

УДК 532.52 + 533.95

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА НА ГЛУБИНУ ПРОНИКАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ В ПРЕГРАДЫ

Г. А. Швецов, А. Д. Матросов, С. В. Станкевич

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: shvetsov@hydro.nsc.ru, maad@hydro.nsc.ru, stan@hydro.nsc.ru

Представлены результаты экспериментальных и численных исследований поведения металлических кумулятивных струй (КС) при протекании по ним электрического тока. Рассматривается возможность уменьшения и увеличения глубины проникания КС в преграды. Введены понятия критической плотности тока и идеальной формы токового импульса, при которых в струе развивается перетяжная магнитогидродинамическая неустойчивость, сопровождающаяся объемным взрывом элементов КС при их выходе из межэлектродного промежутка. Развитие в КС перетяжной магнитогидродинамической неустойчивости и последующий объемный взрыв материала струи приводят к уменьшению ее длины и плотности и как следствие к уменьшению глубины проникания в преграду. Показано, что этим процессом можно управлять, изменяя параметры электрического импульса. Анализируется возможность увеличения глубины проникания КС в преграды в условиях, когда протекающий по КС электрический ток меньше критического значения. Рассматривается процесс нагрева КС из различных материалов (Cu, Fe, Mo, Ta, W и др.) при протекании по ним электрического тока. Показано, что использование электрического тока для нагрева КС может оказаться перспективным для увеличения глубины проникания КС в преграды.

Ключевые слова: кумулятивная струя, преграда, электрический ток, проникание.

**Введение.** В последние годы значительный интерес вызывает изучение влияния различных видов электромагнитного воздействия на работу кумулятивных зарядов (см. [1–6]). Исследуется влияние магнитных полей на работу кумулятивных зарядов (КЗ) на различных стадиях: на стадии образования кумулятивных струй (КС), при движении КС в свободном полете, при проникании КС в преграды. Показано, что, используя различные виды электромагнитного воздействия на различных стадиях функционирования КЗ, можно уменьшать глубину проникания КС в преграды. Основное внимание уделяется изучению влияния электрического тока на глубину проникания КС в преграды, однако детальные исследования не проводились. В данной работе рассматриваются способы уменьшения и увеличения глубины проникания КС в преграды. Вводятся понятия критической плотности тока и идеальной формы токового импульса, при которых в струе развивается перетяжная магнитогидродинамическая (МГД) неустойчивость, сопровождающаяся объемным взрывом элементов КС при их выходе из межэлектродного промежутка. Развитие в КС перетяжной МГД-неустойчивости и последующий объемный взрыв материала струи приводят к уменьшению ее длины и плотности, а также к уменьшению глубины

проникания КС в преграды. Показано, что этим процессом можно управлять, изменяя параметры электрического импульса. Возможность увеличения глубины проникания КС в преграды анализируется в условиях, когда протекающий по КС электрический ток меньше критического значения. Рассматривается процесс нагрева КС из различных материалов (Cu, Fe, Mo, Ta, W и др.) при протекании по ним электрического тока. Показано, что использование электрического тока для нагрева КС может привести к увеличению глубины проникания КС в преграды.

**1. Разрушение кумулятивных струй импульсным током.** В работах [3–10] экспериментально и теоретически показано, что воздействие импульсного электрического тока на металлические КС приводит к существенному изменению структуры струи и уменьшению времени ее разрушения. Анализ этого процесса представляет интерес как с практической точки зрения (уменьшение глубины проникания КС в преграду), так и с теоретической (изучение поведения материала, структуры и физических характеристик КС). В настоящее время механизмы разрушения КС импульсом тока и его влияние на глубину проникания КС в преграды остаются практически не изученными. Поскольку влияние тока на КС проявляется различным образом (нагрев струи протекающим током, нагрев струи в контактных дугах, термическое разупрочнение материала струи, сжатие КС магнитным полем и ускоренное развитие исходной перетяжной гидродинамической неустойчивости, объемное разрушение материала КС при выходе элементов струи из электродной системы и т. д.), в работах [9, 10] введено обобщенное понятие токовой неустойчивости КС. Проведенные экспериментальные и численные исследования показали, что при пропускании тока по КС наблюдается как развитие перетяжной МГД-неустойчивости, так и объемное разрушение КС при выходе ее элементов из электродной системы [9, 10]. Из результатов расчетов следует, что при пропускании по струе электрического тока механизм разрушения КС зависит от условий проведения экспериментов, параметров электрического импульса и времени протекания тока по КС.

В настоящей работе впервые представлены данные систематических экспериментальных исследований влияния параметров электрического импульса на развитие токовой неустойчивости и разрушение КС. В результате проведенных экспериментов предложена простая физическая модель разрушения КС импульсным током, позволяющая выполнять экспресс-оценки влияния параметров электрического импульса на разрушение КС и глубину ее проникания в преграду.

1.1. *Схема экспериментов.* Схема экспериментов приведена на рис. 1. Опыты проводились с использованием КЗ калибром  $d = 30, 50, 75, 100$  мм с коническими медными выемками. Ток протекает по КС с момента замыкания электродов струей. В экспериментах изменялись ток и производная тока по времени ( $I = 100 \div 500$  кА,  $dI/dt = 3 \cdot 10^9 \div 10^{11}$  А/с), форма электрического импульса, время воздействия электрического тока на различные элементы струи и другие параметры. Рентгенографирование КС осуществлялось в межэлектродном промежутке и в свободном полете. В экспериментах с током и без тока рентгеновская съемка проводилась в один и тот же момент времени с погрешностью 0,5 мкс. Влияние электрического тока на КС дополнительно оценивалось по глубине проникания струи в преграду.

1.2. *Результаты экспериментов.* На рис. 2, 3 показано изменение разрядного тока, протекающего через КС при ее воздействии на стальную преграду. В контрольных опытах без пропускания по КС электрического тока глубина пробития стальной преграды составляла  $(210 \pm 5)$  мм.

При  $dI/dt \leq 3 \cdot 10^9$  А/с и амплитуде тока менее 100 кА протекающий по струе ток практически не оказывает влияния на разрушение струи и глубину ее проникания в преграду.

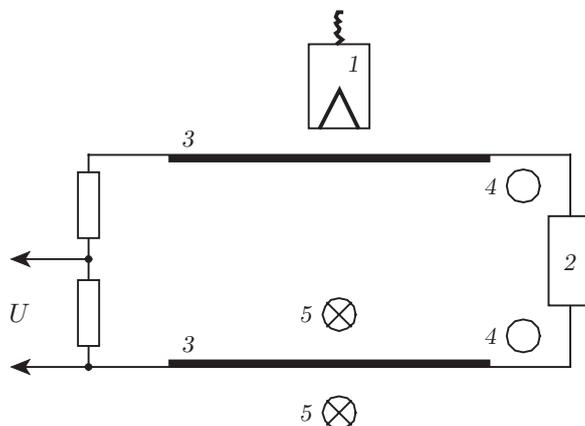


Рис. 1. Схема экспериментов:

1 — кумулятивный заряд; 2 — источник электромагнитной энергии; 3 — электроды; 4 — индуктивные датчики для измерения тока и производной тока разряда; 5 — области, в которых проводилась рентгеновская съемка

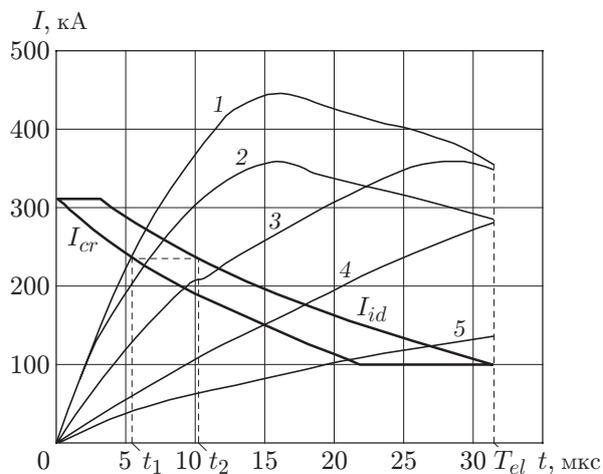


Рис. 2

Рис. 2. Экспериментальные зависимости разрядного тока, протекающего через кумулятивную струю, от времени при различных значениях глубины пробития преграды  $h$ :

$I_{cr}$  — критический ток,  $I_{id}$  — идеальная форма тока,  $T_{el}$  — момент окончания замыкания струей электродов для кумулятивного заряда калибром  $d = 50$  мм; 1 —  $h = 79$  мм, 2 —  $h = 91$  мм, 3 —  $h = 147$  мм, 4 —  $h = 160$  мм, 5 —  $h = 195$  мм

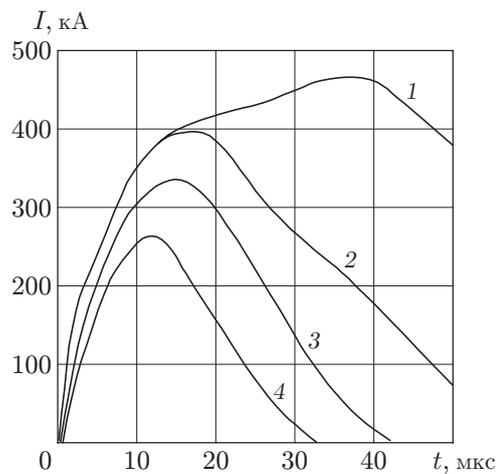


Рис. 3

Рис. 3. Экспериментальная зависимость разрядного тока, протекающего через кумулятивную струю, от времени при  $dI/dt \approx \text{const}$ ,  $d = 50$  мм и различных значениях глубины пробития преграды  $h$ :

1 —  $h = 76$  мм, 2 —  $h = 90$  мм, 3 —  $h = 129$  мм, 4 —  $h = 158$  мм

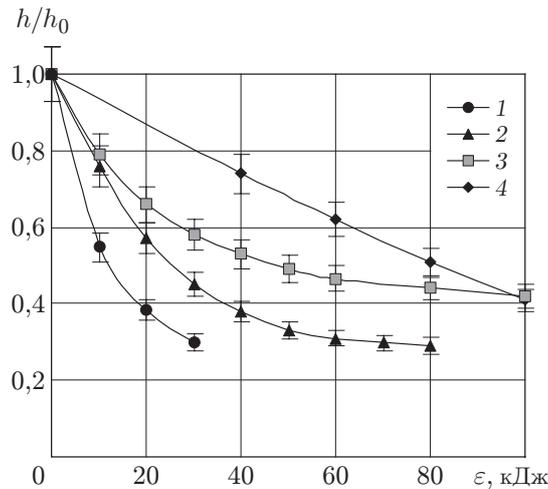


Рис. 4. Экспериментальная зависимость глубины проникания кумулятивной струи в стальную преграду от энергии, запасенной в конденсаторной батарее: 1 —  $d = 30$  мм,  $h_0 = (135 \pm 5)$  мм; 2 —  $d = 50$  мм,  $h_0 = (210 \pm 5)$  мм; 3 —  $d = 75$  мм,  $h_0 = (380 \pm 10)$  мм; 4 —  $d = 100$  мм,  $h_0 = (540 \pm 10)$  мм

На рис. 4 представлена зависимость глубины проникания КС в стальную преграду от энергии в конденсаторной батарее при  $d = 30, 50, 75, 100$  мм ( $h_0$  — глубина проникания КС в преграду в экспериментах без тока). Видно, что при умеренных значениях энергии в источнике глубину проникания КС в преграду можно уменьшить в несколько раз.

На рис. 5, а–в представлены рентгенограммы КС от КЗ калибром 50 мм при наличии и отсутствии тока, полученные в различные моменты времени. Зависимость  $I(t)$  для данных экспериментов приведена на рис. 5, д (вертикальные штриховые линии — моменты времени съемки). Из рис. 5, а следует, что в момент съемки формы струй с током ( $\approx 250$  кА) и без тока практически одинаковы. На рис. 5, б, в структуры струй с током и без тока существенно различаются. Видно, что в экспериментах с током имеют место разрывы КС перед нижним электродом и существенное увеличение диаметров струй. На рис. 5, г (увеличенный фрагмент КС с током в межэлектродном зазоре на рис. 5, в) показан процесс зарождения и развития перетяжек и разрыва участка струи. После прохождения нижнего электрода струи с током распадаются на фрагменты, размеры которых в аксиальном направлении приблизительно равны 1–3 диаметрам струи. Наблюдается объемное разрушение элементов. Фрагменты расширяются в радиальном направлении, достигая размеров, равных 5–10 диаметрам струи, в тех же сечениях, что и в экспериментах без тока.

Анализ рентгенограмм, полученных в одни и те же моменты времени, показывает, что количество перетяжек в струе в отсутствие тока и количество фрагментов при наличии тока достаточно хорошо согласуются. Следовательно, магнитное давление способствует ускоренному развитию первоначально малых возмущений исходной гидродинамической перетяжечной неустойчивости КС. Воздействие импульсного электрического тока на элементы КС происходит в основном в межэлектродном промежутке, что обеспечивает время электродинамического воздействия на элементы КС, необходимое для развития перетяжечной МГД-неустойчивости.

В экспериментах не зафиксировано появления изгибных неустойчивостей. Интенсивное расширение фрагментов струи в радиальном направлении после прохождения ими нижнего электрода обусловлено снятием давления магнитного поля и разгрузкой материала струи. Это приводит к уменьшению средней плотности материала элементов струи, эффективной длины струи и как следствие к ухудшению ее пробивной способности.

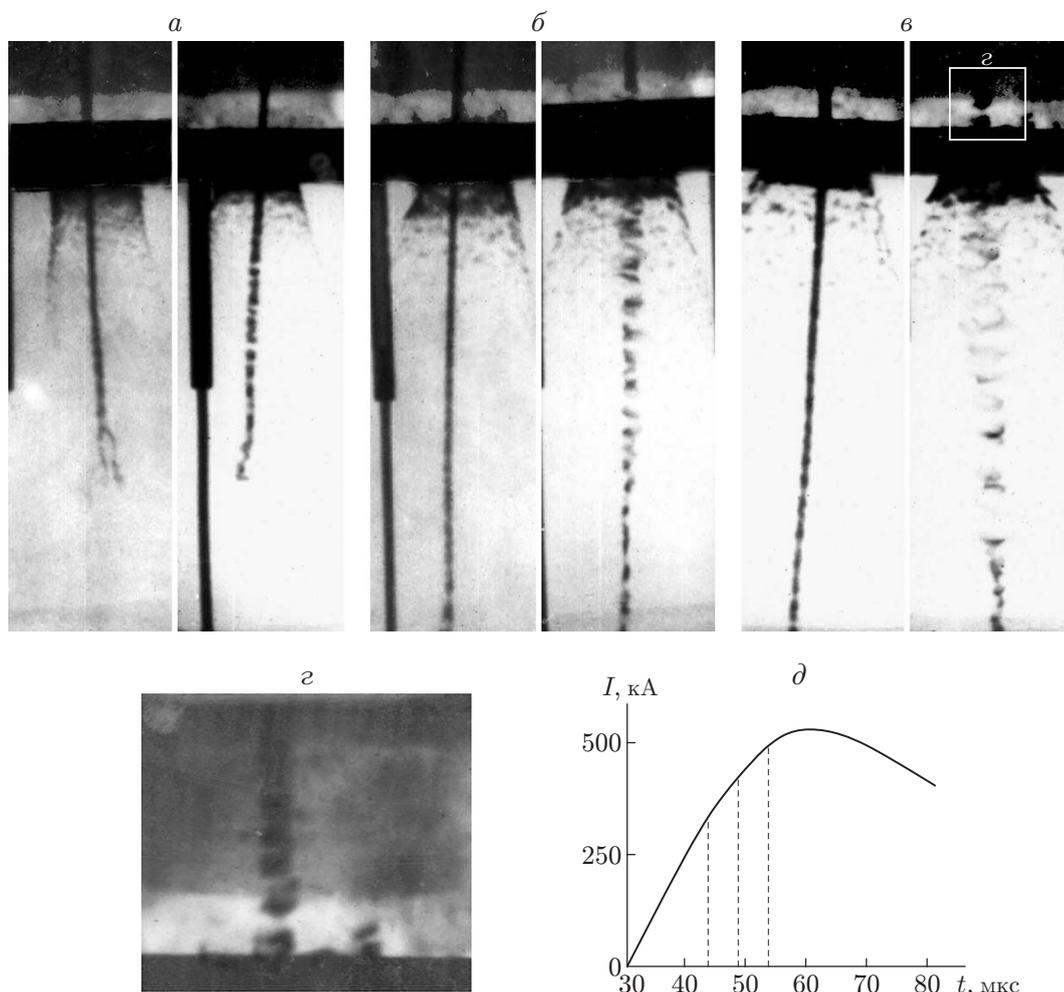


Рис. 5. Рентгенограммы КС без тока (слева) и с током (справа), полученные в различные моменты времени (а-в), увеличенный фрагмент участка КС в межэлектродном зазоре на рис. 5,в (з) и токовая кривая, соответствующая приведенным рентгенограммам (д):

а —  $t = 42,5$  мкс, б —  $t = 47,8$  мкс, в —  $t = 52,5$  мкс

Из анализа результатов проведенных экспериментов следует, что для эффективного воздействия на КС скорость нарастания тока и его амплитуда должны превышать некоторые пороговые значения. Эксперименты показывают, что можно создать условия, при которых элементы КС, подвергнутые воздействию тока, превышающего пороговое значение, не будут оказывать влияния на глубину проникания КС в преграду после их выхода из электродной системы. Этот вывод может служить основой для создания простой физической модели разрушения КС импульсным током, позволяющей оценивать глубину проникания КС в преграду.

**2. Физическая модель воздействия электрического тока на кумулятивную струю.** Рассмотрим процесс воздействия электрического тока на КС. Проблема устойчивости жидкого проводящего цилиндра (струи, взрывающиеся проводники) в собственном магнитном поле аксиального электрического тока исследовалась во многих работах (см., например, [11–14]). Не обсуждая подробно положения и выводы, представленные в этих

работах, приведем только основной результат. Было показано, что жидкий металлический цилиндр конечной проводимости при протекании по нему аксиального электрического тока неустойчив к осесимметричным возмущениям всех длин волн. Собственное время развития перетяжечной МГД-неустойчивости равно  $\tau \approx \alpha r_0 / C_H$ , где  $C_H = B / (\mu_0 \rho)^{0,5}$  — скорость Альфвена;  $B$  — индукция магнитного поля;  $\rho$  — плотность;  $r_0$  — радиус струи;  $\alpha$  — коэффициент, величина которого порядка единицы.

В проведенных экспериментах давление магнитного поля существенно превышало прочностные характеристики материала КС (с учетом скорости деформации и температуры), поэтому время развития перетяжечной МГД-неустойчивости можно оценить, используя приведенные выше зависимости.

Как отмечено выше, проведенные экспериментальные исследования показали, что для эффективного воздействия на КС аксиального тока необходимо выполнение двух условий:

1) ток в струе должен превышать некоторое критическое значение  $I_{cr}$ ;

2) время нахождения элемента струи между электродами должно быть достаточным для развития перетяжечной МГД-неустойчивости. Это условие можно представить в виде

$$\tau = \alpha r_0 / C_H \leq \Delta / u_i, \quad (1)$$

где  $\Delta$  — расстояние между электродами;  $u_i$  — скорость  $i$ -го элемента в струе.

Подставляя в выражение (1) значение для альфвеновской скорости  $C_H$  (с учетом того, что  $B = \mu_0 I / (2\pi r_0)$ ) и разрешая его относительно тока  $I$ , получаем

$$I \geq 2\pi\alpha r_0^2 \sqrt{\rho/\mu_0} u_i / \Delta. \quad (2)$$

Среднее значение радиуса КС для конической кумулятивной облицовки определим по формуле (см. [15])

$$r_0 = \sqrt{R_c \delta_0 / \psi} \sin(\varphi/2). \quad (3)$$

Здесь  $R_c$  — радиус основания конуса;  $\varphi$  — угол раствора конуса;  $\delta_0$  — начальная толщина конуса;  $\psi$  — коэффициент удлинения струи при пробитии ею брони. С учетом того что  $\psi = l_{eff} / l_0$  ( $l_0$  — длина образующей конуса;  $l_{eff}$  — эффективная длина КС), запишем (3) в виде  $r_0 = R_c \sqrt{\delta_0 / l_{eff}} \sin(\varphi/2)$ . Подставляя это соотношение в выражение (2), получаем

$$I_{cr} = 2\rho\alpha R_c \delta_0 \sin(\varphi/2) \sqrt{\rho/\mu_0} u_i / \Delta l_{eff}. \quad (4)$$

Выражение (4) получено из условия равенства интервалов времени развития МГД-неустойчивости и времени пролета элементом струи расстояния между электродами.

Если амплитуда тока не превышает  $I_{cr}$ , то МГД-неустойчивость не развивается. Пусть в момент времени  $t_1$  ток достигает критического значения  $I_{cr}$ . Для того чтобы в элементе, находящемся в этот момент на верхнем электроде, успела развиться перетяжечная МГД-неустойчивость, этот ток необходимо поддерживать постоянным в течение промежутка времени, равного времени пролета данным элементом межэлектродного промежутка  $\Delta$ , т. е. с момента времени  $t_1$  до момента времени  $t_2 = t_1 + \Delta / u_i$ . Определенную таким образом форму электрического тока будем называть идеальной формой токового импульса  $I_{id}$ .

Известно, что скорость элементов КС, принадлежащих эффективному участку струи, различна, поэтому значения  $I_{cr}$  и  $I_{id}$  определяются радиусом и скоростью элемента струи в данный момент времени. Если предположить, что распределение скорости вдоль струи имеет вид

$$u(x) = u_0 [1 - \gamma(x/l_{eff})^n],$$

где  $u_0$  — скорость головного элемента струи;  $\gamma = 1 - u_{cr}/u_0$ ;  $u_{cr}$  — критическая скорость хвостового элемента струи, оказывающая влияние на глубину проникания КС в преграду;

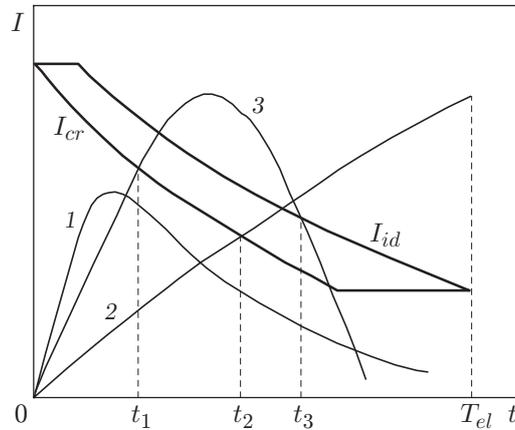


Рис. 6. Влияние электрических импульсов, имеющих различные амплитуду, форму и продолжительность, при воздействии электрического тока на кумулятивную струю:

1–3 — импульсы с различными амплитудой, формой и длительностью; штриховые линии — интервалы времени, на которых происходит разрушение КС

$n$  — показатель, определяемый из эксперимента, то идеальную форму токового импульса можно задать следующим образом:

$$\frac{I_{id}(t)}{I^*} = \begin{cases} \varphi(n), & 0 \leq t \leq t_1, \\ \varphi(n)\psi(n, t), & t_1 \leq t \leq T_{el}. \end{cases}$$

Здесь  $I^* = 2\pi\alpha r_0^2 \sqrt{\rho/\mu_0} u_0/\Delta$  — предельный ток, необходимый для воздействия на головной элемент струи;  $\varphi(n) = 1 - \gamma(\Delta/l_{eff})^n$ ;  $\psi(n, t) = 1 - \gamma_n(T/T_{el}^0)^n$ ;  $\gamma_n = 1 - u_{cr}/u_\Delta$ ;  $T_{el}^0 = T_{el} - t_1$ ;  $T_{el} = \gamma\Delta(1 + l_{eff}u_{cr}/(\gamma\Delta u_0))/u_{cr}$ ;  $u_\Delta$  — скорость элемента струи, находящегося на верхнем электроде, в момент замыкания электродов струей.

Влияние электрических импульсов, имеющих различные амплитуду, форму и продолжительность, при электродинамическом воздействии импульсного тока на КС показано на рис. 6. Если амплитуда тока  $I < I_{cr}$  (кривая 1), то КС не разрушается. Для зависимости, соответствующей кривой 2, разрушение КС будет происходить при  $I > I_{cr}$  с момента  $t = t_2$  до момента  $T_{el}$ , соответствующего моменту выхода элемента КС из электродной системы со скоростью  $u_{cr}$ . Для зависимости  $I(t)$ , соответствующей кривой 3, разрушение КС происходит только в интервале от  $t_1 < t < t_3$ .

Очевидно, что профили тока, приведенные на рис. 2, соответствуют импульсам тока, не обеспечивающим минимальную электрическую энергию, необходимую для уменьшения глубины проникания КС в преграду.

В таблице приведены экспериментальные значения глубины проникания КС в стальную преграду  $h_{exp}$ , соответствующие профилям тока, представленным на рис. 2, и значения глубины проникания, вычисленные по формуле Лаврентьева [16] с учетом растяжения элементов струи с использованием предложенной модели при  $\alpha = 2$ . Для сравнения в таблице приведены также значения  $h$ , вычисленные с использованием моделей развития перетяжечной МГД-неустойчивости, объемного разрушения и модели, учитывающей МГД-неустойчивость и объемное разрушение. Значения глубины проникания КС в стальную преграду, вычисленные по предложенной в данной работе физической модели, хорошо согласуются с экспериментальными данными и результатами вычислений по квазидвумерным нестационарным моделям. Поэтому данную модель можно использовать для

Экспериментальные и теоретические значения  
глубины проникания КС в стальную преграду

Номер экспери- мента	$h_{exp}$ , мм	Предлагаемая модель		Модель объемного разрушения		Модель МГД- неустойчивости		Модель, учитывающая МГД-неустойчивость и объемное разрушение	
		$h$ , мм	$\Delta h/h$ , %	$h$ , мм	$\Delta h/h$ , %	$h$ , мм	$\Delta h/h$ , %	$h$ , мм	$\Delta h/h$ , %
1	79	74	-6	82	4	160	103	82	4
2	91	81	-11	132	45	200	120	98	8
3	147	108	-27	184	25	200	36	200	36
4	160	158	1	200	25	200	25	200	25
5	195	208	7	200	3	200	3	200	3

Примечание.  $\Delta h = h - h_{exp}$ .

проведения экспресс-оценок влияния электрического тока на разрушение КС и вычисления глубин проникания КС в преграду при заданных профилях электрического импульса.

Таким образом, проведенные эксперименты показывают, что, управляя формой и амплитудой токового импульса, при умеренных значениях тока и энергии в источнике можно добиться эффективного разрушения КС и уменьшения глубины проникания КС в преграду в несколько раз.

**3. Оценки джоулева нагрева кумулятивных струй.** Рассматривается задача о джоулевом нагреве КС, проходящей через систему плоских металлических электродов, расположенных перпендикулярно направлению движения струи. Контакт между КС и электродами осуществляется через плазму. Для упрощения задачи в первом приближении можно рассматривать двумерную аксиально-симметричную форму струи и электродов (рис. 7). Поэтому в цилиндрической системе координат  $(r, \theta, z)$  вектор напряженности магнитного поля имеет только одну компоненту  $H_\theta$ . Кроме того, учитывая, что при скоростях движения КС  $V_z > 2$  км/с ток в струе протекает в основном в тонком поверхностном слое и его распределение определяется главным образом скоростью струи, для получения распределения плотности тока в КС в области электродов можно использовать стационарные решения уравнений Максвелла. Используя дополнительно обычные предположения, принимаемые при анализе сильноточных импульсных устройств (токи смещения не учитываются, магнитная проницаемость среды полагается равной магнитной проницаемости вакуума  $\mu_0$ ), из системы уравнений Максвелла получаем уравнение для распределения полного тока  $I(r, z) = 2\pi r H_\theta(r, z)$  в виде

$$\nabla \cdot \frac{1}{r_0 \sigma} \nabla I - \frac{\mu_0 V_z}{r_0} \frac{\partial I}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где  $\nabla = \mathbf{i}_r \partial/\partial r + \mathbf{i}_z \partial/\partial z$ ;  $r_0$  — радиус струи.

В принятой постановке для плотности тока имеем

$$j_r = -\frac{1}{2\pi r_0} \frac{\partial I}{\partial z}, \quad j_z = \frac{1}{2\pi r} \frac{\partial I}{\partial r}.$$

Пренебрегая теплопередачей, находим изменение температуры в струе  $\Delta T(r, z)$ :

$$\Delta T(r, z) = \int_0^{z_{\max}} \frac{j^2}{\rho c \sigma V_z} dz.$$

Здесь  $\rho$ ,  $c$ ,  $\sigma$  — плотность, теплоемкость и электропроводность материала КС соответственно.

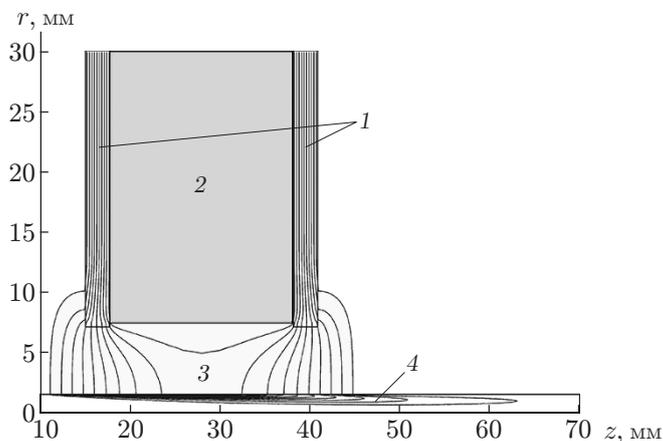


Рис. 7. Распределение полного тока в электродах, плазме и медной струе ( $V_z = 5$  км/с,  $r_0 = 1$  мм):  
1 — электроды, 2 — изолятор, 3 — плазма, 4 — струя

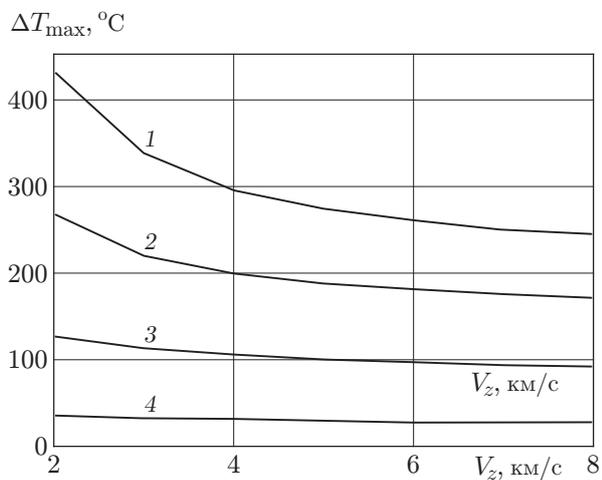


Рис. 8

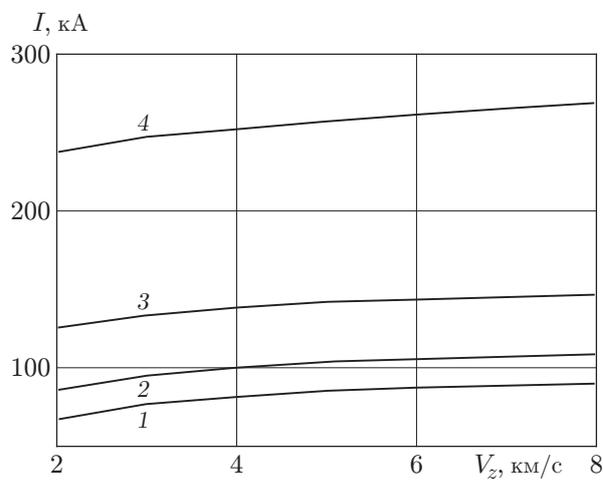


Рис. 9

Рис. 8. Зависимость максимальной температуры медной кумулятивной струи от ее скорости при  $I = 100$  кА и различных значениях радиуса струи:

1 —  $r_0 = 0,7$  мм, 2 —  $r_0 = 0,8$  мм, 3 —  $r_0 = 1,0$  мм, 4 —  $r_0 = 1,5$  мм

Рис. 9. Зависимость полного тока, необходимого для нагрева струи из меди на  $200$  °С, от скорости ее движения при различных значениях радиуса струи:

1 —  $r_0 = 0,7$  мм, 2 —  $r_0 = 0,8$  мм, 3 —  $r_0 = 1,0$  мм, 4 —  $r_0 = 1,5$  мм

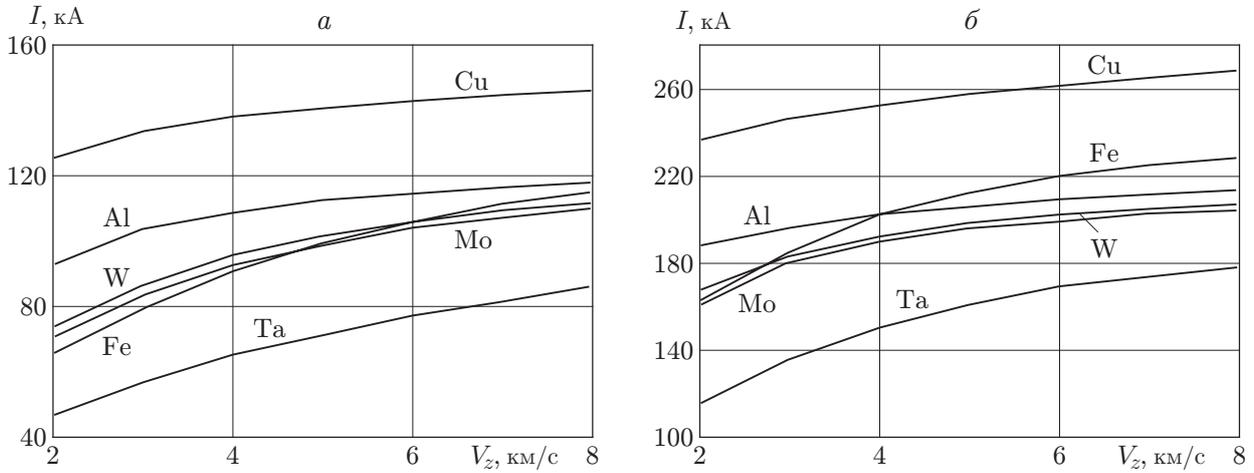


Рис. 10. Зависимость полного тока, необходимого для нагрева кумулятивных струй из Cu, Fe, Al, W, Mo и Ta на 200 °С, от скорости элементов струи с различными радиусами:  
*a* —  $r_0 = 1,0$  мм, *б* —  $r_0 = 1,5$  мм

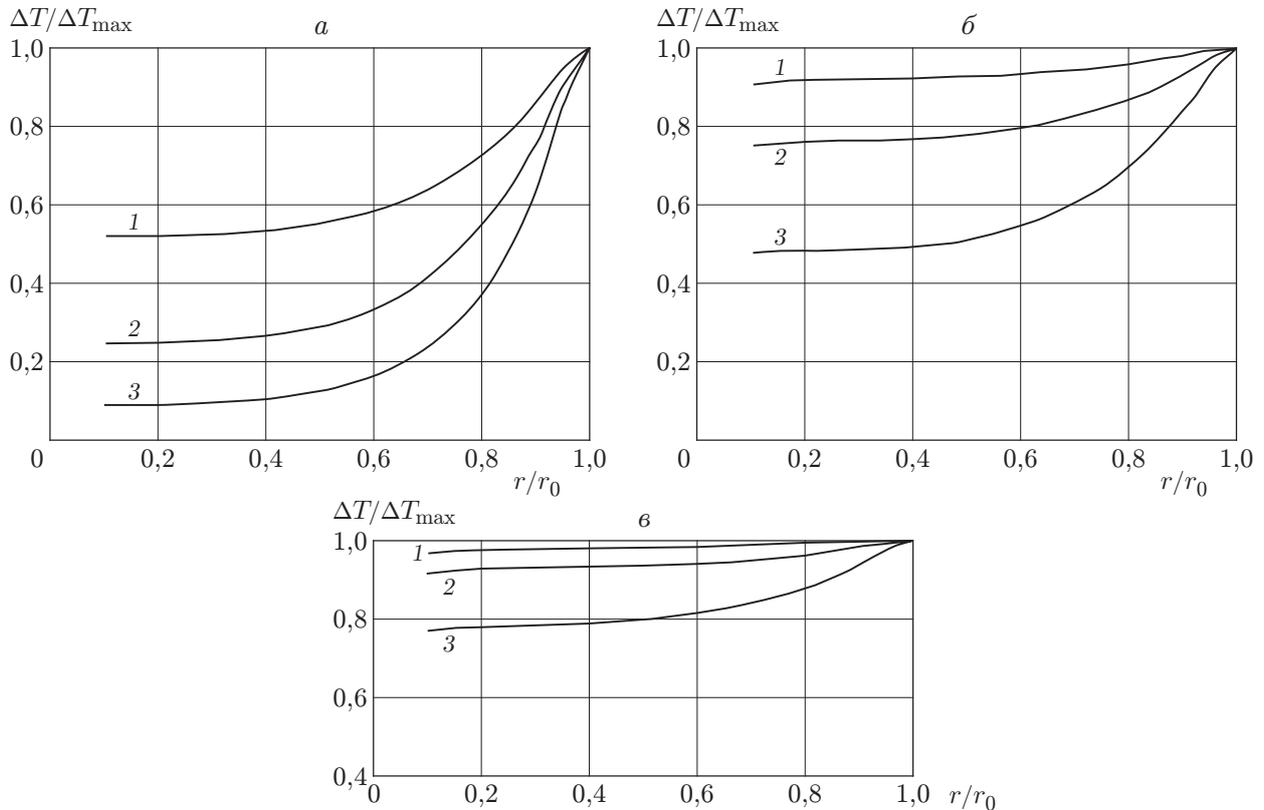


Рис. 11. Распределение температуры по радиусу кумулятивных струй из меди (*a*), молибдена (*б*), тантала (*в*) при  $r_0 = 1$  мм и различных значениях скорости струи:  
 1 —  $V_z = 2$  км/с, 2 —  $V_z = 4$  км/с, 3 —  $V_z = 8$  км/с

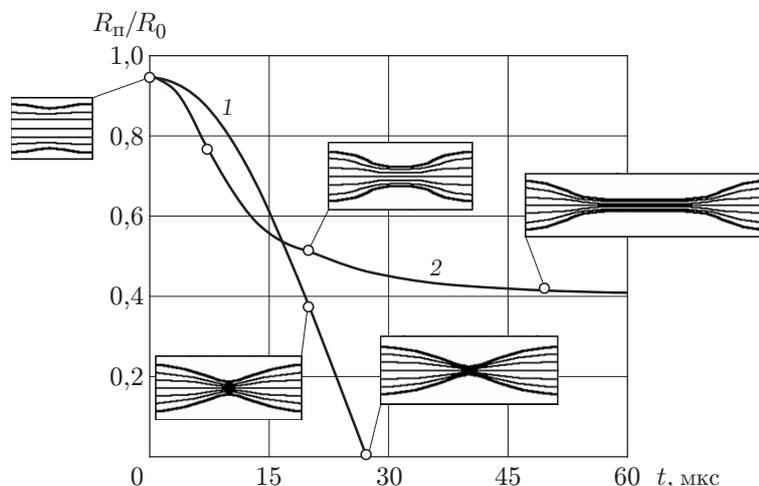


Рис. 12. Изменение отношения радиуса перетяжки  $R_n$  на стадии развития пластической неустойчивости при деформировании элемента кумулятивной струи к начальному радиусу перетяжки  $R_0$ :

1 — без воздействия тока, 2 — при воздействии тока [10]

В расчетах принималось, что начальная температура струи приблизительно равна  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , соответственно средняя по температуре электропроводность струи равна  $\sigma(T) \approx \sigma_0/2$  и остается постоянной в процессе нагрева струи ( $\rho$ ,  $c$  — постоянные величины).

На рис. 8 приведена зависимость максимальной температуры струи при различных значениях ее радиуса  $r_0$ , на рис. 9 — зависимость полного тока, необходимого для нагрева струи на  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , от скорости ее движения при различных значениях радиуса струи  $r_0$ .

На рис. 10–12 представлены результаты вычислений в случае нагрева КС импульсным током.

**Заключение.** В работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований поведения металлических кумулятивных струй при протекании по ним электрического тока.

Эксперименты показывают, что, меняя форму и амплитуду импульса тока, за счет разрушения КС можно уменьшить глубину ее проникания в преграду в несколько раз при умеренных значениях тока и энергии источника. Разрушение КС сопровождается развитием перетяжечной МГД-неустойчивости при движении струи между электродами и объемным разрушением элементов КС после их выхода из электродной системы.

Для случая, когда протекающий по КС электрический ток меньше критического значения, проведен анализ возможности улучшения проникающей способности КС. Рассмотрен процесс нагрева электрическим током КС из различных материалов (Cu, Fe, Mo, Ta, W). Показано, что использование электрического тока для нагрева КС может оказаться перспективным для увеличения глубины проникания КС в преграду.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Швецов Г. А., Матросов А. Д., Ладов С. В. и др. Влияние магнитных полей на работу кумулятивных зарядов // Тр. 14-й Междунар. конф. “Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2013. С. 272–283.
2. Shvetsov G. A., Matrosov A. D., Fedorov S. V., et al. Effect of external magnetic fields on shaped-charge operation // Intern. J. Impact Engng. 2011. V. 38. P. 521–526.

3. **Lei Bin, Qi Wen-Da, Ping Lu, et al.** Research on bending and deviating effects of passive electromagnetic armor acting on shaped-charge jet // Proc. of the 17th Intern. symp. on electromagnetic launch technology, San Diego (USA), July 7–11, 2014. San Diego: IEEE, 2014. P. 60.
4. **Yongfang Huang, Yanjie Cao.** On optimization of passive electromagnetic armor plate spacing // Proc. of the 17th Intern. symp. on electromagnetic launch technology, San Diego (USA), July 7–11, 2014. San Diego: IEEE, 2014. P. 67.
5. **Schünemann B., Schael U., Rauer G., et al.** Rapid recharging power supply for multiple-hit electrical armor // Proc. of the 17th Intern. symp. on electromagnetic launch technology, San Diego (USA), July 7–11, 2014. San Diego: IEEE, 2014. P. 93.
6. **Obukhov V. A., Piskunkov A. F., Svotina V. V.** Investigation of cumulative jet braking inside an obstacle resulting from an electric current pulse // Proc. of the 17th Intern. symp. on electromagnetic launch technology, San Diego (USA), July 7–11, 2014. San Diego: IEEE, 2014. P. 108.
7. **Fowler C. M., Martinez A. R., Hull L. M., Toepfer A. J.** Jet breakup by electromagnetic effects. Los Alamos, 1987. (Rep. / LANL; N LA-UR 94-4282).
8. **Littlefield D. L., Powell J. D.** The effect of electromagnetic fields on the stability of a uniformly plastic jet // Phys. Fluids A. 1990. V. 2, N 12. P. 2240–2248.
9. **Швецов Г. А., Матросов А. Д., Бабкин А. В. и др.** Поведение металлических кумулятивных струй при пропускании по ним импульсного электрического тока // ПМТФ. 2000. Т. 41, № 3. С. 19–25.
10. **Федоров С. В., Бабкин А. В., Ладов С. В. и др.** О возможностях управления кумулятивным эффектом взрыва с помощью электромагнитных воздействий // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36, № 6. С. 126–145.
11. **Taylor R. J.** Stability of twisted magnetic fields in a fluid of finite electrical conductivity // Rev. Mod. Phys. 1960. V. 32, N 4. P. 907–913.
12. **Бреус С. Н.** Об устойчивости жидкого цилиндра с током при конечной проводимости // Журн. техн. физики. 1960. Т. 30, № 9. С. 1030–1034.
13. **Murty G. S.** Instability of conducting fluid cylinder due to axial current // Ark. Fys. 1960. V. 18, N 14. P. 41–250.
14. **Абрамова К. Б., Златин Н. А., Перегуд Б. П.** Магнитогидродинамические неустойчивости жидких и твердых проводников. Разрушение проводников электрическим током // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1975. Т. 12. С. 2007–2022.
15. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002.
16. **Лаврентьев М. А.** Кумулятивный заряд и принцип его работы // Успехи мат. наук. 1957. Т. 12, вып. 4. С. 41–56.

*Поступила в редакцию 12/II 2015 г.*