

## РАЗВИТИЕ ПЕРЕТЯЖЕК В ПЛАЗМЕ ВЗРЫВАЮЩИХСЯ ПРОВОЛОЧЕК

Г. В. Иваненков, А. Р. Мингалеев, С. А. Пикуз, В. М. Романова,  
В. Степневски, Т. А. Шелковенко, К. Ях

*Приводятся результаты МГД расчетов динамики плазмы взрывающихся проволочек. Они свидетельствуют о формировании квазипериодической структуры перетяжек в процессе их конкуренции и о тенденции к появлению разрывов плазменного шнура. Результаты сравниваются с экспериментом.*

В исследованиях Z-пинча важная роль отводится численному моделированию этого явления. Особое внимание уделяется эволюции перетяжки плазменного шнура. Расширение разнообразия типов пинчей ведет к задаче о совместном развитии совокупности перетяжек. Такая задача возникает, например, при нагрузке мощных наносекундных генераторов взрывающимися проволочками. Она и составляет предмет настоящей работы.

Метод численного решения использует вариант крупных частиц, описанный в /1, 2/. Он апробирован на осесимметричных задачах механики сплошных сред, включающих модели вязкопластического течения при кумуляции /1, 2/ и пробивании металлических мишеней /3/, столкновения крупного астероида с Землей /4/. В работе /5/ метод применен к динамике отдельной перетяжки шнура плазмы взрывающихся проволочек как в идеальной МГД модели, так и учитывающей процессы переноса по Брагинскому, чернотельного излучения и многократной ионизации. Расчеты по неидеальной модели пока не удалось довести до времен, необходимых для сравнения с данными эксперимента, и в настоящей работе использована модель идеальной МГД.

Примем, что ток однороден в сечении и линеен во времени, достигая 300 кА за 100 нс (отсчет времени ведем от момента максимального разлета продуктов взрыва, условно 10 нс, когда ток равен 10 кА, а радиус шнура  $\alpha_0 = 250$  мкм). Проволочка вольфрамовая, погонное число ионов  $2 \cdot 10^{17}$  см<sup>-1</sup>, уравнение состояния — адиабата, давление предполагается равным нулю на границе плазмы, возмущения развиваются из малой ( $\leq 5\%$ ) случайной неоднородности начальной плотности.

Результаты расчетов приведены на рис. 1 и в табл. 1 для характерных моментов времени: 21 нс — наибольшего разгона в первом сжатии шнура, 27 нс — первого сжатия, 31 нс — наибольшего разгона при последующем расширении плазмы, 35 нс — максимального разлета, оцененного по разгрузке до наименьшего давления, и 39 нс — наибольшего разгона во втором сжатии. В табл. 1 даны параметры двух перетяжек плазменного шнура, имеющие следующий смысл:  $V$  и  $v_r$  —

магнитная индукция и радиальная скорость на границе плазмы,  $p$  и  $v_z$  — давление и наибольшее значение аксиальной скорости на оси.

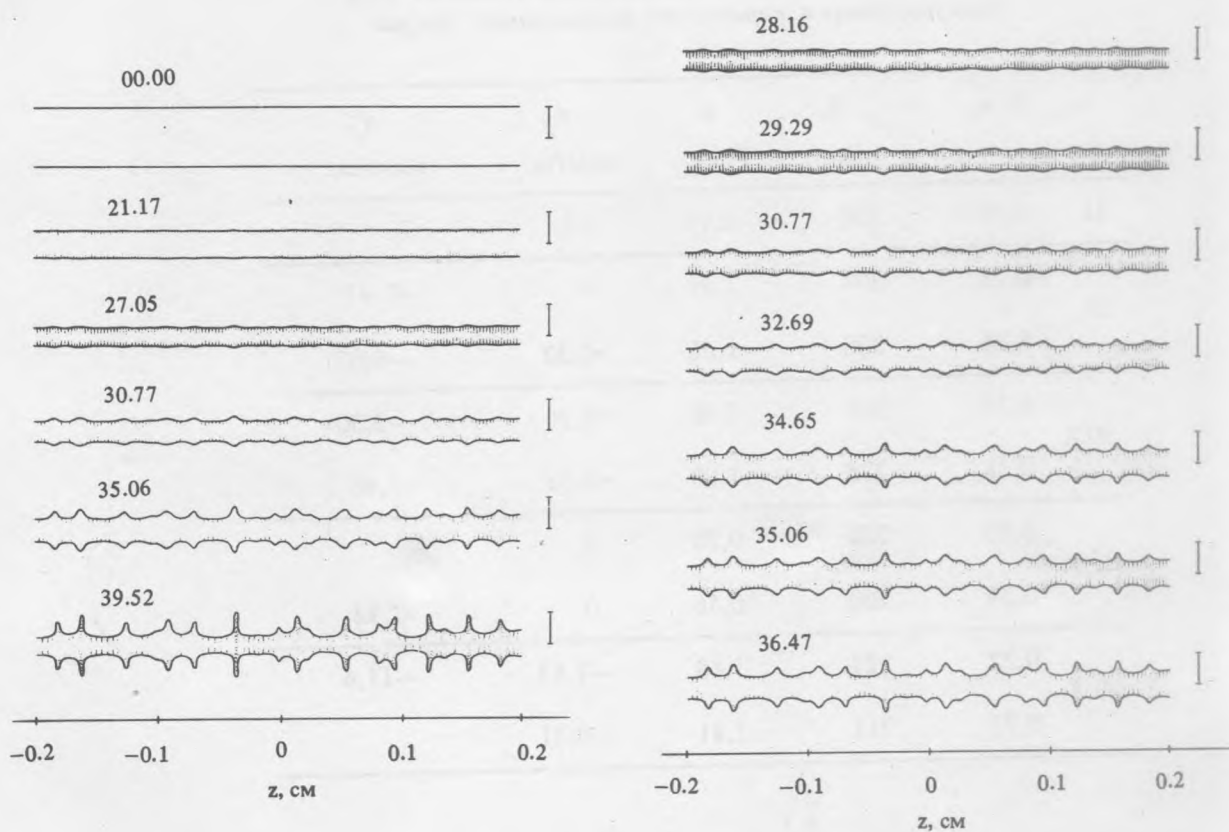


Рис. 1. Общая картина развития перетяжек из малой случайной неоднородности начальной плотности плазменного шнура. Числа у кривых — время в наносекундах.

Рис. 2. Быстрое развитие МГД неустойчивости в ходе разлета плазмы после первого сжатия. Числа у кривых — время в наносекундах.

Т а б л и ц а 1

Параметры сжатия в минимальных сечениях двух конкурирующих перетяжек плазменного шнура

t, нс	$\alpha/\alpha_0$	B, кГс	p, Мбар	$v_r$ , мкм/нс	$v_z$ , мкм/нс
21	0,45	220	0,78	+15	0
27	0,28	304	1,51	0	+0,97
	0,29	308	1,56	+0,30	-0,02
30,8	0,30	278	1,00	+2,96	-2,30
	0,31	275	1,00	+3,52	+3,46
35	0,33	230	0,70	0	
	0,34	200	0,56	0	+2,92
39,5	0,22	227	1,18	-7,63	-11,6
	0,23	211	1,81	-9,41	

Как видно из рис. 1, первое сжатие довольно однородно по оси. Весьма умеренный темп развития возмущений сохраняется вплоть до смены знака ускорения при разлете испытываемой сжатие плазмы. Торможение расширения и последующее ускоренное новое сжатие ведут к быстрому развитию МГД нестабильности с обратным инкрементом 1—2 нс (рис. 2). К началу торможения второго сжатия неустойчивость Релея — Тейлора приводит к резко неоднородной форме шнура плазмы. Этот момент, как известно эмпирически, характеризуется появлением существенных эффектов переноса, включая излучение, что делает неоправданным дальнейший расчет. В данном случае это выражается в малости числа крупных частиц, остающихся в области

наибольшего сжатия перетяжек, в связи с чем здесь возрастает роль флуктуаций и обусловленных ими неустойчивостей. Это наблюдается после 40 нс, когда по расчету давление достигает 4,8 Мбар. В то же время, краткость торможения позволяет сравнить рассчитанную картину с экспериментальной (рис. 3) и убедиться в их хорошем качественном совпадении.

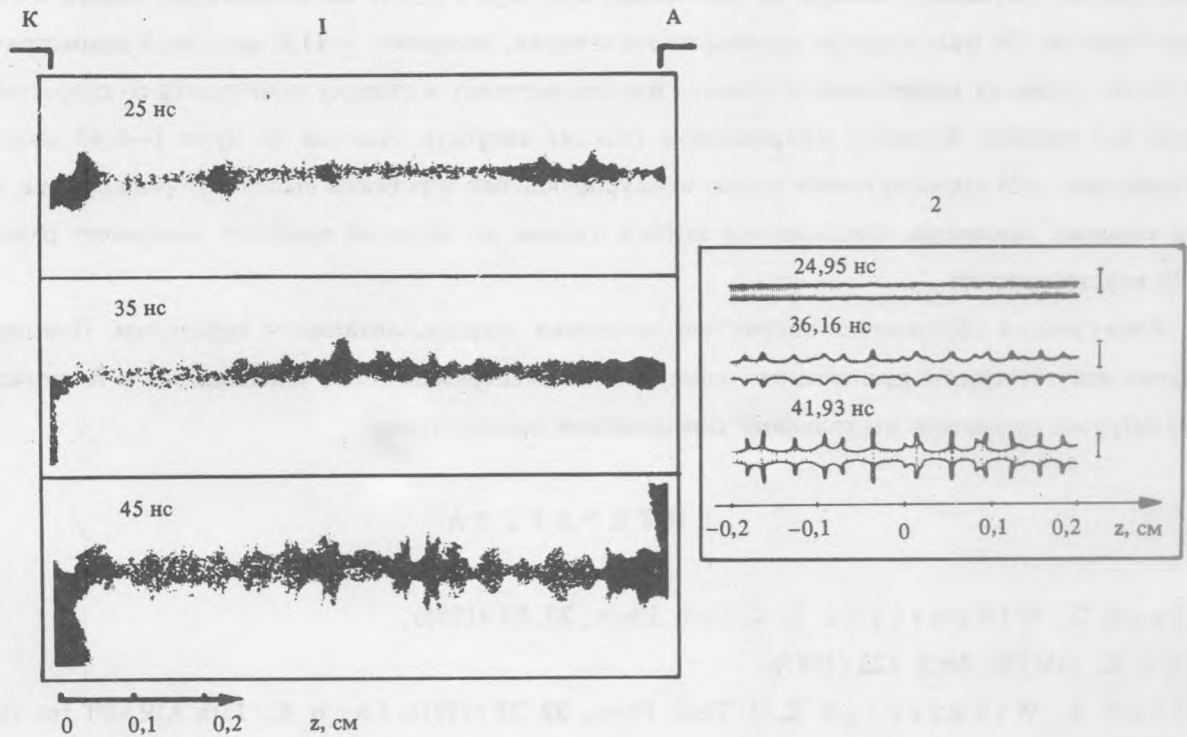


Рис. 3. Сравнение экспериментальных кадров (1) и рассчитанных конфигураций (2) плазменного шнура.

В эксперименте применялся сильноточный генератор БИН с параметрами 250 кА, 400 кВ, 100 нс, близкими к принятым в расчете. Материал взорванной проволоки — вольфрам, диаметр — 8 мкм, длина — 1 см. Параметры полученной плазмы наблюдались на обычном для этого типа экспериментов уровне: электронная температура — несколько кэВ, их плотность  $10^{22} - 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ; регистрировалось излучение ионов  $W^{+46}$  в диапазоне 4 — 6 Å.

И в расчете, и в эксперименте формируется резко неоднородная форма шнура: развиваются глубокие впадины и дискообразные выбросы плазмы, указывающие на тенденцию к обострению профиля границы. Это имеет место и в известном аналитическом решении задачи о формировании перетяжек, найденном в классе чаплыгинских неустойчивостей /6/. В отличие от этой модели в

нашем случае, как и в эксперименте, наблюдается спонтанное формирование квазипериодической структуры перетяжек. В связи с этим отметим связь такого обострения с обрывом перетяжки и ускорением заряженных частиц.

Важно, что в расчетах динамики совокупности перетяжек проявляется конкуренция, выделяющая две области сжатия, разделенные промежуточной перетяжкой. Это ведет к несимметрии вытекания плазмы из перетяжек. Так, при  $t \approx 39,5$  нс скорость вытекания в точке, удаленной на 100 мкм влево от минимального сечения, достигает  $-11,6$  мкм/нс, в симметричной ей точке справа от минимального сечения плазма вытекает в сторону конкурента со скоростью не более  $8,4$  мкм/нс. В самом минимальном сечении скорость отлична от нуля ( $-6,43$  мкм/нс). Отсюда ясно, что промежуточная между конкурирующими перетяжка выполняет роль буфера, куда под высоким давлением сбрасываются потоки плазмы из областей наиболее успешного развития МГД неустойчивости.

Конкуренция обусловлена общностью источника энергии, питающего перетяжки. Повышение сжатия искусственным исключением конкуренции экспериментально наблюдалось в X-пинче /7/ при нагрузке генератора несколькими скрещенными проволочками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Jach K, Włodarczyk E. J. Tech. Phys., 27, 85 (1986).
2. Ях К. ПМТФ, № 2, 123 (1987).
3. Jach K, Włodarczyk E. J. Tech. Phys., 32, 35 (1991); Jach K. 11th AIRAPT Int. Conf., v. 4, p. 198, 1989.
4. Ях К., Мрочковский М., Волянски П. Труды 1-го Всесоюзного совещания по теме "Астероидная опасность". С.-Петербург, 1991.
5. Jach K, Mroczkowski M, Stepiński W. J. Tech. Phys., 32, 125 (1991).
6. Жданов С. К., Трубников Б. А. Квазигазовые неустойчивые среды. М., Наука, 1991.
7. Захаров С. М. и др. Письма в ЖТФ, 8, 1060 (1982).

Поступила в редакцию 9 сентября 1992 г.