

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИЗМЕНЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОЛОСТЯХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСТЕЧЕНИЯ
ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗРЫВЕ УДЛИНЕННЫХ ЗАРЯДОВ ВВ
В ШПУРАХ И СКВАЖИНАХ.**

Мислибаев И.Т.,

доктор тех наук, профессор кафедры «Горное дело» НГГИ.,

Назаров З.С.,

к.т.н. доцент кафедры «Горное дело» НГГИ.,

Гиязов О.М.

Ст. преподаватель кафедры «Горное дело» НГГИ.,

Ермекбаев У.Б.

Ст. преподаватель кафедры «Горное дело» НГГИ.,

Шаропов Э.Н.,

магистрант НГГИ.

Аннотация: В статье предложена численная методика при решения задачи теории сильного точечного взрыва и для расчета избыточного давления, возникающего в цилиндрической полости, при взрыве. При этом предложенная последовательность численного моделирования обеспечивает величину относительной погрешности не более 15% по сравнению с аналитическими и экспериментальными данными и позволит применить эту модель для исследования истечения ПД при взрыве удлиненного заряда ВВ.

Ключевые слова: забойка, детонация, шпур, скважина, инициирование, динамика, волна разрежения, ударная волна, камуфлет, порода, удлиненный заряд.

**A METHOD FOR CALCULATING THE PRESSURE CHANGE IN
CYLINDRICAL CAVITIES FOR STUDYING THE OUTFLOW OF
DETONATION PRODUCTS DURING THE EXPLOSION OF ELONGATED
EXPLOSIVE CHARGES IN BOREHOLES AND BOREHOLES.**

Mislibaev I.T

Nazarov Z.S

Giyazov O.M
Ermekbaev U.B
Sharopov E.N

Abstract: The paper proposes a numerical method for solving the problem of the theory of a strong point explosion and for calculating the excess pressure that occurs in a cylindrical cavity during an explosion. At the same time, the proposed sequence of numerical simulations provides a relative error of no more than 15% compared to the analytical and experimental data and will allow us to apply this model to study the PD expiration during the explosion of an elongated explosive charge.

Keywords: downhole, detonation, borehole, initiation, dynamics, rarefaction wave, shock wave, camouflage, rock, elongated charge.

Повышение эффективности проходки подземных горных выработок буровзрывным способом является одним из приоритетных направлений развития горного производства.

При использовании забойки в буровзрывных работах (БВР) наиболее важным является обеспечение достаточно длительную задержку снижения давления продуктов детонации (ПД) в шпурах (скважинах), при которой происходило бы надежно формирование квазистатических полей напряжений и соответствующее разрушения горных пород.

Несмотря на имеющиеся теоретические и эмпирические соотношения для определения рациональных видов забойки не всегда учитывается ряд факторов:

- свойства материала забойки, ее распор, влияние направления инициирования на движение забойки, изменение давления в шпуре по мере истечения ПД и т.п.

В то же время, обобщённые соотношения на основе многофакторных экспериментов громоздки и неудобны для практических расчетов, причем влияние отдельных факторов неоправданно занижено или не учитывается совсем. Кроме того, до настоящего времени не существует обобщённой теории влияния типов забойки, ее движения и истечения ПД на эффективность взрыва

удлиненного заряда в шпурах (скважинах). Теоретические оценки влияния забойки на эффективность разрушения породы взрывом никак не связаны с формированием полей напряжений и процессам разрушения пород взрывами зарядов ВВ. Нет четкого представления о методах определения параметров истечения ПД, кинематики движения забойки и их взаимосвязи с формированием полей квазистатических напряжений в породе, разрушаемой взрывом.

Для определения параметров истечения ПД необходимо проинтегрировать систему одномерных нестационарных уравнений газовой динамики с учетом граничных условий. Соответствующие уравнения газовой динамики в Лагранжевой системе координат при наличии потерь кинетической и потенциальной энергии принимают вид:

- сохранение момента количества движения

$$\frac{du}{dt} = -\frac{d(p+q)}{dh} - \frac{du |u|}{2d}; \quad (1)$$

Сохранение массы

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{dr}{dh} \quad (2)$$

Сохранение энергии

$$\frac{de}{dt} = -(p + q) \frac{du}{dh} - \frac{du |u|}{2d} - \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{T} \frac{T-T_0}{P_T} \quad (3)$$

где:

$$e = C_v T; \quad \frac{dr}{dt} = u;$$

e -внутренняя энергия, Дж/моль;

C_v –удельная теплоёмкость при постоянном объёме, Дж/(К*моль)

r - эйлеровский радиус, м;

t - время, с;

p, u, v, T - давления , скорость, удельный объём и температура ПД, Па, м/с, м³/кг, К;

q -искусственная вязкость, Па;

γ -отношение удельных теплоёмкостей, в общем случае зависящее от текущего значения плотности газовой смеси;

h - лагранжевая координата;

λ -коэффициент трения о внутреннюю поверхность шпура;

d -диаметр шпура, м.

Левое граничное условие соответствует случаю газонепроницаемой стенки, т.е. величина массовой скорости и на левой границе всегда с течением времени принимает значение, равное 0. Граничное условие на срезе шпура записывается в виде дополнительного слагаемого в уравнении (1), характеризующего сопротивление ПД на срезе при их сверх звуковом истечении:

$$\frac{du}{dt} = k_0(p - p_0) \quad (4)$$

где: k_0 -коэффициент пропорциональности, определяемый количеством газа, вовлекаемого в движение внутрь шпура волной разрежения (величина k_0 предполагается неизменной);

p_0 -атмосферное давление, Па.

Для аппроксимации уравнений газовой динамики использовалась конечно-разностная, условно-устойчивая схема типа "крест" с искусственной вязкостью.

Предложенная численная методика предлагается при решении задачи теории сильного точечного взрыва и для расчета избыточного давления, возникающего в цилиндрической полости, при взрыве газовых смесей. При этом предложенная последовательность численного моделирования обеспечивает величину относительной погрешности не более 15% по сравнению с аналитическими и экспериментальными данными (табл.1), что и позволит применить эту модель для исследования истечения ПД при взрыве удлиненного заряда ВВ.

Таблица 1

Распределение скорости и плотности за фронтом ударной волны при сильном точечном взрыве в воздухе при $E_{\text{взр}}=5 \cdot 10^3$ Дж

$r/r_{\text{ув}}$		0,9	0,8	0,5	0,3
$\frac{v}{v_{\text{ув}}}$	т.р	0,86	0,63	0,42	0,24
	ч.р.	0,95	0,55	0,48	0,27
	$d, \%$	+10,5	-12,7	+14,3	+12,5

$\frac{p}{\rho_{ув}}$	т.р	0,52	0,18	0,06	0,015
	ч.р.	0,55	0,2	0,07	0,013
	d,%	+5,8	+11,1	+16,6	-13,3

Однако на процесс разрушения порода взрывом оказывают существенное влияние физико-технические параметры забойки (длина, плотность, материал, коэффициент трения и т.д.) и теоретическая оценка этих факторов требует значительных трудовых и материальных затрат.

Теоретически возможно установить, что время τ_1 , в течение которого происходит вывод забойки из неподвижного состояния, определяется тем, что начало перемещения различных частей забойки происходит постепенно по мере вовлечения их в движение и, следовательно, перемещение забойки как целого начнется только после того, как продольная волна сжатия пробежит по ее длине по крайней мере 3-4 раза.

В качестве базисных параметров для рассматриваемого процесса приняты 1 , ρ_3 , C_p так, что следуя теореме теории подобия и размерности, время τ_1 может быть представлено в виде некоторой зависимости:

$$\tau_1 = \frac{1}{C_p} F \left(1, 1, 1, \frac{P}{\rho_3 C_p^2}, \frac{\rho}{\rho_3}, \frac{d}{1}, \frac{C}{\rho_3 C_p^2}, \frac{h}{1} \right), \text{ с.} \quad (5)$$

где, учитывая характер данного процесса, была введена величина h - толщина пограничного слоя. Максимальное значение h не превышает $5d_{ч}$, которое и было принято за основу. При сделанных допущениях и физической сущности рассматриваемого явления отношения $d/1$ и $h/1$ постоянны в течение всего времени τ_1 и поэтому зависимость (5) от них дальше не определялась. После математической обработки экспериментальных данных зависимость (5) выглядит следующим образом:

$$\tau_1 = 3,76 \frac{1\rho_3 C_p}{P} \left(1 + 9,48 \frac{\rho}{\rho_3} \right) \left(1 + 8,44 * 10^{-5} \frac{\rho_3 C_p^2}{C} \right) \quad (6)$$

Процесс движения забойки по шпuru определяется законами сохранения энергии и импульса с учетом потерь на трение:

для сплошной забойки

$$m_3 \frac{dx^2}{dt^2} = SP(1 - \delta), \quad (7)$$

где S- площадь поперечного сечения шпура, м²;

P- давление в ПД;

δ - коэффициент трения скольжения (для дерева и свинца δ равен •0,45 и 0,1 соответственно).

для сыпучей забойки –

$$\frac{dx^2}{dt^2} = \frac{[1-k*(1-x)]P}{\theta l}, \quad (8)$$

где k^* - удельная величина коэффициента трения (для песка-0,86 м⁻¹);

l - длина забойки,м;

θ -удельный вес материала забойки (для песка $\theta=1600$ кг/м³).

Решением дифференциального уравнения (8) является интегральная кривая, уравнение которой с начальными условиями $x(0)=0$ выглядит следующим образом:

$$x = \frac{S(1-\theta)P\tau^2}{m_3}, \text{ м}, \quad (9)$$

а решением уравнения (9), удовлетворяющему тем же начальным условия является зависимость $t(x)$:

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{\theta_1}{k^*}} \ln |\varphi(x) + \sqrt{\varphi^2(x) + \varphi(x) + 1}|, \text{ с}, \quad (10)$$

$$\varphi(x) = \frac{k^*x}{1-k^*l}; 0 \leq x \leq 1.$$

При этом изменение давления P в шпуре, обусловленное расширением ПД, рассчитывается по следующей формуле:

$$P = P_1 \left\{ \frac{L-1}{L-1+x} \right\}^\gamma \quad (11)$$

Где: P_1 - давление, установившееся после начала движения забойки;

γ - показатель изоантропы ПД.

Для установления обобщающих закономерностей истечения ПД рассматривался безразмерный критерий подобия χ в области сверхзвукового

течения газа в соответствии с законом сохранения количества движения с привлечением результатов численного расчета свободного истечения:

$$\chi = \frac{\Delta P \Delta t}{\rho_1(r_1 + \Delta r_1) |\Delta U|}, \quad (12)$$

где:

$$\Delta U = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n \rho_1 (U_1 - U_{l-1}) \Delta r_1; \quad M = \sum_{j=1}^n \rho_1 \Delta r_1;$$

r_1 - текущее значение Эйлеровой координаты, соответствующее J -му слоев времени, м;

Δr_1 - приращение координаты за промежуток $\Delta t = t^j - t^{j-1}$, м;

ρ_1 - усреднённое значение плотности газовой смеси, заключённой между дном шпура и сечением с координатой r_1 , кг/м³;

В результате анализа (12) определена общая зависимость времени истечения ПД в произвольном сечении шпура при взрыве в нем удлиненного заряда ВВ от безразмерных параметров α , n и времени детонации t , которая принимает следующий вид: α

$$\tau_3 = t_0 \left\{ 1.179 \left[1 + \frac{0.2}{\alpha - 1} \right] + 33.36\alpha^2 - 60.08\alpha + 26.72 \right\} + \frac{L - \check{x}}{c}, \quad (13)$$

где \check{x} - расстояние от устья шпура до исследуемого сечения, м;

N - число репарных точек;

L - длина шпура, м;

c - скорость звука в ПД, м/с;

$n = 1 + N$; $n = n/N$; $1 < \alpha \leq 2$.

$$P = \frac{P}{\alpha^n}, \text{ Па.}$$

Полученные зависимости (6)+(14) с достаточной для практики точностью в пределах 15% величины относительной погрешности позволяют определить динамику движения забойки и истечения ПД из шпуров.

При рациональном материале забойки, способная обеспечить задержку истечения ПД из шпура по крайней мере в области, прилегающей к его устью, на

величину τ_1 (время квазистатического нагружения ГП взрывом), в результате чего будет практически полностью реализована потенциальная возможность взрыва удлиненного заряда на максимальное обеспечение формирования зоны мелкодисперсного дробления до величины, позволяющая сформировать около заряда квазистатическое поле напряжений. Величина τ_1 : определяется по процессу деформирования ГП в ближней к шпуре зоне при камуфлетном взрыве заряда удлиненного ВВ, согласно теории проф. В.Н. Родионова (рис.1).

Рассмотренная численная методика расчета изменения давления в цилиндрических полостях конечной длины за счет истечения ПД из полости обеспечивает величину относительной погрешности не более 15%, что позволяет применить эту модель для исследования истечения ПД при взрыве удлиненных зарядов ВВ в шпурах и скважинах.

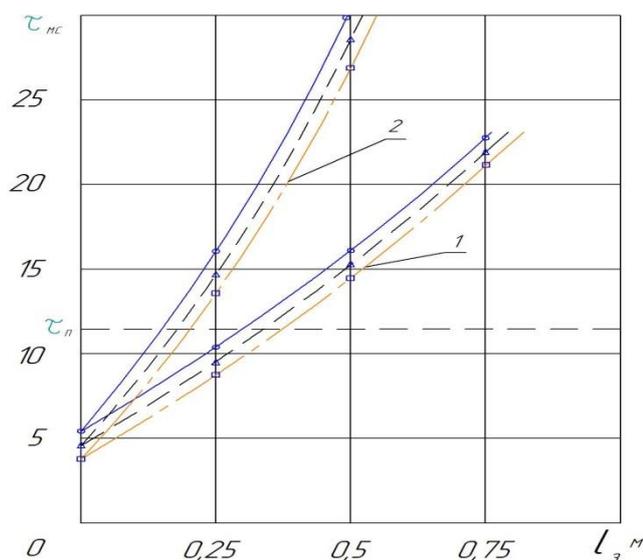


Рис.1. Зависимость времени спада давления в различных сечениях шпура от материала забойки при взрыве АМ №6 ЖВ в песчанике.

1- забойка из песка; 2 - взрывная запрессовка устья шпура.

На основании выше приведенного можно сделать вывод что с применением забойки процесс истечения ПД из модели происходит в три этапа:

- на первом этапе длительностью τ_1 происходит вывод забойки из неподвижного состояния под действие упругих волн, генерируемых в ней ПД;
- на втором этапе длительностью τ_2 имеет место движения забойки из шпура;

-на третьем этапе происходит квазистационарное истечение ПД длительностью τ_3 , который, в свою очередь, подразделяется на два этапа:

Во время первого этапа длительностью τ_1 . наблюдается распространение особой волны разрешения по ПД от устья шпура с резким скачкообразным уменьшением давления, во время второго этапа длительностью τ_2 наблюдается квазистационарное истечение ПД из шпура с постепенным уменьшением в нем давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.Н. Родионов. К вопросу о повышении эффективности взрыва в твердой среде. ИГД им. А.А. Скочинского.

2. Баранов И.М. Оценка параметров взрыва удлиненного заряда ВВ в модели шпура без забойки. В сб. :Физические процессы горного производства. М.:МГИ, 1991: с.7-9.

3. Крюков Г.М. Оценка параметров истечения продуктов взрыва удлиненного заряда ВВ из шпура. -Изв. вузов Горный журнал,1993: 4 с.74-77.

4.Мислибаев И.Т. Экспериментальные исследования действия многоциклических пульсирующих нагрузок на процесс ослабления прочности горных пород. Взрывное дело. – Москва, 2015. – №114/71. – С. 29-44.

5.Мислибаев И.Т., Тухташев А.Б., Гиязов О.М., Солиев Б.З. Изменение прочности массива горных пород в зависимости от конструкции забоек скважинных зарядов взрывчатых веществ. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. –Екатеринбург, 2017. –.№3. – С. 45-50.