

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 622.235: 622.236

Ю. А. Масаев, Н. В. Мильбергер

МЕХАНИЗМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ЗАРЯДА ВВ С ГИДРОЗАБОЙКОЙ И ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ

Эффективность разрушения породного массива предопределяется параметрами формируемого поля напряжений, на которое существенное влияние оказывает качество используемой внутренней забойки шпуров.

В настоящее время доказано, что наилучшей внутренней забойкой, особенно применительно к шахтам, опасным по газу и пыли, является гидрозабойка. Для того, чтобы полнее характеризовать механизм действия гидрозабойки, необходимо дать качественную оценку некоторым процессам, происходящим в забоечной массе при взрыве

При взрыве заряда ВВ под воздействием ударной волны водяная масса воспринимая давление и оказывая сопротивление выталкивающему воздействию выбрасывается через отверстия в виде отдельных струй (рис. 1). Высота выбрасываемых водяных струй показывает характер распределения давления в водяной массе по всей длине шпура. В соответствии с этим, механизм взаимодействия гидрозабойки с окружающим массивом можно представить следующим образом.

Воспринимая давление взрыва, водяная забой-

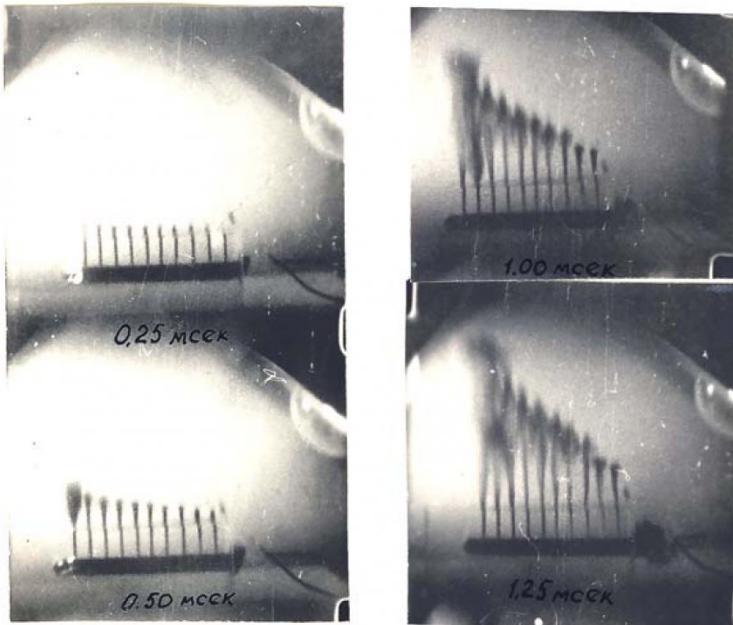


Рис. 1. Характер передачи давления гидрозабойкой на стенках шпура после начала детонации заряда ВВ через: 25 мс; 50 мс; 100 мс; 125 мс

шпурового заряда ВВ.

Качественная картина воздействия гидрозабойки на стенки шпура была получена нами при проведении исследований на моделях с применением скоростной киносъемки. Водяная масса занимала всю длину шпура без запирающей забойки в устье шпура. Модель выполнена в виде блока из органического стекла, по всей длине шпура в стенке, которой были высверлены отверстия диаметром 1,5 мм. Съемка велась со скоростью 10 тыс. кадров в секунду.

ка создает распирающие усилия на стенки шпура. Основное действие ударной волны и газообразных продуктов взрыва воспринимается гидрозабойкой в первоначальный момент взрыва. В этот момент водяная забойка на некотором участке, граничащем с зарядом ВВ, передает окружающей среде максимальное давление, приближающееся по величине к давлению в зарядной камере. Длина этого участка определяется сжимаемостью жидкости, ибо при высоких давлениях, согласно исследованиям проф. Г. М. Ляхова [1] плотность

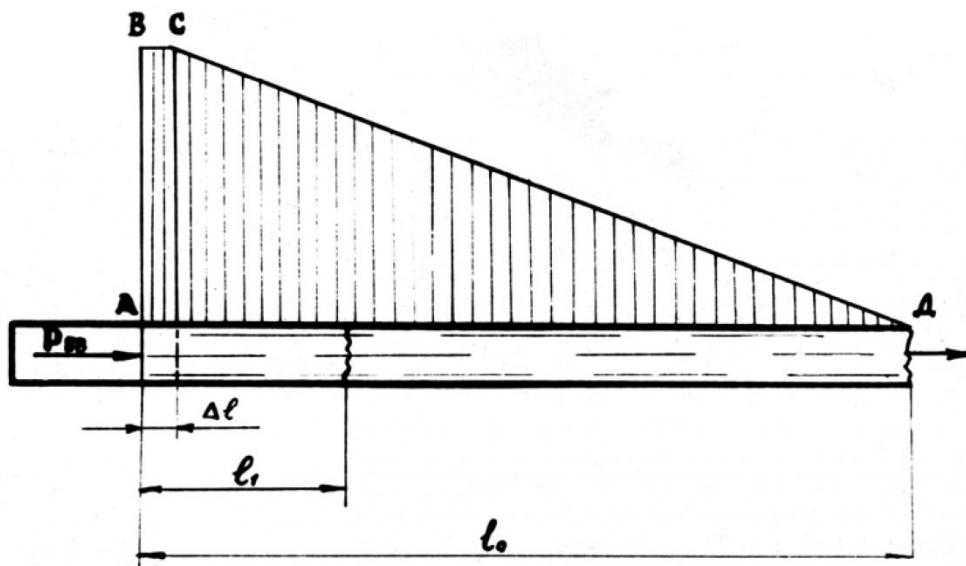


Рис. 2. Характер распределения нормальных давлений, передаваемых гидрозабойкой на стенки шпура при взрыве заряда ВВ

воды изменяется. Степень сжатия забоечной массы можно приближенно определить пользуясь уравнением состояния для воды и других однородных жидкостей при воздействии на них давлений порядка 20-25 тыс. атмосфер, рекомендованным проф. Г. М. Ляховым:

$$P = P_0 + \frac{C_0^2}{\gamma V_0} \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^\gamma - 1 \right], \quad (1)$$

где P – конечное давление, действующее на водяную массу; P_0 – начальное давление; C_0 – скорость звука в воде ($C_0 = 1500$ м/с); V_0 и V – начальный и конечный объем водяной массы; γ – экспериментальный коэффициент, определяемый из опытов по сжатию воды (по данным Г. М. Ляхова $\gamma = 6$).

Рассмотрим возможный участок сжатия водяной массы для случая взрывания заряда 0,6 кг аммонита ПЖВ-20 в шпуре диаметром 44 мм при длине водяной забойки 100 см. При детонации заряда ВВ в зарядной камере создается давление $P = 24,5$ тыс. атмосфер. Объем водяной забойки составляет $V_0 = \pi R^2 l_{заб} = 1520$ см³.

Подставляя значения входящих параметров в уравнение (1) и решая его относительно V , после несложных вычислений получил $V = 1510$ см³, откуда

$$l = \frac{V}{\pi R^2} = 99.34 \text{ см} \quad \Delta l = l_{заб} - l = 0.66 \text{ см}$$

Таким образом, в момент детонации заряда ВВ за счет давления, действующего на водяную забойку, на участке Δl происходит сжатие водяной массы и окружающему массиву передается

максимальное давление, равное давлению продуктам детонации в зарядной камере. После преодоления сопротивления, забойка начинает двигаться и передаваемое стенкам шпура давление снижается.

Приближенно, характер распределения нормальных давлений на стенки шпура вдоль столба водяной забойки может быть представлен, как показано на рис. 2.

Рассмотренный характер распределения нормальных давлений является общим случаем для гидрозабойки. В зависимости от варианта конструктивного выполнения гидрозабойки, характер распределения нормальных давлений и величина сопротивления, которое она способна оказать выталкивающему действию продуктов взрыва, может изменяться.

Сопротивляемость гидрозабойки выталкивающему действию зависит от двух основных факторов –

импульса нормального давления

$$J = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (2)$$

импульса бокового давления

$$J_{\tau} = \int_{t_1}^{t_2} P_{\tau}(t) dt \quad (3)$$

формируемых в зарядной камере при взрыве заряда ВВ. Пределы интегрирования включают интервал времени от начала нарастания давления в данной точке пространства до его снижения до уровня начального значения.

Давление продуктов взрыва в зарядной полости может быть описано адиабатой Гюгонио.

В этом случае взаимосвязь давления и объема

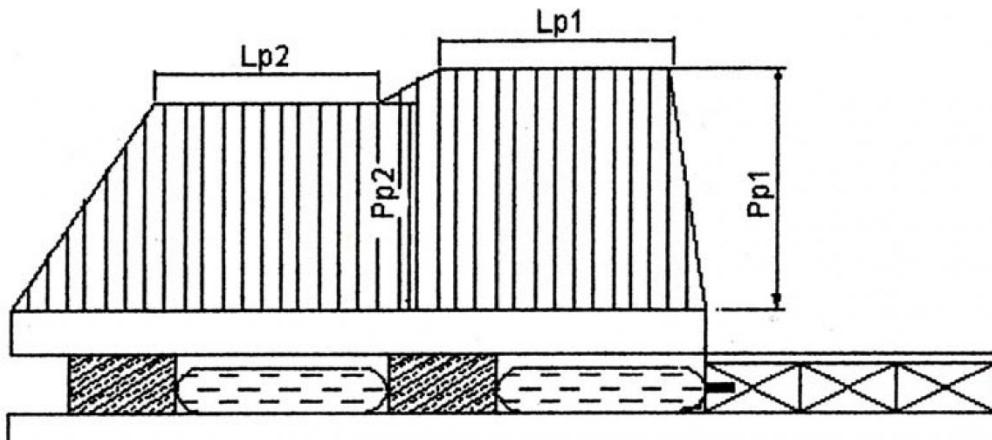


Рис. 3. Комбинированная гидрозабойка

зарядной полости занимаемой газом выражается, как

$$PV^n = \text{const}. \quad (4)$$

Но с началом подвижки внутренней забойки происходит увеличение объема при одновременном снижении давления. В этом случае взаимосвязь давления и объема зарядной полости и ее изменение во времени, по данным ИГД им. А. А. Скочинского, может быть выражена соотношением:

$$P_{n_0} V_i^n = P(t) [V_i + \Delta V_i(t) + \Delta V_{\text{заб}}(t)]^{n(t)}, \quad (5)$$

где P_{n_0} – начальное давление продуктов взрыва в зарядной полости; V_i – начальный объем зарядной полости; n – показатель адиабаты продуктов взрыва в начальный момент времени после завершения процесса детонации; $\Delta V_i(t)$ – приращение во времени объема полости за счет ее расширения; $\Delta V_{\text{заб}}(t)$ – приращение во времени объема полости за счет сдвижения внутренней забойки; $n(t)$ – изменяющийся во времени показатель адиабаты.

Изменение показателя адиабаты происходит от $n \approx 3$ при высоких значениях плотности газообразных продуктов взрыва (ПВ) до $n = 1,5$ при расширении ПВ в 10 и более раз. Для практического использования в расчетах авторы выделяют два интервала давлений, в пределах которых показатель адиабаты можно принимать равным $n = 3$ или $n = 1,25$. Давление, при котором происходит изменение показателя адиабаты можно считать критическим и определить по формуле:

$$P_{kp} = 0,154 \sqrt{\left(E_{bb} - \frac{1}{2} \frac{P_{n_0}}{\rho_{bb}} \right)^3 \cdot \frac{\rho_{bb}^3}{P_{n_0}}}, \quad (6)$$

где E_{bb} – энергия единицы массы ВВ; ρ_{bb} – на-

чальная плотность ВВ; P_{n_0} – среднее начальное давление ПВ (в случае, когда $n \approx 3$).

По данным проф. К. П. Станюковича [2]:

$$P_{n_0} = \frac{1}{8} \cdot \rho_0 D^2, \quad (7)$$

где ρ_0 – массовая плотность ВВ; D – скорость детонационной волны.

В том случае, когда давление превышает критическое значение, взаимосвязь давления $P_1(t)$ и удельного объема $V_1(t)$ может быть выражена соотношением:

$$P_1(t) [V_1(t)]^3 = P_{n_0} V^3. \quad (8)$$

При давлениях меньших критического значения эта взаимосвязь может быть выражена соотношением:

$$P_2(t) [V_2(t)]^{1,25} = P_{kp} V_{kp}^{1,25}. \quad (9)$$

Величина V_{kp} , согласно [2], может быть определена из уравнения:

$$P_{n_0} V_i^3 = P_{kp} V_{kp}^3. \quad (10)$$

Изложенное описание процессов, происходящих в зарядной полости при детонации заряда ВВ и сдвигении внутренней забойки относится к случаю, когда забойка выполнена в виде однородной водяной среды. Для повышения времени задержки гидрозабойки в шпуре и обеспечения максимального использования энергии взрыва на разрушение окружающего породного массива, нами разработаны варианты гидрозабойки в комбинации с промежуточными глиняными пыжами, защищенные патентами РФ [3-5] один из вариантов комбинированной гидрозабойки состоит из водонаполненной ампулы, размещаемой на контакте с зарядом ВВ, после которой расположен промежуточный запирающий глиняный пыж, за ним вторая гидроампула, а после нее в устье шпера основной запирающий пыж (рис. 3).

В данном варианте механизм действия такой забойки можно представить следующим образом. При взрыве заряда ВВ на первую гидроампулу действует давление, равное давлению во фронте ударной волны [2]:

$$P = \frac{\rho_0 D^2}{4}. \quad (11)$$

Процессы, происходящие при этом в зарядной полости и водяной массе описаны выше. Давление на стенки шпура, передаваемое водяной массе, создает импульс бокового давления (бокового распора – P_{p1}) за счет частичного сжатия водяной массы, время действия которого обозначено участком L_{p1} , поскольку сдвижению водяной массы препятствует промежуточный запирающий глиняный пыж, через сжимаемую водяную массу давление передается промежуточному глиняному пыжу, и процессы, происходящие в глиняной массе несколько отличаются от водяной массы.

По данным проф. Г. М. Ляхова [1], при взрыве цилиндрического заряда ВВ, длина которого пре-вышает его диаметр, возникающее напряженное состояние в глиняной массе определяется двумя параметрами – давлениями, действующими в направлении распространения ударной волны (P), т.е. по оси шпура, и в перпендикулярном к стенкам шпура направлении (P_τ), а движение частиц глиняной среды определяется одной величиной – скоростью частиц (u) в направлении распространения волны, поскольку смещения в других направлениях отсутствуют. Поэтому определению подлежат три величины:

$$P = P(t); \quad P_\tau = P_\tau(t) \quad \text{и} \quad u = u(t).$$

И, как уже было сказано ранее, определяющими являются импульсы нормального давления (J) и бокового давления (J_τ).

В неводонасыщенных глинистых грунтах, согласно исследованиям проф. Г. М. Ляхова, в отличие от воды, ударные волны превращаются в волны сжатия с постепенным нарастанием давления. Поэтому действие волн в глинистой массе определяется двумя временными характеристиками – временем нарастания давления, т.е. промежутком времени от начала нарастания до момента достижения максимального значения, и времени действия давления, т.е. промежутком времени от начала нарастания до момента падения давления до начального значения.

При постепенном нарастании давления учитываются две скорости – распространения начала возмущения – D и достижения максимума напряжения – D_{max} . На границе с зарядом ВВ, когда волна является ударной, D и D_{max} совпадают.

Сжатие глинистой массы на фронте ударной волны происходит всегда при одинаковом режиме нагружения, т.е. при скорости деформации, стре-

мящейся к бесконечности. Как уже было отмечено, при взрыве заряда ВВ в направлении оси шпура действует давление P , формирующее нормальные напряжения σ_1 , а в перпендикулярном направлении давление P_τ формирует боковые напряжения σ_2 .

По значениям σ_1 и σ_2 на фронте волны и одной из величин – скорости фронта волны или скорости частиц на фронте волны (u) находится уравнение динамической сжимаемости глинистой массы – $\sigma = \sigma(\varepsilon)$. Если известны σ_1 , σ_2 и D , можно определить динамическую сжимаемость рассматриваемой среды. Взаимосвязь плотности среды и нормального напряжения на фронте волны со скоростью движения фронта определяется из законов сохранения массы и количества движения:

$$D = \sqrt{\frac{\rho}{\rho_0} \cdot \frac{\sigma_1}{\rho_0 - \rho}}. \quad (12)$$

Нулевой индекс указывает на состояние невозмущенной среды перед фронтом волны.

Деформация среды ε с плотностью связана соотношением:

$$\varepsilon = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}. \quad (13)$$

С учетом выражения (12) закон динамического сжатия на фронте ударной волны представляется в виде:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{\rho_0 D}. \quad (14)$$

Если выразить отношение нормального и бокового напряжений через коэффициент бокового давления в виде:

$$K_\tau = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \quad (15)$$

то закон динамического сжатия представляется в виде зависимости деформации среды от среднего нормального напряжения:

$$\varepsilon = \frac{3\sigma}{(1 + 2K_\tau)\rho_0 D^2}. \quad (16)$$

По данным проф. Г. М. Ляхова [1, 5] в условиях движения с плоской и сферической симметрией

$$\sigma = -\frac{(\sigma_1 + 2\sigma_2)}{3}. \quad (17)$$

Величина коэффициента K_τ в общем случае непостоянна [$K_\tau = K_\tau(\sigma)$], но в глинистых средах в некотором интервале напряжений изменяется незначительно и она может быть принята с некоторыми допущениями как $K_\tau = const < 1$. В жидких средах $K_\tau = 1$.

В действительности, в зарядной полости происходят более сложные процессы. При воздейст-

вии на внутреннюю забойку энергии ударной волны и газообразных ПВ, внутренняя забойка начинает смещаться со своего первоначального положения, за счет чего происходит увеличение объема зарядной полости. Одновременно, давление ударной волны и газообразных ПВ действует и на окружающий породный массив, что приводит к смещению стенок зарядной полости и увеличению ее объема на некоторую величину.

По данным проф. Э. О. Миндели, максимальное давление, которое может быть уравновешено прочностными характеристиками среды, определяется из выражения:

$$P_{max} = \sigma_{раз.} \sqrt{\frac{\gamma c^2}{6\sigma_{раз.}}}, \quad (18)$$

где $\sigma_{раз.}$ – напряжение раздавливания среды при одноосном сжатии; γ – плотность горной породы; c – скорость волн напряжения в породном массиве.

Приращение объема зарядной полости за счет смещения ее стенок при известных характеристиках ВВ и породного массива, определяется из уравнения:

$$\Delta V_i(t) = V_i(t) - V_i. \quad (19)$$

Приращение объема зарядной полости за счет смещения внутренней забойки может быть определено из выражения:

$$M = \frac{d^2 l(t)}{dt^2} = P(t)S - F_3, \quad (20)$$

где M – масса внутренней забойки; S – площадь поперечного сечения внутренней забойки; $l(t)$ – смещение внутренней забойки во времени под действием давления $P(t)$; F_3 – сила сопротивления внутренней забойки.

Время увеличения объема зарядной полости

может быть определено из выражения:

$$T = \frac{2xr_n}{c} \left(\frac{\gamma c^2}{250\sigma_{раз.}} \right)^{1/6}, \quad (21)$$

где x – коэффициент $x = \sqrt[3]{\frac{E_{66}}{3\sigma_{раз.}}}$; E_{66} – потенциальная энергия применяемого заряда ВВ; r_n – конечный радиус зарядной полости.

Таким образом, из сказанного выше можно убедиться, что процессы, происходящие в зарядной полости (в шпуре) при взрыве заряда ВВ имеют сложный характер. А при использовании комбинированных видов гидрозабойки, механизм взаимодействия взрыва заряда ВВ с внутренней забойкой и окружающим породным массивом будет иметь более сложный характер, зависящий от конструктивного исполнения внутренней забойки. В этом случае весьма проблематичным представляется определение рациональной длины внутренней забойки по какой-либо формуле, поскольку при одинаковой длине комбинированной забойки, при прочих равных условиях, время ее задержки в шпуре будет различным. Поэтому эффективность того или иного вида внутренней забойки в практических условиях следует определять из условия равенства времени задержки забойки в шпуре ($t_{заб}$) и времени начала разрушения породного массива ($t_{раз.}$), т.е. $t_{заб} = t_{раз.}$.

Для определения времени задержки забойки в шпуре нами разработан датчик [6], размещаемый в устьях шпурков, конструктивное исполнение которого обеспечивает достаточно точные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ляхов, Г. М. Основы динамики взрыва в грунтах и жидкых средах. – М. : Недра, 1964. – 216 с.
- Станюкович, К. П. Неустановившиеся движения сплошной среды. – М. : Наука, 1971. – 854 с.
- Патент № 70572, РФ, МПК F42D 1/08. Забойка шпуров при ведении взрывных работ / КузГТУ ; Ю. А. Масаев, М. Д. Войтов, Н. В. Мильбергер. – Опубл. 27.01.2008. Бюл. № 3.
- Патент № 83129, РФ, МПК F42D 1/08. Гидрозабойка шпуров / КузГТУ ; Ю. А. Масаев, В. Ю. Масаев, Н. В. Мильбергер, О. В. Зиберт, В. А. Карасев. – Опубл. 20.05.2009. Бюл. № 14.
- Патент № 116622, РФ, МПК F42D 1/08. Комбинированная гидрозабойка шпуров / КузГТУ ; Ю. А. Масаев, А. И. Копытов, В. В. Першин, В. Ю. Масаев. – Опубл. 27.05.2012. Бюл. № 15.
- Патент № 122475, РФ, МПК F42D 1/08. Датчик задержки внутренней забойки в шпуре / КузГТУ; Ю. А. Масаев, В. Ю. Масаев. – Опубл. 27.11.2012. Бюл. № 33.

□ Авторы статьи:

Масаев
Юрий Алексеевич,
канд. техн. наук, проф. каф.
строительства подземных соору-
жений и шахт КузГТУ
Email: recess@bk.ru

Мильбергер
Наталья Владимировна,
аспирант КузГТУ
Email: recess@bk.ru