

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ

УДК 532.52+533.95

А. Д. Матросов, Г. А. Швецов

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

Введение. Гидродинамическая теория формирования кумулятивных струй была разработана М. А. Лаврентьевым [1, 2] и Г. Биркгоффом с коллегами [3]. В [2] отмечено, что при работе кумулятивного заряда с произвольным распределением импульса различные элементы струи могут иметь разные скорости, струя в полете будет в одних своих участках сжиматься, а в других растягиваться. Результат неустойчивости кумулятивной струи — уменьшение глубины проникания при удалении заряда от преграды. Для конических облицовок скорость головной части может достигать 10 км/с, температура струи порядка $500 \div 900$ °С [4, 5]. Рентгенографические исследования показали, что вдоль кумулятивной струи почти всегда наблюдается однородный градиент скорости от головной к хвостовой части. Градиент скорости приводит к растяжению струи. Из-за растяжения вдоль струи развиваются серии поверхностных возмущений, которые приводят к разрушению кумулятивной струи на отдельные фрагменты.

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования поведения кумулятивных струй при пропускании по ним электрического тока. Обнаружено, что при превышении определенных значений тока, производной тока и времени электромагнитного воздействия кумулятивные струи начинают разрушаться на отдельные фрагменты. Эксперименты проведены с кумулятивными зарядами с коническими медными выемками диаметром от 30 до 100 мм. Характер разрушения кумулятивных струй от зарядов различного калибра оставался качественно одним и тем же. Основной причиной, по мнению авторов, является ускоренный рост при электромагнитном воздействии исходных первоначально малых возмущений формы боковой поверхности кумулятивной струи. Ускоренное развитие перетяжной неустойчивости в экспериментах с током приводит к более раннему разрыву кумулятивной струи на фрагменты по сравнению с временем разрыва струи без тока. Представленные в работе экспериментальные результаты были получены в конце 70-х — начале 80-х годов.

Физические предпосылки. Прежде чем перейти к описанию схемы проведения экспериментов и их результатов, сделаем несколько предварительных замечаний.

1. Взаимодействие протекающего по проводнику тока с собственным магнитным полем вызывает радиальные и аксиальные силы, под действием которых проводник сжимается в радиальном направлении и одновременно (при наличии сужений) сжимается и растягивается в аксиальном направлении (рис. 1). Следует отметить, что давление магнитного поля $p = B^2/2\mu_0 = \mu_0 I^2/8\pi^2 r^2$ (B — индукция магнитного поля, I — электрический ток, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, r — радиус струи) в зоне сужений может быть значительно больше, чем в зонах выпуклостей.

2. Определим величину магнитного поля, при котором давление магнитного поля со-

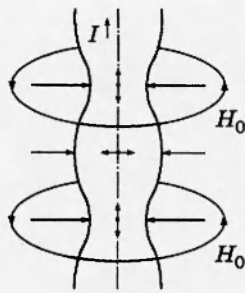


Рис. 1

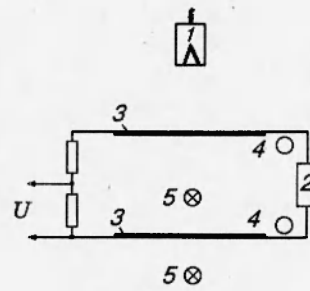


Рис. 2

Материал	$Y \cdot 10^9$, Па	B_Y , Тл	$(I/r_0)Y$, кА/мм
Алюминий (отожженный)	0,022	7,4	37,3
Серебро (отожженное)	0,02 ÷ 0,03	7,9	39,7
Медь (отожженная)	0,07	13,3	66,5
Медь	0,2	22,6	112,3
Никель (отожженный)	0,08	14,2	71,1
Титан (особо чистый)	0,1	15,8	79,4
Железо (отожженное)	0,17	20,7	103,6
Сталь 3	0,22	23,8	119,2
Тантал (отожженный)	0,4	31,8	158,9
Молибден (отожженный)	0,57	37,7	189,7
Вольфрам (деформированный)	0,76	43,9	219,0

здает в металле механические напряжения, отвечающие пределу текучести Y , как поле текучести $B_Y = \sqrt{2\mu_0 Y}$. Для ряда материалов значения полей текучести и соответствующих линейных плотностей тока I/r на поверхности цилиндрических проводников приведены в таблице. Физический смысл B_Y очевиден. При $B < B_Y$ имеют место упругие деформации, а при $B > B_Y$ — пластические деформации. В последнем случае можно ожидать ускоренного роста перетяжек и разрыва металлических кумулятивных струй при относительно небольших токах.

Следует заметить, что приведенные в таблице значения B_Y и $(I/r)Y$ нужно рассматривать лишь как оценки, так как они получены для статических значений пределов текучести при температуре 20 °С [6]. В случае с кумулятивной струей для оценки поля текучести необходимо использовать значения динамического предела текучести материала, который, как известно, несколько больше статического, и учесть зависимость предела текучести от начальной температуры струи. Для примера отметим, что при 600 ÷ 1000 °С предел текучести меди уменьшается в 5–20 раз [7], соответственно можно ожидать уменьшения в несколько раз величин B_Y и $(I/r)Y$.

Если сделанные замечания и оценки верны, то при токах $(3 \div 5) \cdot 10^5$ А и $r_0 = 1$ мм (r_0 — средний радиус) предел текучести будет составлять лишь несколько процентов от давления магнитного поля. При этих условиях кумулятивную струю представляется возможным рассматривать как несжимаемую проводящую идеально пластическую жидкость.

Схема экспериментов. Принципиальная схема экспериментов приведена на рис. 2, где 1 — кумулятивный заряд, 2 — источник электромагнитной энергии, 3 — электроды, 4 — индуктивные датчики для измерения тока и производной тока разряда, 5 — места рентгеновской съемки. Опыты проводились с кумулятивными зарядами с коническими



Рис. 3

медными выемками и калибром от 30 до 100 мм. В качестве источника энергии в экспериментах использовалась конденсаторная батарея с зарядным напряжением до 5 кВ и емкостью до 20 мФ. Ток по кумулятивной струе начинал протекать с момента замыкания электродов струей. В экспериментах изменялись ток, производная тока разряда ($100 \div 500$ кА, $3 \cdot 10^9 \div 10^{11}$ А/с), продолжительность электрического импульса, время воздействия на различные элементы струи и другие параметры. Рентгенографирование кумулятивной струи в свободном полете и в преграде (алюминий) осуществлялось с помощью рентгеновской импульсной установки ПИР-100/240 с экспозицией 100 нс. Рентгенографирование в экспериментах с током и без тока производилось с точностью не хуже 0,5 мкс в одно и то же время. Влияние воздействия электрического тока на кумулятивную струю дополнительно отслеживалось по глубине проникания струи в преграду.

Экспериментальные результаты. На рис. 3 приведены рентгенограммы двух опытов с кумулятивными зарядами калибром 50 мм (*а* — эксперимент без тока, *б* — эксперимент с током (450 кА)). Материал преграды — алюминий. Преграда являлась одним из электродов. Глубины каверн к моменту съемки примерно одинаковы. В эксперименте с током струя разрушилась на отдельные фрагменты.

На рис. 4 представлены попарно рентгенограммы струи без тока и с током, сделанные в различные моменты времени. Начиная с рис. 4, *б*, на рентгенограммах видно, что кумулятивные струи в экспериментах с током имеют разрывы перед нижним электродом с заметным утолщением по диаметру струи над разрывами. После прохождения нижнего электрода струя распадается на отдельные фрагменты с размерами в аксиальном направлении, равными примерно 1–3 диаметрам струи. Фрагменты расширяются в радиальном направлении, достигая 5–10 диаметров струи в тех же сечениях, что и в экспериментах без тока. Качественно картина разрушения кумулятивных струй от зарядов калибром 30; 50; 100 мм одна и та же. На рис. 5 представлены рентгенограммы струй от кумулятивных

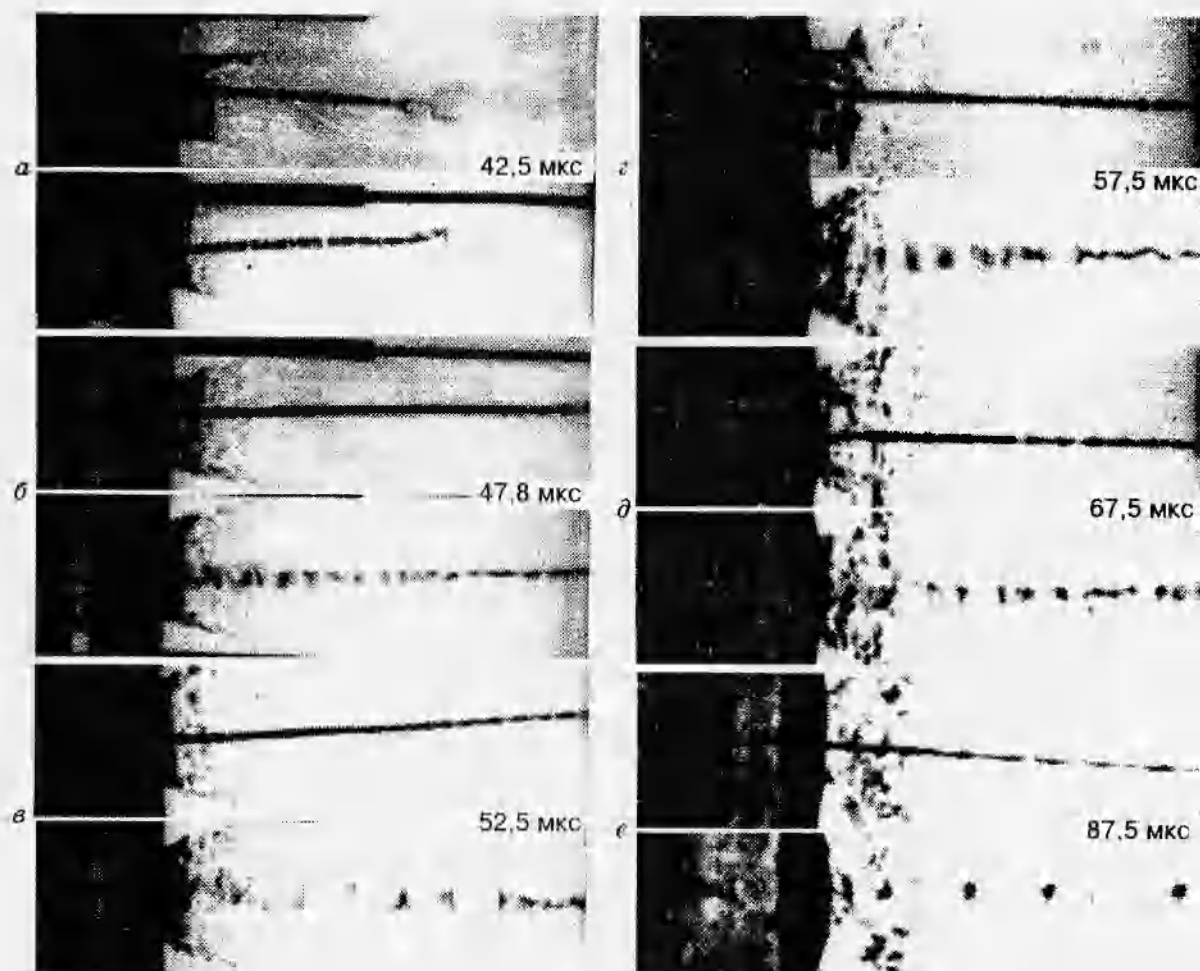


Рис. 4

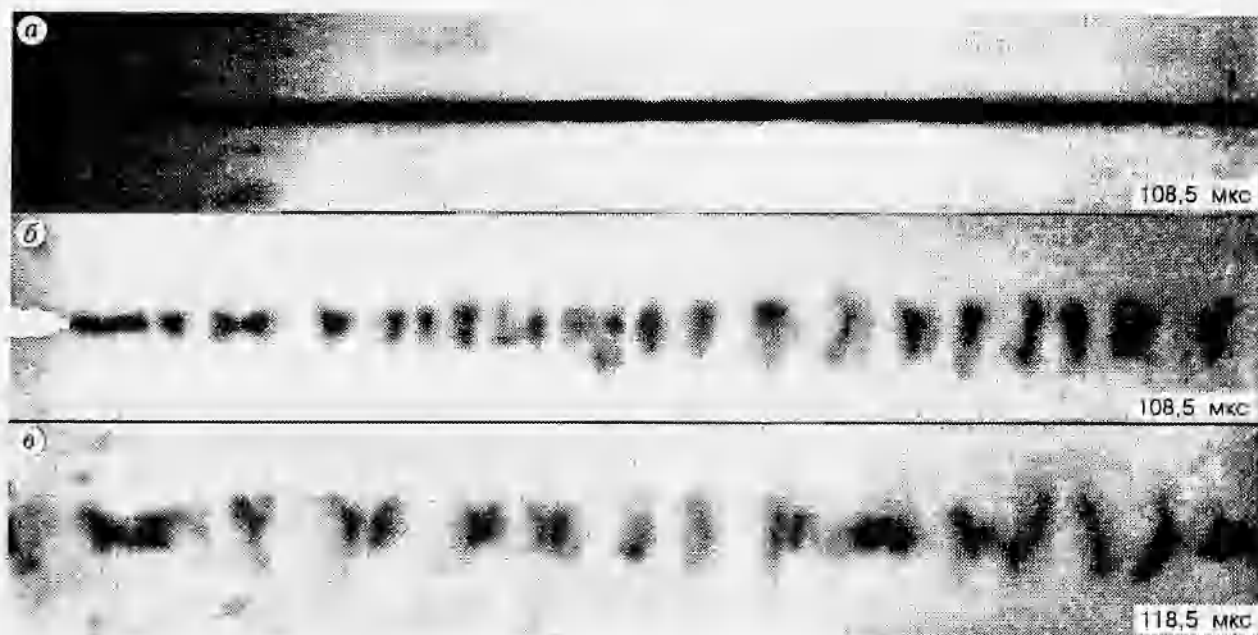


Рис. 5

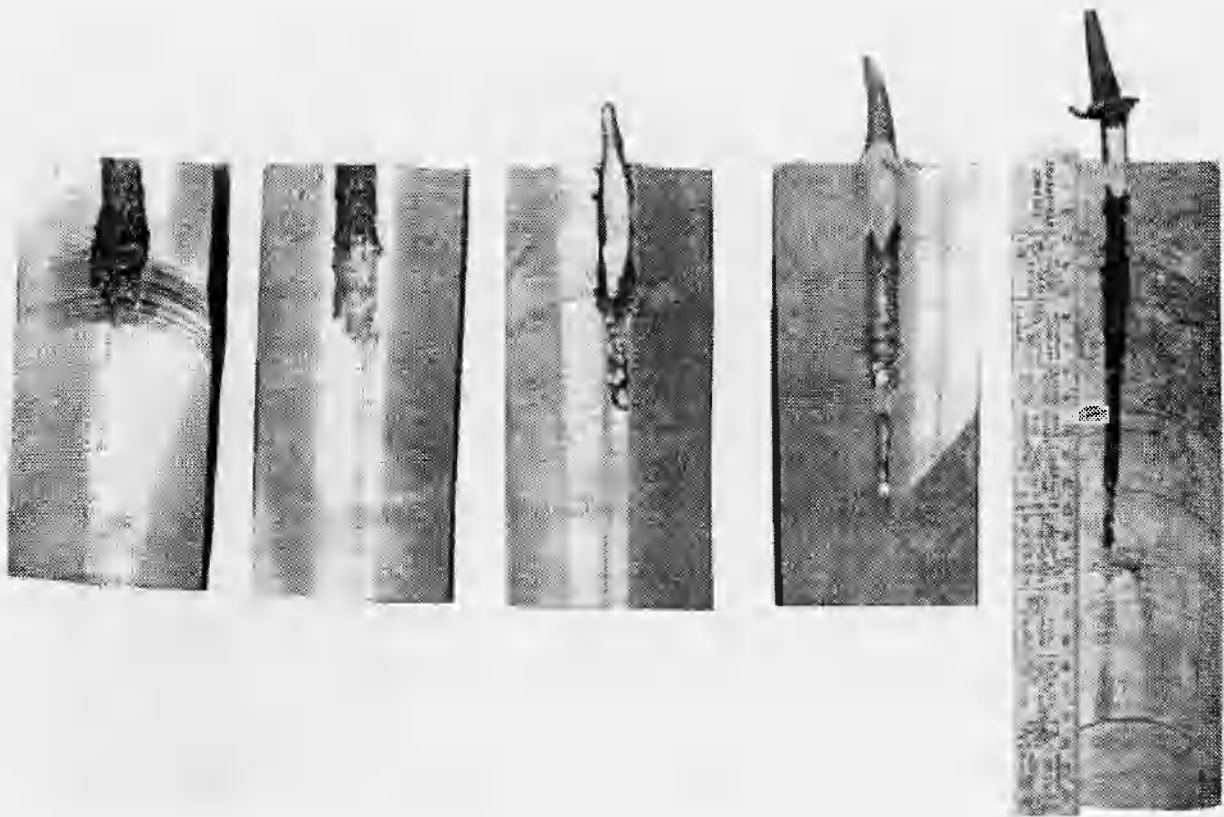


Рис. 6



Рис. 7

зарядов калибром 100 мм (*a* — эксперимент без тока, *б, в* — с током).

Анализ рентгенограмм, сделанных в одни и те же моменты времени, показывает, что количество перетяжек в струе без тока и фрагментов в экспериментах с током достаточно хорошо совпадает. На рис. 5,*а* видимых перетяжек 10, на рис. 5,*б* на такой же базе 11 фрагментов.

Описанное катастрофическое поведение кумулятивных струй при пропускании по ним электрического тока приводит к уменьшению глубины каверны в преграде в несколько раз. Причем этим процессом можно управлять, изменяя амплитуду тока, время его нарастания и продолжительность электрического импульса. На рис. 6 и 7 приведены глубины каверн соответственно в стальной и алюминиевой преградах в зависимости от амплитуды тока разряда при одних и тех же производной тока и длительности электрического импульса.

Таким образом, проведенные исследования показали, что кумулятивные струи неустойчивы в магнитном поле аксиального тока. Возникающие при протекании электрического тока по кумулятивной струе эффекты могут представлять интерес как с практической точки зрения (уменьшение глубины проникания в преграду), так и с методической при изучении поведения материала и физических характеристик кумулятивных струй.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаврентьев М. А. Основы теории кумулятивных зарядов и их бронебойного действия // Изв. Артиллерийской академии. 1948. Т. 56. С. 3–21.
2. Лаврентьев М. А. Кумулятивный заряд и принцип его работы // Успехи мат. наук. 1957. Т. 12, вып. 4. С. 41–56.
3. Birkhoff G., MacDougall D., Pugh E., Taylor G. Explosives with lined cavities // J. Appl. Phys. 1948. V. 19, N 6. P. 563–582.
4. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
5. Walters W. P., Zukas J. A. Fundamentals of Shaped Charges. N. Y.: John Wiley and Sons, 1989.
6. Физические величины. Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мелихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Пресняков А. А. Локализация пластической деформации. Алма-Ата: Наука КазССР, 1981.

Поступила в редакцию 25/IV 1995 г.
