

В. В. Адушкин, С. П. Соловьев, В. В. Сурков

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ, ВОЗНИКАЮЩЕЕ ПРИ ВЗРЫВЕ НА ВЫБРОС

Подземный взрыв заряда ВВ, вызывающий интенсивные деформации и разрушение среды с последующим образованием грунтового купола выброса и выходом продуктов взрыва в атмосферу, сопровождается возникновением низкочастотного электрического поля (ЭП) в приземном слое атмосферы. При взрывах в грунтах умеренной влажности сигнал ЭП имеет, как правило, дипольный характер [1], причем полярность первой полуволны сигнала отрицательна (за положительное направление вектора напряженности ЭП принимается направление сверху вниз). Амплитуда сигнала ЭП зависит от глубины взрыва и расстояния до точки измерения. Длительность отрицательной полуволны сигнала примерно соответствует времени развития купола выброса и разлета кусков грунта. Вторая фаза сигнала связана с электрическим зарядом пылегазового облака, образующегося при взрыве, и ее длительность определяется временем оседания частиц облака.

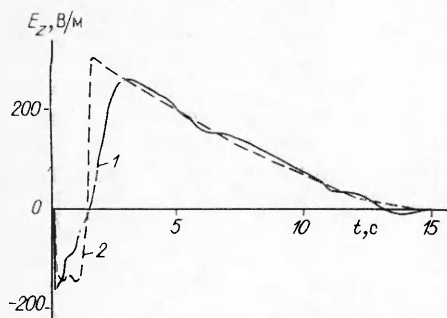
Типичная зависимость вертикальной составляющей напряженности E_z ЭП от времени t , зарегистрированная при взрывах на выброс [1], представлена на рисунке (кривая 1). Рассчитаем эволюцию электрического сигнала во времени на основе простой одномерной модели движения грунтового купола выброса и продуктов взрыва (ПВ), не конкретизируя вначале механизм электризации частиц.

При подъеме грунтового купола выброса частицы грунта и газообразные продукты взрыва заряжаются разноименно, причем, как показывает эксперимент, грунт несет на себе отрицательный заряд. Для расчета напряженности ЭП вдали от эпицентра взрыва полагаем, что весь грунт с зарядом $-Q_1(t)$ находится в верхней точке $H_1(t)$, а ПВ и пыль образуют узкий равномерно заряженный столб высоты $H_2(t)$ с общим зарядом $Q_2(t)$. Тогда вертикальная составляющая напряженности ЭП на поверхности земли на расстоянии R от эпицентра взрыва имеет вид

$$E_z = -\frac{Q_1 H_1}{2\pi\epsilon_0 (H_1^2 + R^2)^{3/2}} + \frac{Q_2}{2\pi\epsilon_0 H_2} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{(R^2 + H_2^2)^{1/2}} \right). \quad (1)$$

В этом выражении учтено поле индуцированных в земле электрических зарядов при условии ее идеальной проводимости.

Высоты подъема купола выброса и пылегазового облака могут быть приблизительно описаны функциями $H_1 = H_2 = u_{\text{н}}t - g_0 t^2/2$, где $u_{\text{н}}$ — начальная скорость грунта; g_0 — величина, существенно большая ускорения свободного падения g . Это связано в основном с сопротивлением воздуха движению грунта. Полагая, что на фазе подъема линейная



Характерный вид записи E_z ЭП в приземном слое атмосферы.

1 — при взрыве заряда ВВ в песке массой 0,0238 кг, на приведенной глубине 0,68 м/кг^{1/3} и расстоянии 5,2 м; 2 — расчетная зависимость $E_z(t)$, полученная по выражению (1).

плотность электрического заряда в пылегазовом столбе не изменяется, имеем $Q_2 = -Q_1 = Q_0 H_2 / H_m = Q_0 (u_n t - g_0 t^2 / 2) / H_m$, Q_0 — максимальный заряд на высоте наибольшего подъема H_m . На фазе падения грунта в выражении для H_1 следует положить $g_0 = g$. При этом заряд грунта $Q_1 = -Q_0$. Заряд Q_2 определяется прежней формулой, где H_2 уменьшается вследствие оседания частиц пылегазового облака. Для описания этого процесса необходимо учесть силы сопротивления воздуха, действующие на заряженные частицы пыли.

Полагаем скорость спуска и размер частиц a малыми, т. е. $Re < 1$. Тогда уравнение движения частиц массой $M(a)$ с зарядом $q(a)$ имеет вид

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = g - \frac{\vec{v} - \vec{u}_r}{\tau} + \frac{\vec{E}_c}{M}, \quad \tau = \frac{M}{6\pi\eta a}, \quad (2)$$

где v — скорость частицы; u_r — скорость газа; E_c — напряженность геоэлектрического и самосогласованного ЭП заряженных частиц и индуцированных в земле зарядов; η — коэффициент вязкости воздуха. Используя значения для размеров частиц пыли $a = 20$ мкм, для заряда частицы $q = 100 e$ (e — элементарный заряд) и напряженности ЭП, соответствующего условиям пробоя воздуха $E_{пр} = 30$ кВ/м, получаем $qE_{пр}/M = 0,7$ м/с² $\ll g$, т. е. влиянием ЭП на движение частиц таких размеров можно пренебречь. Тем не менее для мелкодисперсной пыли с большим удельным электрическим зарядом влияние фактора ЭП на движение может быть существенным.

Полагая для простоты $u_r = 0$ и интегрируя дважды уравнение (2) по t с момента времени начала падения, получаем $H_2 = H_m + \tau g (u_n / g_0 - t)$. Формула (1) и выражения для H_1 , H_2 , Q_1 , Q_2 на разных стадиях процесса описывают ЭП при взрыве на выброс. В момент $t = u_n g_0^{-1} (1 + \sqrt{g_0/g})$ первое слагаемое в (1) обращается в нуль, а $i_* = u_n g_0^{-1} + H_m (g\tau)^{-1}$ (полное осаждение пылегазового облака) поле исчезает, $E_z = 0$. Таким образом, измерение времени релаксации ЭП t_* позволяет оценить (в отсутствие ветра) средний размер заряженных частиц пыли.

Кривая 2 на рисунке показывает результаты расчета по полученным формулам, которые сравниваются с экспериментальной зависимостью. Использовались значения параметров $\eta = 1,7 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $a = 48$ мкм и кинематические характеристики движения купола выброса, полученные из киносъемки развития взрыва: $g_0 = 23$ м/с², $u_n = 14$ м/с. Параметры $Q_0 = 1,84$ мкКл и $H_m = 4,2$ м оценивались по экспериментальным значениям амплитуды в отрицательной фазе сигнала E_z с помощью метода наименьших квадратов [1]. Отметим, что форма начальной полуволны существенно зависит от распределения зарядов в куполе выброса. Лишь на больших расстояниях R , где справедливо дипольное приближение, сигнал сглаживается. Острый пик у второй полуволны — следствие приближения об одновременном падении частиц грунта.

Оценим влияние других механизмов возникновения ЭП при взрыве в грунте. Начальный пик электрического сигнала может быть связан с возмущением электромагнитного поля Земли сейсмической волной или обусловлен ударной поляризацией при детонации ВВ и распространении ударной волны (УВ) в грунте. Эффект магнитоупругой волны оценим с помощью соотношения $E_z \sim \mu_0 v_i H_3$, справедливом при частотах $\omega < \mu_0 \sigma_3 c_p^2$ [2], $H_3 = 40$ А/м — напряженность геомагнитного поля; v_i — скорость смещения грунта; c_p — скорость звука в грунте; σ_3 — коэффициент электропроводности. Для взрыва в песке при $\sigma_3 = 25$ См/м и $v_i \sim c_p \sim 100$ м/с получаем $E_z \sim 0,5$ мВ/м, т. е. эффект мал.

Ударная поляризация во фронте УВ пропорциональна амплитуде давления. Максимальный дипольный электрический момент p УВ оценим, интегрируя модуль вектора поляризации по объему радиуса R_0 , охваченному УВ [3]. Принимая, что амплитуда давления убывает с

расстоянием R от эпицентра взрыва по закону: $p = p_0(r_0/R)^n$, получим оценку

$$E_z \sim \frac{P}{4\pi\epsilon_0 R^3} \sim \frac{A p_0 r_0^n R_0^{(3-n)/3}}{\epsilon_0 (3-n) R^3},$$

где p_0 и r_0 — начальное давление и размер взрывной полости; A — коэффициент пропорциональности между поляризацией вещества и давлением. Задавая $A \sim 10^{-5}$ Кл/(м²·ГПа), $p_0 = 10$ ГПа, $r_0 = 1,5$ см, $R_0 = 10$ см, $n = 2$, получаем $E_z \sim 2$ В/м на расстоянии $R = 5$ м, что на 2 порядка меньше экспериментальной величины. Заметим, что пьезоэффект в случае взрыва в песке не существует, несмотря на то, что пьезомодуль кварца на 2 порядка больше величины A . Это связано с тем, что квазистатическое поле, наблюдаемое в [1], определяется суммарным дипольным моментом песчинок. Ввиду хаотической ориентации монокристаллов кварца в частицах песка, общий дипольный момент, обусловленный пьезоэффектом, равен нулю.

Электризация грунта при взрыве может возникнуть из-за трения и разрушения частиц. Величина поверхностного заряда, образующегося при скалывании поверхности кристаллов, порядка $5 \cdot 10^{-7}$ Кл/м² [4], что близко к плотности поверхностного заряда $\sim 10^{-6}$ Кл/м² в эксперименте [1]. Микроскол и разрушение связаны с концентрацией напряжений на поверхности контакта частиц грунта. Локальное напряжение на контакте выражается через среднее напряжение p в грунте в виде: $p_\pi = p^{1/3} (4E/3\pi(1-\nu^2))^{2/3}$ [5], где $E \sim 50$ ГПа — модуль Юнга кварца (при взрывах в песке), $\nu \sim 0,25$ — коэффициент Пуассона. Для разрушения необходимо, чтобы $p_\pi \geq 1$ ГПа, откуда $p > 2$ МПа. Такие давления возникают в достаточно большой области за фронтом УВ.

В момент прорыва газов через купол выброса вместе с ПВ выносятся заряженные фрагменты разрушенных частиц грунта и пыль. Обозначим ρ_* — плотность заряда микрочастиц, содержащихся в ПВ. Тогда с момента начала движения через поверхность купола выброса площади

$S(t)$ выносятся электрический заряд $Q \sim \int_0^t \rho_* S v_\pi dt$. Относительная скорость

продуктов взрыва v_π у поверхности купола пропорциональна $\Delta p / \Delta h$, где Δp — перепад давления на толщине купола Δh . Для взрывов на выброс с одинаковой приведенной глубиной заложения заряда ВВ характеристики движения обладают подобием. В частности $S \sim C^{2/3}$, $\Delta h \sim C^{1/3}$, $t \sim C^{1/3}$ (C — масса заряда ВВ, t — время до начала прорыва газов), а ρ_* и Δp практически не зависят от C . Учитывая эти соотношения получаем: $Q \sim C^{2/3}$, в то время как из экспериментальных данных получена зависимость $Q = KC^{0,5 \pm 0,085}$ [1]. Тем не менее, учитывая приближенный характер оценок, исключить данный механизм электризации грунта при взрыве нельзя.

Экспериментальную зависимость удается объяснить при рассмотрении взаимодействия грунта с ионизованными продуктами детонации заряда ВВ. Этот процесс характерен для начальной фазы взрыва, когда продукты детонации отделены от окружающей среды слоем грунта. Частичная ионизация возникает за счет образования химических свободных радикалов и вследствие тепловой ионизации, причем начальная концентрация электронов достигает $10^{18} \div 10^{20}$ см⁻³ [6]. До момента разрушения купола выброса на отдельные части продукты детонации диффундируют в толщу грунта по трещинам и порам, возникающим при взрыве. Поверхности трещин способны захватывать электрические заряды одного знака, в результате чего грунт приобретает заряд. Скорость фильтрации газа u_ϕ определяется градиентом давления p в соответствии с обобщенным законом Дарси. В системе отсчета, связанной с грунтом, имеем

$$-\nabla p = \frac{\eta_l}{k_l} \vec{u}_\phi + \frac{\rho_T}{k_T} \vec{u}_\phi |\vec{u}_\phi|, \quad (3)$$

где k_{λ} и k_{τ} — коэффициенты ламинарной и турбулентной проницаемости; ρ_r — плотность газа. При большой пористости среды m эмпирическая связь параметров имеет вид: $k_{\tau} = 200m^{5.5}\sqrt{k_{\lambda}}$ [7]. При нормальных условиях ($\eta = 1,7 \cdot 10^{-5}$ Па·с, $\rho_r = 1,2$ кг/м³) и $m = 0,4$, $k_{\lambda} = 2 \cdot 10^{-14}$ м² ламинарное слагаемое в (3) больше турбулентного вплоть до скоростей $u_{\phi} < 130$ м/с. Однако на начальной фазе взрыва, когда плотность газа уменьшается на 2—3 порядка, а коэффициент вязкости только на один порядок, возможен турбулентный режим фильтрации.

Оценим объем грунта V , взаимодействующий с ионизованными продуктами детонации. В ламинарном режиме глубина проникновения фронта диффузии за время t составит $r_d \sim \sqrt{Dt}$, где $D \sim k_{\lambda}p/\eta$ — коэффициент диффузии газа по трещинам. Задавая $p = 10 \div 10^{-3}$ ГПа, $t = 1$ мс, находим $r_d \sim 10 \div 0,1$ см. В случае больших градиентов давления или большой пористости грунта, когда преобладает турбулентный режим, оценки с помощью (3) дают $r_d \sim (k_{\tau}pt^2/\rho_r)^{1/3} \sim 0,4$ см. Используя эти оценки и учитывая подобие характерных величин при взрыве ($t \sim C^{1/3}$, $S \sim C^{2/3}$), получаем необходимые зависимости: $V \sim Sr_d \sim C^{5/6}$ при ламинарной диффузии и $V \sim C^{8/9}$ в случае турбулентного режима фильтрации.

Часть электрических зарядов, содержащихся в газе, проникшем в грунт, оседает на поверхности среды. Свободные электроны, имеющиеся первоначально в продуктах детонации, захватываются за время $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ с молекулами кислорода. Время релаксации зарядов ионов за счет электропроводности слабо ионизованного газа $\tau \sim \epsilon_0 \sigma \sqrt{MkT}/\alpha e^2$ (σ — сечение столкновений ионов с нейтральными частицами, M — масса ионов, α — степень ионизации). Полагая $\sigma \sim 10^{-17}$ м², $T \sim 10^3$ К, $\alpha \sim 10$, находим $\tau \sim 10^{-8}$ с, т. е. плазма остается квазинейтральной при $t > \tau$. Распределение по скоростям становится максвелловским за время $\tau_M \sim \sqrt{M/kT}/n\sigma < 10^{-11}$ с (n — концентрация нейтральных молекул).

Предположим, что газ помимо нейтральных молекул содержит ионы двух типов. Концентрация ионов n_1 (заряд $-e$) и n_2 (заряд $+e$) равны между собой в начальный момент времени, а затем изменяются вследствие процессов рекомбинации и захвата электронов ловушками в поверхностном слое трещин. Для концентраций ионов между стенками трещин имеем

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} + \text{div } \vec{j}_1 = \mu_p n_1 n_2 - \mu_s n_1 (N_{\lambda} - n_{\lambda})/d + \nu n_{\lambda}/d, \quad (4)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} + \text{div } \vec{j}_2 = -\mu_p n_1 n_2. \quad (5)$$

Здесь n_{λ} — поверхностная концентрация ловушек, заполненных электронами; $(N_{\lambda} - n_{\lambda})$ — поверхностная концентрация свободных ловушек; μ_p — константа рекомбинации; μ_s — константа захвата электронов ловушками; ν — частота ионизации ловушек; d — расстояние между берегами трещин. Плотности потоков частиц \vec{j}_1 , \vec{j}_2 обусловлены фильтрацией газа, а также амбиполярной диффузией, если имеются свободные электроны. В рамках рассматриваемой задачи важно учесть процессы рекомбинации и захвата, поэтому изменением концентрации ионов по пространству пренебрегаем, опуская в (4), (5) слагаемые $\text{div } \vec{j}_{1,2}$.

Условие квазинейтральности плазмы и стенок трещин имеет вид $n_1 + m_{\lambda} = n_2$, где $m_{\lambda} = n_{\lambda}/d$. Учитывая, что $m_{\lambda} \ll n_1$, $m_{\lambda} \ll n_2$, подставим $n_1 = n_2$ в (5). Интегрируя уравнение (5) по времени с начальным условием $n_2(0) = n_0$, имеем

$$n_2 \sim n_1 = n_0 (\mu_p n_0 t + 1)^{-1}. \quad (6)$$

При диссоциативной рекомбинации константа процесса $\mu_p \sim 10^{-6} \div 10^{-7}$ см³/с. Принимая $n_0 \sim 10^{15} \div 10^{18}$ см⁻³, замечаем, что при

$t \gg (n_0 \mu_p)^{-1} \sim 10^{-8} \div 10^{-12}$ с можно пренебречь единицей в знаменателе выражения (6).

Вычитая из (5) уравнение (4) и учитывая, что $N_n \gg n_n$, получаем

$$\frac{dn_n}{dt} = \nu_0 \exp(-E_s/kT) - \nu n_n. \quad (7)$$

Частота тепловой ионизации ловушек $\nu = \nu_0 \exp(-E_s/kT)$, где $\nu_0 \sim 10^{13}$ с⁻¹, а энергия уровня захвата $E_s \sim 0,1 \div 0,5$ эВ. При $T \sim 10^3$ К получаем $\nu^{-1} < 10^{-10}$ с, что гораздо меньше характерного времени развития взрыва $t \sim 1$ мс. Поэтому производная в (7) намного меньше второго слагаемого в правой части уравнения, и ее можно опустить. В результате из (6), (7) находим

$$n_n \approx \frac{N_n \mu_3}{\nu \mu_p t}.$$

Полученное соотношение позволяет оценить заряд, захваченный разрушенной средой: $Q \sim -etn_n V/d$, где V — объем грунта, взаимодействующий с ионизованными продуктами детонации. Используя полученные выше результаты, получаем следующие закономерности: $Q \sim C^{1/2}$ (ламинарный режим фильтрации); $Q \sim C^{5/9}$ (турбулентный режим фильтрации), которые хорошо согласуются с экспериментом [1], где установлен эмпирический закон $Q \sim C^{0,5 \pm 0,085}$ для максимального электрического заряда, возникающего в эпицентральной области при взрывах в песке и супеси.

Проведенный в работе анализ показывает, что ЭП в приземном слое атмосферы, возникающее при взрывах зарядов ВВ в грунте, связано с движением электрически заряженных купола выброса и пылегазового облака. Расчет изменений $E_z(t)$ по выражению (1), с учетом закономерностей движения грунта и оседания на землю заряженного пылегазового облака, согласуется с экспериментальными данными. Исследование показало, что эффекты ударной поляризации среды и возмущения электромагнитного поля Земли сейсмическими волнами приводят к гораздо меньшим величинам ЭП при взрыве. Электрический заряд грунта может достигать величины, полученной на опыте, за счет процессов разрушения и трения частиц грунта, но его зависимость от массы ВВ отличается от эмпирической. Предложен физический механизм разделения электрических зарядов при фильтрации продуктов взрыва в разрушенную взрывом среду с учетом релаксационного процесса в плазме, что позволило объяснить экспериментальную зависимость между электрическим зарядом купола выброса и массой ВВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адушкин В. В., Соловьев С. П. Докл. АН СССР, 1988, 299, 4, 840.
2. Горбачев Л. П., Сурков В. В. Магнитная гидродинамика, 1987, 2, 3.
3. Сурков В. В. ПМТФ, 1986, 1, 29.
4. Френкель Я. И. ЖЭТФ, 1948, 18, 9, 799.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теория упругости.— М.: Наука, 1987.
6. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах.— М.: Недра, 1980.
7. Маша Б. А., Биверс Ж. С., Перроу И. М. Тр. Америк. об-ва инж.-мех. Теор. основы инженерных расчетов, 1974, 96, 4, 145.

г. Москва

Поступила в редакцию 5/V 1989