂, составляет около 700 кДж). Таким образом, с ростом энергии батареи происходит „насыщение“ эффекта снижения пробивного действия КС и полной ликвидации пробития достичь не удастся. С выходом остаточного пробития КЗ на уровень примерно диаметра заряда d_0 дальнейшая „закачка“ энергии в накопитель крайне малоэффективна: глубина пробития падает очень слабо. „Насыщение“ остаточного пробития обусловлено 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 „разрушающей“ величины.

Оптимальная емкость конденсаторной батареи, обеспечивающая максимально возможную эффективность „вложения“ энергии батареи в разрушение КС, изменяется с изменением условий осуществления ЭДВ (конструктивных параметров элемента ЭДВ и электротехнических параметров разрядной цепи). На рис. 5 проиллюстрировано снижение глубины пробития КЗ₂ в зависимости от энергии и емкости накопителя при размещении элемента ЭДВ на большем расстоянии от КЗ ($h_s = 100$ мм, остальные параметры системы ЭДВ те же, что и на рис. 3). С удалением электродов от КЗ возрастает время попадания элементов КС в межэлек-

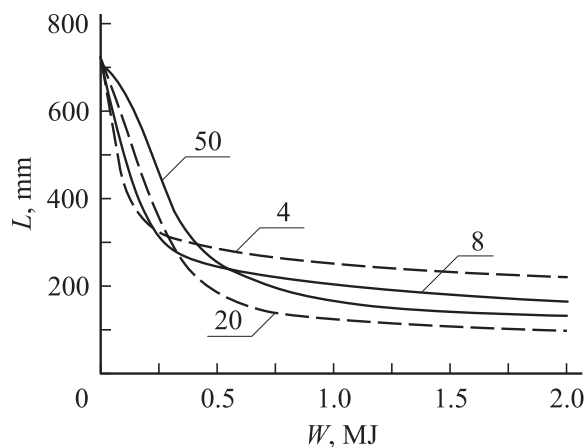


Рис. 5. Снижение глубины пробития КЗ₂ в зависимости от энергии и емкости конденсаторной батареи при размещении элемента ЭДВ за экраном. Цифры около кривых — значения C в мФ.

тродный промежуток от момента начала разряда. Увеличивается и общее время прохождения всей КС через область воздействия. За счет этого требуются более длительные токовые импульсы для того, чтобы эффективно воздействовать на хвостовую часть струи. Поэтому для более удаленного элемента ЭДВ ($h_s = 100$ mm) оптимальная емкость батареи смещается в сторону увеличения, из рассмотренных вариантов емкостей накопителя (рис. 3) наилучший результат по снижению пробития достигается при $C = 20$ mF (рис. 5). Повышение эффективности ЭДВ с удалением электродной системы от КЗ наблюдается также для накопителя с емкостью 50 mF. При емкостях же 4 и 8 mF удаление элемента ЭДВ, напротив, приводит к ослаблению эффекта разрушения КС: токовые импульсы становятся слишком короткими, чтобы „охватить“ всю струю.

Для выбранных из кумулятивных зарядов КЗ₁, КЗ₂ и КЗ₃ были определены возможные параметры системы ЭДВ, обеспечивающей снижение их пробития до уровней 50, 100 и 200 mm (рис. 6). В качестве параметров разрядной цепи при этом использовались их опорные значения $L_s = 0.25$ μ H, $R_s = 0.01$ Ω . Варьируемым параметром являлась емкость конденсаторной батареи. Для каждого значения емкости определялись начальное напряжение U_0 на накопителе и запасенная в нем энергия $W = CU_0^2/2$, позволяющие снизить глубину пробития соответствующего КЗ до заданного уровня. В расчетах были рассмотрены также разные варианты элементов ЭДВ ($h_s = 0$ и 100 mm, с различным межэлектродным расстоянием δ).

Как видно из рис. 6, и в этом случае выявляется эффект существования оптимальных параметров источника электрической энергии. Существует оптимальная емкость накопителя, обеспечивающая достижение заданной эффективности воздействия при минимальной энергии. С ужесточением требований по снижению пробития КЗ 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 δ и удаления h элемента ЭДВ от КЗ оптимальная емкость накопителя возрастает, что связано с возрастанием времени, за которое вся КС проходит электродную систему. Одновременно за счет использования этих конструктивных факторов можно добиться снижения потребной энергии накопителя для обеспечения необходимого снижения пробития. Для КЗ₁ при элементе ЭДВ с межэлектродным расстоянием $\delta = 50$ mm без экрана ($h_s = 0$) остаточное пробитие $L = 50$ mm достигается при энергии накопителя около 1.6 MJ и его емкости $C = 10$ mF. Наличие экрана ($h_s = 100$ mm) при оптимальной емкости батареи $C = 15$ mF позволяет уменьшить эту энергию более чем на 0.5 mJ. Для обладающего максимальным прибытием КЗ₃ уровень остаточного пробития $L = 200$ mm обеспечивается устройством ЭДВ с электродами, разнесенными на расстоянии $\delta = 125$ mm, и с накопителем

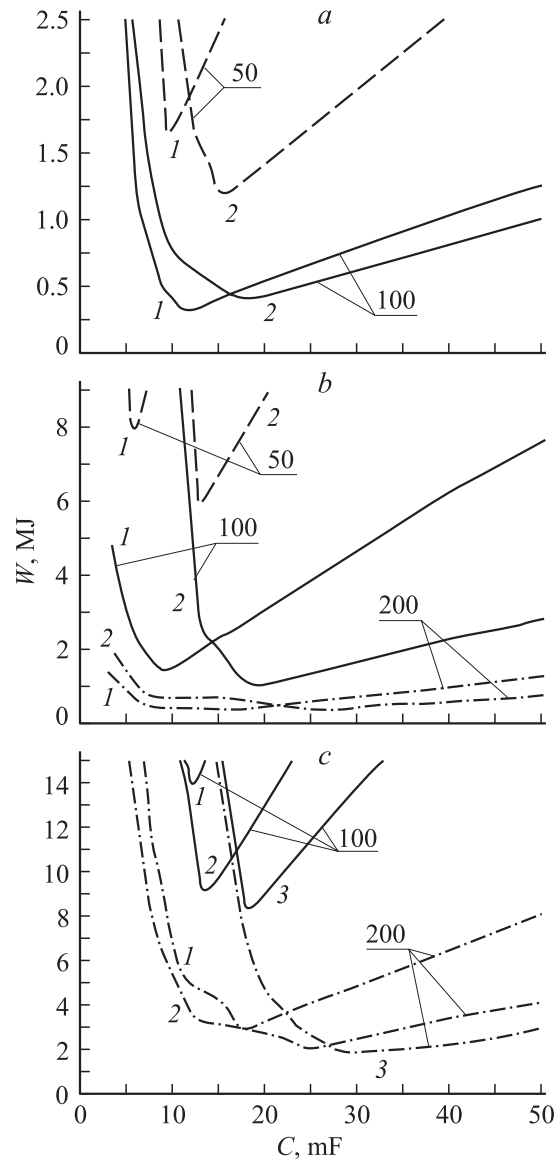


Рис. 6. Соотношение энергии и емкости конденсаторной батареи для достижения заданного уровня остаточного пробития при токовом воздействии на кумулятивную струю: *a* — КЗ₁ (1 — $\delta = 50$ mm, $h_s = 0$; 2 — $\delta = 50$ mm, $h_s = 100$ mm); *b* — КЗ₂ (1 — $\delta = 75$ mm, $h_s = 0$; 2 — $\delta = 125$ mm, $h_s = 100$ mm); *c* — КЗ₃ (1 — $\delta = 75$ mm, $h_s = 0$; 2 — $\delta = 125$ mm, $h_s = 0$; 3 — $\delta = 125$ mm, $h_s = 100$ mm). Значения $L(\geq 50)$ в mm — у кривых.

емкостью 25 ... 35 mF при его энергии чуть более 2 MJ. Достичь уровня остаточного пробития $L = 100$ mm для КЗ₃ практически нереально: для этого необходима конденсаторная батарея с энергией около 10 MJ. В то же время для снижения пробития КЗ₂ до такого же уровня требуется накопитель с энергией 1.2 ... 1.5 MJ, а до уровня $L = 200$ mm — с энергией 300 ... 400 kJ.

В практическом отношении интересен вопрос о том, какого снижения пробития КЗ различного диаметра можно добиться при заданном фиксированном уровне

энергии емкостного накопителя. Для рассматриваемых КЗ были рассчитаны кривые снижения пробития при уровнях энергии батареи 100, 200, 500 и 1000 кДж (рис. 7). В проведенных расчетах варьировалась емкость батареи и рассматривались элементы ЭДВ с различным межэлектродным расстоянием (без экрана).

Как свидетельствуют результаты расчетов, выбирая соответствующим образом емкость накопителя, можно добиться максимально возможного при заданной величине его энергии снижения пробития КЗ (рис. 7). Эффект снижения пробития при одной и той же энергии

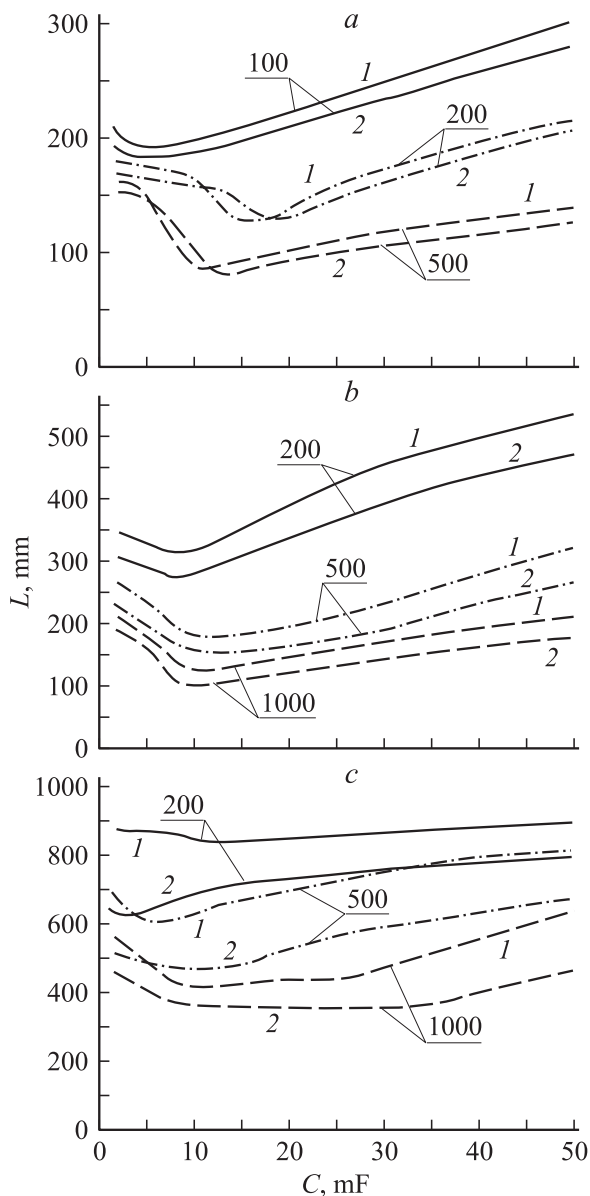


Рис. 7. Снижение пробивного действия КЗ₁ (1 — $\delta = 50$, 2 — 75 мм), КЗ₂ и КЗ₃ (1 — $\delta = 75$, 2 — 125 мм) элементом ЭДВ без экрана при заданном уровне энергии емкостного накопителя: а — КЗ₁ (1 — $\delta = 50$, 2 — 75 мм); б, с — КЗ₂ и КЗ₃ соответственно (1 — $\delta = 75$, 2 — 125 мм). Значения $W(\geq 100)$ в кДж — у кривых.

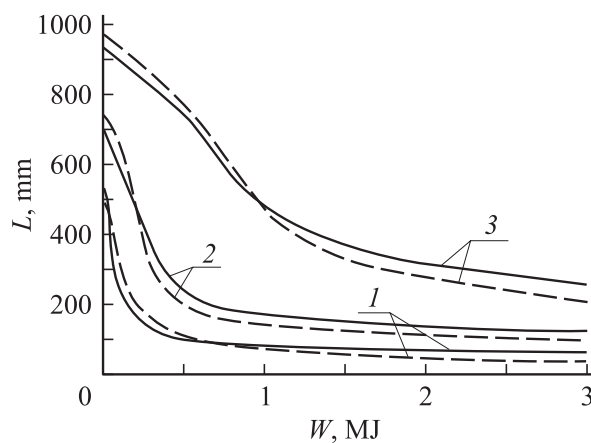


Рис. 8. Снижение глубины пробития различных КЗ элементом ЭДВ с межэлектродным промежутком $\delta = 75$ мм в зависимости от энергии конденсаторной батареи емкостью $C = 30$ мФ (сплошные кривые — $h_s = 0$, пунктир — $h_s = 100$ мм). 1 — КЗ₁, 2 — КЗ₂, 3 — КЗ₃.

батарей может быть усилен за счет увеличения межэлектродного промежутка. Для КЗ₁ при энергии накопителя 100 кДж минимально возможное пробитие составляет около 200 мм ($L/L_0 = 0.4$). Имея батарею с энергией 200 кДж, пробитие КЗ₁ и КЗ₂ можно снизить до уровней соответственно 125 ... 150 ($L/L_0 = 0.25 \dots 0.3$) и 300 ... 350 мм ($L/L_0 = 0.43 \dots 0.5$). Снижения пробития КЗ₃ при данной энергии накопителя и межэлектродном промежутке $\delta = 75$ мм практически не достигается. При $\delta = 125$ мм остаточное пробитие КЗ₃ для $W = 200$ кДж может быть снижено до 650 ... 700 мм ($L/L_0 = 0.68 \dots 0.74$), причем при относительно малых емкостях накопителя (в пределах 5 мФ). Батарея с энергией 500 кДж дает возможность ослабить пробивное действие КЗ₁, КЗ₂ и КЗ₃ до значений соответственно $L = 75 \dots 100$ ($L/L_0 = 0.15 \dots 0.2$), 150 ... 200 ($L/L_0 = 0.21 \dots 0.29$) и 500 ... 600 мм ($L/L_0 = 0.53 \dots 0.63$).

Практический интерес может также представлять сравнительная оценка эффективности одной и той же системы ЭДВ (с фиксированными параметрами) при ее „работе“ против различных КЗ. В расчетах был рассмотрен вариант ЭДВ с конденсаторной батареей емкостью $C = 30$ мФ (параметры разрядной цепи $L_s = 0.25 \mu\text{H}$, $R_s = 0.01 \Omega$). Предполагалось, что кумулятивным зарядом с различным „естественным“ уровнем пробития (КЗ₁, КЗ₂, КЗ₃) противодействует элемент ЭДВ с межэлектродным промежутком $\delta = 75$ мм, размещенный либо за экраном ($h_s = 100$ мм), либо без экранировки. На основании зависимостей пробития КЗ от энергии батареи (рис. 8) могут быть оценены характеристики накопителя, способного обеспечить требуемый уровень „расстройства“ кумулятивного действия для заданной номенклатуры КЗ.

Заключение

Таким образом, разработанная простая „инженерная“ расчетная методика позволяет прогнозировать проникающую способность металлических струй КЗ при токовом воздействии и исследовать раздельное и совместное влияние на пробитие преграды параметров как самой системы ЭДВ, так и кумулятивных зарядов. В то же время очевидно, что полученные с помощью этой методики и представленные в данной работе результаты должны рассматриваться лишь как первое приближение к решению проблемы оптимизации системы ЭДВ и нуждаются в дальнейшем уточнении и экспериментальном подтверждении. Ценность этих результатов может заключаться в том, что они дают возможность более осмысленно проводить экспериментальные исследования по разрушению КС электрическим током.

Список литературы

- [1] *Walters W.P., Zukas J.A.* Fundamentals of shaped charges. New York: John Wiley and Sons, 1989. 398 p.
- [2] *Матросов А.Д., Швецов Г.А.* // ПМТФ. 1996. Т. 37. № 4. С. 9–14.
- [3] *Pollock C.E.* // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications / Ed. M. Cowan, R.B. Spielman. New York: Nova Science Publ., 1994. P. 309–316.
- [4] *Павловский А.И., Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Бродский А.Я.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 2. С. 76–82.
- [5] *Павловский А.И., Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Бродский А.Я.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 5. С. 43–48.
- [6] *Shvetsov G.A., Matrosov A.D., Babkin A.V.* et al. // Proc. of the 19th Intern. Symposium on Ballistics. Interlaken (Switzerland), 2001. Vol. 2. P. 851–857.
- [7] *Shvetsov G.A., Matrosov A.D.* // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Sarov: VNIIEF, 1997. Pt II. P. 948–955.
- [8] *Shvetsov G.A., Bashkatov Yu.L., Matrosov A.S.* et al. // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Sarov: VNIIEF, 1997. Pt II. P. 956–960.
- [9] *Babkin A.V., Kruzhev V.A., Ladov S.V.* et al. // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Russia. Sarov: VNIIEF, 1997. Pt II. P. 961–966.
- [10] *Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В.* // Оборонная техника. 1998. № 1–2. С. 49–56.
- [11] *Швецов Г.А., Матросов А.Д., Федоров С.В.* и др. // Тр. Междунар. конф. „III Харитоновские тематические научные чтения“. Саров: ВНИИЭФ, 2002. С. 263–269.
- [12] *Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В.* // ПМТФ. 1999. Т. 40. № 4. С. 25–35.
- [13] *Физика взрыва / Под ред. К.П. Станюковича.* М.: Наука, 1975. 704 с.
- [14] *Бабкин А.В., Кольчев М.Е., Ладов С.В., Федоров С.В.* // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 47–54.
- [15] *Бабкин А.В., Кружков В.А., Луговой Э.В., Федоров С.В.* // Оборонная техника. 1993. № 9. С. 36–39.
- [16] *Маринин В.М., Бабкин А.В., Колпаков В.И.* // Оборонная техника. 1995. № 4. С. 34–39.
- [17] *Швецов Г.А., Матросов А.Д., Бабкин А.В.* и др. // ПМТФ. 2000. Т. 41. № 3. С. 19–25.
- [18] *Федоров С.В., Бабкин А.В., Ладов С.В.* и др. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 6. С. 126–145.
- [19] *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972. 392.
- [20] *Пляшкевич Л.Н., Шувалов А.М., Спиоров Г.М.* и др. // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 5. С. 124–127.