

катода приводит к нарушению его колебательного движения, что сопровождается уменьшением уровня мощности излучения и срывом генерации.

Таким образом, в триоде с виртуальным катодом коаксиального типа возможна генерация мощных СВЧ импульсов, которая связана, как и в системе с плоским катодом и анодом, с колебанием виртуального катода.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В. и др. А.С. № 1522317 // БИ № 42, 1989.  
[2] Григорьев В.П., Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В. // Физика плазмы, 1988. Т. 14. В. 2. С. 210.

Научно-исследовательский институт ядерной физики при Томском политехническом институте им. С.М. Кирова

Поступило в Редакцию  
17 июня 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 22

26 ноября 1990 г.

03; 05.1

© 1990

### ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЙ В ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛНАХ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОННЫХ ПУЧКОВ

О.Ю. Воробьев, А.Л. Ни,  
В.Е. Фортон

В последнее время широко изучаются возможности применения сильнотоочных релятивистских электронных (РЭП) и высокоэнергетических ионных пучков (ИП) для генерации в конденсированном веществе высоких импульсных давлений с целью исследования теплофизических свойств вещества в экстремальных состояниях [1-4].

При воздействии пучка на конденсированную мишень вследствие объемного энерговыделения образуется область высокого давления, значение которого определяется плотностью поглощенной энергии. В частности, для протонных пучков с плотностью мощности  $Q < 10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> характерное давление достигает величин мегабарного диапазона [5]. В процессе взаимодействия происходит перераспределение тепловой энергии, часть которой переходит в энергию движения ударно-сжатого вещества и плазменной короны.

Более высокие давления можно получить с помощью ИП, если использовать его энергию для разгона конденсированных ударников с последующим их соударением с исследуемой мишенью. В [5] для разгона лайнера была предложена система, состоящая из двух слоев поглощающих энергию пучка (тампера и абсорбера) и лайнера, разгоняемого под действием высокого давления в абсорбере. Тампер препятствует разлету материала абсорбера, что приводит к увеличению времени существования области высокого давления (следовательно, повышает эффективность метательной системы). С этой точки зрения ясно, что материал тампера должен быть плотнее абсорбера. С другой стороны, уплотнение тампера может привести к уменьшению энергии, выделяющейся в абсорбере, а следовательно к снижению уровня давления. Таким образом, возникает оптимизационная задача о выборе материалов и размеров слойки с целью получения максимальных скоростей метания. Одним из путей решения этой проблемы является параметрическое исследование задачи на ЭВМ. Численный анализ важен и для выяснения поведения лайнера при разгоне, поскольку одним из физических ограничений существующих метательных систем является разрушение, либо испарение лайнеров. Плавление и испарение приводит к появлению неустойчивости Релея-Тейлора.

В настоящей работе были проведены одномерные численные расчеты воздействия пучков протонов с энергиями 3 МэВ и длительностью 20 нс на слоистые мишени с целью выяснения возможностей применения ИП для разгона тонких ударников и генерации мощных импульсов давления. Расчеты выполнялись методом Годунова [6] в подвижной сетке с выделением фронта ударной волны. Уравнения движения конденсированной среды замыкались широкодиапазонными полуэмпирическими уравнениями состояния [7], которые описывают состояния среды в конденсированной и в газообразной фазе. Для описания процессов динамического разрушения привлекалась континуально-кинетическая модель [1], полученная на основе экспериментальной регистрации профилей скорости свободной поверхности, при выходе на нее импульса сжатия. Расчет поглощения энергии пучка мишенью осуществлялся в одночастичном приближении по формуле [8]

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial E}{\partial x} = S_{be} + S_{fe} + S_{fi} + S_n = S(\rho, T),$$

основанной на предположении, что полная тормозная способность  $S$  представляется в виде суммы слагаемых, описывающих вклады связанных и свободных электронов, ионов и ядер. Так как моделировались воздействия расфокусированных пучков, у которых плотность тока не слишком высока ( $I < 10^6$  а/см<sup>2</sup>), пренебрегали коллективными эффектами и обратным плазменным током [2].

В таблице приведены результаты расчетов по воздействию пучка протонов с энергией частиц 3 МэВ на слоистые мишени, имеющие следующие размеры и состав [5]: А - Au 21 мкм + CH<sub>2</sub>

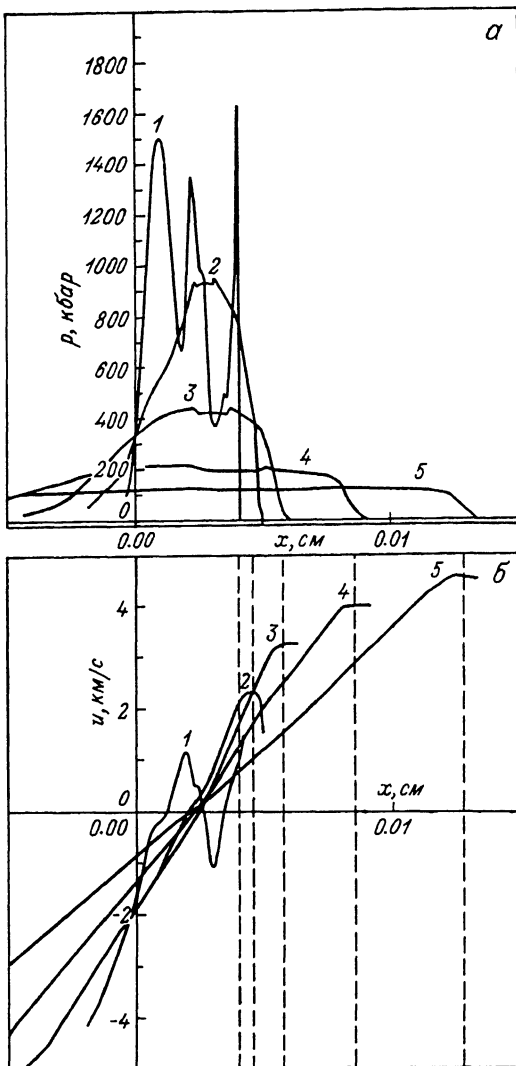


Рис. 1. Профили давления  $\alpha$  и массовой скорости  $\beta$  в мишени А на моменты времени: 1- 1.44 нс, 2 - 5.49 нс, 3 - 9.84 нс, 4 - 17.52 нс, 5 - 27.3 нс.

19 мкм + Au 5.5 мкм, В - Al 44.4 мкм + CH<sub>2</sub> 40.3 мкм + Au 2.5 мкм, С - Al 44.4 мкм + CH<sub>2</sub> 40.3 мкм + Al 17.5 мкм, D - Al 44.4 мкм + CH<sub>2</sub> 40.3 мкм + Cu 5.3 мкм, Е - Au 20 мкм + CH<sub>2</sub> 50 мкм + Al 20 мкм.

В таблице показаны скорости лайнеров  $u^*$  при прохождении ими расстояния 500 мкм, давления, генерируемые в мишени из золота  $p^*$  при соударении с ней лайнеров имеющих скорость  $u^*$ ,

Мишень	A	B	C	D	E
$\rho^*$	2.4	3.63	1.16	2.48	2.26
$\rho^0$ Мбар	1.8	3.16	0.85	2.05	-
$u^*$ км/с	4.03	5.26	5.22	5.25	8.1
$W$ Вт/см <sup>2</sup> $\times 10^{10}$	1	1	1	1	3
$\tau$ нс	43	43	43	43	20

а также плотность мощности и длительность пучка. На рис. 1, а и б представлены соответственно профили давления и массовой скорости для мишени А, подверженной воздействию пучка протонов с плотностью мощности  $5 \cdot 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Тормозная способность протонов, проходящих во второй слой, возрастает по мере распространения. Это приводит к появлению Брэгговского пика поглощения во втором слое, который заметен на профиле давления (рис. 1, а, профиль 1).

К моменту окончания действия пучка лайнер успевает значительно разогнаться, при этом, как следует из рис. 1, профиль скорости с хорошей точностью можно считать линейным. В мишени С размер лайнера одного порядка с толщиной поглотителей, и в этом случае течение в лайнере неоднородно, тем не менее лайнер не разрушается. Незначительное увеличение толщин слоев (мишень Е) приводит к усилению неоднородности течения в лайнере и разрушению последнего в процессе разгона. К моменту начала разрушения действие пучка еще не завершилось, поэтому впоследствии часть пор схлопывается под действием давления в абсорбере. Профили давления и пористости, соответствующие данному случаю, показаны на рис. 2.

Результаты расчетов позволяют заключить, что применение в качестве тампера алюминиевой пластины более предпочтительно, чем использование для этой цели золота. В первом случае в тампере поглощается 34.4% энергии пучка, во втором 50%. Для лайнеров, наоборот, использование золота дает лучшие результаты, чем меди или алюминия. Во всех рассмотренных случаях вещество лайнера при разгоне находилось в конденсированной фазе. Результаты численных расчетов находятся в качественном согласии с выводами работы [5], но приводят к большим давлениям в мишенях. Давления  $\rho^0$ , полученные в [5], приведены в таблице. Это различие можно объяснить тем, что в работе [5] распределение энергии по слоям считается однородным, при этом не учитывается наличие Брэгговского пика поглощения во втором слое. Кроме того, в [5] предполагались также линейный профиль массовой скорости в обоих поглощающих слоях мишени и постоянная скорость по глубине лайнера, что имеет место для тонкого лайнера, когда время прохождения волн через него много меньше

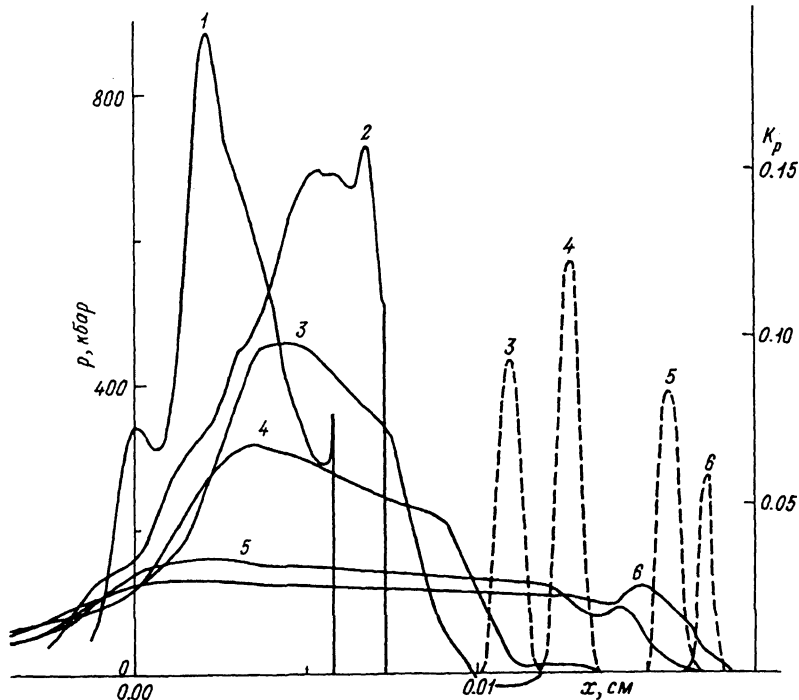


Рис. 2. Профили давления и коэффициента пор (пунктир) в мишени E на моменты времени: 1 - 3.22 нс, 2 - 5.54 нс, 3 - 12.25 нс, 4 - 15.3 нс, 5 - 20.2 нс, 6 - 21.7 нс.

длительности импульса. Ясно, что при таких допущениях не учитываются динамические процессы в разгоняемом лайнере, в том числе и возможное его разрушение.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бушман А.В., Канель Г.И., Ни А.Л., Фортгов В.Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черноголовка. 1988. 200 с.
- [2] Perry F.C., Widner M.M. // J. Appl. Phys. 1976. V. 47. N 1. P. 127-134.
- [3] Reugnet C., Roche M. et al. // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. N 8. P. 4169-4177.
- [4] Демидов Б.А., Мартынов А.И. // ЖЭТФ. 1981. Т. 90. В. 2. С. 738-744.
- [5] Ng A., Piriz A.R. // Physical Review A. 1989. V. 40. N 4. P. 1993-1998.

- [6] Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1978.
- [7] Бушман А.В., Ломоносов И.В., Форттов В.Е. Препринт ИВТАН № 6-287. 1989. 44 с.
- [8] Баско М.М. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. В. 6. С. 1195.

Институт высоких температур  
АН СССР,  
Москва

Поступило в Редакцию  
23 августа 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 22

26 ноября 1990 г.

04; 10

© 1990

### ПРИМЕНЕНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПЛОСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН И МЕТАНИЯ УДАРНИКОВ

О.Ю. Воробьев, Б.А. Демидов,  
В.П. Ефремов, А.И. Рудаков,  
А.Л. Ни, П.В. Морозов,  
В.Е. Форттов

Релятивистские электронные пучки (РЭП) широко используются для генерации ударных волн в веществе [1-4]. К достоинствам РЭП можно отнести большие плотности вкладываемой мощности, что позволяет достигать давлений мегабарного диапазона. Это дает возможность моделировать при помощи РЭП высокоскоростной удар [5], а также воздействие термоудара [6]. Ввиду сложности и нелинейности процесса взаимодействия сильноточного РЭП с веществом, исследование ударно-волновых процессов в мишенях целесообразно проводить в комплексе с математическим моделированием. Ввиду простоты интерпретации наибольший интерес представляют опыты с плоскими ударными волнами, однако сейчас выполнено немного таких экспериментов [7-9]. В данной работе параметры пучка и толщина мишени выбирались так, чтобы ударно-волновое течение в мишени было одномерным. Эксперименты проводились на установке „Кальмар” (рис.1). Ток пучка варьировался в пределах 40-60 кА, энергия электронов - от 100 до 480 кэВ, импульс имел длительность 100 нс. Диаметр фокального пятна был равен 20 мм. При таких параметрах пучка давления в мишенях составляют десятки килобар. Луч стационарного He-Ne лазера ЛГ-79(1), проходя через оптическую систему