УДК 622.235

Ю.А.МИРОНОВ, Р.Е.АНДРЕЕВ, Д.В.МОЛДОВАН
Санкт-Петербургский государственный горный институт (*технический университет*), *Россия*

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА СТЕНКЕ ЗАРЯДНОЙ ПОЛОСТИ С УЧЕТОМ ИСТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ЧЕРЕЗ ОСЕВОЙ КАНАЛ ПРОФИЛИРОВАННОЙ ЗАБОЙКИ

В работе рассмотрен процесс формирования импульса удлиненного заряда взрывчатого вещества (ВВ) с размещением в устье сплошной и специальной забойки. Предложена физическая модель для определения импульса отраженной волны с учетом приращения радиуса поперечного сечения зарядной полости и истечения продуктов детонации. Приведено численное моделирование газодинамических процессов в шпуре при изменении осевого канала забойки.

In given work was considered an impulse's formation process of extended charge explosive with installation a continuous and a special stemming in the hole. Was given the physical model to definite a size of the reflected wave impulse. Also was taken into account an increment radius of cross-section blast hole and expirations of detonation products. Was developed the model consists gas dynamic process in the hole during changing the central canal of the stemming.

Известно, что общее время воздействия взрыва на среду значительно больше длительности процесса детонации самого ВВ, поэтому давление взрывных газов на стенки зарядной камеры будет различным в каждый промежуток времени. Предложена методика определения давления (P) для трех наиболее характерных для процесса взрыва промежутков времени:

- T_1 – период распространения детонации ВВ по заряду;
- T_2 – период прохождения первых ударных волн по продуктам детонации;
- T_3 – момент начала перемещения забойки.

Точное решение задачи о распределении давления вдоль образующей скважины представляет значительные трудности, однако оно может быть упрощено, если пренебречь при вычислениях радиальным расширением продуктов детонации стенок скважины. Погрешность, возникающая при этом, будет незначительной, так как за период времени $T_1 – T_3$ скорость радикального движения границы раздела «продукты детонации – порода» относительно мала по сравнению со скоростью осевого разлета продуктов детонации. При этом принимаются реальная детонация заряда ВВ и наличие монолитных скальных пород (утечка газов взрыва через естественные трещины и пустоты отсутствует).

Согласно теории взрыва, при рассмотрении сплошных колонковых зарядов давление на фронте детонационной волны пропорционально плотности ВВ и квадрату скорости детонации.

Вслед за волной детонации в продуктах взрыва возникает волна разрежения, которая появляется сразу по окончании реакции разложения ВВ.

Давление в волне разрежения определяется по формуле

$$P_2 = \frac{8}{27} P_H \left(\frac{x}{Dt} + \frac{1}{2} \right)^3, \qquad (1)$$

где x – расстояние от точки инициирования до исследуемого сечения, м; t – время пробега волны до исследуемого сечения, с.

Когда в заряде длиной L_3 волна детонации достигает нижнего предела, то в интер-

вале $D/2 \geq t \leq D$ скорость волны движется по линейному закону $(x = Dt/2)$ и давление P меняется по степенному закону от P_H при $x = L_3$ до $P_2 = \frac{8}{27} P_H$ при $x = \frac{L_3}{2}$ (рис.1), а на интервале $0 \leq \frac{x}{t} \leq \frac{D}{2}$ наблюдается выравнивание давления по всей длине заряда: $P_2 = \frac{8}{27} P_H$.

В момент времени T_3 после газодинамического процесса перемещения ударных волн в зарядной камере устанавливается среднее давление взрывных газов:

$$P = 1/2 P_H = 1/8 \rho_0 D^2 = 0{,}5 P_H .$$

Под воздействием давления P_3 в последующие периоды времени (после T_3) происходит метание забойки и расширение зарядной камеры, в результате чего в продуктах детонации возникают новые волны. Процесс их распространения нами не рассматривается.

В СПГГИ (ТУ) разработана конструкция забойки, увеличивающая время нагружения массива при взрывном разрушении. Принцип действия конструкции – отражение ударной волны к донной части зарядной полости внутренним профилем забойки при ее расширении. Истечение продуктов детонации из шпура или скважины регулируется выходным осевым каналом, что приводит к их воздействию на массив до полного разрушения. Испытания забойки показали ее эффективность при различных технологиях ведения взрывных работ. Конструкция постоянно совершенствуется для адаптации к различным типам ВВ и бурового инструмента [5].

Таким образом, целесообразно рассмотреть общую физическую модель работы предлагаемой забойки для оценки эффективности ее применения в различных условиях и сравнения с математической моделью, предложенной ранее.

Полный импульс, передаваемый продуктами взрыва в породный массив за время расширения зарядной полости до $R_{\max}$ может быть определен путем суммирования

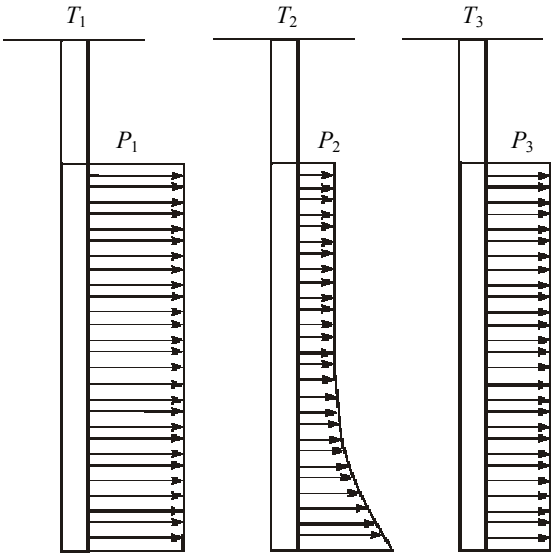


Рис.1. Эпюры давления на стенки зарядной камеры при взрыве сплошного колонкового заряда

импульсов, передаваемых массиву серией волн отражения, распространяющихся по длине заряда за время нахождения забойки в зарядной полости.

Рассмотрим процесс формирования полного импульса при обратном способе инициирования удлиненного заряда ВВ с размещенным в устье предлагаемым устройством. Детонационная волна, проходя по заряду, генерирует импульс, который согласно зависимости

$$l_ç = S_0 \int_0^{t_1} P_H dt,$$

где S_0 – площадь поверхности зарядной полости; t_1 – время детонации заряда; P_H – давление во фронте детонационной волны.

Площадь поверхности зарядной полости

$$S_0 = 2\pi R_0 l_ç ,$$

где $l_ç$ – длина заряда ВВ.

Время прохождения детонационной волны со скоростью детонации по длине заряда

$$t_1 = \frac{l_ç}{D} .$$

Давление во фронте детонационной волны

$$P_H = \frac{\rho_{ÂÂ} D'}{k-1},$$

где k – коэффициент изоэнтропы, при $k = 3$ получаем полный импульс

$$I = \frac{\pi}{2}\rho_{\text{ВВ}} D R_0 l_{\text{з}}^2.$$

Ударная волна, проникая в коническое входное пространство, производит ударное нагружение поверхности профилированного устройства, в результате чего последнее расширяется и запирает продукты детонации в пространстве зарядной полости.

В результате трехударных маховских отражений ударная волна усиливается до величины, определяемой радиусом поперечного сечения (критического) [3]

$$P_{\max} = (P_1 - P_H) R_{\text{к}}^{-0,4},$$

где P_1 – давление за фронтом уплотнения среды; P_H – давление перед фронтом отклонения; $R_{\text{к}}$ – радиус критического сечения.

При этом на дно распространяется отраженная ударная волна с давлением $kP_{\max}$.

Из условия динамической совместимости потока до и после скачка уплотнения [2]

$$P_1 = \frac{2kP_H}{k+1}\left(\text{M}^2 + \frac{1+k}{2k}\right),$$

где M – безразмерная скорость звукового потока продуктов детонации (число Маха), при $k = 1{,}4$ M = 1,5.

Тогда $P_1 = 1{,}85P_H$.

На динамику развития колебательного процесса по длине заряда при $0 < t < t_{\max}$ влияет снижение плотности. Связь между объемом и текущим средним давлением продуктов детонации в полости ($P_{\text{ñð}}$) выражается изоэнтропами $PV^k = \text{ñînst}$ – в начале, $PV^{\alpha} = \text{const}$ – в конце процесса.

Радиус максимального расширения полости может быть оценен на основании аппроксимирующей зависимости [1]

$$\frac{\frac{4}{3}\pi R_{\max}\rho_0 C_p^2}{E} = 38\left(\frac{\rho_0 C_p^2}{250\sigma_{\text{ñæ}}}\right)^{\frac{2}{3}},$$

где E – энергия взрыва; $\sigma_{\text{ñæ}}$ – предел прочности породы на сжатие;

$$R_{\max} = R_0 \frac{38\sigma_0}{\rho_0 C_p^2}\left(\frac{\rho_0 C_p^2}{250\sigma_{\text{ñæ}}}\right),$$

σ_0 – напряжение на фронте волны, генерируемой в массиве при взрыве заряда.

За время $t_{\text{çàä}}$ из зарядной полости через осевой канал предлагаемого устройства происходит утечка продуктов детонации [2] ($k = 1{,}2$):

$$\Delta m = \rho_0 V_k S_{\text{êð}}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} t_{\text{çàä}},$$

где $S_{\text{êð}}$ – площадь поперечного (критического) сечения горловины диффузора.

Плотность продуктов детонации в зарядной полости с учетом истечения через диффузор

$$\rho_{\min} = \frac{m_0 - \Delta m}{V},$$

где V – объем зарядной полости.

Масса газа при детонации заряда

$$m_0 = \pi R_0^2 l_{\text{з}} \rho_{\text{ВВ}}. \qquad (2)$$

Скорость звука при детонации заряда при снижении до $\rho_{\min}$

$$C_{\min} = C_n\left(\frac{\rho_m}{\rho_0}\right)^{\frac{k-1}{2}},$$

где $k = 1{,}4$; $\rho_0 = \rho_{\text{ВВ}}$; $C_n = (3/8)D$ [3].

За время $t_{\text{çàä}}$ забойкой количество колебаний вдоль оси скважины

$$n = \frac{1 + C_{\text{ср}} t_{\text{çàä}}}{l_{\text{çàä}}},$$

где

$$\tilde{N}_{\text{ñð}} = \frac{\tilde{N}_n + C_{\min}}{2}.$$

Давление в отраженной волне

$$\frac{P_1}{P_n} = \left(\frac{C_1}{C_n}\right)^3.$$

Приращение радиуса поперечного сечения зарядной полости при сообщении импульса горной породе отраженной волной

$$\Delta R = \frac{R_{\max} - R_0}{n}.$$

Объем зарядной полости при приращении ΔR

$$V_1 = \pi(R_0 + \Delta R)^2 l_ç.$$

Время прохождения отраженной волны по длине заряда

$$t_{n-1} = \frac{l_ç}{C_{n-1}},$$

где C_{n-1} – скорость звука в продуктах детонации с учетом приращения ΔR и истечения Δm за время t_{n-2},

$$C_{n-1} = C_n \left(\frac{\rho_{n-1}}{\rho_0} \right)^{\frac{k-1}{2}}.$$

Импульс отраженной волны за время t_{n-1} аналогичен (1):

$$I_{n-1} = S_1 \int_{t_n}^{t_{n-1}} P_{îòð\,n-1}\, dt.$$

Процесс колебания в зарядной полости будет продолжаться в течение времени расширения полости до $t_{çàä}$ [4].

С учетом (2) и принимая параметры расширения при истечении с R_k до $R_{ñêâ}$ и $R_{ç.ï}$ с R_0 до $R_{\max}$ можно воспользоваться основными соотношениями, с величинами $t_{çàä}$, n и Δm и решить систему с граничными условиями относительно $t_{çàä}$.

По результатам расчетов построены графические зависимости (рис.2).

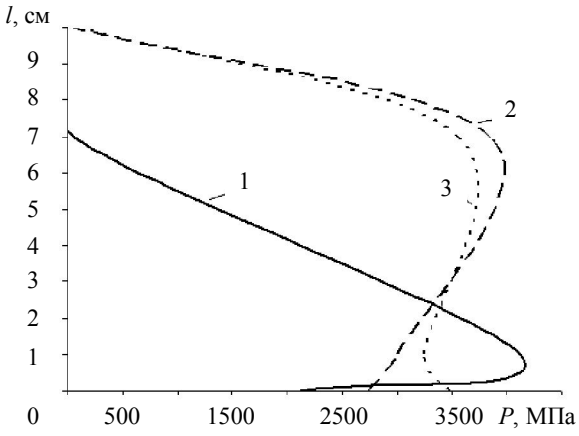


Рис.2. Изменение давления на стенке зарядной камеры
1 – 0,5 мс; 2 – 4 мс; 3 – 8 мс

Выводы

1. В отличие от сплошной забойки механизм работы предложенной конструкции обеспечивает практически полное запирание зарядной полости.

2. Импульс ударной волны усиливается в диффузоре за счет уплотнения среды и может составлять до 50 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баум Ф.А.* Физика взрыва / Ф.А.Баум, И.А.Станюкович, Б.И.Шехтер. М.: Недра, 1973.

2. *Дейг М.Е.* Техническая газодинамика. М.: Энергия, 1974.

3. *Жигалко Е.Ф.* Динамика ударных волн. Л.: Издво ЛГУ, 1987.

4. *Миронов Ю.А.* Разработка и исследование параметров скважинной забойки для снижения пылегазовых выбросов при взрыве: Автореф. дис. … канд. техн. наук / Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1998.

5. *Парамонов Г.П.* Исследование эффективности применения запирающих газодинамических устройств в качестве забойки / Г.П.Парамонов, М.Г.Менжулин, Ю.А.Миронов // Взрывное дело. 1998. № 91/48.