

Краткие сообщения

01;04;10

Генерация электрических полей пылевыми частицами при воздушных взрывах зарядов конденсированного взрывчатого вещества

© М.А. Ерохин, А.А. Кондратьев, И.В. Литвиненко, Ю.И. Матвеев

Российский федеральный ядерный центр—Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. ак. Е.И. Забабахина (РФЯЦ—ВНИИТФ),
456770 Снежинск, Челябинская область, Россия
e-mail: yu.i.matveenko@vniitf.ru

(Поступило в Редакцию 19 сентября 2000 г. В окончательной редакции 10 мая 2001 г.)

Приведены результаты двумерного численного моделирования генерации электрических сигналов при воздушных взрывах химических взрывчатых веществ. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными, полученными в результате выполнения работ по проекту МНТЦ № 835 специалистами Института динамики геосфер РАН (ИДГ), Научно-исследовательского института импульсной техники Минатома (НИИИТ) и РФЯЦ—ВНИИТФ Минатома. Предполагается, что электрическое поле создается заряженными пылинками, образованными при взрыве конденсированного химического взрывчатого вещества. Показано, что привлечение модели пылевой плазмы к описанию характеристик пылинок приводит к удовлетворительному согласию результатов численного моделирования с экспериментом.

Введение

Известно, что при воздушных взрывах химического взрывчатого вещества (ХВВ) регистрируются электрические поля, имеющие дипольный характер [1,2]. В работах [3,4] сделан обзор экспериментальных и теоретических работ по данной теме и предложен механизм генерации электрических полей, связанный с образованием в продуктах взрыва (ПВ) твердых частиц графита (пылинок), имеющих отрицательный заряд. Там же качественно объяснена зависимость от времени напряженности электрических полей, полученных в экспериментах с массами ХВВ, находящимися в диапазоне 10^{-3} –5 kg.

Для исследования механизма генерации электромагнитного излучения (ЭМИ) в рамках программы экспериментальных исследований по проекту МНТЦ № 835 специалистами РФЯЦ—ВНИИТФ, НИИИТ и ИДГ РАН были выполнены эксперименты с литыми зарядами массой 2.9 kg из сплава тринитротолуола и гексогена в пропорции 1 : 1 (ТГ-50/50), имеющими сферическую форму. Заряды ВВ подвешивались на веревках на высоте 2 m от поверхности Земли. Подрыв всех зарядов был выполнен огневым способом из точек, расположенных сверху, или из центра зарядов [5].

Цель нашей работы — показать, что при привлечении идеи о заряженных пылинках результаты численного моделирования удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными по измерению электрической составляющей ЭМИ, полученными при воздушных модельных опытах летом 1999 г. на экспериментальной площадке РФЯЦ—ВНИИТФ.

Теоретическая модель

ХВВ ТГ-50/50 имеет отрицательный кислородный баланс, т.е. при детонации разлагается с выделением свободного углерода. При взрыве ТГ-50/50 на фронте детонационной волны в зоне химических реакций (химпике) за времена порядка $1 \mu\text{s}$ образуются алмазный порошок и графитовая сажа [6,7]. Кинетика процессов образования зародышей алмазной фазы и их последующего роста заканчивается до плоскости Чепмена—Жуге. Здесь же, в зоне химпика, реализуются высокие давления в сотни тысяч атмосфер, температура достигает 0.35 eV , а проводимость ПВ достигает значений $\sigma \approx 10\text{--}20 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, а затем уменьшается на порядок через время $t = 1 \mu\text{s}$ после прохождения фронта детонационной волны.

Следуя работам [8,9], можно оценить заряд пылинки q_p исходя из характеристик в области химпика ПВ. Он пропорционален потенциалу пылинки ϕ_p относительно плазмы $q_p = eZ_p = C_p \phi_p$, где $C_p = 4\pi\epsilon_0 R_p$ — емкость пылевой частицы, R_p — радиус частицы, Z_p — число электронов на пылинке. Рост отрицательного заряда пылинки происходит до тех пор, пока тепловой поток электронов на пылинку не будет равен тепловому ионному потоку $Z_p e^2 / (4\pi\epsilon_0 R_p) = \beta k T_e$, где $\beta \approx 2$, и логарифмически зависит от плотности, массы и температуры ионов. Подставляя в выражение температуру в химпике $T_e = 3800 \text{ K}$, получим величину

$$Z_p = 4.2 \cdot 10^8 R_p. \quad (1)$$

Начальная геометрия расчетов максимально приближена к экспериментальной постановке опытов. Заряд ХВВ массой 2.9 kg сферической формы располагался на высоте 2 m от поверхности Земли. Детонация ХВВ происходила в точке, расположенной в центре ХВВ (соответствует первой серии опытов), или точке, расположенной сверху ХВВ (соответствует второй серии опытов). Движение воздуха или ПВ описывается уравнениями газовой динамики

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \rho \mathbf{u} = 0, \quad \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho},$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \varepsilon + \frac{\rho u^2}{2} \right) + \nabla \left(\rho \mathbf{u} \left(\varepsilon + \frac{u^2}{2} \right) + p \mathbf{u} \right) = \rho Q, \quad (2)$$

где ρ , ε , \mathbf{u} — плотность, внутренняя энергия и скорость ПВ или воздуха; Q — мощность выделения энергии при детонации.

Использовались уравнения состояний для воздуха и ХВВ ТГ-50/50, приведенные в [10]. Совместно с уравнениями (2) решались уравнения движения для пылинок

$$M_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = -6\pi\eta R_p (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}). \quad (3)$$

Здесь \mathbf{u}_p — скорость пылинки, $\eta = 10^{-3} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ — коэффициент динамической вязкости (в расчетах полагался постоянным), $M_p = (4/3)\pi R_p^3 \rho_p$ — масса пылинки, $\rho_p = 2 \text{ g}/\text{cm}^3$ — плотность пылинки. Отметим, что в уравнении движения не учитывается влияние электрического поля на движение пылинок (из-за малости величины по сравнению с силой вязкого трения пылинки о ПВ). Начальная скорость пылинок полагалась равной нулю.

Так как пылинки и ПВ на рассчитываемые времена (до 5 s) сосредоточены в области диаметром 4 m, а регистрация сигнала происходила на расстоянии 30 m от центра взрыва, то для вычисления электрического сигнала использовалось дипольное приближение. В этом приближении значение электрического сигнала в месте расположения датчиков составляет

$$\mathbf{E} = \frac{3\mathbf{R}(\mathbf{D}\mathbf{R})}{R^5} - \frac{\mathbf{D}}{R^3},$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}_z \left(\sum_k q_k z_k + \int \rho_q(r, z) z 2\pi r dr dz \right),$$

где R — расстояние до центра взрыва; q_k — заряд пылинки; z_k — координата пылинки на оси OZ ; $\rho_q(r, z)$ — объемная плотность заряда в ПВ; (z, r) — координаты в цилиндрической системе; дипольный момент \mathbf{D} вычисляется в приближении осевой симметрии и направлен вдоль оси симметрии OZ .

Моделирование движения газа проводилось в двумерном осесимметричном приближении (ось симметрии перпендикулярна поверхности Земли и проходит через центр сферической формы ХВВ) с использованием метода частиц на адаптивной встраиваемой нерегулярной прямоугольной сетке: 1) частицы описываются следующими параметрами: координатами, компонентами скорости, массой, внутренней энергией, положительным электрическим зарядом, а также рядом вспомогательных величин, необходимых при организации вычислений; 2) в начале каждого шага движения частиц в расчетной области строится адаптивная нерегулярная прямоугольная сетка; 3) адаптация сетки заключается в дроблении каждой ячейки, в которую попало число частиц больше заданного, дробление ячейки предполагает ее разделение на четыре одинаковые новые ячейки; 4) для каждой ячейки сетки по находящимся в ней частицам определялись интегральные величины: плотность ρ , средняя скорость, удельная внутренняя энергия ε , давление p ; 5) для расчета уравнений газовой динамики (2) применялась явная разностная схема, предложенная Харлоу [11].

Образование пылинок и заряда на них при численном решении происходило в ПВ на фронте детонации, причем выполнялось условие, при котором число образовавшихся пылинок в ячейке с ПВ выбиралось пропорционально массе ячейки (пылинки в ней размещались равномерно по объему), а заряд частиц ПВ в ячейке полагался равным заряду пылинок в ячейке с противоположным знаком (условие квазинейтральности выполнялось на каждом счетном шаге).

При моделировании динамики заряженных пылинок применялся подход, согласно которому пылинки двигаются шаг в шаг с расчетом движения ПВ. При этом в начале временного шага для каждой пылинки определялась газодинамическая ячейка, куда она попадает, после этого скорость ячейки использовалась для решения уравнений движения пылинок (3).

Результаты численного моделирования и сравнение с экспериментом

Вертикальная составляющая напряженности электрического поля регистрировалась на расстоянии 30 m от центра взрыва у поверхности Земли, амплитуды напряженности электрического поля в двух экспериментах равны $E = 3 \text{ kV}/\text{m}$, но временные зависимости отличаются друг от друга (рис. 1, 2).

Проводилось моделирование двух опытов: опыт 1 — подрыв из центра и опыт 2 — подрыв сверху. Качественно движение продуктов взрыва и пылинок представляется следующим образом. При подрыве ХВВ на высоте 2 m в течение 1 ms происходит расширение ПВ до радиуса 100 cm, которое затем сменяется сжатием. Радиус облака пылинок на момент времени 1 ms составляет 20 cm (для пылинок радиусом $9.5 \mu\text{m}$). На момент времени 1.5 ms ударная волна (УВ) достигает поверхности Земли. При

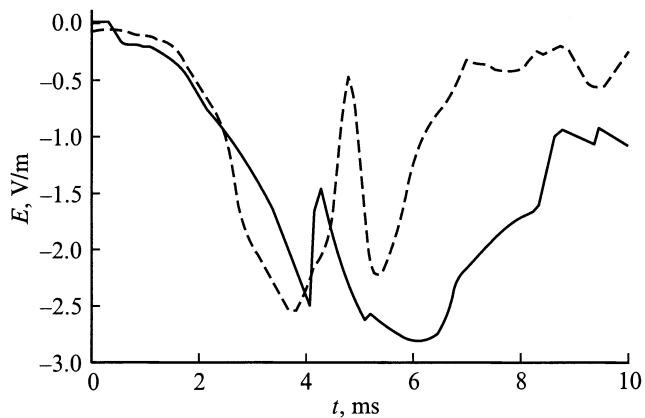


Рис. 1. Зависимость вертикальной составляющей напряженности электрического поля от времени при подрыве ВВ из центра (сплошная кривая — расчет, штриховая — эксперимент).

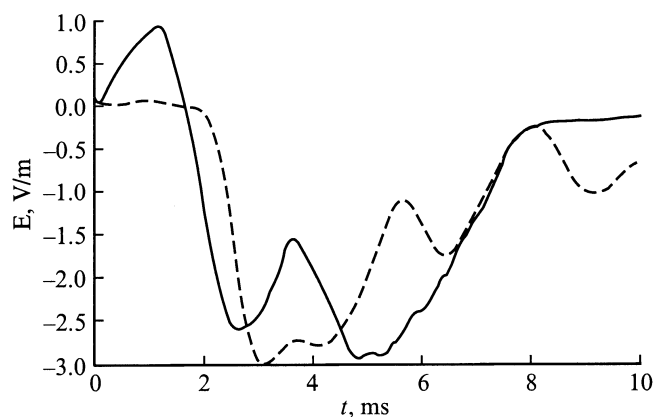


Рис. 2. Зависимость вертикальной составляющей напряженности электрического поля от времени при подрыве ВВ сверху (сплошная кривая — расчет, штриховая — эксперимент).

взаимодействии отраженной от поверхности Земли УВ с ПВ начинается асимметричное движение ПВ и пылинок, приводящее к образованию электрического дипольного момента и появлению электрического поля. Основное отличие опыта 2 от опыта 1 состоит в том, что из-за несимметричности подрыва дипольный момент появляется с начала подрыва.

Напряженность электрического поля зависит от двух параметров: радиуса пылинки R_p и общего количества пылинок N_p . Отметим, что при увеличении радиуса пылинок также увеличивается время t_f появления максимума сигнала, так как более тяжелые пылинки медленнее разгоняются и позже (по сравнению с легкими) останавливаются. Радиус пылинок в расчетах изменялся в диапазоне $0.1\text{--}50\ \mu\text{m}$ для получения согласия t_f в расчете и эксперименте. Радиус пылинки однозначно определяет заряд на ней (1). Общее число пылинок в ПВ N_p также изменялось для получения согласия ам-

плитуд напряженности электрического поля в расчетах и экспериментах.

Результаты численных расчетов напряженности электрического поля приведены на рис. 1, 2. Удовлетворительное согласие величины электрического поля в численных расчетах и экспериментах получается при значении радиуса пылинок, равном $R_p = 9.5\ \mu\text{m}$, и полном заряде на пылинках $q_{\text{tot}} = 3.3 \cdot 10^{-5}\ \text{C}$. Максимальный дипольный момент системы (ПВ и пылинок) равен $d_{\text{max}} = 9 \cdot 10^{-7}\ \text{C} \cdot \text{m}$, на этот момент времени эффективное расстояние L , на которое разнесены заряды, равно $L = d_{\text{max}}/q_{\text{tot}} = 2.7\ \text{cm}$.

Подставляя в уравнение (1) значение $R_p = 9.5\ \mu\text{m}$, получим величину числа электронов на одной пылинке $Z_p = 4.3 \cdot 10^3$. При этом полное число пылинок составляет $N_p = 4.8 \cdot 10^{10}$, а суммарная масса всех пылинок равна 340 г, или 11.7% от полной массы ПВ. Это значение согласуется с величиной выхода алмазного порошка в специализированных взрывных камерах, которая достигает 10% [6,7].

Заключение

Исследован механизм образования электрического дипольного момента при взрыве ХВВ ТГ-50/50, расположенного над поверхностью Земли. С помощью двумерного численного моделирования показано, что при выборе радиуса пылинок, равного $R_p = 9.5\ \mu\text{m}$, и числе пылинок, составляющем 11.7% от полной массы ХВВ, можно удовлетворительно описать пространственно-временную зависимость электрического сигнала.

Авторы выражают благодарность за предоставленные экспериментальные результаты сотрудникам ИДГ РАН и НИИИТ, принимавшим участие в этой работе, а также М.М. Горшкову и В.Н. Приставко за полезные обсуждения результатов работы.

Работа поддержана проектом МНТЦ (№ 835).

Список литературы

- [1] Andersen W.H., Long C.L. // J. Appl. Phys. 1965. Vol. 36. N 4. P. 1494–1495.
- [2] Горшунов Л.М., Кононенко Г.П., Сиротин Е.И. // ЖЭТФ. 1967. Т. 53. Вып. 3 (9). С. 818–821.
- [3] Боронин А.П., Капинос В.Н., Кренив С.А., Минеев В.Н. // ФГВ. 1990. Т. 26. № 2. С. 110–116.
- [4] Боронин А.П., Капинос В.Н., Кренив С.А. // ФГВ. 1990. Т. 26. № 2. С. 117–123.
- [5] Российско-американский семинар "ЭМИ химических взрывов" по проекту МНТЦ № 835-98. Сб. докл. Пер. № О-1575. М.: НИИИТ, 1999.
- [6] Geiner N.R., Phillips D.S., Jonson J.D., Volk F. // Nature. 1988. Vol. 333. P. 440–442.
- [7] Лямкин А.И., Петров Е.А., Ершов А.П. и др. // ДАН. 1988. Т. 302. № 3. С. 611–613.

- [8] *Tsytoich V.N., Angelis U.* // *Phys. Plasmas.* 1999. Vol. 6. N 4. P. 1093–1106.
- [9] *Цитович В.Н.* // *УФН.* 1997. Т. 167. № 1. С. 57–100.
- [10] *Куропатенко В.Ф.* // *ФГВ.* 1989. Т. 26. № 6. С. 112–117.
- [11] *Харлоу Ф.Х.* // *Вычислительные методы в гидродинамике* / Под ред. Б.Олдера, С.Фернбаха, М.Ротенберга. М.: Мир, 1967. С. 383. Harlow F.H. // *Fundamental Methods in Hydrodynamics* / Ed. B.Alder, S.Fernbach, M.Rotenberg. Vol. 3. New York; London: Academic Press, 1964.