

сивной волне разрежения возможна разница между расчетной скоростью детонации и полученной в эксперименте, превышающая 10%. В эксперименте наблюдается резкий, в два и более раза, спад скорости распространения фронта ионизации при переходе к запредельным составам. Такой ход экспериментальных кривых, описывающих зависимость скорости детонационной волны от состава смеси, позволяет заключить, что выбранная геометрия эксперимента в большой мере соответствует условиям малых теплопотерь, а установленные в данном исследовании значения концентрационных пределов детонации близки к пределам для труб очень большого диаметра или для сферической детонации, инициированной большими зарядами ВВ.

Распространение детонационных волн на пределе в широких трубах характеризуется отсутствием устойчивой спиновой конфигурации. На пределе наблюдались одноголовые, двух- и четырехголовые волны.

Авторы благодарны Л. Н. Стесику, В. М. Васильеву и Ю. М. Петрову за предоставленные результаты расчетов параметров детонационных волн.

*Институт химической физики
АН СССР, Москва*

*Поступила в редакцию
4/V 1976*

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, А. С. Компанеев. Теория детонации. М., ГИТТЛ, 1955.
2. К. И. Шелкин, Я. К. Трошин. Газодинамика горения. М., 1963.
3. В. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.
4. Science of Petroleum. V. IV, London, 1938.
5. W. Pusch, H. G. G. Wagner. Berichte der Bunsengesellschaft, 1965, 69, 6, 503.
6. K. Guhlmann, W. Pusch, H. G. G. Wagner. Berichte der Bunsengesellschaft, 1966, 70, 2, 143.
7. W. E. Gordon, A. J. Mooradian, S. A. Harper. VII-th Symposium (International) on Combustion, London, 1959.
8. W. B. Benedick, I. D. Kennedy, B. Morosin. Combustion and Flame, 1970, 15, 85.
9. I. Hasiguti. Industrial Science and Technol., 1970, 11, 2, 26.
10. A. Burcat, K. Scheller, A. Lifshitz. Combustion and Flame, 1971, 16, 29.
11. С. М. Когарко. Докт. дис. ИХФ АН СССР, 1952.

О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ СО СТЕНКАМИ ВЗРЫВНОЙ ПОЛОСТИ В ГРУНТАХ И ГОРНЫХ ПОРОДАХ

В. М. Кузнецов, А. Ф. Шацкевич

При исследовании камуфлетного взрыва в грунте обычно полагают, что расширение газов — продуктов детонационного разложения ВВ — происходит адиабатически, т. е. без теплообмена с окружающей средой. Такое предположение основывается на сравнении относительно медленного процесса диффузионного теплообмена на «видимой» поверхности взрывной полости с быстрым расширением ее в начальной стадии движения, когда тепловые потери могли бы быть наиболее существенными. При этом, однако, упускается из виду, что при давлении в десятки и сотни килобар возможно значительное увеличение площади поверхности контакта газов с твердым телом за счет проникновения продуктов детонации в поры и трещины среды (как естественные, так и образованные в результате разрушения границы полости). Это может привести не

только к увеличению теплоотдачи вследствие конвективного теплообмена, но и прямому захвату продуктов взрыва при помощи механизмов сорбции, капиллярной конденсации и т. д. Формально эти процессы сводятся к тому, что часть продуктов детонации расходуется, не совершая механической работы. В некоторых случаях такие потери энергии ВВ могут быть одного порядка с механическими диссипативными потерями или даже превосходить последние.

В практике буровзрывных работ факт захвата взрывных газов горными породами считается давно установленным. Известно, что куски отбитой горной породы спустя значительное время после взрыва «дымят», а, будучи разбитыми, выделяют дополнительную порцию «дыма». Поскольку в продуктах детонации содержится значительное количество ядовитых газов, явление захвата газов горными породами исследуется специалистами по безопасности горных работ [1]. В работе [2] при взрыве заряда аммонала весом 0,4 кг в шпуре диаметром 40 мм обнаружено содержание СО на расстояниях от 12,5 до 25 радиусов шпура для соответственно монолитных и трещиноватых пород (трахилипариты с коэффициентом крепости по Протодьяконову $f=8$). Следует отметить, что СО, в соответствии с [3], стоит примерно в конце сорбционного ряда, который начинается с паров воды, обладающих максимальной абсорбционной способностью.

Во всех этих исследованиях, однако, отсутствует такой важный для дальнейшего рассмотрения фактор, как время. Отмечается только, что при «давлениях 10000—150000 ат и температуре газов до 3000°С абсорбция ядовитых газов практически протекает мгновенно, независимо от того, является ли абсорбируемое вещество газом или паром» [4].

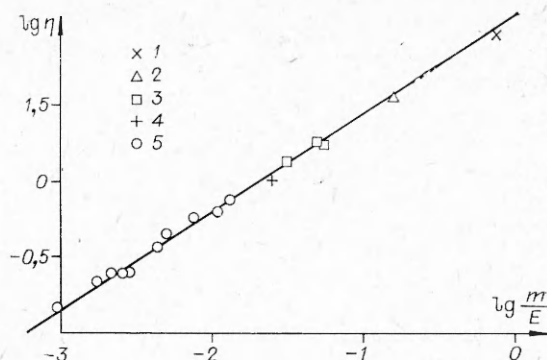
Если сорбция газов в начальной стадии расширения полости играет важную роль, процесс не является адиабатическим, так как вместе с массой сорбируемых газов уносится и тепло. В лабораторных условиях это проще всего проверить в опытах на песке, где количество пор заведомо достаточно велико и истечение газов внутрь окружающей среды заранее обеспечено. Поскольку все сорбционные процессы характеризуются бальмановским множителем $\exp(-U/kT)$, получить широкий диапазон изменения экспериментальных параметров можно только за счет существенного изменения температуры взрыва T , так как величина энергетического сорбционного барьера U есть характеристика соответствующего газа и твердого вещества.

Такие опыты были проделаны [5]: комбинировались заряды тэна с электровзрывом (высокие температуры), добавлялись легкоиспаряющиеся вещества (понижение температуры), взрывались заряды тэна в воздушных полостях¹ и «заряды» из сжатого воздуха в тонкой оболочке. Во всех случаях регистрировались поля массовых скоростей, по которым определялся тэновый эквивалент взрыва η , величина которого есть множитель в выражении для приведенного расстояния от центра взрыва $\bar{r}=r/(\eta E)^{1/2}$ (E — энергия взрыва). В каждом опыте величина η подбиралась так, чтобы зависимости массовых скоростей от расстояний (например, их максимальных значений $v_m=f(\bar{r})$) описывались одной и той же кривой.

Последнее можно было сделать в силу весьма важного экспериментального результата: все поля скоростей оказались с хорошей точностью геометрически подобными. Таким образом, основные тепловые потери не связаны с движением среды и проявляются на самых ранних стадиях расширения полости. Результаты всех экспериментов показаны на рисунке (1 — сжатый воздух, 2 — тэн+воздух, 3 — смесевые заряды, 4 — тэн, 5 — электровзрыв). Здесь в логарифмическом масштабе по оси

¹ Изменения политропы расширения продуктов взрыва, как показали эксперименты, были несущественными.

ординат отложен тэновый эквивалент взрыва, а по оси абсцисс — отношение количества молей газа к его полной энергии. Обратная величина есть энергия одного моля. Для идеального газа $E/m = c_v \cdot T$, где c_v — молярная теплоемкость. Для продуктов разложения тэна зависимость температуры от E/m можно оценить, используя уравнение состояния воздуха [6]:



$$T = 480 (E/m)^{0.6}. \quad (1)$$

Экспериментальные точки на рисунке лежат на прямой $\lg \eta = 1,045 + 0,63 \lg (m/E)$, откуда приближенно

$$\eta = 10 (m/E)^{0.6}. \quad (2)$$

Комбинируя (1) и (2), получаем простое выражение

$$\eta = 4800/T = T_0/T, \quad (3)$$

где $T_0 = 4800$ К — температура продуктов разложения тэна при плотности $1,45$ г/см³.

Формулу (3) можно получить из следующих формальных рассуждений. Пусть в результате детонации ВВ образовалось m_0 молей газа с теплоемкостью $c_v(T)$, так что общая энергия есть $m_0 \int c_v \cdot dT$. Пусть далее мгновенно Δm молей абсорбировалось в окружающую среду, причем

$$\Delta m = m_0 e^{-U/kT}, \quad (4)$$

тогда коэффициент полезного действия взрыва

$$\xi = (E - \Delta E)/E = (m_0 - \Delta m)/m_0 = 1 - e^{-U/kT}. \quad (5)$$

При малом значении U/kT из (5)

$$\xi = U/kT. \quad (6)$$

Здесь ξ — относительная доля полной энергии ВВ, превращающаяся в дальнейшем в кинетическую энергию среды и механические диссипативные потери. Если последние малы, как в случае песка, то, обозначая через ξ_0 КПД для тэна, получаем

$$\xi_0 = U_0/kT_0, \quad \eta = \xi/\xi_0, \quad (7)$$

откуда и следует выражение (3). При переходе к другой среде расчет тэнового эквивалента осуществляется по формуле

$$\eta = UT_0/U_0T. \quad (8)$$

Величина U — «потенциальный барьер» сорбции — в этих рассуждениях есть некоторая интегральная характеристика среды, учитывающая как ее механическое состояние (трещиноватость, пористость), так и минералогический состав породы.

Оценим теперь скорость сорбционного захвата в начальный момент процесса, когда количество абсорбированных молекул на поверхности взрывной камеры пренебрежимо мало. Тогда захватываться породой будет каждая молекула, ударяющая о стенки камеры (с учетом Больцмановского множителя). Количество ударов в единицу времени об единицу поверхности, как известно из молекулярной физики, равно $n\bar{v}/4$,

где $\bar{v}$ — средняя скорость, $n = N/V$ — плотность молекул. Скорость убывания общего числа молекул определяется в начальной стадии выражением:

$$dN/dt = -1/4 \cdot N/V \cdot \bar{v} e^{-U/kT} \cdot S. \quad (9)$$

Здесь V — объем; S — площадь поверхности взрывной камеры. Решение уравнения (9)

$$N = N_0 e^{-t/\tau}, \quad (10)$$

где

$$\tau = 4V/S \cdot e^{U/kT} \cdot 1/\bar{v}, \quad (11)$$

играет роль постоянной времени. Для шара $V/S = 1/3 \cdot R$ (R — радиус заряда). Величина $\bar{v}$ имеет порядок скорости звука в продуктах детонации, а последняя равна скорости детонации D . По данным [7], величина $\theta = U/k$ имеет порядок 1000 К, так что $e^{U/kT}$ при $T = 4000$ К порядка единицы. Таким образом, получаем, что

$$\tau \approx R/D \quad (12)$$

имеет величину того же порядка, что и время детонации заряда.

Поскольку приведенные рассуждения представляются формальными, а обсуждаемая проблема новой, требуются, естественно, дополнительные экспериментальные данные, подтверждающие общую правильность рассматриваемого направления. Если проникновение газов в среду приводит к снижению КПД взрыва или эквивалента, то любая конструкция, препятствующая этому проникновению, должна повышать эффективность взрыва. Это, например, могут быть оболочки, отделяющие продукты взрыва от среды. Разумеется, сами оболочки не должны содержать микротрещин и не должны быстро разрушаться при расширении. Иными словами, они должны быть сделаны из пластичного материала.

Были проведены эксперименты, полностью подтверждающие этот вывод. Оболочки, сделанные из гипса и цемента, не изменяли эквивалента, а из свинца и пластилина привели к увеличению эквивалента в 1,5—3 раза. Если свинцовую оболочку, дающую увеличение эквивалента в 3 раза, разрезать на две полусферы, то эффект полностью исчезает. Пластилиновая оболочка тех же размеров, что и свинцовая, да-

Таблица 1

Материал оболочки	$\frac{R_{об}}{R_3}$	V/C (м ³ /кг) при $W/C^{1/3}$ (м/кг ^{1/3})			η
		0,48	0,53	0,63	
Заряд без оболочки	—	2,56	2,3	1,14	1,0
Свинец					
4 сферы	2,92	3,9	3,78	—	1,45
7 сфер	2,35	3,8	3,6	—	1,4
3 сферы	2,35	3,3	3,15	—	1,25
1 сфера	1,65	2,9	—	—	1,1
1 сфера ($R_{об} = 1,65 R_3$) и слой каучука ($R_{сл} = 2,35 R_3$)	2,35	3,8	3,6	—	1,40
Каучук	2,35	3,6	—	2,9	1,35
Резина	2,35	—	3,15	—	1,25

Примечание. $R_{об}$ — радиус оболочки; W — глубина заложения заряда; R_3 — радиус заряда; V — объем воронки выброса; C — масса заряда ТНТ; $R_{сл}$ — радиус слоя.

Таблица 2

Материал оболочки	$\frac{R_{об}}{R_3}$	V/C (м ³ /кг) при $W/C^{1/3}$ (м/кг ^{1/3})			η
		0,48	0,53	0,63	
Заряд без оболочки	—	2,56	1,93	1,14	1,0
100% цемента *	3,5	2,84	2,32	—	1,1
75% песка, 25% цемента **	3,5	2,84	2,32	—	1,1
Водонасыщенный цемент (75% песка, 25% цемента) ***	3,5	3,4	2,9	—	1,25
Водонасыщенный песок	3,5	3,6	—	2,85	1,35
Вода	3,5	3,6	—	2,85	1,35
Гудрон (T=20°C)	2,95	3,1	2,7	2,15	1,2

* Тампонажный цемент, прочность около 500 кг/см².

** Тампонажный цемент, прочность <100 кг/см².

*** Невыдержанный, насыщенный водой цемент, прочность <10 кг/см².

ет меньшее увеличение эквивалента. Это объясняется тем, что часть энергии идет на разогревание и испарение самого пластилина.

Ясно, что полученные результаты имеют прямое отношение к практике взрывных работ. Изолируя продукты детонации от прямого контакта с породой на начальной стадии расширения, можно достичь значительного увеличения КПД взрыва. Это относится к камуфлетным взрывам, к взрывам на выброс и к разрушению крепких горных пород. В табл. 1, 2 приведены экспериментальные данные величины относительного объема воронок выброса в песке в зависимости от приведенной глубины заложения для зарядов тэна одного и того же веса, но в разных условиях: без оболочки и в оболочках из различных материалов. Видно, что применение пластичных оболочек приводит к увеличению КПД взрыва.

Неадиабатичность расширения продуктов детонации качественно должна проявляться на взрывах любого масштаба в широком диапазоне грунтов и горных пород. Вопрос о количественных соотношениях является предметом дальнейших исследований.

Авторы благодарят К. Е. Губкина за поддержку и полезные обсуждения проблемы.

Институт физики Земли
АН СССР, Москва

Поступила в редакцию
12/IV 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Борьба с ядовитыми газами при взрывных работах и новые методы испытаний промышленных ВВ. Сборник. Взрывное дело, № 68/25. М., «Недра», 1968.
2. П. И. Балковой, И. А. Остроушко.— В сб.: Взрывное дело, № 68/25. М., «Недра», 1968.
3. А. Н. Дудырев, Н. И. Шуров.— В сб.: Взрывное дело, № 68/25. М., «Недра», 1968.
4. А. Н. Дудырев, В. В. Оборин и др.— В сб.: Взрывное дело, № 68/25. М., «Недра», 1968.
5. В. И. Куликов, А. Ф. Шацкевич. ФГВ, 1971, 7, 3.
6. Н. М. Кузнецов. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М., «Машиностроение», 1965.
7. Г. Дозе, Г. Марк.— В сб.: Проблемы кинетики и катализа. Т. III. Л., ОНТИ, 1937.