

4. Дымарский Я. С., Лозинский Н. Н. и др. Справочник программиста. Т. 1. Л., Судпромгиз, 1963.
5. Кузнецов С. В. О взаимодействии горного давления и давления газа в угольном пласте. — ПМТФ, 1961, № 4.
6. Кузнецов С. В. К вопросу о внезапных выбросах угля и газа. — ФТПРПИ, 1966, № 4.

УДК 622.235.5

О ТЕПЛОМАССОБМЕНЕ ПРИ ВЗРЫВЕ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

К. Е. Губкин, В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич

(Москва)

Давления в продуктах детонации ВВ имеют величины порядка 100 кбар, а температура газов в начальные моменты времени достигает нескольких тысяч градусов. Многие реальные твердые тела, грунты и горные породы содержат в своей структуре значительное количество пор, микро- и макроскопических трещин и просто щелей, разделяющих среду на отдельные блоки. При таких условиях газ может с большой скоростью проникать в эти дефекты среды, не совершая вообще никакой механической работы по деформированию материала или при определенных условиях производя «расклинивающее» действие в трещинах. Поскольку свежесформированные поверхности твердых тел имеют повышенную сорбционную способность, часть газа может адсорбироваться в среде и подвергаться капиллярной конденсации. Это количество газа, «поглощенное» средой, может быть различным в зависимости от суммарной площади поверхности трещин и пор и в некоторых случаях достигать весьма значительных величин. С формальной точки зрения захват продуктов детонации твердыми средами сводится к неадиабатичности процесса расширения взрывной полости в грунтах и горных породах, а с фактической — к уменьшению эффективности взрыва или его механического действия.

В Институте физики Земли АН СССР под руководством И. Л. Зельманова на протяжении ряда лет проводились систематические экспериментальные исследования микровзрывов в песке с различной плотностью выделения энергии [1, 2]. Это достигалось с помощью электровзрывов, комбинацией электрического разряда с химическими ВВ, разбавлением взрывчатых веществ легко испаряемыми добавками, взрывами в воздушных полостях и, наконец, «взрывами» просто сжатого воздуха. Опыты ставились таким образом, что существенно изменяющимся (примерно на два порядка) параметром была начальная температура газов. Подбирая соответствующим образом объем воздушной полости, можно, почти не изменяя начальной температуры газов, получать примерно одинаковые начальные давления, так что характер изэнтропы расширения оставался во всех опытах одним и тем же. При помощи индукционных датчиков измерялось поле массовых скоростей в зависимости от расстояния и времени. Как обычно принято во взрывных экспериментах, полученные данные обрабатывались в приведенных координатах $\bar{r} = r/E^{1/3}$, где r — расстояние от центра взрыва, E — энергия. Для однотемпературных взрывов (например, для одного и того же вида ВВ) подтвердился принцип геомет-

рического подобия по энергии. Если, например, максимальную массовую скорость v_m записать в виде $v_m = f(\bar{r})$, то для взрывов разных масштабов функция $f(\bar{r})$ имеет один и тот же вид.

Однако для взрывов с различными начальными температурами ВВ экспериментальные кривые $f(\bar{r})$ были разными, и для того чтобы их свести к одной, нужно было в каждом из описанных выше случаев вводить поправочный множитель к величине E . В качестве такой универсальной кривой была выбрана зависимость $v_m = f(\hat{r})$ для тэна. Таким образом, во всем исследованном диапазоне изменения энергий и температур для взрывов в песке установлена единая формула

$$(1) \quad v_m = f(\hat{r}), \quad \hat{r} = r/(\eta E)^{1/3}.$$

Величина η называется в этом смысле тэновым эквивалентом. Для тэна в (1) $\eta = 1$.

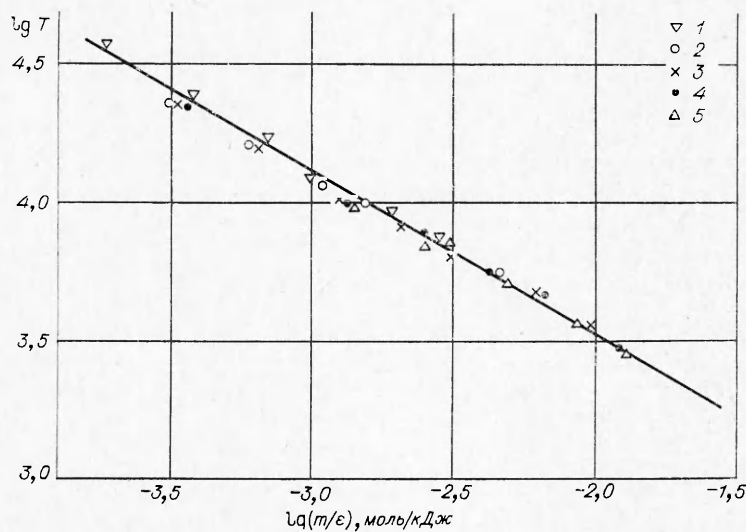
Величина температуры в опытах не измерялась, а определялась косвенным образом. Для всех видов взрывчатых веществ одной из стандартных характеристик является объем газов на 1 кг ВВ, приведенный к нормальным условиям. Обозначая его через m^* и деля на 22,4 л, получаем количество молей газа на 1 кг ВВ

$$(2) \quad m = m^*/22,4.$$

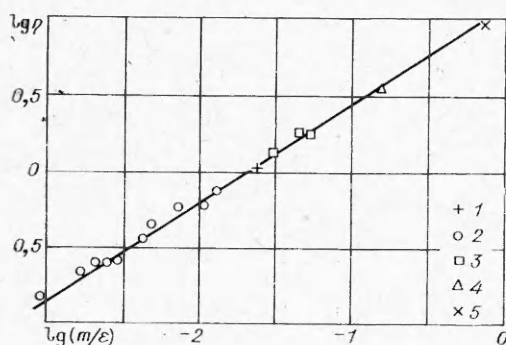
Зависимость температуры продуктов взрыва от удельной энергии ϵ и величины m можно оценить, используя уравнение состояния воздуха [3]. На фиг. 1 приведена зависимость $T = f(m/\epsilon)$ при различной плотности энергии (I соответствует $E/V = 0,460$, $2 - 0,286$, $3 - 0,143$, $4 - 0,0715$, $5 - 0,0357$ кДж/см³). Эта зависимость может быть аппроксимирована соотношением

$$T = 480(m/\epsilon)^{-0,6} \text{ моль/ккал.}$$

С другой стороны, по данным описанных выше экспериментов построена зависимость $\eta = f(m/\epsilon)$, изображенная на фиг. 2 (I соответствует



Ф и г. 1



Ф и г. 2

тэну, 2 — электровзрыву, 3 — смесевым зарядам, 4 — смеси тэн — воздух, 5 — сжатому воздуху), которая с хорошей точностью описывается уравнением

$$(3) \quad \eta = 10(m/\varepsilon)^{0,6}.$$

Комбинируя эти два выражения, получаем

$$(4) \quad \eta = T_0/T, \quad T_0 = 4800\text{К}.$$

Значение T_0 соответствует температуре продуктов детонации тэна [4]. Интересно, что это соотношение можно получить из следующих простых, но несколько формальных соображений. Пусть в начальный момент времени образовалось m молей газа с температурой T_0 и Δm молей мгновенно «исчезло», проникнув в поры песка и адсорбировавшись на его поверхности. Поскольку для этого процесса необходимо преодолеть некоторый потенциальный барьер U , можно предположить, что количество Δm определяется бoльцмановским множителем, так что

$$\Delta m = m \exp(-U/kT).$$

Так как Δm молей газа не совершают механической работы, то КПД взрыва ζ , понимаемый как отношение механической работы (вместе с сопутствующими тепловыми потерями) к полной энергии взрыва, равен

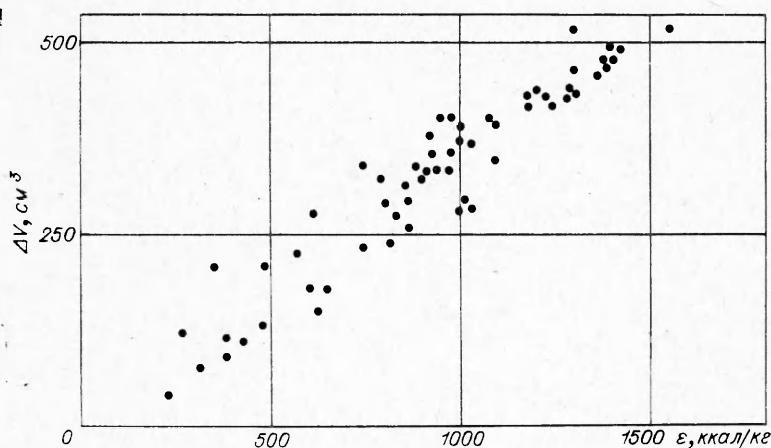
$$\zeta = (m - \Delta m)/m = 1 - \exp(-U/kT) \approx U/kT.$$

Последнее равенство имеет место ввиду того, что величина ζ при взрывах в песке мала и составляет по экспериментальным данным [4] всего несколько процентов. Если ввести относительный КПД (или эквивалент по тэну), то, очевидно,

$$(5) \quad \eta = \zeta/\zeta_0 = UT_0/U_0T.$$

Если взрывы производятся в одной и той же среде, то $U = U_0$ и из последнего выражения следует формула (4). Роль газовой работоспособности ВВ, наряду с энергией определяющей работоспособность ВВ, отмечалась рядом исследователей. Одним из способов характеристики работоспособности ВВ является метод свинцовой бомбы или проба Трауцля [4,5].

Стандартная бомба представляет собой цилиндр высотой и диаметром 20 см с осевым отверстием 2,5 см и высотой 12,5 см. Исследуемый заряд массой $M = 10$ г помещается на дно канала бомбы и засыпается сухим кварцевым песком. За меру работоспособности принимается приращение объема полости ΔV в кубических сантиметрах. Все взрывчатые вещества, выпускаемые промышленностью, имеют в качестве табличных характеристик наряду с удельной энергией ε (ккал/кг), газовой m^* (л/кг) также и работоспособность ΔV (см³). На фиг. 3 изображены графически данные по зависимости ΔV от ε для нескольких десятков видов ВВ. Видно, что разброс экспериментальных точек весьма велик. Так как часть поверхности ВВ находится в контакте с песком, то не исключено, что и здесь работает механизм тепломассопотерь, описанный выше. Введем поправочный множитель и будем искать зависимость ΔV от $\eta\varepsilon$ (фиг. 4). Как видно,



Ф и г. 3

разброс точек существенно уменьшился, так что по ним можно построить кривую (сплошная линия на фиг. 4), которую будем рассматривать как экспериментальную тарировку свинцовой бомбы.

Можно произвести приближенные расчеты. Для этого примем следующие предположения:

1) заменим цилиндрическую бомбу шаровым слоем эквивалентного объема с внутренним радиусом a_0 и внешним R_0 ;

2) будем считать материал несжимаемым и удовлетворяющим условию пластичности Треска—Мизеса

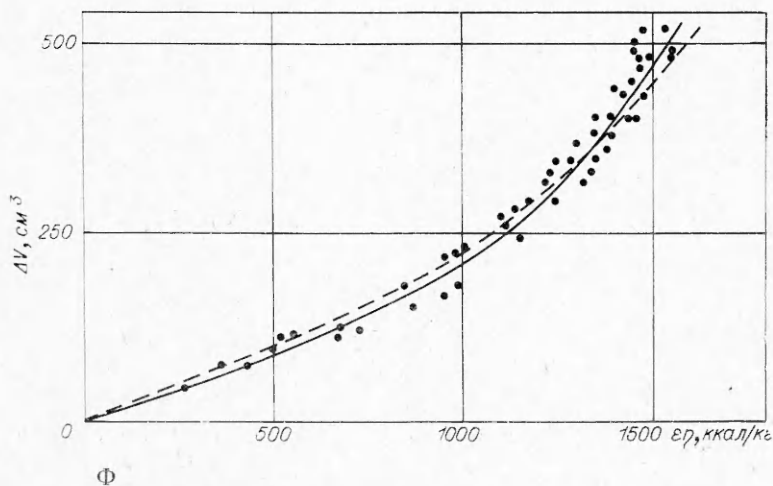
$$|\sigma_r - \sigma_\theta| = 2\tau_s.$$

В этих предположениях уравнения движения

$$\rho(\partial v/\partial t + v\partial v/\partial r) = \partial\sigma_r/\partial r + 2(\sigma_r - \sigma_\theta)/r$$

и неразрывности

$$\rho = \text{const}, v = a^2\dot{a}/r^2$$



при граничных условиях

$$\sigma_r = -p(a), \quad r = a; \quad \sigma_r = 0, \quad r = R$$

могут быть проинтегрированы и приведены к виду, выражающему закон сохранения энергии:

$$(6) \quad \int_{a_0}^a p(a) 4\pi a^2 da = \int_{a_0}^a \left(4\tau_s \ln \frac{R}{a} \right) 4\pi a^2 da + 2\pi\rho (a^2 \dot{a}^2) \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{R} \right),$$

где σ_r , σ_θ — компоненты тензора напряжений; τ_s — предел текучести (прочности на сдвиг); ρ — плотность свинца; v — радиальная скорость; r — координата; \dot{a} — скорость расширения полости; $p(a)$ — давление газа в полости; a — текущее значение радиуса полости; R — текущее значение внешнего радиуса.

В момент максимального расширения ($a = a_m$, $R = R_m$) скорость $\dot{a} = 0$ и последний член в (6), выражающий кинетическую энергию среды, равен нулю

$$(7) \quad \int_a^{a_m} p(a) 4\pi a^2 da = \int_{a_0}^{a_m} \left(4\tau_s \ln \frac{R}{a} \right) 4\pi a^2 da,$$

работа газов совершена на пластическое деформирование материала, т. е. в конечном итоге на его нагрев.

Это выражение (точное в рамках сделанных предположений) может быть проинтегрировано (правая часть), если сделать два довольно очевидных допущения:

$$R^3 \gg a^3, \quad a_m^3 \gg a_0^3.$$

Левую часть (7) по определению КПД запишем в виде ζE , где $E = M\varepsilon$ — полная энергия взрыва. Используя (5), окончательно получаем

$$\eta\varepsilon = \frac{4}{3} \frac{\tau_s}{\zeta_0} \frac{1}{M} \left(\ln \frac{V}{\Delta V} + 1 \right) \Delta V,$$

где V — объем бомбы; ΔV — расширение взрывной полости.

Эта зависимость изображена на фиг. 4 штриховой линией при значениях параметров: $V = 6 \cdot 10^3$ см³, масса ВВ $M = 10$ г, $\tau_s/\zeta_0 = 300$ кг/см². По справочным данным для свинца $\tau_s = 60-85$ кг/см².

Таким образом, коэффициент полезного действия заряда тэна в бомбе Трауцля ζ_0 имеет величину в пределах от 20 до 28%. Если принять, что весь дефицит энергии расходуется на кинетическую энергию вылетающей песчаной забойки, то, как показывает расчет, ее скорость должна быть около $2,5 \cdot 10^3$ см/с, что более чем на порядок превышает наблюдаемые величины. Кроме того, множитель $\eta \sim (m/\varepsilon)^{0,6} \sim T^{-1}$, упорядочивающий экспериментальные данные, характеризует тепловые потери при взрыве, учет которых необходим для адекватного описания явления. Из (1)–(3) получаем, что относительная (по тэну) работа взрыва ε_0 характеризуется следующей комбинацией из энергии ε и удельного объема газов m^* :

$$\varepsilon_0 = 1,6 m^{*0,6} \varepsilon^{0,4}.$$

Из вышесказанного ясно, что увеличить КПД взрыва можно, если не допустить проникания газов в среду на ранней стадии расширения. Были поставлены опыты в песке с ВВ, заключенным в пластичную оболочку (свинец, каучук, пластилин). При этом КПД взрыва возрастал в 2—3 раза. Характерно, что, если сплошную оболочку разрезать на две части, результат получался таким же, как и при взрыве без оболочки. Хрупкие оболочки (цемент) не оказывали влияния на КПД взрыва.

Объем пор в сухом насыпном песке очень велик — до 40%. Очевидно, что при давлениях порядка 100—10 кбар продукты взрыва могут проникать внутрь среды на значительные расстояния и при температурах в несколько тысяч градусов тепломассообмен может быть настолько велик, что играет преобладающую роль во всем процессе. В горных породах (особенно трещиноватых) суть явления сохраняется, меняется только количественная сторона дела. Имеются экспериментальные и опытно-промышленные данные [6] о проникании продуктов детонации ВВ на расстояния от 12,5 до 25 радиусов заряда для соответственно монолитных и трещиноватых трахилипаритов с прочностью на сжатие 800 кг/см², там же имеются сведения о том, что до 40% газов удерживаются породами, окружающими место взрыва, при отбойке руды в подземных условиях. Были поставлены специальные эксперименты по взрыву смеси тэна и иода в блоках каменной соли (В. М. Комир, В. Г. Назаренко, Харьковский политехнический институт). Количественный анализ показал, что внутри блока в трещинах после взрыва содержится до 33% общего содержания иода. Проникание газов внутрь горных пород имеет двойное значение. С одной стороны, уменьшается КПД взрыва вследствие рассмотренных выше причин. С другой стороны, газы оказывают расклинивающее действие на существующие трещины, а также уменьшают прочность материала. Последнее связано с тем, что прочность на разрыв в механике хрупкого разрушения [7] определяется формулой Гриффитса

$$\sigma_{\text{пр}} = \sqrt{E'\sigma/\pi(1 - \nu^2)l},$$

где E' — модуль Юнга; σ — удельная поверхностная энергия; ν — коэффициент Пуассона; l — полудлина трещины.

При проникании (адсорбции) газов внутрь среды величина σ уменьшается, что и приводит к снижению прочности.

Рассматриваемая проблема в физике взрыва, несмотря на значительное количество эмпирических сведений из практики взрывного дела, представляется авторам новой. В связи с этим здесь имеется большое количество еще неясных вопросов и прежде всего не выяснена роль масштабных и временных факторов.

Поступила 22 IX 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельманов И. Л., Колков О. С., Тихомиров А. М., Шацукевич А. Ф. Движение песчаного грунта при камуфлетном взрыве. — ФГВ, 1968, № 1.
2. Зельманов И. Л., Колков О. С., Тихомиров А. М., Шацукевич А. Ф. Об электро-взрыве в песчаном грунте. — ФГВ, 1968, № 3.
3. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах (таблицы). М., «Машиностроение», 1965.
4. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М., «Недра», 1973.
5. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
6. Борьба с ядовитыми газами при взрывных работах и новые методы испытаний промышленных ВВ. — В кн.: Взрывное дело № 68/25. М., «Недра», 1970.
7. Разрушение. Т.2. М., «Мир», 1975.