

столь значительным по причине нарушения геометрического подобия в размере полости, например, из-за возрастания литостатического давления или прочности грунта с глубиной.

В области провальных воронок расположение модельных кривых, которые построены по измерениям $R_{эф}$ меняются: радиусы воронок более мощных взрывов располагаются выше. Среди данных натуральных взрывов отмечается большой разброс. Кроме того, не указано, в каких случаях образовалась зона проседания, приводятся только внутренняя воронка и размеры воронки, не указаны мощности взрывов. Это осложняет анализ. Поэтому можно лишь отметить, что модельные кривые располагаются в самой гуще натуральных точек. Вероятно, что в этих случаях процессы образования провальной воронки в натуре и модели подобны.

*Поступила в редакцию
24/III 1972*

ЛИТЕРАТУРА

1. Engineering with nuclear explosives. Proc. 3-rd. Plowshare Symp., 1965.
2. G. W. Johnson, G. G. Higgins. Rev. of Geophysics, 1965, 3, 3.
3. М. А. Садовский, В. В. Адушкин, В. Н. Родионов. Докл. АН СССР, 1966, 167, 6.
4. В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
5. В. В. Адушкин, Т. А. Орленко. МТТ, Изд. АН СССР, № 2, 1970.
6. Subsidence related to underground nuclear explosions. Nevada test site, Bulletin of the Seismological Society of America, 1969, 59, 6.

УДК 550.348.425

КИНЕТИКА УТЕЧКИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ В ПОРИСТОМ ГРУНТЕ

*В. И. Куликов
(Москва)*

Большинство модельных исследований различных сторон подземного взрыва в лабораторных условиях выполнено в песчаном пористом грунте. Интерпретация их результатов и перенос их на натуре обычно проводятся в предположении, что утечкой продуктов взрыва из полости в поровое пространство грунта можно пренебречь. Однако никаких оценок на этот счет до сих пор опубликовано не было, хотя имеются экспериментальные данные, показывающие, что в ряде случаев утечка продуктов детонации влияет на эффект взрыва. Так, в работе [1] приводятся экспериментальные результаты, полученные при взрыве химических зарядов в начальных воздушных полостях, показывающие существенность утечки продуктов детонации в поровое пространство грунта в процессе расширения камуфлетной полости, показано влияние утечки на размер котловой полости и на характер затухания взрывной волны в грунте. По экспериментальным данным авторы работы [1] оценили конечную массу продуктов взрыва, остающуюся в полости к моменту ее расширения до максимального размера. В настоящей работе в рамках

теории фильтрации делается попытка восстановить кинетику процесса утечки, определить объем грунта, заполненный фильтрующимися продуктами, и оценить скорость распространения «фронта» фильтрации.

Ставится и численно решается нестационарная сферически симметричная задача о фильтрации продуктов взрыва из полости в грунт при заданном законе расширения полости и поле скоростей скелета грунта. Используется закон Дарси с учетом линейного и квадратичного членов, режим фильтрации предполагается адиабатическим. Проведены расчеты, соответствующие условиям конкретных экспериментов, описанных в работе [1], результаты которых находятся в удовлетворительном согласии с данными лабораторных исследований.

Постановка задачи

Будем предполагать, что фильтрация продуктов детонации в поровом пространстве грунта описывается законом Дарси:

$$-\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\mu}{k} v + \frac{\rho v^2}{k_T}, \quad (1)$$

где μ — вязкость газов; k и k_T — константы, характеризующие проницаемость грунта; v — скорость фильтрации газов

$$v = \alpha(u - w) \quad (2)$$

(u — скорость газов, w — скорость частиц грунта и α — пористость среды).

Если изменением пористости среды пренебречь, то уравнение неразрывности для фильтрующегося газа в сферически симметричном случае будет иметь обычный вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\rho u r^2) = 0. \quad (3)$$

Согласно выражению (2), исключим u из уравнения (3):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho r^2 \left(w + \frac{v}{\alpha} \right) \right] = 0. \quad (4)$$

Помножим обе части уравнения (1) на ρ , найдем из него ρv и подставим в уравнение (4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho w r^2 + \frac{r^2}{\alpha} \left(-b + \sqrt{b^2 - \rho k_T} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] = 0, \quad (5)$$

где $b = \frac{\mu k_T}{2k}$.

Будем предполагать, что расширение газа в порах грунта происходит адиабатически, тогда в уравнении (5) проведем замену

$$\rho = A p^n. \quad (6)$$

Скорости частиц грунта w выразим через скорость расширения полости $\dot{a}$, согласно интегралу движения:

$$w = \dot{a} \left(\frac{a}{r} \right)^\delta, \quad (7)$$

который получен рядом авторов экспериментально при взрыве в песчаном грунте. В частности, в работе [2] приводится значение $\delta = 1,6$. После подстановок соотношений (6) и (7) в уравнение (5) получим

$$A \frac{\partial p^n}{\partial t} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[A p^n r^2 \dot{a} \left(\frac{a}{r} \right)^\delta + \frac{r^2}{\alpha} \left(-b + \sqrt{b^2 - A k_T p^n} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \right] = 0. \quad (8)$$

Начальное условие запишем в виде:

$$\begin{aligned} t=0, \quad r=a_0, \quad p=p_0, \\ r>a_0, \quad p=p_1, \end{aligned} \quad (9)$$

где a_0 — начальный радиус полости; p_0 — начальное давление продуктов взрыва в полости, p_1 — давление порового воздуха. Граничное условие:

$$r=a, \quad p=p_0 \frac{\left(\frac{m}{m_0}\right)^\gamma}{\left(\frac{a}{a_0}\right)^{3\gamma}}. \quad (10)$$

Здесь a и m — текущие значения радиуса полости и массы продуктов взрыва в ней; m_0 — начальное значение массы газов в полости; γ — показатель адиабаты продуктов детонации. Условие (10) означает, что давление продуктов взрыва в полости изменяется адиабатически за счет ее расширения и утечки части продуктов взрыва из полости в грунт.

Массу газа m , входящую в уравнение (10), найдем из выражения

$$m=m_0-\int_0^t 4\pi a^2 \rho v dt, \quad (11)$$

где значение расхода ρv берется на границе полости при $r=a$. Используя уравнение (1), сделаем замену ρv , тогда окончательно получим

$$m=m_0-\int_0^t 4\pi a^2 \left(-b + \sqrt{b^2 - Ak_\tau p^n \frac{\partial p}{\partial r} \bigg|_{r=a}} \right) dt. \quad (12)$$

Таким образом, задача сводится к решению уравнения (8) совместно с (12) с начальным условием (9), граничным (10) и заданным законом расширения полости $\dot{a}(t)$. Задача решалась численно. Была выбрана явная четырехточечная схема с количеством точек, равным 100, и размером сетки, равным половине радиуса заряда. Шаг по времени оценивался так же, как для обычного уравнения теплопроводности.

Перед составлением расчетной схемы был сделан переход в систему координат x, t согласно формуле:

$$x=r-\int_0^t \dot{a} dt,$$

в которой граница полости неподвижна.

Результаты расчетов

Расчеты проводились для случаев, соответствующих экспериментам, описанным в работе [1], т. е. подрыву зарядов из тэна в начальных воздушных полостях, предварительно созданных в грунте. Начальный радиус полости имел значения: $a_0=3,6 R_0$, $6,33 R_0$ и $9,3 R_0$, где R_0 — радиус заряда, равный 5,13 мм. Начальное давление продуктов взрыва оценивалось по уравнению состояния продуктов детонации гексогена [3] и равнялось соответственно: $p_0=500$, 83 и 25,2 атм. Давление порового воздуха принималось равным атмосферному, вязкость продуктов взрыва бралась равной вязкости воздуха и ее зависимость от температуры не учитывалась.

В соответствии с гранулометрическим составом грунта, в котором проводились экспериментальные исследования (пористость 40%, сред-

ний размер частиц 0,23 мм), из работы [4] были выбраны значения констант проницаемости среды k и k_T . Расчеты проводились для двух вариантов грунта: 1) $k=19$ дарси и $k_T=5 \cdot 10^{-4}$ см; 2) $k=4$ дарси и $k_T=8 \cdot 10^{-5}$ см.

Ввиду того, что значения k_T , приведенные в [4], имеют порядок величин не соответствующий исходным экспериментальным данным, по которым производилось их вычисление, они были уменьшены нами на три порядка.

Наконец, в расчет закладывались экспериментально полученные зависимости скорости расширения полостей $a(t)$, которые были описаны интерполяционными полиномами. О характере расширения полостей во времени дает представление кривая $a(t)$ (см. рис. 5).

Рассмотрим подробнее результаты расчетов для взрыва в полости с начальным радиусом $a_0=6,33 R_0$, которые приведены на рис. 1—5. На рис. 1 показано изменение массы газа, находящейся в полости, от времени (1, 2 — расчетные варианты «грунта»).

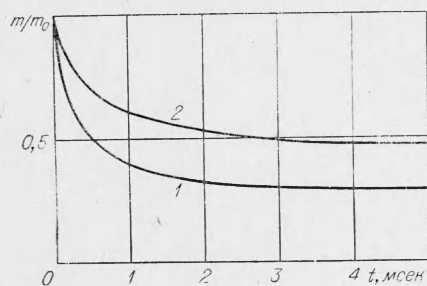


Рис. 1.

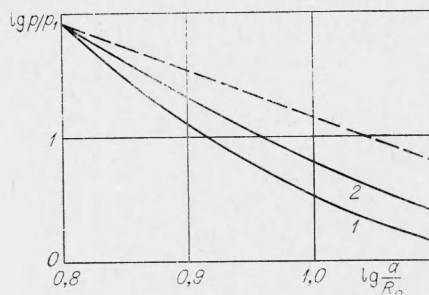


Рис. 2.

На рис. 2 показано изменение давления продуктов взрыва в камуфлетной полости в зависимости от ее радиуса. Давление продуктов взрыва отнесено к поровому давлению, радиус полости выражен в радиусах заряда, масштаб по обеим осям логарифмический. Здесь же штрихом для сравнения приведено изменение давления газов в полости по адиабате при отсутствии утечки. Эти данные показывают, что утечка происходит вплоть до давлений, составляющих несколько атмосфер, т. е. практически в течение всего времени расширения полости.

Работа продуктов взрыва по образованию полости в грунте

$$A = \int p dV$$

существенно уменьшается вследствие утечки газов в поры среды. Так, если без утечки газов при расширении продуктов взрыва до 1 атм имеем $A=0,587 C$, где C — энергия заряда, то оценки по результатам расчетов дают следующие значения: $A=0,15 C$ для первого варианта и $A=0,28 C$ для второго варианта «грунта». Отсюда следует, что утечка вызывает уменьшение энергетического эквивалента заряда до величины, равной 0,25—0,48. Интересно отметить, что из сравнения кинетических энергий грунта, полученных экспериментально при взрыве с утечкой и без нее, был сделан вывод о потере 74% энергии заряда за счет фильтрации, т. е. эквивалент взрыва вследствие утечки по экспериментальным наблюдениям для полости с $a_0=6,33 R_0$ уменьшается до 0,26 [1].

На рис. 3 показаны эпюры давления фильтрующегося газа в различные моменты времени, а на рис. 4 распределения скоростей фильтрующихся продуктов взрыва по пространству (1—0,5 мсек, 2—1 мсек, 3—2 мсек). Здесь же для сравнения пунктиром приведены профили

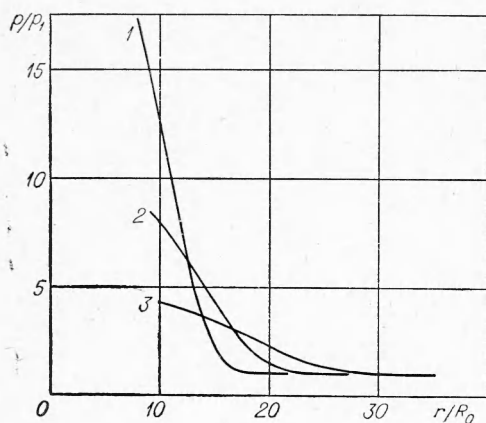


Рис. 3.

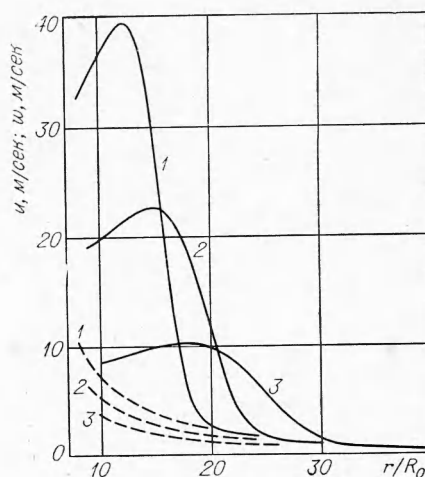


Рис. 4.

скоростей частиц грунта в эти же моменты времени, полученные экспериментально авторами работы [1]. Приведенные распределения соответствуют расчету по первому варианту «грунта».

На рис. 5 показаны годограф волны сжатия в грунте (экспериментальный результат [1]), обозначенный R^0 , годографы различных уровней давления фильтрующихся газов, граница полости, обозначенная a , и «фронт» фильтрации. Последний определялся следующим способом: расчетные эпюры плотности газа интегрировались по пространству от границы полости до некоторого значения R^* , при котором этот интеграл равнялся массе профильтровавшихся из полости продуктов. Это значение R^* принималось за «фронт» фильтрации, по физическому смыслу

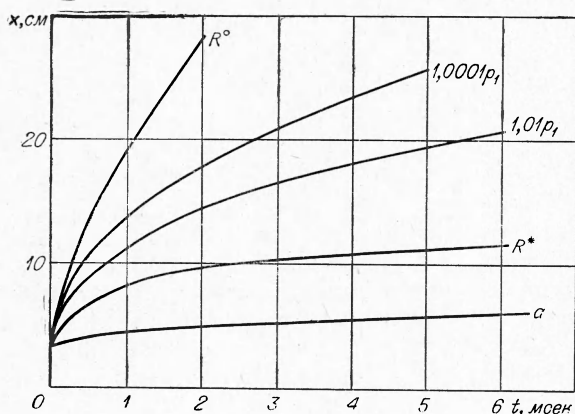


Рис. 5.

представляющему собой контактную границу между фильтрующимся газом и поровым воздухом. Хотя в нашей задаче свойства фильтрующегося газа и порового воздуха идентичны, указанным способом можно условно отделить газы, которые в начальный момент времени были в полости и в порах грунта. Исходя из этих данных, были получены следующие скорости распространения «фронта» фильтрации 60 м/сек в момент времени 0,25 м/сек, 24 м/сек через 1 м/сек и 5 м/сек через 4 м/сек. Скорости распространения «фронта» фильтрации оказались значительно ниже скорости распространения волны сжатия в грунте. Эти результаты также относятся к расчетам по первому варианту «грунта».

Аналогичные результаты были получены для взрыва в начальных полостях с $\dot{a}_0 = 3,6 R_0$ и $9,3 R_0$. Ограничимся здесь лишь приведением конечной массы продуктов взрыва, фильтрующейся в грунт, значения

По оси ординат отложена масса газа m_* , которой приведены точками на рис. 6. заполняющая поровое пространство грунта, отнесенная к начальной массе продуктов взрыва (1, 2 — расчет по первому и второму вариантам «грунта» соответственно). Для сравнения на этом рисунке приведена кривая массы профильтровавшихся продуктов, полученная по экспериментальным данным [1]. Как видно из рис. 6, расчеты по теории фильтрации дают результаты, близкие к экспериментальным данным. Можно ожидать, что учет теплопередачи между фильтрующимся газом и скелетом грунта увеличил бы расчетные значения массы профильтровавшихся продуктов и совпадение результатов счета с экспериментальными данными было бы лучшее.

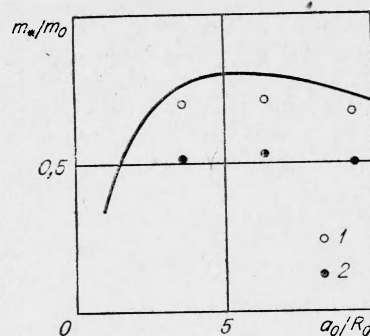


Рис. 6.

Было рассмотрено влияние на утечку газа движения скелета грунта в волне сжатия. Расчеты, проведенные при $\delta=10$ и $\delta=0$, что соответствует практически неподвижному грунту и грунту, движущемуся со скоростью расширения полости, дали незначительно отличающиеся результаты, т. е. эффект «увлечения» газа движущимся скелетом грунта невелик.

Теплопередача в настоящей задаче не учитывалась, однако ее влияние было рассмотрено следующим образом: если внутри полости вне режима фильтрации бралась адиабатическая связь давления газа с плотностью, то в поровом пространстве грунта вместо адиабаты бралась политропа с показателем, большим показателя адиабаты, что соответствует теплоотводу от фильтрующегося газа. Были проведены расчеты с показателем адиабаты внутри полости, равным 1,25, и показателями политропы, равными 1,5 и 1,75. Эти значения показателя политропы обеспечивали уменьшение абсолютной температуры фильтрующегося газа на «фронте» фильтрации в 2 и 3 раза по сравнению с температурой на «фронте» при адиабатической фильтрации, а расчетные значения массы фильтрующихся продуктов получились равными 75 и 78%, в то время как при адиабатической фильтрации, т. е. без теплопередачи, фильтруется 72% от массы заряда. Эти результаты показывают, что, хотя теплопередача усиливает «утечку газа в расчетах», она не является определяющей в настоящей задаче.

Перенос полученных результатов на случаи взрыва зарядов большего веса требует известной осторожности, так как неясен характер подобия утечки продуктов взрыва от энергии заряда. Непосредственным анализом задачи не удалось выявить зависимость массы фильтрующихся продуктов от веса заряда, поэтому для оценки были проведены расчеты утечки продуктов при взрыве в начальной полости с радиусом $a_0 = 6,33 R_0$ для зарядов весом от 1 до 10^9 г, которые показали, что с увеличением масштаба взрыва доля продуктов взрыва, фильтрующихся в поры грунта, уменьшается. Например, при взрыве заряда весом 1 г по расчету фильтруется 71% массы продуктов детонации, при взрыве заряда 10^3 г — 51%, 10^6 г — 27% и 10^9 — 12,5%. В указанном диапазоне изменения веса заряда результаты расчетов массы фильтрующихся продуктов m_* в зависимости от веса или энергии заряда могут быть приближенно описаны выражением

$$m_* \sim C^{0,93}.$$

При постановке задачи в уравнении Эйлера были опущены инерционные члены $\rho \frac{\partial u}{\partial t}$ и $\rho u \frac{\partial u}{\partial r}$. Оценки, проведенные по результатам расчетов, показали, что инерционные члены на два-три порядка меньше остальных членов уравнения движения, так что пренебрежение ими вполне оправдано.

В законе Дарси (1) были взяты линейный и квадратичный по скорости члены, что соответствует двум режимам фильтрации. Оценки показали, что ламинарный и турбулентный члены в настоящей задаче имеют одинаковый порядок к моменту времени, которому соответствует фильтрация 60—70% от конечной массы профильтровавшегося газа, так что учет квадратичного члена в подобных задачах необходим, а на первой стадии расчета он основной.

Таким образом, приведенные выше результаты расчетов кинетики утечки продуктов детонации при взрыве в пористом грунте подтвердили эффект значительной фильтрации продуктов взрыва в поровое пространство грунта, позволили восстановить кинетику процесса и исследовать влияние ряда факторов на характер утечки. Поставленная выше задача и ее реализация на БЭСМе в целом правильно отражают явление, наблюдаемое экспериментально, и могут служить самостоятельным инструментом теоретического исследования аналогичных явлений при подземном взрыве.

В заключение автор выражает благодарность И. Л. Зельманову и В. И. Бергельсону за интерес к работе и помощь при постановке задачи и в ходе ее решения.

Поступила в редакцию
24/V 1972

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Куликов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1971, 7, 3.
2. И. Л. Зельманов и др. ФГВ, 1968, 4, 1.
3. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1966, 2, 4.
4. Г. Ф. Требин. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах. М., ГИТИНТЛ. 1959.

УДК 532.593

РАСЧЕТ ВЗРЫВА В ВОДЕ ПО ОПЫТНЫМ ДАННЫМ О РАСШИРЕНИИ ПОЛОСТИ

П. Ф. Коротков, В. С. Лобанов, Б. Д. Христофоров
(Москва)

Приведены численные расчеты уравнений гидродинамики, в которых по экспериментальной зависимости радиуса газового пузыря от времени рассчитаны параметры ударной волны и давление в расширяющемся пузыре при подводном взрыве сферического заряда ВВ. Приведено сравнение результатов расчета для взрывов зарядов из тэна полностью 0,4 г/см³ с экспериментальными данными. С помощью предложенной