

# МЕХАНИКА ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 625.235.5

DOI:10.7242/echo.2024.1.6

## ИМПУЛЬС СКВАЖИННОГО РАССРЕДОТОЧЕННОГО ЗАРЯДА С ЗАБОЙКОЙ

В.М. Мальцев, В.В. Аникин  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Взрыв рассматривается как адиабатический процесс. В работе использовано уравнение Пуассона для идеального газа. Получена зависимость полного импульса скважинного заряда от массы взрываемого ВВ. Для распределенного скважинного заряда определен импульс отдельных частей, разделенных воздушным промежутком, взрываемых последовательно. Дана оценка величины дополнительного импульса при использовании забойки.

**Ключевые слова:** рассредоточенный заряд, забойка, импульс взрывных газов, длительность импульса, скорость детонации, адиабатический процесс, показатель адиабаты, уравнение Пуассона для идеального газа.

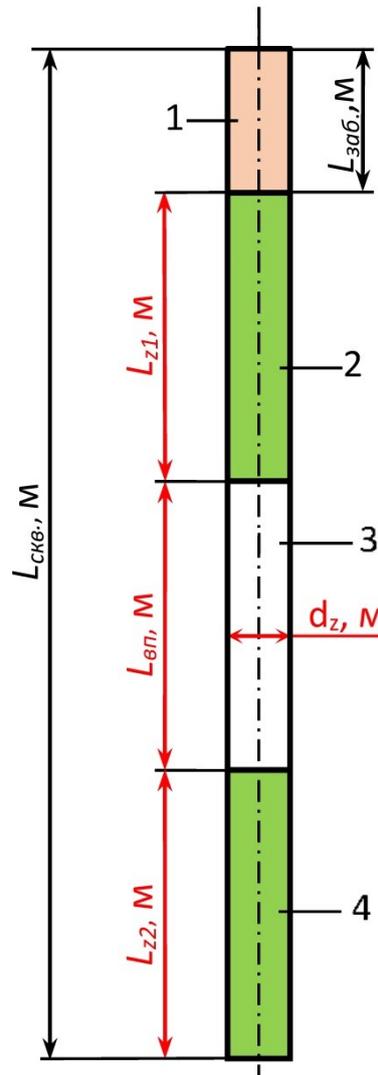
Эффективность взрывания горных пород существенным образом зависит, при прочих равных условиях, от конструкции заряда. В данной работе рассматривается распределенный скважинный заряд, состоящий из двух частей, с воздушным промежутком и забойкой (рис. 1).

При равном выходе горной массы с 1 м скважины и удельном расходе ВВ рассредоточение заряда улучшает дробление (делает его более равномерным) по сравнению со сплошным зарядом. Обычно рассредоточение заряда применяется, если емкость скважины используется не полностью при сплошных зарядах. В неоднородных породах целесообразно рассредоточить заряд ВВ, располагая его части напротив наиболее трудно взрываемых участков пород. При взрыве сплошного заряда происходит переизмельчение породы вблизи заряда из-за высокого давления взрывных газов в зарядной камере, при этом в дальнюю зону передается относительно меньшее количество энергии, что приводит к дроблению породы на более крупные куски. Воздушные промежутки позволяют снизить пиковое давление из-за уменьшения плотности заряда, что позволяет уменьшить переизмельчение породы вблизи заряда. Взрывные газы верхнего заряда «запирают» газообразные продукты детонации нижнего заряда, тем самым увеличивая время воздействия заряда на взрываемый массив. Эффект воздушного промежутка зависит от его длины: при малой длине промежутков не дает эффекта, а при чрезмерном увеличении может привести к ухудшению дробления из-за чрезмерного снижения давления в зарядной камере. Обычно, в большинстве случаев, длина воздушного промежутка устанавливается эмпирически и зависит от длины заряда, типа ВВ и физико-механических свойств горных пород [1].

Забойка уменьшает потери энергии при детонации заряда, обеспечивая более полное протекание реакции взрыва, увеличивает время воздействия газообразных продуктов детонации на стенки зарядной камеры, что приводит к повышению интенсивности дробления взрываемых горных пород, а также уменьшает силу ударной воздушной волны и разброс кусков взорванных горных пород. В качестве материала забойки можно использовать глину, песок, их смеси, буровую мелочь, мелко раздробленную породу и т.д. [1].

Минимальная длина забойки при взрывании зарядов в скважинах по углю и породе в шахтах и рудниках, опасных по газу и (или) пыли, должна быть не менее 1 м [2].

В данной работе импульс рассредоточенного скважинного заряда с забойкой, разделенного на две равные части воздушным промежутком, которые взрываются последовательно, рассматривается при следующих условиях:



**Рис. 1.** Расчетная схема скважинного рассредоточенного заряда с воздушным промежутком и забойкой  
 1 – забойка; 2 – верхняя часть рассредоточенного заряда; 3 – воздушный промежуток;  
 4 – нижняя часть рассредоточенного заряда

1) если начальную стадию взрыва рассматривать как процесс, происходящий без обмена с окружающей средой, т.е. как адиабатический процесс, то, согласно уравнению Пуассона для идеальных газов,  $PV^\gamma = const$ , где  $P$  и  $V$ , соответственно, давление и объем взрывных газов в зарядной камере;  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $\gamma = C_p/C_v$ ,  $C_p$  и  $C_v$  – теплоемкость взрывных газов, соответственно, при постоянном объеме и давлении; для ВВ типа аммонит БЖВ показатель адиабаты  $\gamma \approx 3$ ;

2) длина заряженного участка равна длине воздушного промежутка:  $L_{z1} = L_{z2} = L_{вп}$ ; объемы, соответственно, тоже одинаковы:  $V_{z1} = V_{z2} = V_{вп}$ , рис. 1;

3) соударения отраженных фронтов не учитываются, объем взрывных газов  $V$  на участке скважины  $L_{z1} + 0,5 \cdot L_{вп}$  увеличится в  $j = 1,5$  раза (2-я половина промежутка заполнится газом от следующего заряженного участка), поэтому, в соответствии с уравнением Пуассона, давление  $P$  на этом суммарном участке и во всей скважине первоначально понизится в  $P/j^3$  раза;

4) при одинаковой массе ВВ сплошного и рассредоточенного зарядов объем взрывааемых пород при использовании этих зарядов (в случае последовательного взрывания двух частей рассредоточенного заряда) также будет одинаковый;

5) за счет большего времени, необходимого для стабилизации давления в зарядной камере при взрывании рассредоточенного скважинного заряда, по сравнению со сплошным зарядом, и происходящих при этом колебаний амплитуды давления, передающихся на взрывааемый массив, степень дробления горных пород будет выше по сравнению со сплошным зарядом;

6) забойка до момента вылета из скважины также будет способствовать увеличению времени стабилизации давления в зарядной камере и воздействия импульса на массив.

Для удобства дальнейших расчетов необходимо получить зависимость величины полного импульса скважинного (удлиненного) заряда от массы взрываемого ВВ.

Общеизвестное классическое выражение импульса можно записать:

$$J = m \cdot v = F \cdot t, \quad (1)$$

где  $J$  – импульс тела, Н·с;  $m$  – масса тела, кг;  $v$  – скорость движения этого тела, м/с;  $F$  – сила, действующая на тело, Н;  $t$  – время воздействия силы на тело, с.

При взрыве, в данном случае, скорость  $v$  – это скорость волны разряжения  $v_p$ , м/с, равная [3]:

$$v_p = D \cdot \sqrt[2]{3/8} \approx 0,612 \cdot D, \quad (2)$$

где  $D$  – скорость детонации используемого ВВ, м/с.

Масса скважинного заряда  $m$  находится по формуле, кг:

$$m = V_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} = S_z \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} = (\pi \cdot d_z^2 / 4) \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}}, \quad (3)$$

где  $V_z$  – объем скважинного заряда ВВ, м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ВВ}}$  – плотность ВВ в заряде, кг/м<sup>3</sup>;  $S_z$  – площадь заряда (скважины), м<sup>2</sup>;  $L_z$  – длина скважинного заряда, м;  $d_z$  – диаметр скважинного заряда, м.

Таким образом, с учетом выражения (2) и (3) получим:

$$J = m \cdot v_p = (\pi \cdot d_z^2 / 4) \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot 0,612 \cdot D, \text{ Н} \cdot \text{с} \quad (4)$$

При описании взрыва нужно использовать удельную силу – давление, определяемое по формуле:

$$P = F / S, \quad \text{Н} / \text{м}^2 \quad (5)$$

где  $S$  – площадь зарядной камеры, м<sup>2</sup>, на которую действует сила  $F$ , Н.

Сила  $F$  из выражения (5) находится по формуле:

$$F = P \cdot S, \text{ Н} \quad (6)$$

Величина давления в скважине при детонации заряда определяется из выражения [3]:

$$P_c = \rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2 / [2 \cdot (1 + k)], \quad (7)$$

где  $P_c$  – среднее (установившееся) давление в зарядной камере, Н/м<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент Грюнайзена используемого ВВ [3].

Площадь поверхности зарядной камеры, на которую действует давление  $P$ , равна:

$$S_6 = \pi \cdot d_z \cdot L_z, \text{ м}^2 \quad (8)$$

При описании взрыва вместо времени  $t$  в формуле (1) нужно использовать время прохождения волны разряжения  $\tau_0$ , с:

$$\tau_0 = L_z/v_p = L_z/0,612 \cdot D, \quad (9)$$

Таким образом, с учетом формул (6), (8), (9), можно представить величину импульса, определяемого по формуле (1), следующим образом, Н·с:

$$J = F \cdot t = P_c \cdot S_6 \cdot \tau_0 = P_c \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot [L_z/0,612 \cdot D] \quad (10)$$

С учетом выражения (7) выражение (10) будет выглядеть, Н·с:

$$J = [\rho_{\text{ВВ}} \cdot D^2/2 \cdot (1 + k)] \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot [L_z/0,612 \cdot D] \quad (11)$$

После преобразования формула (11) будет выглядеть следующим образом, Н·с:

$$J = \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot D \cdot L_z/[2 \cdot 0,612 \cdot (1 + k)], \quad (12)$$

Умножая числитель и знаменатель формулы (12) на  $2d_z$ , имеем, Н·с:

$$J = 2 \cdot \pi \cdot d_z^2 \cdot L_z \cdot \rho_{\text{ВВ}} \cdot D \cdot L_z/[4 \cdot d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)], \quad (13)$$

После преобразования выражение (13), с учетом выражения (3), имеет вид, Н·с:

$$J = 2 \cdot M \cdot D \cdot L_z/[d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)], \quad (14)$$

Окончательно выражение импульса можно записать в следующем виде, Н·с:

$$J = P_c \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot L_z/0,612 \cdot D = 2 \cdot M \cdot D \cdot L_z/[d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)] \quad (15)$$

Таким образом, с учетом основных разрушающих факторов удлиненного заряда, полный импульс давления взрыва в скважине (при отсутствии радиального зазора) определяется следующим выражением:

$$J_{\text{п}} = I \cdot P_c \cdot \pi \cdot d_z \cdot L_z \cdot L_z/0,612 \cdot D = I \cdot 2 \cdot M \cdot D \cdot L_z/[d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)] \quad (16)$$

где  $J_{\text{п}}$  – полный импульс давления взрывных газов, Н·с;  $I$  – коэффициент недозаряжения,  $I = 0,8$ ;

Из выражения (16) следует, что полный импульс зависит, в том числе, от массы и длины заряда. Если разделить сплошной заряд на две равные части с промежутком, т.е.  $M_{1,2} = 1/2 \cdot M$  и  $L_{z1,2} = 1/2 \cdot L_z$ , то, при прочих равных условия взрывания имеем:

$$J_{\text{п1,2}} = I \cdot 2 \cdot M/2 \cdot D \cdot L_z/[2 \cdot d_z \cdot 0,612 \cdot (1 + k)] = J_{\text{п}}/(2 \cdot 2) = J_{\text{п}}/4, \text{ Н} \cdot \text{с};$$

Откуда сумма импульсов двух одинаковых частей разделенного заряда с промежутком при последовательном взрывании составит:

$$J_{п1} + J_{п2} = J_{п}/4 + J_{п}/4 = 1/2 \cdot J_{п}, \text{ Н} \cdot \text{с};$$

Вместе с тем, согласно закону сохранения энергии, при одинаковой массе взрывае-мого ВВ при сплошном или рассредоточенном заряде можно написать:

$$J = P \cdot t = \text{const}, \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (17)$$

Согласно данным профессора А.Ф. Беляева [4], при столкновении двух ударных волн наблюдается прирост давления  $\Delta P$ , т.е. при последовательном взрыве двух частей распределённого заряда будет происходить прирост импульса (за счет стабилизации давления в зарядной камере), который можно определить по формуле:

$$\Delta J = J_{п} - (J_{п1} + J_{п2}), \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (18)$$

В данном случае, когда  $M_{1,2} = 1/2 \cdot M$ ,  $L_{z1,2} = 1/2 \cdot L_z$ ,

$$\Delta J = J_{п} - 1/2 \cdot J_{п} = 1/2 \cdot J_{п}, \text{ Н} \cdot \text{с};$$

Известно, что забойка до момента вылета из скважины способствует увеличению времени стабилизации давления в зарядной камере. После вылета забойки объем скважины увеличится  $i$  раз:

$$i = (V_{скв.}^* + V_{заб.})/V_{скв.}^* = (L_{скв.}^* \cdot S_z + L_{заб.} \cdot S_z)/(L_{скв.}^* \cdot S_z) = (L_{скв.}^* + L_{заб.})/L_{скв.}^*, \quad (19)$$

где  $L_{скв.}^*$  — длина скважины без учета длины забойки, м;  $L_{заб.}$  — длина забойки, м;

После вылета забойки давление в скважине, согласно уравнению Пуассона, понизится в  $i^\gamma$  раз и станет равным,  $\text{Н}/\text{м}^2$ :

$$P_{п} = P_c/i^\gamma = \rho_{вв} \cdot D^2/[2 \cdot (1 + k) \cdot i^\gamma]; \quad (20)$$

где  $\gamma$  — показатель адиабаты.

Вместе с тем при вылете забойки из скважины за счет переходных процессов газораспределения давление в скважине еще понизится. По скважине пройдет волна разрежения в заполняющих ее газах со скоростью  $v_p$  в течении времени  $\Delta t_{заб.}$ , с:

$$\Delta t_{заб.} = \begin{cases} 0, \text{ если } L_{заб.} = 0; \\ L_{скв.}/v_p = (L_{скв.}^* + L_{заб.})/(0,612 \cdot D), \text{ если } L_{заб.} \geq 1,0 \text{ м}, \end{cases} \quad (21)$$

где  $L_{скв.}$  — длина скважины с учетом длины забойки, м;

Истекающие газы создадут дополнительный импульс, равный:

$$J_{заб.} = P_{п} \cdot \Delta t_{заб.} = \rho_{вв} \cdot D^2/[2 \cdot (1 + k) \cdot i^\gamma] \cdot [(L_{скв.}^* + L_{заб.})/(0,612 \cdot D)], \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (22)$$

После преобразования получим:

$$J_{заб.} = \rho_{вв} \cdot D \cdot (L_{скв.}^* + L_{заб.})/[1,224 \cdot (1 + k) \cdot i^\gamma], \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (23)$$

Таким образом, окончательный импульс заряда с воздушным промежутком, учитывающий влияние забойки, составит:

$$J_{п.заб.} = J_{п} + J_{заб.}, \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (24)$$

В таблице представлены расчётные параметры полного импульса  $J_{\text{п}}$  и дополнительного импульса от забойки  $J_{\text{заб.}}$  для скважины стандартного диаметра  $d_{\text{скв.}} = d_z = 0,126$  м.

Таблица

$L_{\text{скв.}}^*$ м	$L_{\text{заб.}}$ м	$\rho_{\text{вв.}}$ кг/м <sup>3</sup>	$D$ , м/с	$P_c$ , Н/м <sup>2</sup>	$i$	$v_p$ , м/с	$P_{\text{п}}$ , Н/м <sup>2</sup>	$J_{\text{п}}$ , Н·с	$J_{\text{заб.}}$ , Н·с	$J_{\text{заб.}}$ / $J_{\text{п}}$
6,0	1,0	1100	4000	$2,2 \cdot 10^9$	1,17	2448	$1,38 \cdot 10^9$	$10,24 \cdot 10^6$	$3,96 \cdot 10^6$	0,39

**Выводы:**

1) при разделении сплошного скважинного заряда на  $n$  равных по длине (и, следовательно, массе) частей полный импульс каждой отдельной части равен  $J_n = J_{\text{п}}/n^2$ ; если заряд разделен на неравные части, то полный импульс каждой такой части находится по формуле (16);

2) при использовании рассредоточенного скважинного заряда с воздушным промежутком общий суммарный импульс при последовательном взрывании частей заряда после стабилизации давления в зарядной камере равен импульсу взрыва сплошного заряда, имеющего массу, равную сумме масс частей рассредоточенного заряда:  $\sum_{i=1}^n J_i = J_{\text{п}}$ ;

3) расчеты показывают (табл.), что в условиях, рассмотренных в статье, при использовании забойки добавка к полному импульсу взрыва скважинного заряда  $J_{\text{п}}$ , рассчитанного по выражению (16), может составить до 39% от этого полного импульса, поэтому применение забойки оправдано.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках государственного задания (рег. номер НИОКТР: 124020500031-4).*

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Ч. 1. Разрушение горных пород взрывом: учебник для вузов. – М.: Горн. книга, 2007. – 471 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения»: утв. 3.12.2020, № 494, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 352 с. – Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в области взрывных работ и изготовления взрывчатых материалов: сер. 13, вып. 15).
3. Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 53-102.
4. Беляев А.Ф. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. – М.: Наука, 1968. – 255 с.: ил.