

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ГОРЕНИЯ
АЭРОВЗВЕСЕЙ ПОРОШКОВ АЛЮМИНИЯ**

УДК 536.46

**В. В. Архипов, И. И. Дивнов, Н. И. Зотов,
Ю. Н. Киселев, Б. Д. Христофоров, В. Л. Юрьев**

Институт динамики геосфер РАН, 117334 Москва

Приведены результаты измерения радиационных и газодинамических характеристик при горении порошка алюминия, возбуждаемом электрическим взрывом фольги. Измерена энергия излучения в различных спектральных интервалах, исследован процесс формирования и движения облака продуктов горения. Показана возможность создания эффективных источников импульсного излучения мегаджоульного диапазона на основе электрического взрыва в порошках.

Для создания высокоэнергетичных импульсных излучателей могут применяться электрохимические преобразователи, использующие энергию быстрого горения металлов в воздухе. В работе [1] предложен вариант такого излучателя на основе электрического взрыва алюминиевых фольг. Согласно измерениям [2] в этом варианте потери электрической энергии на нагрев и диспергирование фольги составляют до 25–30 % величины излучаемой энергии. Ниже приведены результаты исследования излучателей на основе быстрого горения в воздухе мелкодисперсного порошка алюминия, который обладает значительно лучшими излучательными характеристиками. Кроме ряда технических приложений такие источники применяются для моделирования радиационно-газодинамических процессов при естественных и техногенных катастрофах, связанных с входом в атмосферу и ударом о Землю крупных астероидов и метеоритов, при пожарах, взрывах пылегазовых смесей и т. д. [3].

В опытах алюминиевый порошок (марка ПАП-2, размер зерен $0,5 \div 100$ мкм, плотность $0,3$ г/см³) равномерно насыпался на плоскую алюминиевую фольгу, включенную в разрядный контур батареи конденсаторов емкостью 13 мФ и напряжением до 4 кВ, при разряде которой взрывалась фольга, разбрасывались и поджигались частицы порошка. Энергия разряда составляла ~ 70 кДж, а масса порошка и площадь фольги варьировались в пределах от 0,01 до 0,75 кг и от 70 до 600 см² соответственно. Масса фольги в опытах намного меньше массы порошка. Система диагностики включала кино съемку формирования и движения в атмосфере облака продуктов горения, регистрацию параметров импульса тока и напряжения. Пирозлектрическими датчиками измерялась энергия теплового излучения в разных спектральных интервалах. Применялся набор светофильтров с полосой пропускания 0,2–3,6, 0,4–0,7 и 1,9–3,6 мкм. По результатам диагностики в функции времени определялись значения подводимой и излученной энергии, размеры излучателя, высота его подъема, яркостные температуры и другие параметры.

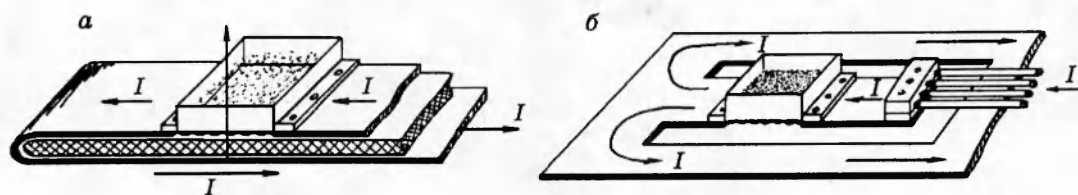


Рис. 1. Схемы экспериментальных устройств

Экспериментальные устройства отличались конструкцией и расположением обратного токопровода. На рис. 1, *a* обратный токопровод расположен под прямым углом к установленной на нем бумажной коробке с порошком. Поэтому порошок под действием пондеромоторной силы между проводниками получает начальный импульс по нормали к фольге. В сборке, показанной на рис. 1, *б*, прямой и обратные токопроводы расположены в одной плоскости, и пондеромоторные силы практически не влияют на электрический взрыв и последующее горение порошка.

Характерные фотографии развития светящейся области показаны на рис. 2. Процесс начинается с электрического взрыва фольги, при котором выделяется энергия электрического разряда (~ 70 кДж). Возникающая плазма поджигает порошок, который разлетается под действием электрического взрыва и сгорает, перемешиваясь с воздухом. Энергия горения составляет ~ 30 кДж/г. Такая картина развития процесса, похожая на взрыв пыли в воздухе, согласуется с данными, полученными при различных условиях проведения эксперимента.

Форма и высота подъема плазменного факела существенно зависят от типа применяемого устройства. При наличии пондеромоторной силы отталкивания (см. рис. 2, *a*) его форма близка к цилиндрической, а без нее (см. рис. 2, *б*) — к сфере. Соответственно изменяется начальная скорость подъема. В поздней стадии, когда влияние электрического взрыва фольги по сравнению с энергией горения незначительно, параметры исследуемых процессов мало зависят от вида экспериментальной сборки. Ниже на рисунках графики результатов измерений соответствуют условиям опытов, представленных на рис. 1, *б*.

На рис. 3 приведены зависимости максимальных значений высоты, объема и диаметра факела от массы порошка. При анализе результатов измерения временных зависимостей размеров и объема облака продуктов горения (термика) отчетливо прослеживаются начальное быстрое расширение облака в процессе выделения энергии (при этом высвечивается около половины всей энергии излучения) и последующее медленное всплытие в поле тяжести. С увеличением массы порошка максимальные значения высоты, диаметра и объема облака возрастают линейно в логарифмическом масштабе и близки к параметрам облака взрыва взрывчатого вещества с учетом тротилового эквивалента.

На рис. 4 приведены характерные зависимости мгновенной мощности W от времени в спектральном интервале 0,2–3,6 мкм. Значения $W(\tau)$ определялась дифференцированием временной зависимости энергии излучения $\varepsilon(\tau) = 4\pi R^2 E(\tau)$. Здесь E — плотность энергии, регистрируемая пироэлектрическими датчиками на расстоянии R от источника излучения. С увеличением массы порошка возрастают мощность и характерная длительность излучения, определяемая временем горения порошка. В первом приближении время высвечивания $\tau[\text{с}] = (0,2-0,3)m^{1/3}$ [кг]. Такая зависимость согласуется с полученной для времени высвечивания при взрыве взрывчатого вещества с учетом тротилового эквива-

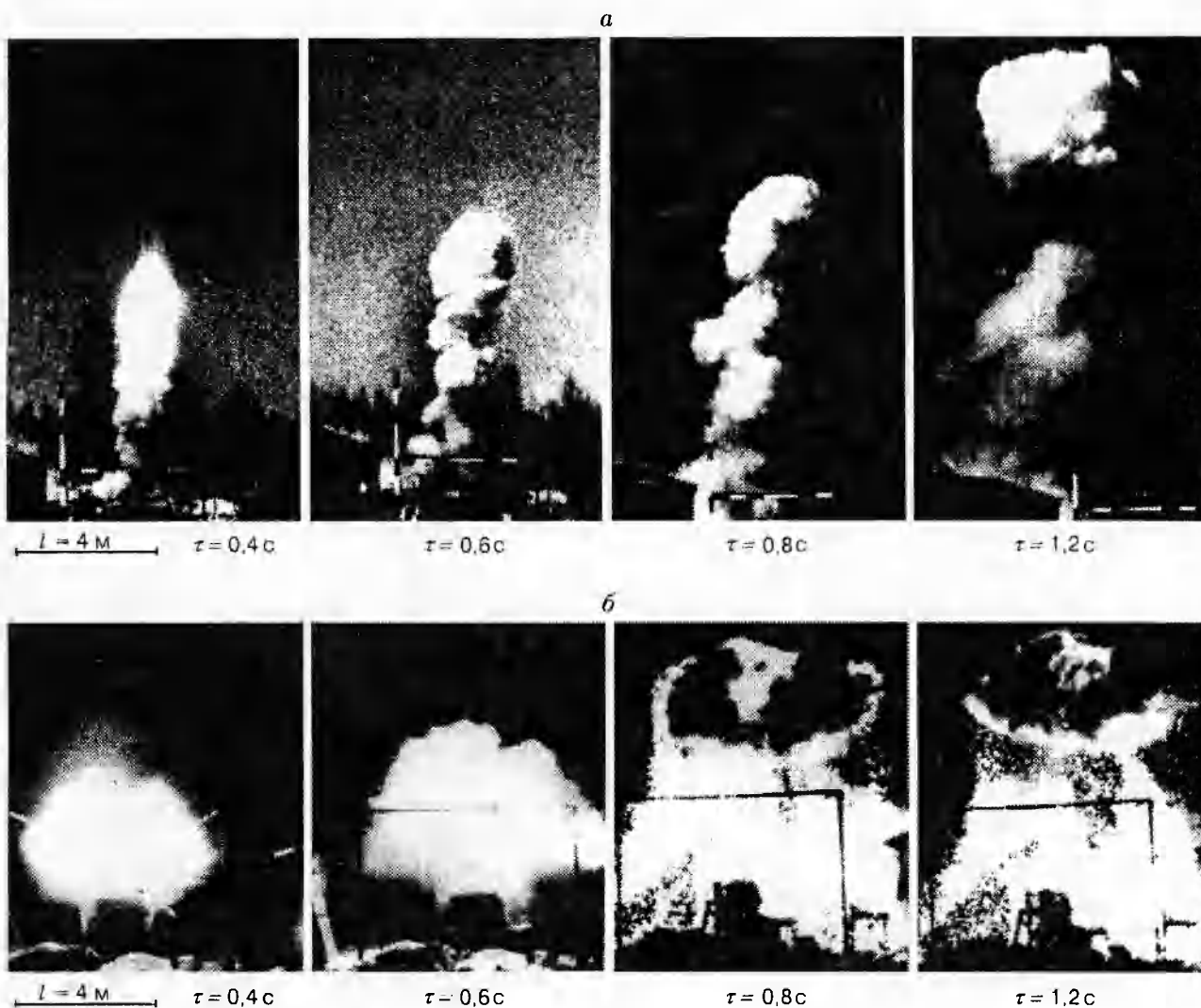


Рис. 2. Фотографии развития факела при горении порошка алюминия, инициированном электрическим взрывом алюминиевой фольги:

a — сборка рис. 1, *a*; *b* — сборка рис. 1, *b*

лента [3].

На рис. 5 показана зависимость излученной факелом энергии ϵ_m от массы порошка m в различных спектральных интервалах. На рис. 6 приведены аналогичные зависимости для мощности, яркостной температуры и длительности импульсов излучения. В исследованных спектральных интервалах излучаемая энергия примерно пропорциональна массе порошка. В диапазоне 0,2–3,6 мкм она составляет 12–15 МДж/кг или до 50% энергии горения. В видимом свете (0,4–0,7 мкм) доля излученной энергии уменьшается с ростом массы образца с 1 МДж/кг при $m = 50$ г до 0,5 МДж/кг при 750 г. Яркостные температуры в различных спектральных диапазонах совпадают в пределах погрешности измерений и убывают с ростом массы порошка от 5 кК, что характерно для ядерных взрывов, до температур взрыва мощных взрывчатых веществ ($2,5 \div 3,0$ кК). Приведенное время свечения основной доли энергии примерно постоянно и составляет $\sim 0,2\text{--}0,3$ с/кг^{1/3}.

Проведенные исследования показали возможность создания на основе электрического

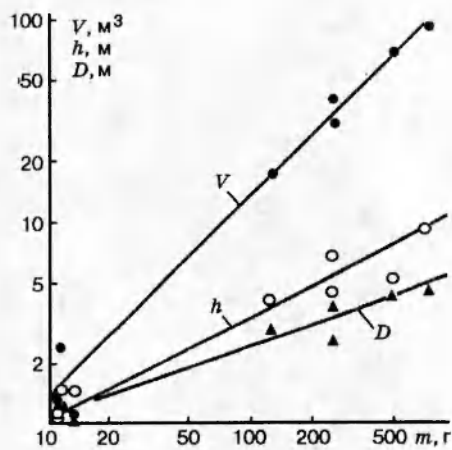


Рис. 3

Рис. 3. Зависимости максимальных значений высоты (1), объема (2) и диаметра факела (3) от массы порошка

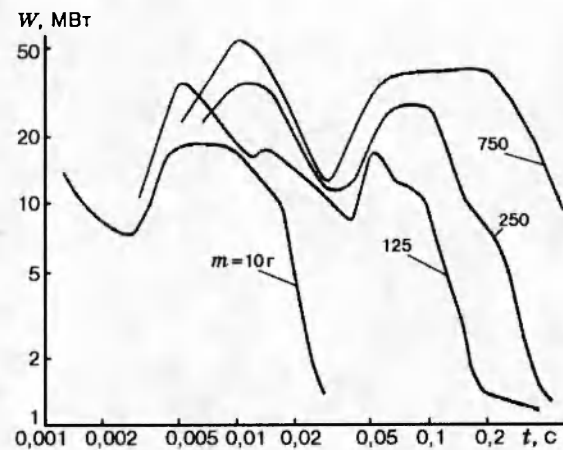


Рис. 4

Рис. 4. Характерные зависимости мгновенной мощности излучения от времени в спектральном интервале 0,2–3,6 мкм

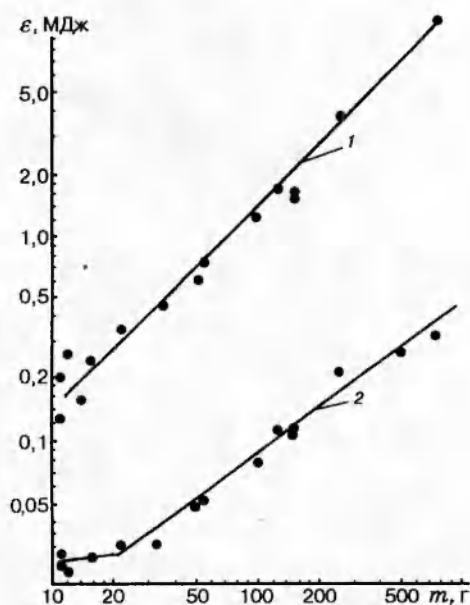


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость излученной факелом энергии от массы порошка в спектральных интервалах 0,2–3,6 (1) и 0,4–0,7 мкм (2)

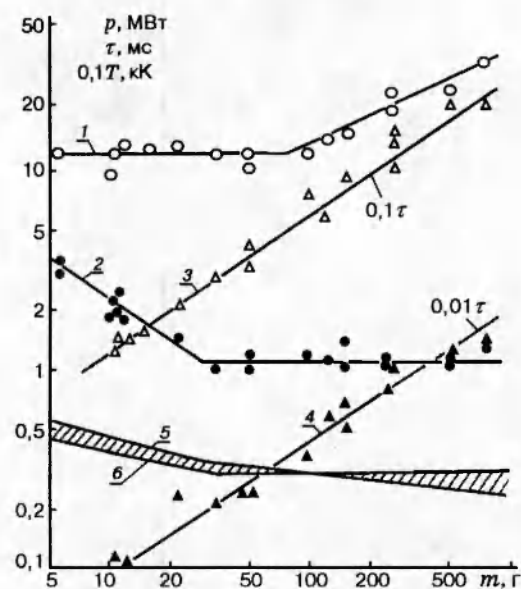


Рис. 6

Рис. 6. Зависимости мощности (1, 2), длительности (3, 4) и температуры факела (5, 6) от массы порошка в спектральных интервалах 0,2–3,6 мкм (1, 3, 5) и 0,4–0,7 мкм (2, 4, 6)

взрыва в порошках алюминия эффективного источника излучающей плазмы с объемом $\sim 100 \text{ м}^3$ и энергией излучения выше 10 МДж, более чем на два порядка превышающей подводимую электрическую энергию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 94-05-16263).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Роговцев П. Н., Соболев В. Ф., Старченко В. А.** Исследование излучательных характеристик пламени горения электрических взрываемых фольг // Журн. прикл. спектроскопии. 1989. Т. 47, № 6. С. 911–914.
2. **Андержанов Э. К., Дивнов И. И., Зотов Н. И. и др.** Зависимость параметров электровзрыва фольг и последующего разряда в воздухе от подводимой мощности // Журн. теор. физики. 1989. Т. 59, № 8. С. 17–23.
3. **Рождественский В. Б., Христофоров Б. Д., Юрьев В. Л.** Влияние состава продуктов на радиационные характеристики взрыва ВВ в воздухе // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 145–148.

*Поступила в редакцию 27/XI 1995 г.,
в окончательном варианте — 15/XII 1995 г.*
