

**ИЗМЕРЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
МОЩНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ  
ПУЧКОВ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПРЕГРАДЫ**

*А. А. Игнатов, А. А. Провалов, Б. Д. Христофоров,  
О. Г. Чернов*

*(Москва)*

В связи с возможностью применения мощных импульсных пучков электронов для технологических целей [1—6] и проходки горных выработок [7] проведены измерения яркостной температуры и скорости разлета паров, а также параметров тепловых потоков и механических нагрузок на преграды из металлов и диэлектриков при воздействии на них электронных пучков с током до 40 кА, энергией электронов 60—100 кэВ.

Опыты проводились на ускорителях [8, 9] с током до 40 кА, ускоряющим напряжением 60—100 кВ, диаметром пучка до 3 см при длительности импульса напряжения по основанию и энергии пучка соответственно 0,2 и 1,5 мкс, 180 и 1300 Дж. Облучаемые преграды располагались в трубке дрейфа ускорителей, откачанной до  $10^{-6}$  мм рт. ст.

Энергия пучка определялась по осциллограммам тока на мишень и ускоряющего напряжения, а также по нагреву медных калориметров, измеренному термомпарами. Плотность энергии в пучке убывала от его центра к краю. Для определения распределения энергии в пучке по его сечению применялись калориметры с диаметром входного отверстия от 5 до 60 мм. Из-за испарения стенок калориметра и уноса из него части испаренного вещества результаты калориметрических измерений были ниже данных электрических измерений, расхождение увеличивалось с ростом энергии пучка, но не превышало 20% [10].

Измеренная плотность энергии в пучке при диаметрах входного отверстия в калориметр 5; 10; 20; 30 мм составляла 110; 65; 30; 16 Дж/см<sup>2</sup> на ускорителе [8] и 260; 120; 110; 100 Дж/см<sup>2</sup> на ускорителе [9].

Измерения механического импульса проводились мембранным импульсометром МИД или пьезоэлектрическим импульсометром ПИМ. Прибор МИД содержит упругую мембрану, прогиб которой при воздействии пучка, пропорциональный действующему импульсу, определялся по смятию свинцового крешера, установленного в корпусе прибора под мембраной. Использовались мембраны из стали, дюрала и плексигласа с диаметром от 10 до 30 мм. Мишени из других материалов приклеивались к мембране прибора эпоксидной смолой.

Погрешности измерений возникали из-за термоупругих деформаций мембран и изменения их упругих характеристик из-за прогорания и отжига, а также при отклонении центра пучка от центра мембраны. При тщательном контроле характеристик мембран погрешность измерений не превышала 15%.

Пьезоэлектрический импульсометр ПИМ содержит съемную мишень из исследуемого материала, установленную на 3-консольном упругом элементе. При воздействии пучка на мишень под действием импульса

отдачи возбуждаются колебания упругого элемента, которые передаются пьезоэлементам из ЦТС-19, установленным в качестве опор под консолями. Регистрируемая на осциллографе ЭДС изменяется с частотой колебаний упругой системы, а ее амплитуда пропорциональна действующему импульсу. Величину импульса можно определять по любым последовательным амплитудам сигнала, что позволяет при высоком уровне помех производить регистрацию после их окончания. Термоупругие напряжения и деформации, а также отклонение пучка от центра мишени не влияют на работу прибора, поэтому погрешность стандартных измерений не превышает 10%. Чувствительность прибора до  $0,5 \text{ В} \times 1000 \text{ пФ/дин}\cdot\text{с}$ .

После воздействия пучка на поверхность мишеней наблюдались следы эрозии из-за испарения и плавления. Центральная (обычно круглая) область связана в основном с разлетом паров, периферийная — с разбрызгиванием расплава. Вне этих областей металлические мишени окрашены в цвета побежалости. Диэлектрики: кварц, ЦТС, плексиглас — разрушались в результате растрескивания и отколов.

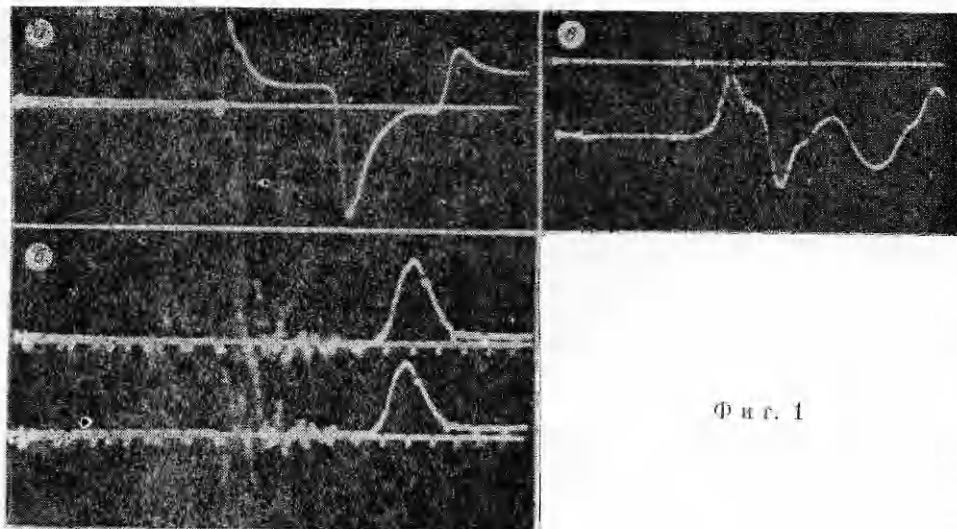
С ростом энергии пучка  $Q$  измеренные значения механического импульса отдачи  $I$  возрастают, однако отношения  $I/Q$  на установках [8, 9] близки и составляют для свинца и серебра около  $10 \text{ дин}\cdot\text{с/Дж}$ .

Унос массы  $m$  определялся взвешиванием мишеней до и после воздействия. С увеличением радиуса мишени унос массы уменьшался из-за осаждения на них расплава, что особенно заметно при воздействии пучка на сталь и медь. Значения унесенной массы примерно пропорциональны поглощенной энергии пучка и слабо зависят от плотности и потока энергии электронов. У дюрала Д16Т и алюминия, имеющих максимальную теплоту сублимации, унос массы значительно выше, чем у стали и меди, поскольку из-за низкой температуры плавления значительная часть алюминия и Д16Т уносится в виде расплава.

Измерения на алюминиевой мишени диаметром 40 мм, состоящей из 64 элементов, показали, что унесенная с единицы площади масса максимальна в центре и убывает к краям пятна облучения, что примерно соответствует распределению энергии по облучаемому пятну. Поэтому отношение  $m/Q$  на различных элементах мишени примерно одинаково.

Характерные значения унесенной массы на установке [8] на мишенях диаметром 30 мм из стали, дюрала, свинца, серебра, кварца и плексигласа около 20; 70; 200; 70; 40; 190 мкг/Дж. На ускорителе [9]  $m/Q$  несколько ниже, чем на ускорителе [8], поскольку с ростом длительности воздействия большая доля энергии пучка поглощается в парах.

Для измерения зависимости давления от времени использовались торцевые пьезоэлектрические датчики, работающие в режиме генератора тока с временным разрешением до  $10^{-8}$  с и полным временем регистрации до 2 мкс. Действию пучка подвергалась внешняя поверхность чувствительного элемента из пьезокерамики ЦТС-29 или кварца диаметром 30 мм, на которую наносилась мишень. Сигнал снимался с внутреннего (окруженного охранном кольцом) измерительного электрода датчика, диаметр которого для различных чувствительных элементов составлял 20; 15; 10; 6 и 4 мм, что позволяло измерять среднее давление в функции времени на площадь пятна, равной площади измерительного электрода. Регистрация проводилась на осциллографе С-1-26. В качестве мишеней использовались серебро, медь, алюминий, свинец и эпоксид. Пьезоэлементы из ЦТС-19 надежно работали на ускорителе [8], в условиях же ускорителя [9] зарегистрировать ими давление не удалось из-за высокой интенсивности тормозного рентгеновского излучения. После воздействия пучка пьезомодуль заметно изменялся. Применение мишеней с толщиной, большей длины пробега рентгеновского излучения, позволяло проводить



Фиг. 1

измерение давления, но приводило к занижению показаний из-за затухания ударной волны в толстой мишени. Поэтому на установке [9] применялись пьезоэлементы из кварца, не чувствительные к рентгеновскому воздействию.

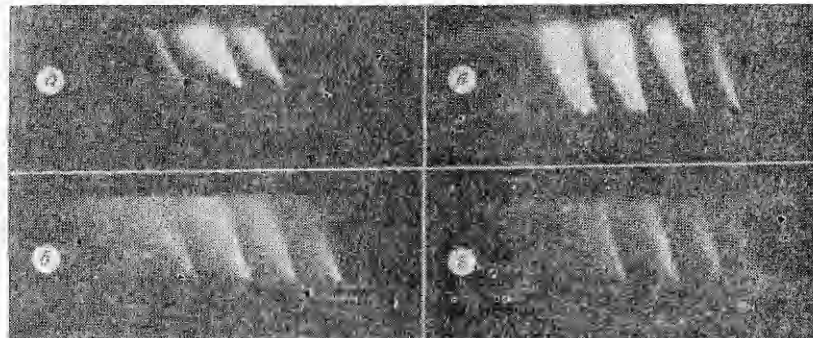
На фиг. 1, *a* — *в* соответственно приведены характерные осциллограммы давления при воздействии пучка на серебро ( $p_m = 2550$  атм [8]), свинец ( $p_m = 1460$  атм [8]) и алюминий ( $p_m = 700$  атм [9]). Кроме основной ударной волны, отмечается дуг волн, отраженных от поверхностей пьезоэлемента. Максимальное давление  $p_m$  увеличивается с ростом плотности потока электронов, причем максимум давления наблюдается в момент, близкий к максимуму мощности облучения. В серебре при изменении плотности потока от 180 до 670 мВт/см<sup>2</sup> максимальное давление возрастает от 1500 до 4200 атм, в меди в диапазоне 180 — 470 мВт/см<sup>2</sup> — от 730 до 1900 атм, в свинце в диапазоне 50 — 225 мВт/см<sup>2</sup> — от 500 до 1500 атм. В алюминии и эпоксиде при плотности потока 170 мВт/см<sup>2</sup> максимальное давление соответственно равно 850 и 1460 атм.

Полный механический импульс по осциллограммам давления определен лишь на установке [8], на установке [9] длительности регистрации датчика 2 мкс оказалось недостаточно, поскольку время нагружения мишени из-за подбора паров примерно на порядок больше времени воздействия пучка электронов.

Измерение остаточного тепла в мишени проводилось одновременно 2—3 медно-константановыми термодарами с термо ЭДС около 41,6 мкВ/°С с регистрацией на шлейфовый осциллограф Н-117. Термодары зачеканивались в мишенях приборов, воспринимающих воздействие пучка.

Разогрев преград в основном связан с торможением электронов в глубоких слоях, откуда не происходит разлета вещества, потоком излучения из плазменного облака над мишенью и оседанием расплава за пределами облучаемого пятна. Влияние последнего эффекта возрастает с размерами мишени.

Измерения остаточного тепла в металлах на установке [9] с энергией пучка 860 Дж показали, что при воздействии на прибор МИД с диаметром лицевой поверхности 65 мм энергия остаточного тепла в стали, алюминии и свинце составляет соответственно 340; 310; 280 Дж или около 35—40% от энергии пучка.



Ф и г. 2

На установке [8] при диаметре мишени 30 мм в стали, дюрале и кварце остаточное тепло составляло соответственно 78; 67; 50% от энергии пучка. Обычно в тугоплавкие материалы переходит больше тепла, чем в материалы с низкой температурой плавления.

Картина разлета светящихся паров регистрировалась камерами ЖФР и СФР-2М. В последнем случае на пленке разворачивалась картина явления, видимого через 5 щелей раstra шириной 0,02 мм, нормальных к поверхности мишени. Увеличение около 1,3 достигалось специально разработанной линзовой приставкой. Разрешение во времени около 0,03 мкс. Применение растров позволяло по регистрограммам определять форму факела в различные моменты времени. Яркостная температура паров определялась методом сравнения почернения пленки на фотографиях процесса с марками почернения, полученными при фотографировании через ступенчатый ослабитель эталонного источника света ЭВ-39 с яркостной температурой  $39000 \pm 2000^\circ\text{C}$ .

Фоторегистрограммы разлета паров на установке [8] приведены на фиг. 2 (развертка изображения справа — налево, увеличение 1,3, скорость развертки 3 мм/мкс, а — серебро, б — свинец, в — сталь, г — алюминий). Общая картина разлета паров металлов примерно одинакова. На всех фотографиях видна внешняя наиболее яркая зона (граница движения паров), которая отрывается от поверхности мишени. Яркостная температура паров на установке [9] значительно выше, чем на установке [8], из-за большей энергии пучка, однако скорости разлета  $v_m$  примерно одинаковы. Средняя плотность  $\bar{\rho}$  паров к концу воздействия определялась по измеренному объему паров и унесенной массе. Картина разлета паров диэлектриков существенно отличается от полученной для металлов. Из анализа фотографий следует, что испарение начинается в самом начале воздействия и дальнейшее поглощение пучка происходит в парах. Со вре-

Т а б л и ц а 1

Материал	Д16Т		Сталь		Свинец		Плексиглас	
	[8]	[9]	[8]	[9]	[8]	[9]	[8]	[9]
Установка	[8]	[9]	[8]	[9]	[8]	[9]	[8]	[9]
$T_m \cdot 10^{-3} \text{ К}$	9,5	45	14,5	60	10	35	6,5	10
$v_m, \text{ км/с}$	10	10	10	10	8	8	9	—
$\bar{\rho} \cdot 10^3 \text{ г/см}^3$	—	2,9	—	2,5	—	16	—	—

Т а б л и ц а 2

Материал	Сталь		Алюминий		Свинец	
Энергия испарения . . . . .	75Дж	9%	185Дж	22%	83Дж	10%
Кинетическая энергия паров	130Дж	15%	85Дж	10%	43Дж	5%
Остаточное тепло . . . . .	340Дж	40%	310Дж	36%	280Дж	33%
Внутренняя энергия паров с учетом ионизации . . .	205Дж	24%	250Дж	29%	310Дж	36%
Полные затраты энергии	750Дж	88%	828Дж	96%	716Дж	83%

менем зона паров с максимальной яркостью удаляется от мишени, но все время остается за передней границей паров. Распределение температуры паров по высоте коррелирует с кривыми энерговыделения электронов.

В момент окончания воздействия температура паров у мишени в несколько раз меньше максимальной  $T_m$ . Некоторые результаты измерений приведены в табл. 1.

Результаты проведенных измерений позволяют оценить затраты энергии пучка на различные физические процессы (табл. 2).

Приведенный баланс энергии по средним результатам опытов удовлетворительно согласуется с результатами измерения энергии пучка  $Q = 860$  Дж.

Авторы выражают благодарность Д. В. Иремашвили и сотрудникам его лаборатории Т. А. Осепашвили, П. И. Какучая, В. Д. Попову за предоставленную возможность и обеспечение работы на ускорителях.

Поступила 26 X 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вудраф, Кристенсен. Численный расчет деформации кольца при импульсном воздействии пучка электронов.— ПМ, 1971, № 4.
2. Вудраф, Гидт, Хесс. Поверхностное плавление, откалывание и возникновение напряжений в металлах при пульсирующем нагреве.— ПМ, 1971, № 2.
3. Farber M., Robin I., Srevastava R. High-power electron beam deposition studies on aluminum and graphite.— «J. Appl. Phys.», 1972, vol. 43, N 8.
4. Боголюбовский, Герасимов. Нагрев тонких фольг сильноточным пучком электронов.— «Письма в ЖЭТФ», 1976, т. 24, вып. 4.
5. Артемов В. А., Власов М. А., Малафеев О. А., Редер А. В., Рыхлов А. В., Сафонов В. А. Экспериментальное изучение нестационарного испарения металла под действием электронного пучка.— ЖТФ, 1978, т. 48, № 1.
6. Артемов В. А., Власов М. А. Нестационарный процесс испарения при взаимодействии электронного пучка с металлом.— ЖТФ, 1978, т. 48, № 1.
7. Fogelson E. Advanced Fragmentation techniques.— In: Adv. Rock. Mech. Vol. 1. Pt BDC, 1974.
8. Иремашвили Д. В., Курильников С. В., Леонтьев Н. И., Осепашвили Т. А. Сильноточная плазменная электронная пушка с током 50 кА в импульсе.— «Письма в ЖЭТФ», 1972, т. 17, вып. 1.
9. Иремашвили Д. В., Какучая П. И., Осепашвили Т. А. Формирование высокоинтенсивного пучка микросекундной длительности.— «Письма в ЖЭТФ», 1975, т. 20, вып. 11.
10. Иремашвили Д. В., Какучая П. И., Осепашвили Т. А., Кузьмин А. П. Некоторые особенности калориметрирования высокоинтенсивных электронных пучков с энергией  $10^5$  эВ.— В кн.: Разработка и практическое применение электронных ускорителей. Томск, изд. Томск. ун-та, 1975.