

3. А. Н. Ромашов, В. Ф. Евменов, В. А. Поддубный.— В сб.: Работа продуктов детонации при взрыве на выброс. Ч. III. Киев, «Наукова думка», 1970.
4. М. М. Докучаев, В. Н. Родионов, А. Н. Ромашов. Взрыв на выброс. М., «Наука», 1963
5. А. Н. Ромашов, Н. Н. Симонов.— В сб.: Взрывное дело, № 64/21. М., «Недра», 1968.
6. В. Н. Родионов и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971
7. А. Н. Ромашов, С. А. Симонян.— В сб.: Специальные работы в промышленном строительстве. Вып. 7. М., ЦБНТИ Минмонтажспецстроя, 1973.
8. В. Б. Лебедев и др.— В сб.: Взрывное дело, № 64/21. М., «Недра», 1968.

### О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВЗРЫВА В ПОРИСТЫХ СЫПУЧИХ СРЕДАХ

*В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич*

(Москва)

Настоящая статья продолжает работы [1—3], в которых рассматривается вопрос о возможности интенсивного теплообмена со средой на начальной стадии развития взрыва, когда температура и давление продуктов детонации весьма велики. Поскольку прямых экспериментальных данных по кинетике этого процесса нет, целесообразно обсудить некоторые особенности взрывов в сыпучих пористых материалах, подтверждающие, на наш взгляд, справедливость выдвинутых в [1—3] концепций.

При камуфлетных взрывах в грунтах основная доля потенциальной энергии ВВ расходуется в зоне размером порядка нескольких радиусов заряда. По своей природе эти потери можно разделить на две основные части: прямые тепловые потери, вызванные быстрым проникновением газов в поры и трещины с последующим их охлаждением или сорбционным захватом твердыми частицами; механические потери, связанные в основном с внутренним трением.

В любой момент при развитии взрыва в песке закон сохранения энергии можно представить в виде

$$E_0 = E_k + E_n + E_y + E_d, \quad E_d = E_m + E_t. \quad (1)$$

Здесь  $E_0$  — начальная энергия взрыва, равная теплоте химического превращения ВВ;  $E_k$  — кинетическая энергия грунта;  $E_n$  — энергия газов — продуктов детонации к данному моменту времени;  $E_y$  — энергия упругого деформирования;  $E_d$  — энергия, диссипированная в грунте;  $E_m$  — механические потери;  $E_t$  — тепловые потери.

При достаточно больших деформациях песка  $E_y \ll E_d$ . Вместо времени можно брать зависимость всех величин от радиуса фронта волны сжатия  $R$ , который в свою очередь однозначно зависит от радиуса полости  $a$ . Тогда из (1) получаем

$$E_d(R) = E_0 - E_k(R) - E_n(R). \quad (2)$$

Величина  $E_0$  определяется по табличным данным (расчет изэнтропической зависимости  $p_s(V)$  [4]), а  $E_k$  — из экспериментов по определению полей массовых скоростей [5].

Опыты проводились в кварцевом песке с насыпной плотностью  $\rho_0 = 1,55 \text{ г/см}^3$ , пористостью 40,5%, влажностью менее 1%. Использовались заряды тэна массой 0,8 г с плотностью  $1,45 \text{ г/см}^3$ , диаметром 10 мм. Критический диаметр для тэна менее 1 мм. Таким образом, обеспечивалась 100%-ная полнота детонации, что контролировалось

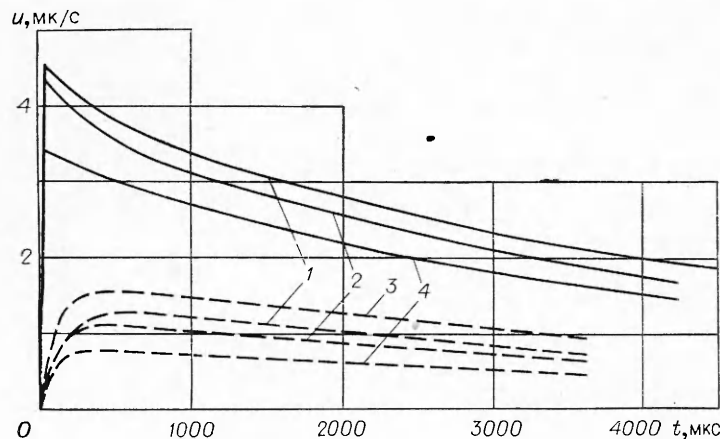


Рис. 1. Эпюры массовых скоростей на различных расстояниях от центра взрыва.

1 — заряд без оболочки; 2 — заряд в свинцовой оболочке,  $R_{об}/a_0=2,4$ ; 3 — заряд в свинцовой оболочке,  $R_{об}/a_0=3$ ; 4 — заряд в пластилиновой оболочке,  $R_{об}/a_0=3,5$ . Сплошные линии —  $R/a_0=19,2$ ; штриховые —  $R/a_0=38,4$ .

также и специально поставленными экспериментами. Измерения массовых скоростей проводились с помощью индукционного метода [5]: миниатюрные плоские катушки (датчики) перемещаются вместе со слоями песка в постоянном во времени, но переменном по длине магнитном поле.

Схема проведения эксперимента и образцы осциллограмм массовой скорости приведены в [5, 6], точность измерений в пределах нескольких процентов, разброс экспериментальных данных не более 10%. На рис. 1 приведены усредненные по многим опытам зависимости массовой скорости  $u$  от времени  $t$  для двух приведенных расстояний от центра взрыва и для различных условий взрывания. По полученным кривым можно определить зависимости  $E_k(t)$  и  $R(t)$ . Независимо от времени  $t$  производится измерение радиуса полости  $a$ . Изменение давления  $p_s(a)$  с ростом  $a$  в предположении отсутствия теплообмена вычисляется по изэнтропе продуктов разложения тэна [4]. По этим данным рассчитываются  $E_n(a)$  и  $E_n(R)$ .

Полученная, таким образом, картина развития взрыва в песке изображена на рис. 2. Здесь по оси абсцисс отложен безразмерный радиус взрывной полости (по отношению к радиусу заряда  $a_0$ ). Четыре кривыми разного масштаба представлена зависимость давления в полости от этой величины. Кривая  $R/a_0$  показывает положение фронта волны,  $E_k/E_0$  — кинетическая энергия грунта,  $E_n/E_0$  — энергия газов в полости. Видно, что максимальное значение кинетической энергии, составляющее всего 7,4% полной энергии взрыва, достигается при расширении полости в 2,45 раза. Фронт в это время находится на расстоянии, равном 4,4 радиуса заряда. Энергия газов в полости составляет 23%. Таким образом, к этому моменту времени в грунт передано 77% энергии ВВ, из которых около 70% уже диссипировало. Подчеркнем, что здесь речь идет о нижней оценке  $E_n$ , поскольку, как указано выше, в расчетах  $E_n(a)$  не учитывается тепломассообмен газов со средой.

Таким образом, при взрыве в песке все процессы, связанные с передачей энергии продуктов детонации грунту и необратимыми тепловыми потерями, происходят на ранней стадии развития взрыва и в относительно небольшой области, примыкающей к газовому пузырю.

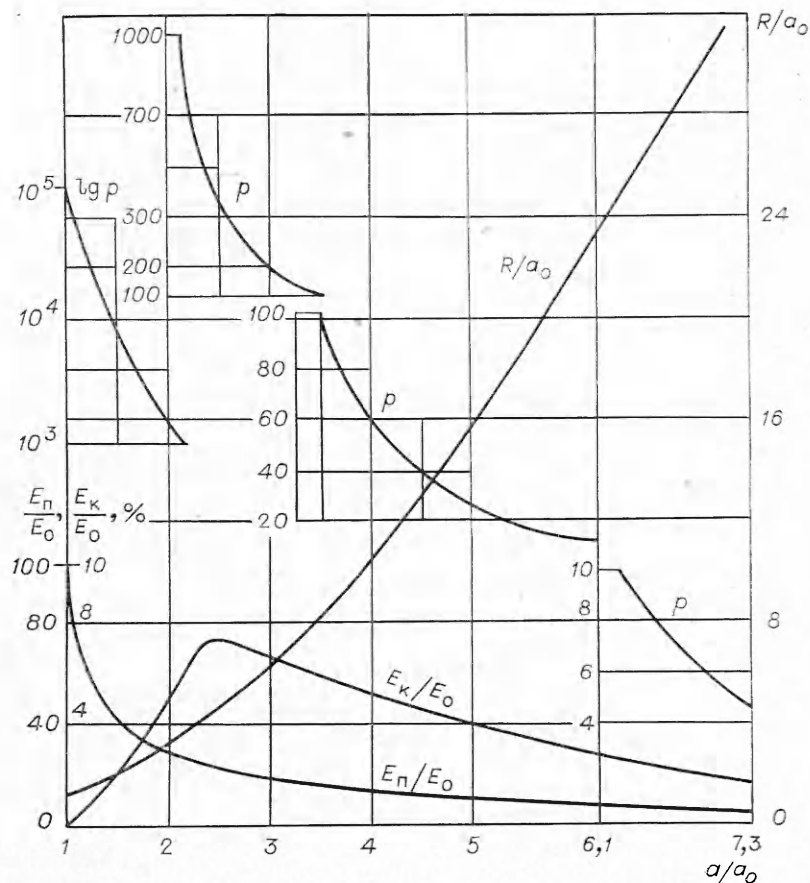


Рис. 2. Развитие камуфлетного взрыва в песке.

Вторая особенность взрыва в песке состоит в уменьшении плотности за фронтом волны сжатия до значений ниже первоначального. Изменение плотности можно вычислить из уравнения неразрывности в лагранжевом представлении:

$$\rho_0 R^2 = \rho r^2 \cdot \partial r / \partial R, \quad \rho_0 / \rho = [1 + (\Delta R / R)^2] [1 + \partial \Delta R / \partial R], \quad (3)$$

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  — начальное и текущее значение плотности;  $R$ ,  $r$  — начальная и текущая координата. Смещения  $\Delta R = r - R$  получаются интегрированием скоростей  $u(R, t)$  по времени. Результаты расчетов приведены в [5] в виде таблиц и показаны графически на рис. 3. Эти данные согласуются с результатами рентгенографического исследования взрыва в песке [7], согласно которым вблизи взрывной полости развиваются разрывы сплошности — своеобразные «трещины». Отсюда следует, что попытки описания взрыва в песке с позиций механики сплошной среды с условием сухого трения Кулона или условием идеальной пластичности Треска — Мизеса, или условием Мизеса — Шлейшера и т. п. носят формальный, модельный характер, и оценка тепловых потерь в рамках этих моделей не адекватна условиям опытов. Поэтому предпринята попытка выяснения природы тепловых потерь чисто экспериментальным путем.

Были проведены эксперименты, в которых при взрыве в песке ближняя зона размером от 4 до 10 радиусов заряда заменялась различными сыпучими материалами, список которых приведен в табл. 1 (влажность всех веществ, кроме  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ , менее 1%). Кроме того, за-

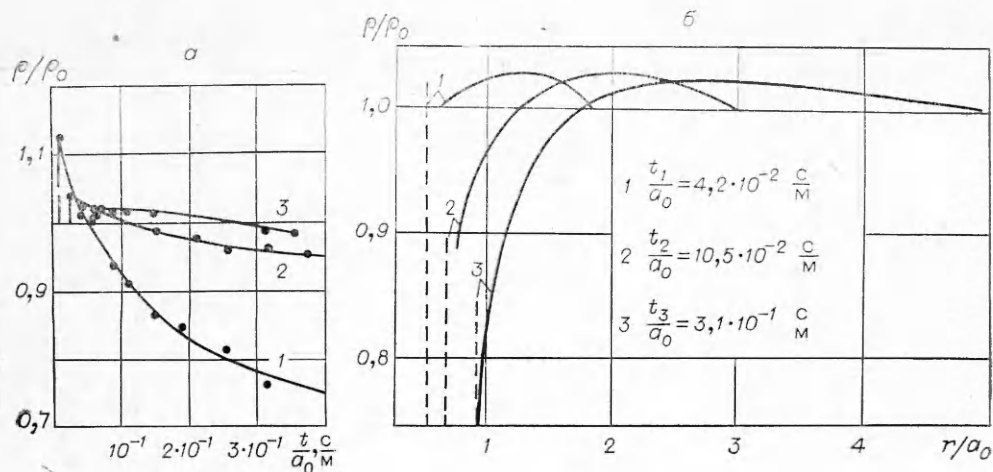


Рис. 3. Изменение плотности грунта со временем (а) и расстоянием (б).  
 1 —  $R/a_0=6,8$ ; 2 —  $R/a_0=12$ ; 3 —  $R/a_0=20$ .

ряды окружались сферическими оболочками, сделанными из плотного гидрогеля на основе воды (75%) и крахмала, пластилина, свинца и тампонажного цемента. Использовались также и различные смеси из материалов, приведенных в табл. 1. Применялись заряды из тэна весом 0,8 г плотностью 1,45 г/см<sup>3</sup>. Во всех случаях измерялись массовые скорости среды в зависимости от времени на расстояниях примерно 10, 20 и 40 радиусов заряда и сравнивались с соответствующими записями при взрывах просто в песке. Результаты сравнения приведены в табл. 2 в виде величин отношения  $u/u_n$ , где  $u$  — скорость при взрыве в оболочке,  $u_n$  — без оболочки, в различные моменты времени ( $R/a_0$  есть отношение радиуса точки наблюдения к радиусу заряда).

Прочностные характеристики и коэффициенты внутреннего трения не измерялись. Однако было ясно заранее, что механические свойства карбида бора и кислого углекислого аммония различаются сильно: первое вещество — абразивный материал с большим внутренним трением, второе — низкой прочности с влажными зёрнами, с коэффициентом внутреннего трения, близким к нулю. Тем не менее существенного различия в скоростях смещений в этих двух случаях не наблюдается. Замена песка на графит (смазочный материал) приводит во всей области измерений к уменьшению массовых скоростей. То же самое наблюдается

Таблица 1

Материал оболочки	Плотность зёрна, г/см <sup>3</sup>	Насыщенная плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %	Преимущественный размер частиц, мм	Примечание
Кварцевый песок	2,6	1,55	40,5	0,2	Зерно барита хрупкое низкой твердости
Пыль кварцевого песка	2,6	1,45	44	0,03	
Молотый барит (BaSO <sub>4</sub> )	4,5	2,53	44	0,07÷0,12	
Карбид бора (B <sub>4</sub> C)	2,64	1,41	46,5	0,1	Типичный абразив
Порошкообразный графит	2,4	1,4	42	0,07÷0,1	
Кислый углекислый аммоний	1,2	0,72	40	0,08÷0,1	Зерно низкой прочности, поверхность покрыта тонкой пленкой воды
Медные опилки	8,9	2,31	74	0,1	Частицы резко асимметричные с сильно развитой поверхностью.

Таблица 2

Материал оболочки	$R_{00}/u_0$	$R/\tau_0$	$u/u_{\text{п}}$ при $t(\text{мкс})$						
			20	100	300	500	1000	2000	4000
Барит $\text{BaSO}_4$	6	9,6	1,0	1,03	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
		19	1,03	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
		38	1,00	1,09	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Бетон	4	19	1,08	1,08	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
		38	1,08	1,08	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Графит	4	9,6	0,70	0,75	0,75	0,80	0,80	0,80	0,80
		31	0,79	0,79	0,8	0,8	0,80	0,80	0,80
Медные опилки	4	15	0,74	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,75
		31	0,74	0,74	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Гидрогель	5	19	1,26	1,26	1,30	1,30	1,30	1,30	1,30
		38	1,38	1,38	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
Карбид бора	6	9,6	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
		19	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
		38	1,00	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	—
Кислый углекислый аммоний	6	11,5	1,00	1,00	0,98	0,98	1,00	1,00	1,00
		21	1,00	1,00	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
		38	1,00	1,00	1,00	1,06	1,06	1,06	1,06
25% $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ + +75% $\text{B}_4\text{C}$	6	21	1,00	1,04	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
		38	1,00	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
75% $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ + +25% $\text{B}_4\text{C}$	6	21	1,00	1,04	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
		38	1,00	1,06	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08
Пыль песка	6	9,6	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		21	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
		38	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

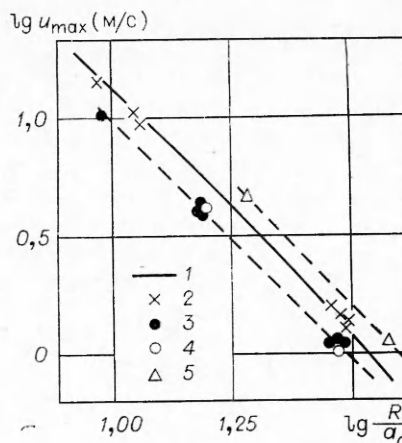
и в случае оболочек, изготовленных из медных опилок. Существенно отличаются медь и графит от других использованных веществ, очевидно, теплофизическими свойствами. Скорость теплообмена определяется в основном скоростью доставки газов к поверхности твердых частиц. Но если газы проникают в поры во всех случаях примерно одинаково (т. е. в равном количестве и с одинаковой скоростью), то тепловые потери на графите и меди должны быть несколько больше, чем на частицах песка, барита и карбида бора. С другой стороны, использование гидрогеля — вещества пластичного с малой пористостью — приводит к увеличению массовых скоростей в окружающей среде. В качестве иллюстрации на рис. 4 изображена зависимость максимальных массовых скоростей от приведенного расстояния для этих случаев.

Окружение заряда ВВ оболочками из высокопластичных материалов, неразрушающихся при больших растяжениях, должно задержать начало интенсивного теплообмена газов со средой и привести к увеличению массовых скоростей. Этот эффект показан на рис. 1, 3, 4. Оболочки из свинца готовились из полусфер, располагаемых внахлест так, чтобы между ними не было щелей. Контакты между полусферами пропаявались. Именно такие оболочки давали существенное увеличение массовых скоростей в песке. Если же сплошную оболочку разрезать на две половинки, эффект исчезает: скорости имеют такие же величины, как и при взрыве без оболочки. Это объясняется быстрым истечением газов через щели.

С графитом и медными опилками также проведены контрольные опыты, в которых поверхность заряда изолировалась от окружающей среды при помощи тонкой резиновой оболочки. В этом случае скорости имели те же значения, что и при взрыве с такой же оболочкой в песке. Кроме того, проводились опыты по подрыву ВВ в воздушной

Рис. 4. Зависимость максимальной массовой скорости от расстояния до центра взрыва в песке.

1 — заряд тэна в песке; 2 — 60% песка+40% графита,  $R_{об} = (5 + 10) a_0$ ; 3 — графит,  $R_{об} = 4a_0$ ; 4 — медные опилки,  $R_{об} = 4a_0$ ; 5 — гель,  $R_{об} = 5 a_0$ .



полостях. Стенки сферических оболочек толщиной 0,5 мм готовились из гипса и меди. В первом случае скорости мало отличались от взрыва заряда просто в песке, во втором — существенно превышали их.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о существенной роли проникновения газообразных продуктов детонации в открытые поры среды в общей картине развития взрыва и о связанном с этим прямом теплообмене продуктов со средой.

Поступила в редакцию  
16/V 1978

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1977, 13, 5.
2. В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1978, 14, 2.
3. К. Е. Губкин, В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич. ПМТФ, 1978, 6.
4. В. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2.
5. И. Л. Зельманов, О. С. Колков и др. ФГВ, 1968, 4, 1.
6. А. Ф. Шацкевич.— В сб.: Взрывное дело, № 76/33. М., «Недра», 1976.
7. Л. В. Альтшулер и др. ФГВ, 1970, 6, 3.

### ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ОТРЫВА ПРИ ОТКОЛЕ ДЛЯ СТ. 3 И МЕДИ

М. А. Иванов

(Москва)

Эксперименты по импульсному разрушению сосудов и их анализ в [1, 2] позволили количественно подтвердить энергетическую гипотезу масштабных эффектов, предложенную в [3], а также количественно описать явление откола в металлах [4—6] и динамическую пластичность труб [7]. Эти исследования дали возможность сформулировать двухстадийный подход к общей проблеме разрушения [5]. Первая стадия — накопление дефектов — описывается уравнением долговечности кинетической теории прочности<sup>1</sup> [8, 9]. Природа дефектов, а также конкретный механизм их возникновения не рассматривается, а используется только феноменология явления.

Вторая стадия — разрушение объекта испытания на части, прохождение магистральной трещины — требует в качестве необходимого усло-

<sup>1</sup> В [10, 11] отмечается, что появление и накопление дефектов в материале происходит не за счет термофлуктуационного распада атомных связей, как это следует из кинетической теории прочности, а за счет термофлуктуационного процесса движения дислокаций, определяющих деформацию ползучести.