

К ВОПРОСУ ИЗУЧЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ДОБАВКАМИ

У статті наведено результати, отримані при теоретичних дослідженнях особливостей детонації вибухових речовин з домішками.

TO A QUESTION OF STUDY OF EXPLOSIVE SUBSTANCE'S DETONATION WITH THE ADDITIVES

In clause the results received at theoretical researches of features of explosive substance's detonation with the additives are given.

Известно, что максимальное давление продуктов детонации (ПД) в полости взрыва больше оптимального, а скорость изменения давления в зоне химических реакций на несколько порядков превышает необходимую.

В случае скважинного заряда через несколько миллисекунд с момента его инициирования параметры продуктов детонации становятся такими, что они уже не способны разупрочнить породу. То есть происходит кратковременный нерациональный выброс энергии. Снизить начальное давление в зарядной полости и увеличить время его действия на окружающую среду можно с помощью добавок к ВВ.

При использовании бризантных взрывчатых веществ (ВВ) часто необходимо ограничить давление продуктов взрыва (ПВ) в полости. Иногда требуется погасить волновые процессы в полости взрыва (например, скважинного заряда ВВ). С этой целью в состав ВВ можно вводить вещества, которые поглощают энергию ПВ при давлении (температуре), большем определенного, и возвращают ее при более низком давлении (температуре).

При взрыве бризантных ВВ давление у фронта детонационной волны приблизительно за 2 мкс увеличивается до давления на порядок большего предела прочности породы. Сдвиг породы из-за отсутствия ударных волн начинается только через 1-2 мс, начиная с момента прохождения детонационной волны. Все это время порода раздавливается и переизмельчается. Для существенного уменьшения зоны раздавливания давление в полости взрыва должно увеличиваться не за 2 мкс, а приблизительно за 1 мкс (рис. 1). Этого можно добиться, вводя в ВВ добавки. На основе изучения термодинамических процессов, протекающих при детонации ВВ с инертными добавками, показано, как с помощью добавок можно снизить максимальное давление в полости взрыва до необходимого и на 2-3 порядка увеличить время химических реакций, тем самым управлять энергией ВВ в процессе взрыва.

В ряде работ [1, 2-6] исследованы параметры детонационных волн смеси ВВ с инертными добавками, но расчеты волновых процессов при взаимодействии потока ПВ с частицами добавки не производились, и зависимость показателя адиабаты от объема ПВ не определялась.

В настоящей статье теоретически рассмотрены нагрев и движение частиц в ПВ, получено уравнение состояния и выражение для показателя адиабаты системы ПВ-добавка.

Пусть в ВВ находятся сферические частицы инертного вещества диаметром d . При распространении детонационной волны на частицы падает ударная волна (УВ). Если ширина фронта УВ значительно меньше d и сжимаемость вещества добавки достаточно велика [1], то в частице успевает сформироваться

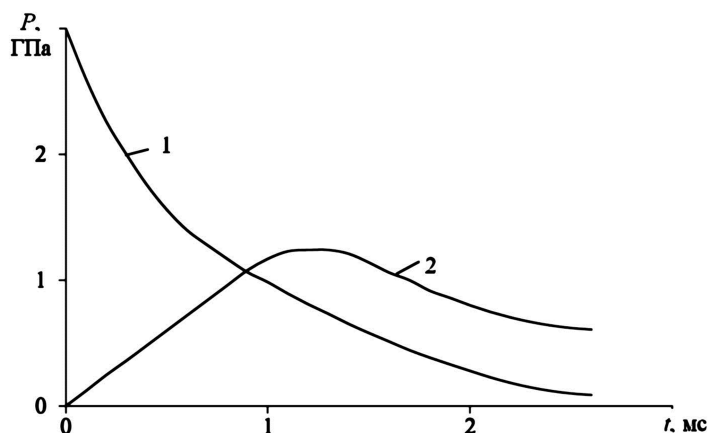


Рис. 1 – Зависимость давления продуктов взрыва от времени в сечении скважины: 1 – штатное ВВ; 2 – предлагаемое ВВ

УВ. В ПВ отраженная от частицы волна возникает в любом случае. Когда по частице распространяется УВ, за ее фронтом вещество течет со скоростью порядка 100-1000 м/с. Так как поверхность частицы не плоская, то в направлении движения волны все слои частицы будут двигаться относительно друг друга. Это приведет к нагреву частицы.

Температуру частицы можно определить, зная скорость отраженной от нее УВ (D_0), начальную скорость ПВ (u), скорость ПВ за фронтом УВ (u_y) и скорость УВ в частице (D_y). Для этого изменение кинетической энергии части потока ПВ в отраженной УВ приравнивается изменению полной энергии частицы. Параметры указанных волн находятся по обычной методике [1]. Скорость частицы после прохождения по ней УВ равна средней массовой скорости вещества за фронтом УВ. УВ в частице отражается от ее поверхности. При этом массовая скорость вещества возрастает, как обычно полагают, в два раза. Численные расчеты, выполненные для алюминия и тротила [7] с $\rho_{\text{вв}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$, $u = 1500 \text{ м/с}$, $D = 5100 \text{ м/с}$, $P_H = 7 \text{ ГПа}$, $A = 19,7 \text{ ГПа}$, $\rho_{Al} = 2700 \text{ кг/м}^3$, $n = 4,2$ (D – скорость детонации ВВ; A , n – коэффициенты в уравнении Тэта), дают начальное давление на фронте УВ в частице $P_y = 13,5 \text{ ГПа}$, скорость вещества $u_y = 630 \text{ м/с}$, температуру частицы $T = 900 \text{ }^\circ\text{К}$.

Таким образом, за время прохождения волны по частице туда и обратно скорость частицы возрастает до $2u_y = 1260 \text{ м/с}$, а температура до $T_1 \approx 1500 \text{ }^\circ\text{К}$.

Когда в частице не возбуждаются УВ, она подвергается сжатию. Течение вещества отсутствует и увеличение температуры частицы значительно меньше. Скорость частицы в этом случае можно оценить, определив силу сопротивления частицы потоку. Для этого необходимо вычислить число Рейнольдса для частицы добавки $Re = \rho \langle u \rangle d / \eta$, где ρ , $\langle u \rangle$ – соответственно плотность и скорость ПД; η – вязкость ПД. Если пренебречь силами молекулярного взаимодействия, что допустимо при температуре ПД $T \sim 3 \text{ кК}$, то $\eta \sim 10^{-4} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$. Для частиц с $d = 10^{-7}$ - 10^{-3} м число Рейнольдса соответственно равно $Re = 10^3$ - 10^7 при средней скорости $\langle u \rangle = 750 \text{ м/с}$. При таких числах Рейнольдса коэффициент лобового сопротивления $c_x \sim 0,1$ - 1 , а сила сопротивления определяется по известному закону $F = c_x \rho \langle u \rangle^2 S / 2$, где $S = \pi d^2 / 4$ – сечение частицы. Средняя сила и ускорение для частиц с плотностью $\rho = 3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ будут соответственно равны $\langle F \rangle = 10^{-7}$ - 1 Н , $a = 10^{11}$ - 10^6 м/с^2 . Скорость 10^3 м/с частицы приобретут за время, соответственно равное $t = 10^{-8}$ - 10^{-3} с . Таким образом, частицы с диаметром $d \leq 10 \text{ мкм}$ успевают приобрести скорость ПВ до точки Чемпена-Жуге.

При сжатии ПВ в отраженном от частицы УВ их температура возрастает и становится равной

$$T_y = T_H (P_y / P_H)^{(k-1)/k}, \quad (1)$$

где T_H – температура ПВ на химпике;

k – показатель адиабаты идеального газа.

Для рассматриваемого тротила $k = 3$, $T_H = 3,1 \text{ кК}$, $T_y = 4,8 \text{ кК}$.

Исходя из вышеприведенных оценок, можно сделать ошибочный вывод о больших потерях энергии ПВ на разгон и нагревание частиц добавки. В действительности большую часть энергии частицы отдают ВВ в процессе распространения детонации. Например, частица, имея скорость порядка км/с, при ударе о частицу ВВ разбивает ее. При ударе о неподвижную частицу добавки она обменивается с ней кинетической энергией.

Кроме того, инертные добавки могут увеличивать давление во фронте детонационной волны. Действительно, когда между частицами ВВ находится воздух, то при детонации ПВ расширяются в него. Пусть воздух занимает 0,25 всего объема, тогда при расширении ПВ давление уменьшится в μ раз, где $\mu \approx (V_{\text{вв}} + 0,25V_{\text{вв}})^3 / V_{\text{вв}}^3 = 1,25$. Замена части воздуха добавкой приводит к увеличению давления. Скорость детонации можно определить [2], учитывая уменьшение давления во фронте УВ при потерях энергии на инертных частицах и относительное увеличение его при уменьшении объема воздуха в ВВ. Это можно сделать, если известен показатель адиабаты для ПВ с добавками.

Показатель адиабаты для ПВ ВВ без добавок и с добавками зависит от параметров ПД. Чтобы определить эту зависимость, можно записать уравнение Пуассона для ПВ в виде

$$P_1 (V_1 - \alpha)^{\gamma} = P (V - \alpha)^{\gamma}, \quad (2)$$

где P_1, P – давление ПВ при объеме соответственно V_1 и V ;
 α – эффективный объем молекул ПВ;
 γ – показатель адиабаты ПВ как смеси идеальных газов.
 Для неидеального газа уравнение Пуассона имеет вид

$$P_1 V_1^k = P V^k, \quad (3)$$

где k – показатель адиабаты неидеального газа.
 Совместное решение уравнений дает

$$k = \gamma \ln \frac{V - \alpha}{V_1 - \alpha} / \ln \frac{V}{V_1}. \quad (4)$$

Если положить, что $V_1 = 1 \text{ м}^3$, $V = 1,1 \text{ м}^3$, ($V = 1,0001 \text{ м}^3$), рассчитать α и γ для тротила с выбранными параметрами ($\alpha = 0,55 \text{ м}^3$; $\gamma = 1,4$), то $k = 2,95$ ($k = 3,11$).

Уравнение состояния ПВ с добавками можно записать, если учесть, что оно должно иметь вид

$$P(V - V_0) = \nu \bar{R}T, \quad (5)$$

где \bar{R} – новая постоянная;
 V_0 – объем добавок и эффективный объем молекул ПВ.
 Необходимо найти \bar{R} . Изменение внутренней энергии для системы газ-добавка равно

$$dU = \frac{i}{\bar{M}} \frac{m}{2} R dT + m_\partial C_\partial dT, \quad (6)$$

где m, \bar{M} – масса и средняя молярная масса ПВ;
 i – среднее число степеней свободы ПВ;
 m_∂, C_∂ – масса и удельная теплоемкость вещества добавки.
 С другой стороны dU равно

$$dU = \frac{i}{2} \frac{m + m_\partial}{\bar{M}} \bar{R} dT. \quad (7)$$

Приравнявая dU , можно получить

$$\bar{R} = \frac{mRC}{m + m_\partial} \left(1 + \frac{\frac{i}{2} \frac{m}{\bar{M}}}{imR} \right). \quad (8)$$

Чтобы найти показатель адиабаты ПВ с добавкой, необходимо заменить адиабату ПВ и изохору вещества добавки искомой адиабатой. Показатель адиабаты для ПВ с нагревающимся веществом добавки имеет вид

$$r = k_0 + \ln \frac{P_H}{P_{pH}} / \ln \frac{V}{V_0}, \quad (9)$$

где $k_0 = \gamma \ln \frac{V - V_0}{V_H - V_0} / \ln \frac{V}{V_0}$ – показатель адиабаты ПВ с добавкой, теплоемкость которой равна нулю;
 P_p – давление в ПВ после нагревания и фазовых переходов вещества добавки

$$P_p = R \left(\frac{m_\partial}{M_\partial (V - V_\partial)} + \frac{m}{M(V - \alpha)} \right) \frac{CmT_0 - \int_{T_{пл}}^{T_{кр}} C_{ж\partial} m_\partial dT + C_{г\partial} m_\partial T_{кр}}{C_{г\partial} m_\partial + Cm}, \quad (10)$$

$T_0, T_{кр}, T_{пл}$ – соответственно начальная температура, критическая и температура плавления добавки;

$C_{ж\partial}, C_{г\partial}$ – удельная теплоемкость добавки в жидком и газообразном состоянии;

V_∂ – объем вещества добавки.

Легко получить показатель адиабаты для ПВ с добавками, которые отдают тепло. Большое значение V_0 , значительная теплота нагревания и фазовых переходов вещества добавки

приводят к большому показателю адиабаты ($r \leq 10$) в начальной стадии расширения ПВ. При дальнейшем расширении ПВ показатель может уменьшиться до нуля.

Таким образом, на основе анализа волновых процессов, протекающих при взаимодействии продуктов детонации с частицами добавок, проведена оценка скорости движения и температуры частицы. Кроме того, для продуктов взрыва вместе с добавками получено уравнение состояния и показатель адиабаты. Установлено, что введением добавок инертного вещества можно значительно изменять показатель адиабаты, тем самым регулировать давление в полости взрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
2. Афанасенков А.Н. Расчет параметров детонационной волны смесей взрывчатых веществ с инертными добавками / А.Н. Афанасенков, В.М. Богомолов, И.М. Воскобойников // Физика горения и взрыва. – 1970. – Т. 6. – № 2. – С. 182-184.
3. Баранов Е.Г. Влияние промежутков из пористых низкоплотных материалов на эффективность взрыва скважинного заряда / Е.Г. Баранов, В.Н. Вилянский, О.Н. Оберемок, В.П. Куриной // Изв. вузов. Горный журнал. – 1990. – №5. – С. 72-76.
4. Воскобойников И.М. Расчет параметров детонации смесей ВВ с инертными добавками / И.М. Воскобойников, А.А. Котомин // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21. – №5. – С. 93-97.
5. Котомин А.А. Детонация взрывчатых веществ с инертными добавками / А.А. Котомин, И.В. Петров, В.В. Гидаспов // Горение и взрыв (Материалы Четвертого всесоюзного симпозиума по горению и взрыву). – М.: Наука, 1975. – С. 428-432.
6. Дремин А.Н. Влияние алюминия на параметры детонации тротила / А.Н. Дремин, П.Ф. Похил, М.И. Арифов // ДАН СССР. – 1960. – Т. 131. – Вып. 5. – С. 1140-1142.
7. Дремин А.Н. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов. – М.: Наука, 1970. – 164 с.