

2,21 г/см³. Зафиксирована скорость $u = 2,3$ км/с, соответствующая давлению $p \approx 30$ ГПа. Известно [12], что превращение графита в алмаз начинается при ударном сжатии с давления $p \approx 20$ ГПа и почти завершается при $p \approx 40$ ГПа.

На фиг. 6, в представлена осциллограмма опыта, выполненного в тех же условиях нагружения ($p \approx 30$ ГПа), но без алюминиевой фольги на границе раздела графит — фторопласт. Как и в опыте с висмутом (см. фиг. 4, а), видно, что выходу ударной волны из проводника на границу его раздела с диэлектриком предшествует опережающее возмущение магнитного поля. В опыте с графитом, однако, в момент выхода ударной волны на границу раздела (отмеченном на фиг. 6, в стрелкой) ЭДС индукции в датчике исчезает, что служит наглядным свидетельством диэлектризации ударно-сжатого графита, т. е. превращения, по крайней мере, части его в алмаз.

Поступила 23 VI 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Альшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. — УФН, 1965, т. 85, вып. 2.
2. Иванов А. Г., Новиков С. А. Метод емкостного датчика для измерения мгновенной скорости движущейся поверхности. — Приборы и техника эксперимента, 1963, № 1.
3. Жугин Ю. Н., Крупников К. К. Индукционный датчик для регистрации кратковременных процессов. Авт. свид. № 468150. БИ, 1975, № 15.
4. Fritz J. N., Morgan J. A. An electromagnetic technique for measuring material velocity. — Rev. Sci. Instrum., 1973, vol. 44, N 2.
5. Нестеренко В. Ф. Бесконтактный метод измерения параметров ударно-сжатых металлов. — В кн.: Тезисы докладов III Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям. М., 1979.
6. Забабахин Е. И., Нечаев М. Н. Ударные волны поля и их кумуляция. — ЖЭТФ, 1957, т. 33, вып. 2(8).
7. Бюргерс Ж. М. Проникание ударной волны в магнитное поле. — В кн.: Магнитная гидродинамика (материалы симпозиума). М.: Атомиздат, 1958.
8. Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики. М.: Мир, 1967.
9. Кулешова Л. В. Электропроводность нитрида бора, хлористого кальция и фторопласта-4 за фронтом ударных волн. — ФТТ, 1969, т. 11, вып. 5.
10. Соболев В. С., Шкарлет Ю. М. Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967.
11. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1967.
12. Alder V. J., Christian R. H. Behavior of strongly shocked carbon. — Phys. Rev. Lett., 1961, vol. 7, N 10.

УДК 534.222

ИЗЛУЧЕНИЕ УПРУГИХ ВОЛН ПРИ ВЗРЫВЕ В ПОРИСТОЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

С. З. Дунин, А. М. Масленников, О. В. Нагорнов, В. С. Фетисов

(Москва)

Расчет сейсмических волн, образующихся при камуфлетном подземном взрыве, проводился в [1—4], где сделаны определенные упрощающие предположения. В [1, 2] среда за фронтом ударной волны предполагалась несжимаемой. На основе приближенной схемы развития взрыва в прочной горной породе, предложенной в [3], сделана оценка основных параметров продольных упругих волн, излучаемых при взрыве. В [4] рассмотрено влияние упругого предвестника на движение в ближней зоне взрыва для прочной горной породы в предположении, что на фронте волны выполняется условие сдвигового разрушения, за фронтом ударной волны среда не имеет прочности и описывается уравнением состояния, полученным по ударным адиабатам для твердого тела.

Представляет интерес задача об излучении упругой волны с минимумом упрощающих предположений, решить которую возможно только численными методами (см., например, [5, 6]).

Одной из важных задач при изучении сейсмического эффекта подземного взрыва в реальных грунтах и горных породах является получение детальных характеристик

излучаемых упругих волн. Здесь следует учитывать факторы, влияющие на формирование упругого сигнала: наличие пористости среды, характер насыщения пор, неоднородность деформирования реальной среды.

В [7] учет этих факторов основывался на эмпирических соотношениях. С другой стороны, физическая картина излучения упругих волн при подземном взрыве должна с самого начала учитывать динамику формирования упругого сигнала в средах со сложной реологией.

В данной работе исследуется излучение упругих волн при камуфлетном подземном взрыве с учетом динамики деформирования пористой насыщенной среды (переменная сжимаемость среды на фронте волны нагрузки, разгрузка за фронтом, необратимый характер объемных деформаций). Исследование проводится с помощью численного решения системы уравнений гидродинамики, учитывающих сдвиговую прочность среды. Многокомпонентность среды учитывается с помощью модельного уравнения состояния. Для уточнения профиля упругого предвестника производится пересчет. Анализируется влияние пористости, прочностных параметров среды, характера насыщения на характеристики излучаемой упругой волны.

Источник взрыва моделируется расширяющейся полостью, заполненной адиабатическим газом. Система уравнений, описывающая движение среды в лагранжевых координатах, имеет вид

$$(1) \quad \frac{\partial v}{\partial t} = v_0 \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial u}{\partial r_0} + \frac{2vu}{r}, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = v_0 \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial v_r}{\partial r_0} + \frac{2v\tau}{r},$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -p \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{2}{3} \tau \left(v_0 \frac{r^2}{r_0^2} \frac{\partial u}{\partial r_0} - \frac{vu}{r} \right), \quad \bar{r} = \bar{r}_0 + \int_0^t u \bar{u} \bar{t},$$

где v и e — удельный объем и удельная энергия многокомпонентной среды; v_0 — начальный удельный объем; u — скорость; $\tau = \sigma_r - \sigma_\varphi$; $p = -(\sigma_r + 2\sigma_\varphi)/3$; σ_r и σ_φ — радиальная и угловая компоненты тензора напряжений; r и r_0 — эйлерова и лагранжева координаты; t — время. Система уравнений (1) замыкается уравнением состояния среды и упруго-пластическими соотношениями:

в упругой области закон Гука

$$(2) \quad \partial \tau / \partial t = 2G(\partial u / \partial r - u/r),$$

где G — модуль сдвига;
в пластической зоне

$$(3) \quad |\tau| = \alpha + kp,$$

где α — коэффициент сцепления; k — коэффициент трения.

Тензор напряжений σ_{ij} связан с тензором напряжений σ_{ij}^0 , действующим в твердом компоненте, и давлением газа (или жидкости) q в поре [8]:

$$\sigma_{ij} = (1 - m) \sigma_{ij}^0 - mq \delta_{ij},$$

где m — объемная пористость; δ_{ij} — символ Кронекера. Для связи давления в твердом компоненте и насыщающем пору веществе использовалась модель многокомпонентной среды [9], которая удовлетворительно описывает поведение пористых газонасыщенных и водонасыщенных грунтов и горных пород при нагрузке и разгрузке. Макроскопическое пластическое течение и пластическое течение в окрестности поры описываются разными прочностными параметрами. (Предполагается, что размер поры много меньше размера кусков, на которые разрушается среда.) Данная модель среды описана в [10].

Система уравнений (1) — (3) интегрировалась численно. Для размазывания разрывов вводилась искусственная линейно-квадратичная вязкость [10]. Пересчет излучаемой упругой волны производился по следующей схеме. Рассчитывался годограф точки, разделяющей упругую и пластическую области на фронте волны нагрузки $R_*(t)$, и вычислялись значения радиальных напряжений на $R_*(t)$. Параметры упругой волны можно выразить через одну неизвестную функцию $f(\xi)$ — потенциал упру-

гих смещений:

$$v^* = c_0 \left[\frac{\ddot{f}(\xi)}{x} + \frac{\dot{f}(\xi)}{x^2} \right], \sigma_r^* = -\rho_0 c_0^2 \left[\frac{\ddot{f}(\xi)}{x} + \right. \\ \left. + 2 \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left(\frac{\dot{f}(\xi)}{x^2} + \frac{f(\xi)}{x^3} \right) \right] - p_*, \\ \sigma_\varphi^* = -\rho_0 c_0^2 \left[\frac{\nu}{1-\nu} \frac{\ddot{f}(\xi)}{x} - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left(\frac{\dot{f}(\xi)}{x^2} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{f(\xi)}{x^3} \right) \right] - p_*, \rho^* = \rho_0 \left[1 - \frac{\ddot{f}(\xi)}{x} \right],$$

где $\xi = c_0 t/a - x$; $x = r/a$; v^* — скорость; ν — коэффициент Пуассона; p_* — литостатическое давление; a — радиус, с которого начинается излучение упругих волн; c_0 — продольная скорость звука. Чтобы найти $f(\xi)$, достаточно решить уравнение, задаваемое на линии $r = R_*(t)$:

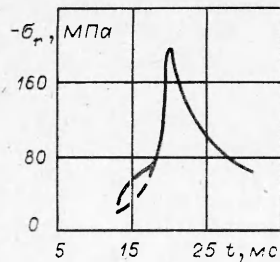
$$\left[\frac{\ddot{f}(\xi)}{x} + 2 \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left(\frac{\dot{f}(\xi)}{x^2} + \frac{f(\xi)}{x^3} \right) \right]_{x=R_*(t)/a} = - \frac{\sigma_r(r=R_*(t))}{\rho_0 c_0^2}.$$

Данное обыкновенное дифференциальное уравнение интегрировалось численно методом Рунге — Кутты с нулевыми начальными условиями $f(0) = 0, \dot{f}(0) = 0$. Упругая энергия, излучаемая при взрыве, рассчитывалась по формуле

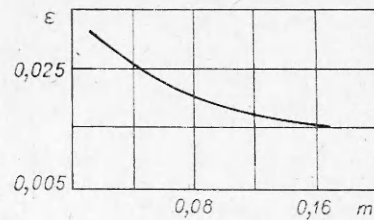
$$e^* = 4\pi\rho_0 a^3 c_0^2 \int_0^\infty [\ddot{f}(\xi)]^2 d\xi.$$

Расчеты показывают, что введение искусственной вязкости приводит к выполаживанию профиля упругого предвестника. На фиг. 1 проведено сравнение профилей радиального напряжения в волне нагрузки с пересечением упругой энергии (сплошная кривая) и без пересчета [10] (штриховая кривая) на расстоянии $7a$ при пористости 7%. Результаты расчетов показывают, что основная часть излучаемой упругой энергии излучается при движении фронта пластической волны нагрузки (т. е. до момента исчезновения пластической зоны на фронте волны нагрузки). Этот эффект связан с тем, что скорость излучения упругой энергии пропорциональна произведению радиального напряжения на массовую скорость в упругой волне, а на этом этапе излучения уровень напряжений и массовая скорость на отрывающемся упругом предвестнике весьма значительны.

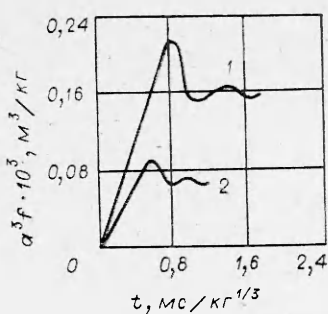
С увеличением газонасыщенной пористости амплитуда волны нагрузки интенсивнее затухает, уменьшается радиус пластичности и соответственно уменьшается время излучения упругой энергии. Амплитуда упругой волны на отрыве (в точке $R_*(t)$) с увеличением пористости спадает со временем более быстро. Поэтому увеличение газонасыщенной пористости приводит к значительному уменьшению излучаемой упругой энергии (фиг. 2, ε — отношение излученной упругой энергии к полной энергии



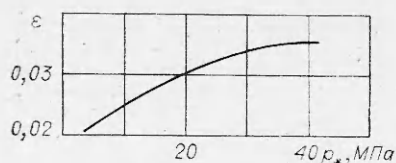
Фиг. 1



Фиг. 2



Ф и г. 3



Ф и г. 4

взрыва). Видимая частота (на которую приходится максимум излученной упругой энергии) увеличивается с ростом пористости. Например, при увеличении газонасыщенной пористости от 3 до 13% видимая частота увеличивается на 30%. При этом остаточные смещения в упругой области, пропорциональные величине $f(\infty)/r^2$, уменьшаются примерно в 2 раза. На фиг. 3 приведены зависимости потенциалов упругих смещений от времени для газонасыщенных пористых сред (1 — $m = 3\%$, 2 — $m = 13\%$).

На фиг. 4 построена зависимость излученной упругой энергии (отношенной к полной энергии взрыва) от литостатического давления. С ростом литостатического давления пористость уменьшается. Это приводит к увеличению излучаемой сейсмической энергии, что соответствует экспериментальным данным [11].

Насыщение пор жидкостью делает среду более жесткой (по сравнению с газонасыщенной средой), увеличиваются радиус пластичности и время излучения упругой энергии. Это приводит к увеличению излучаемой упругой энергии и уменьшению видимой частоты.

Как показали расчеты, излученная упругая энергия слабо изменяется при варьировании параметров прочности среды. Так, с увеличением коэффициента сцепления при неизменной пористости от 15 до 30 МПа излученная упругая энергия уменьшается на 5%. Увеличение коэффициента сцепления среды ведет к уменьшению времени излучения упругой волны и увеличению уровня напряжений в отрывающемся упругом предвестнике.

Таким образом, газонасыщенная пористость является основным фактором, влияющим на развитие подземного взрыва. Значительная концентрация напряжений в окрестности пор приводит к появлению пластического течения и затеканию пор. Это существенно влияет на характер распространения пластической волны нагрузки, а также на упругую волну, формирование которой происходит на фронте пластической волны.

Поступила 15 XII 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Ловецкий Е. Е. Некоторые вопросы теории взрыва в пористом грунте.— Изв. АН СССР. ОТН, 1959, № 6.
2. Зволинский Н. В. Об излучении упругой волны при сферическом взрыве в грунте.— ПММ, 1960, т. 24, вып. 1.
3. Костюченко В. Н., Родионов В. Н. Об излучении сейсмических волн при мощных подземных взрывах в прочных горных породах.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1974, № 10.
4. Корявов В. П. О влиянии упругого предвестника на движение в ближней зоне взрыва.— Там же.
5. Хользер Ф. Расчет механизмов действия сейсмических источников.— Сб. пер. Механика, 1968, № 2.
6. Баталов Б. А., Свидинский В. А. Исследование влияния параметров среды на размеры полости при взрыве.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, № 12.
7. Родин Г. Сейсмология ядерных взрывов. М.: Мир, 1974.
8. Николаевский В. Н., Басниев В. К., Горбунов А. Г., Зотов Г. А. Механика насыщенных пористых сред. М.: Недра, 1970.
9. Дуниа С. З., Сурков В. В. Уравнение состояния газонасыщенных сред.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1978, № 11.
10. Ловецкий Е. Е., Масленников А. М., Фетисов В. С. Механический эффект и диссипативные процессы при взрыве в пористой среде.— ПМТФ, 1981, № 2.
11. Коган С. Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука, 1975.