

## ПРИМЕНЕНИЕ МКГ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ТОКОВОМУ РАЗРУШЕНИЮ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

Г. А. Швецов, Ю. Л. Башкатов, А. Д. Матросов, А. И. Павловский\*,  
Р. З. Людаев\*, Л. Н. Пляшкевич\*, А. М. Шувалов\*, Г. М. Спиров\*,  
Н. П. Шишаев\*\*, В. В. Чивилев\*\*

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

\* ВНИИ экспериментальной физики, 607200 Саров

\*\* ОАО НИИ стали, 127411 Москва

Представлены результаты экспериментов по разрушению кумулятивных струй импульсным током. В качестве источника энергии использовался выпускаемый промышленностью спирально-коаксиальный магнитокумулятивный генератор К-80 с трансформаторным выводом энергии. Обсуждаются особенности работы генератора в проведенных опытах и влияние параметров токового импульса на разрушение и глубину проникания кумулятивной струи в преграду.

**Введение.** Процесс разрушения металлической кумулятивной струи (КС) протекающим по ней электрическим током довольно широко изучается в последнее время как экспериментально, так и теоретически [1–8]. В исследованиях просматриваются два направления. В одном из них поведение КС изучается в сильноточном режиме, при этом основная цель — определить условия максимально возможного разрушения струи и добиться ее полного разрушения. В другом направлении КС исследуется в режиме умеренных токов, основная цель — добиться частичного разрушения КС при возможно меньшей энергии источника тока. При этом допускается некоторое внедрение струи в защищаемую преграду. В работах этого направления есть большой разброс значений энергии источника тока, необходимой для того, чтобы снизить глубину проникания струи в преграду в определенное число раз. Это связано с тем, что из-за развития естественной гидродинамической неустойчивости струя в конце концов сама разрывается на отдельные фрагменты. Если КС подключать к источнику тока за время  $\Delta t$  до момента разрыва струи, то открывается возможность произвольного толкования действенности электрической энергии  $\Delta E$ , вложенной в струю за время протекания электрического тока. При небольшом значении  $\Delta t$  энергия  $\Delta E$  может быть очень малой, а струя тем не менее — разрушенной. Очевидно, что сравнение результатов экспериментов необходимо проводить при едином подходе к условиям проведения экспериментов и конструкции экспериментального устройства.

Поскольку магнитокумулятивные генераторы (МКГ) конкурируют в сильноточных экспериментах с конденсаторными батареями, то представляет интерес изучение возможности их применения в опытах с КС, так как взрывной характер опытов с МКГ сочетается со взрывом кумулятивного заряда. Преимущества МКГ — малые габариты и возможность получения в них больших значений энергии и тока, что позволяет использовать генераторы с кумулятивными зарядами большого и малого калибра и исследовать разрушение КС в обоих вышеуказанных режимах.

Однако между МКГ и конденсаторной батареей имеются два существенных отличия. Если электрическая энергия в конденсаторной батарее перед замыканием струей элек-

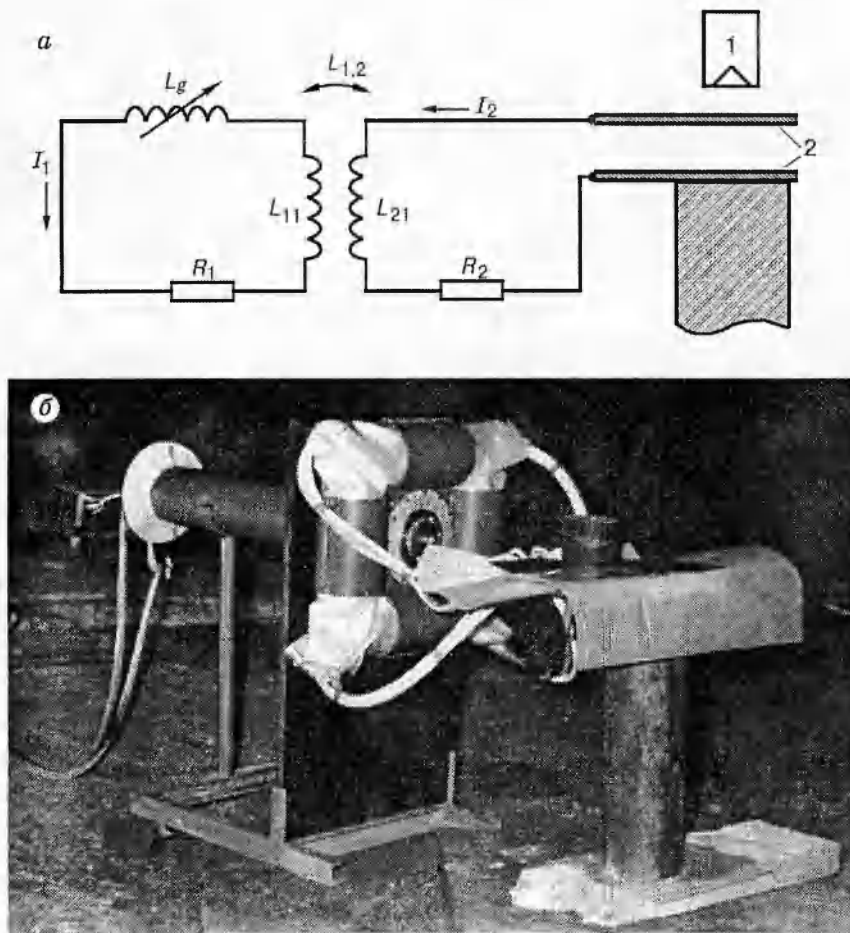


Рис. 1

тродов уже накоплена, то при применении МКГ требуется определенное время, чтобы энергию ВВ превратить в электрическую. Поэтому необходима система синхронизации работы кумулятивного заряда и МКГ. Кроме того, поскольку при одной и той же амплитуде тока значение интеграла действия при разряде конденсаторной батареи, как правило, существенно выше, чем при работе МКГ, то необходимо некоторое обострение токового импульса МКГ.

Для экспериментов с КС можно использовать различные типы МКГ и схемы включения КС в контур МКГ. КС в контур МКГ можно включить как во время, так и по окончании работы МКГ. В последнем случае МКГ работает в режиме зарядки некоторого промежуточного индуктивного накопителя, коммутируемого затем на струю. Однако согласование параметров генератора, промежуточной нагрузки и КС является довольно непростой задачей. Более предпочтительным может оказаться использование МКГ с внешним возбуждением [9] или трансформаторным выводом энергии [10–12].

В данной работе представлены результаты экспериментов с МКГ с трансформаторным выводом энергии. Цель их — показать принципиальную возможность применения МКГ этого типа в экспериментах с КС и выяснить особенности такого использования. Эксперименты проведены с кумулятивными зарядами калибра 55 и 100 мм.

**Схема экспериментов.** Принципиальная схема экспериментов приведена на рис. 1, а, где 1 — кумулятивный заряд, 2 — контактные пластины (электроды), которые подклю-

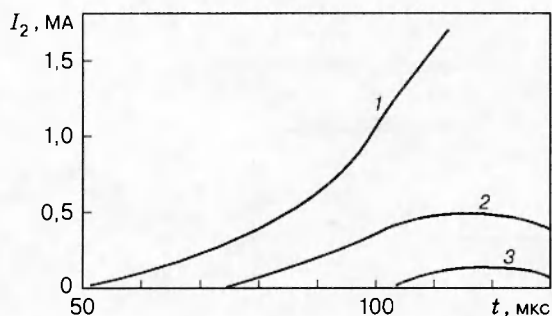


Рис. 2

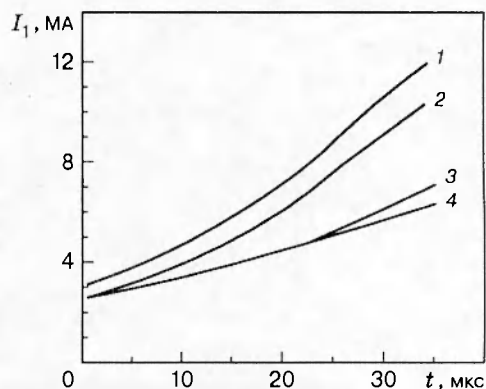


Рис. 3

ны ко вторичной обмотке трансформатора. Остальные обозначения общепринятые. Эксперименты проводились с модифицированным генератором К-80. Фотография генератора перед опытом представлена на рис. 1, б (кумулятивный заряд не показан).

Характеристики генератора К-80 приведены в [10] (начальная энергия 2,0 кДж, энергия в нагрузке 250 кДж). В отличие от генератора К-80, где отношение диаметров спираль/труба равно 2, в модифицированном генераторе это отношение равно 2,5 за счет уменьшения диаметра центральной трубы. В результате предельное значение конечного тока снизилось от  $\sim 14 \div 15$  до  $\sim 12$  МА, а энергия в нагрузке стала около 200 кДж. В генераторе К-80 трансформаторы кабельные, а в описываемом генераторе применен блок цилиндрических проволочных трансформаторов с расположением соленоида вторичной обмотки внутри первичной. Коэффициент связи трансформатора при этом снизился от 0,94 до 0,92, однако трансформатор стал компактнее.

В начале работы генератора (рис. 1, а) вторичная цепь разомкнута, и генератор работает в режиме холостого хода [12]. При этом чем ближе к концу работы МКГ замыкается струей вторичная цепь, тем меньше ток в генераторе и нагрузке и круче фронт токового импульса. По окончании работы МКГ ток в образовавшемся контуре нагрузки еще протекает некоторое время и воздействие на КС продолжается, но из-за влияния разрушающегося трансформаторного узла ток уменьшается довольно быстро (примерно за 30 мкс).

Индуктивность первичной обмотки трансформатора составляет 18 нГн, полная конечная индуктивность первичного контура 18,4 нГн. Количество витков вторичной обмотки трансформатора снижено в опытах до 7,5. Экспериментальная токовая кривая 1 для этого генератора при чисто индуктивной нагрузке 0,15 мкГн приведена на рис. 2, 3.

Индуктивность 0,15 мкГн выбрана такой же, как индуктивность аналогичного устройства в опытах с конденсаторной батареей [3]. Из этих опытов видно, что сопротивление нагрузки, определяемое струей и ее контактами с пластинами, колеблется в опытах с зарядами калибра 55 мм от 5 до 8 мОм, а калибра 100 мм примерно 10 мОм. Такое его значение уже оказывает влияние на работу генератора, но еще не так велико, чтобы не было применимо для оценки работы МКГ приближение эффективной индуктивности. В этом приближении эффективная индуктивность контура генератора в опытах  $L_{1\text{eff}} = L_1 - 11,6$  нГн, а эффективное сопротивление  $R_{1\text{eff}} = R_1 + 48,4$  мОм.

В данном случае, чтобы найти токовую кривую для любого момента времени включения вторичной цепи в ходе работы генератора, достаточно знать только две зависимости

тока  $I_1$  в первичном контуре трансформатора: когда вторичная цепь всегда замкнута и когда она всегда разомкнута. На рис. 3 приведены зависимости  $I_1(t)$  для холостого хода (кривая 4) и при замыкании вторичной цепи КС за 36 и 8 мкс до конца работы генератора (соответственно кривые 2 и 3). При этом ток вторичной цепи  $I_2$  рассматривается как вынужденный и может быть найден по формуле

$$I_2(t) = -I_1 \frac{L_{12}}{L_2} + I_1^* \frac{L_{12}}{L_2} \exp\left(-\frac{R_2}{L_2} t\right) + R_2 \frac{L_{12}}{L_2^2} \exp\left(-\frac{R_2}{L_2} t\right) \int_0^t I_1(t) \exp\left(\frac{R_2}{L_2} t\right) dt,$$

где  $L_1, L_2, R_1, R_2$  — индуктивность и сопротивление первичного и вторичного контуров;  $L_{12}$  — взаимоиנדукция трансформатора;  $I_1^*$  — ток в первичном контуре в момент замыкания вторичной цепи за время  $t^*$  до конца работы МКГ.

Время подрыва кумулятивных зарядов выбиралось таким образом, чтобы КС замкнула контактные пластины в заданное время  $t^*$ . В опытах использовался кумулятивный заряд калибра 55 мм, глубина пробивания  $h_0$  которого в обычной стали  $190 \div 200$  мм, и калибра 100 мм ( $h_0 = 460$  мм).

**Результаты экспериментов.** Данные опытов приведены в таблице.

Значения тока в КС, полученные в опытах 1 и 2, приведены на рис. 2 (кривые 2 и 3), в опытах 3 и 5 — на рис. 4 (кривые 1 и 2).

На рис. 5 представлены фотографии разрезов каверн в стальной преграде, полученных в экспериментах с кумулятивными зарядами калибра 100 мм: *a* — эксперимент без тока, *b-2* — опыты 3–5.

Рис. 6 иллюстрирует разрез каверны в стальной преграде, полученной в опыте 1. В опыте 1 токовый фронт пологий (если в опыте 2 ток 200 кА достигается за 8 мкс, то в опыте 1 — за 18 мкс), поэтому форма каверны определяется начальной частью импульса. В опыте 2 узкий извилистый канал образован в конце токового импульса из-за его недостаточной длительности. При  $36 > t^* > 8$  мкс значения  $h$  будут меньше указанных в таблице.

В экспериментах с зарядами калибра 55 мм с использованием конденсаторной батареи [1–3] при примерно таких же амплитудах тока имеет место большее сокращение  $h$  (в 4 раза). Это объясняется более высоким значением токового интеграла действия конденсаторной батареи по сравнению со значением интеграла действия МКГ.

В заключение отметим следующее. Проведенные опыты продемонстрировали принципиальную возможность использования трансформаторного МКГ для разрушения КС. При

Опыт	$d$ , мм	$t^*$ , мкс	$I_{\max}$ , кА	$h$ , см	$h_0/h$
1	55	36	600	5,5	3,5
2	55	8	200	5,5	3,5
3	100	13	290	31	1,5
4	100	16	350	25	1,9
5	100	26	430	27	1,7

Примечание.  $d$  — диаметр кумулятивного заряда,  $h$  — глубина пробивания в экспериментах с током.

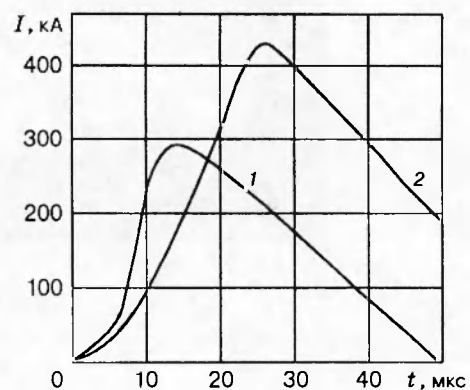


Рис. 4

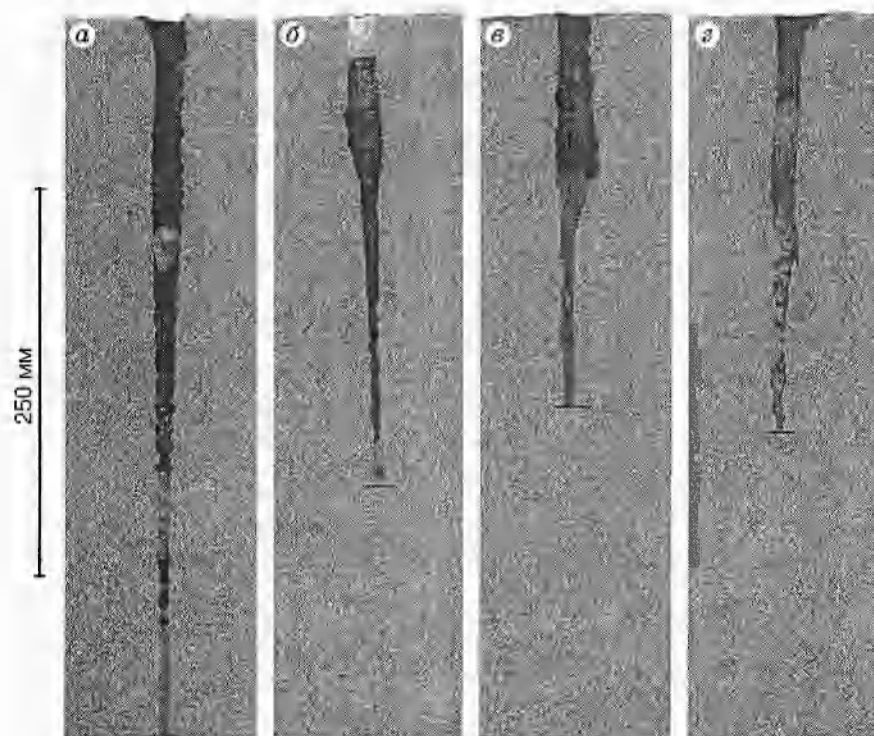


Рис. 5

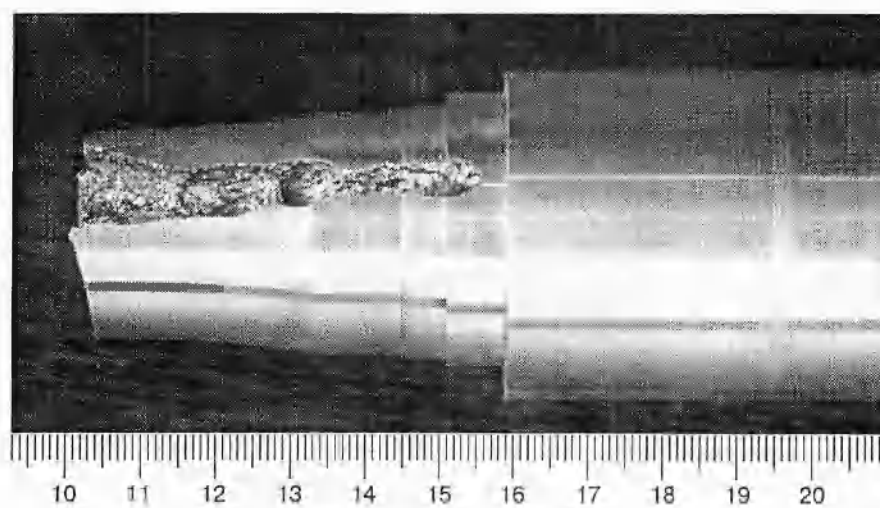


Рис. 6

включении КС в контур МКГ без трансформатора (например, в цепь высокоиндуктивного спирального МКГ) трудности, по-видимому, будут более существенными.

Если проэкстраполировать результаты проведенных опытов на более крупные заряды (калибра 200 мм и более), то можно предположить, что для воздействия на КС от таких зарядов потребуется токовый импульс с амплитудой  $2,5 \div 3$  МА. Такой импульс был получен от трансформаторного генератора типа К-160 [10] с вторичной обмоткой, содержащей 5 витков. При использовании модифицированного генератора К-160 с отношением диаметров спираль/труба, равным 2,5, в чисто индуктивной нагрузке 0,2 мкГн был генерирован ток 3,3 МА, а с отношением диаметров спираль/труба, равным 2, ток возрастает до 4,3 МА. Указанные значения тока и продолжительность электрического импульса вполне достаточны для опытов с крупнокалиберными зарядами.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Shvetsov G. A., Matrosov A. D., Pavlovskii A. I. Current instability of shaped-charge jets // Proc. 10th Pulsed Power Conf., USA, Albuquerque, 1995.
2. Матросов А. Д., Швецов Г. А. Экспериментальное исследование токовой неустойчивости кумулятивных струй // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 4. С. 9–14.
3. Павловский А. И., Пляшкевич Л. Н., Шувалов А. М., Бродский А. Я. Экспериментальные исследования разрушения кумулятивной струи импульсом тока // ЖТФ. 1994. Т. 64, № 2. С. 76–82.
4. Fowler C. M., Martinez A. R., Hull L. M., Toepfer A. J. Jet Breakup by Electromagnetic Effects. Los Alamos, 1987 (Report / LANL; N LA-UR 94-4282).
5. Pollock C. E. Electromagnetic effect on the natural hydrodynamic instability of stretching, high velocity, metallic jets // Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications / M. Cowan, R. B. Spilman (Eds), N. Y.: Nova Sci., 1994. P. 309–316.
6. 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.
7. Littlefield D. L. Finite conductivity effects on the MHD instabilities in uniformly elongating jets // Phys. Fluids A. 1991. V. 3, N 6. P. 1666–1673.
8. Littlefield D. L. Thermomechanical and magnetohydrodynamic stability of elongating plastic jets // Phys. Fluids A. 1994. V. 6, N 8. P. 2722–2729.
9. Швецов Г. А., Матросов А. Д. Взрывной МК-генератор с внешним возбуждением // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Приложения / Под ред. В. М. Титова, Г. А. Швецова. М.: Наука, 1984. С. 263–264.
10. Pavlovskii A. I., Lyudaev R. Z., Plyashkevich L. N., et al. Magnetocumulative generator with a transformer output of energy // Megagauss Physics and Technology / P. J. Turchi (Ed.). N. Y.; L.: Plenum Press, 1980. P. 611–626.
11. А. с. № 266100. Магнитокумулятивный генератор // Открытия. Изобретения. 1970. № 11.
12. Пляшкевич Л. Н., Жильцова И. Л., Рымарь О. В. Моделирование магнитокумулятивного генератора с трансформаторным отводом энергии // Электричество. 1993. № 7. С. 17–21.

Поступила в редакцию 28/X 1996 г.