

УДК 622.268.4:622.235

*С.А. Гончаров, А.В. Дугарцыренов, Г.Г. Каркашадзе,
В.В. Семенов*

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ
КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАБОЙКИ
НА ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЕ ПРИ ВЗРЫВЕ
СКВАЖИННЫХ ЗАРЯДОВ**

Массовые взрывы на открытых горных работах являются основным источником загрязнения окружающей среды мелкодисперсной пылью - пылевым аэрозолем (размеры частиц менее 20 мкм) и токсичными газообразными продуктами взрыва типа CO, NO, NO₂ и др. Установлено, что на 1 м³ добываемой горной массы приходится 30-160 г пылевого аэрозоля, образуемого при ведении взрывных работ. Суммарная величина выделяемой пыли от производства открытых горных работ на территории Российской Федерации составляет 0,46 млн т в год. В частности, количество пылевого аэрозоля, образуемого в течение года на карьерах Лебединского, Михайловского и Стойленского ГОКов КМА составляет соответственно до 7,4; 6,7 и 2,7 тыс. т.

Основными факторами образования пылегазового облака (ПГО) являются: разрушение и переизмельчение горной массы до размеров пылевого аэрозоля в ближней зоне взрыва под воздействием высоких температур (до 4000 °С) и давлений (до 10¹⁰ Па = 10⁵ атм) продуктов детонации ВВ, разгон и вынос пылевого аэрозоля в атмосферу через устье скважины сверхзвуковой струей газообразных продуктов взрыва, подъем пылевых частиц за счет приобретенной в газовом потоке начальной скорости и движения в восходящем потоке высокотемпературных продуктов

взрыва. Разрушение и разлет кусков взорванной горной массы способствуют переносу пыли в ПГО в спутном потоке, в теневой области кусков, а также взметыванию пыли, осевшей на поверхности блока и переносу ее за счет эжекции в восходящий поток высокотемпературных газов.

Критический перепад давлений в скважине и атмосфере обуславливает звуковую скорость потока продуктов взрыва в верхней цилиндрической части (устье) скважины и сверхзвуковую – в атмосфере вблизи ее устья. Установлено, что по мере истечения газов их давление в скважине снижается по экспоненциальному закону, тем не менее, критический режим течения сохраняется вплоть до уменьшения давления до атмосферного. Образование и формирование ПГО предшествует разрушению блока взрываемых горных пород, т.е. происходит до появления и развития магистральных трещин в массиве. Образование ПГО обусловлено в первую очередь наличием единственного канала – устья скважины, через который со значительной скоростью (до 1200 м/с) пылегазовая мелкодисперсная смесь истекает в атмосферу на большую высоту. По мере появления и развития сети магистральных трещин в массиве в процессе его разрушения начинается резкое снижение объема пылегазовой смеси, истекающей в атмосферу через

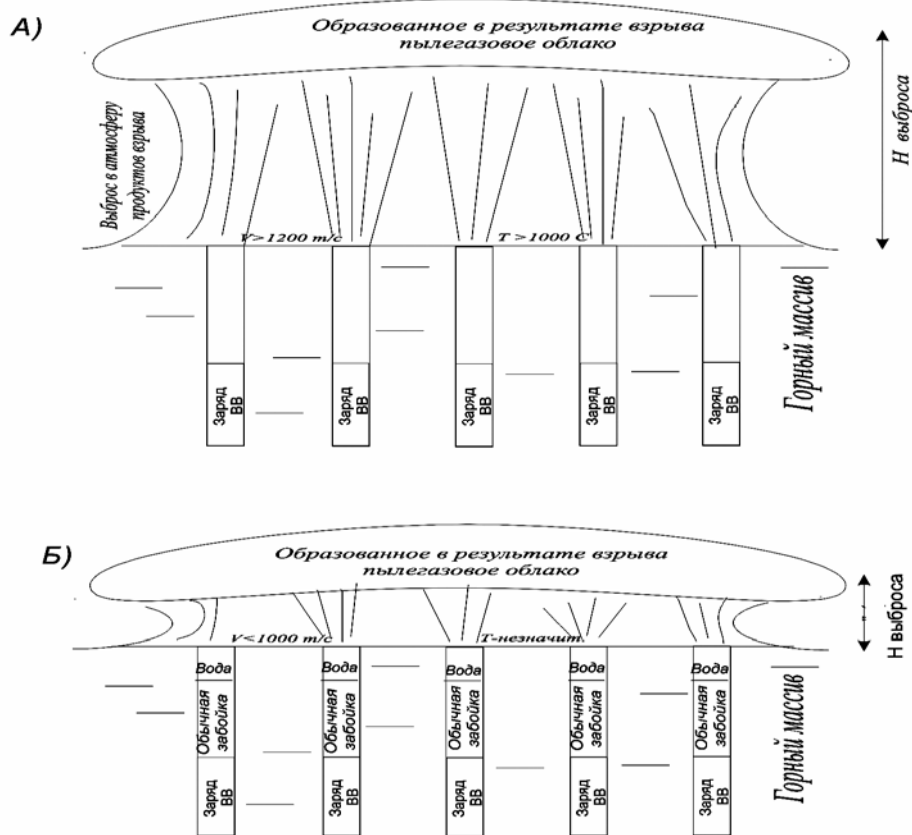


Рис. 1. Результаты проведения массовых взрывов: а) – без применения забойки; б) – с применением забойки

устье скважины. В этом случае основная масса пылегазовой смеси истекает в образовавшиеся и вновь образуемые трещины. При этом в силу значительной площади суммарного сечения этих трещин поток пылегазовой смеси в массив имеет сравнительно малую скорость и сосредоточен внутри развала горной массы.

Для устранения причин образования ПГО требуется исключить истечение пылегазовой смеси через устье скважины в атмосферу на время до момента появления и развития магистральных трещин и соответственно разрушения массива, т.е. «запереть» скважину на заданное время. Помимо этого, необходимо также снизить температуру продуктов детонации ВВ. Этих результатов можно добиться с помощью использования комбинированной

забойки, нижняя часть которой состоит из твердых материалов, а верхняя – представляет собой герметичную оболочку, заполненную водой. Нижняя часть, в отличие от верхней, испытывает трение со стенками скважины; вода же играет роль инертной массы, оказывая давление на нижнюю часть при ускоренном движении забойки. Помимо этого, за счет высокой скорости вылета забойки вода расплывается и способствует снижению температуры продуктов взрыва и подавлению пыли, образующейся в результате взрыва.

На рис. 1, а рассмотрен вариант массового взрыва без применения забойки. В результате происходит выброс в атмосферу всех продуктов взрыва, а также пыли, поднятой с поверхности в результате эжекции. На рис. 1, б рассмотрена картина

взрыва с применением комбинированной забойки. В таком случае большая часть энергии взрыва используется на образование сети магистральных трещин, а вырвавшийся на поверхность поток высокотемпературных продуктов взрыва нейтрализуется распыленной до мелкодисперсного состояния (размер капель 15-20 мкм) водой. С применением забойки такого рода выброс в атмосферу пылегазового облака уменьшается в несколько раз.

Длительность «запирания» скважины определяется в основном параметрами твердой нижней части комбинированной забойки. Верхняя водяная составляющая забойки при вылете из скважины распыляется за счет высокой скорости движения (200-1000 м/с) и снижает температуру продуктов детонации.

На движение забойки в общем случае оказывают влияние следующие факторы и явления:

1) давление продуктов детонации ВВ, которое изменяется при их расширении в процессе вылета забойки;

2) боковой распор забойки в условиях ее сжатия под действием сил инерции;

3) сила трения между забойкой и стенками скважины, определяемая величиной бокового распора.

Будем рассматривать комбинированную забойку, нижняя часть которой длиной l_3 состоит из сыпучего твердого материала, а верхняя длиной $l_в$ – из воды, заключенной в герметичной оболочке.

Проведем ось $l(\tau)$ вдоль скважины и с ее дном совместим начало координат (рис. 2). В процессе вылета положение забойки в любой момент времени определяется координатой $l(\tau)$. Величина $l(\tau)$ изменяется в пределах от $l_{вв}$ до l_c , где

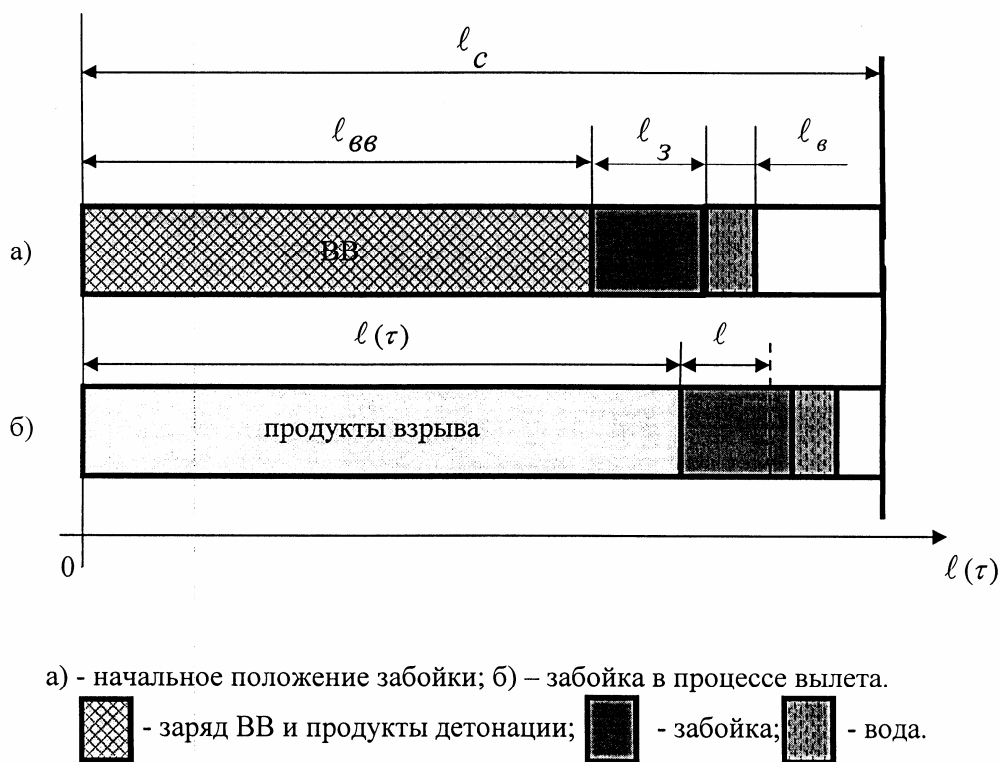


Рис. 2

l_c - глубина скважины, а $l_{\text{вв}}$ - длина ее зарядной части. Введем безразмерную координату $L_\tau = \frac{l(\tau)}{l_{\text{вв}}}$, определяющую относительное положение забойки. Сила трения зависит, как от площади бокового контакта нижней части забойки со стенками скважины, так и от распределения напряжений сжатия по ее длине.

По мере движения забойки в скважине происходит расширение газообразных продуктов детонации. Для быстропротекающих процессов передачей тепла можно пренебречь, поэтому принимаем адиабатическое приближение. Согласно уравнения адиабаты

Пуассона имеем

$$P(\tau) = P \left(\frac{l_{\text{вв}}}{l(\tau)} \right)^\gamma = P \frac{1}{L_\tau^\gamma}, \quad (1)$$

где P - максимальное давление продуктов взрыва, установившееся в момент завершения процесса детонации ВВ; γ - показатель изоэнтропы продуктов детонации.

Движение забойки под действием переменной силы $P(\tau)$ S_c , где S_c - площадь поперечного сечения скважины, определяется дифференциальным уравнением 2-го порядка

$$P(\tau) = (\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6) \cdot l''(\tau) \Leftrightarrow l''(\tau) = \frac{P}{\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6} \cdot \frac{1}{L_\tau^\gamma} \quad (2)$$

где ρ_3 и ρ_6 - соответственно плотности нижней и верхней частей забойки. Так как $l''(\tau) = (l_{\text{вв}} \cdot L_\tau)'' = l_{\text{вв}} \cdot L_\tau''$, то уравнение (2) приводится к виду

$$L_\tau'' = \frac{P}{(\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6) l_{\text{вв}}} \cdot \frac{1}{L_\tau^\gamma} = k \cdot \frac{1}{L_\tau^\gamma} \quad (3)$$

$$\text{где } k = \frac{P}{(\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6) l_{\text{вв}}}.$$

Решение уравнения (3) имеет вид

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{k}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma-1}{2}} \times \left[(L_\tau)_2 F_1 \left(\frac{1}{1-\gamma}; 0,5; 1 + \frac{1}{1-\gamma}; L_\tau^{1-\gamma} \right) - {}_2 F_1 \left(\frac{1}{1-\gamma}; 0,5; 1 + \frac{1}{1-\gamma}; 1 \right) \right] = \left[\frac{(\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6) l_{\text{вв}}}{P} \right]^{0,5} f(L_\tau, \gamma), \quad (4)$$

где

$$f(L_\tau, \gamma) = \sqrt{\frac{\gamma-1}{2}} \times \left[(L_\tau)_2 F_1 \left(\frac{1}{1-\gamma}; 0,5; 1 + \frac{1}{1-\gamma}; L_\tau^{1-\gamma} \right) - {}_2 F_1 \left(\frac{1}{1-\gamma}; 0,5; 1 + \frac{1}{1-\gamma}; 1 \right) \right] - {}_2 F_1 \left(\frac{1}{1-\gamma}; 0,5; 1 + \frac{1}{1-\gamma}; L_\tau^{1-\gamma} \right) - \text{гипергеометрическая функция Гаусса.}$$

Введем безразмерное время вылета забойки:

$$\bar{\tau} = \sqrt{k} \cdot \tau. \quad (5)$$

Тогда уравнение (8) перепишется в виде

$$\bar{\tau} = \sqrt{\frac{\gamma-1}{2}} \times \left((L_{\tau})_2 F_1 \left(\frac{1}{1-\gamma}; 0,5; 1+\frac{1}{1-\gamma}; L_{\tau}^{1-\gamma} \right) - {}_2F_1 \left(\frac{1}{1-\gamma}; 0,5; 1+\frac{1}{1-\gamma}; 1 \right) \right) \quad (6)$$

Проведенное исследование процесса вылета забойки не учитывает влияния сил трения на движение забойки в скважине. Силы трения, возникающие между забойкой и стенками скважины, пропорциональны боковому распору забойки, обусловленному ее сжатием под действием сил инерции при ее ускоренном движении. Испытания на прямой сдвиг (на срез) сыпучих минеральных материалов показывают, что коэффициент внутреннего трения $k_{тр}$ для этих материалов имеет достаточно большие значения [1]. В частности, для крупнозернистого песка и гравия величина $k_{тр}$ находится в пределах 0,625 – 0,726. Произведем оценку времени вылета забойки с учетом сил трения

При ускоренном движении забойки происходит ее сжатие за счет сил инерции. Предварительно расчеты проведем при условии, что напряжения равномерно распределены в любом сечении забойки по ее длине. Тогда напряжение сжатия $\sigma_{сж}$ в сечении забойки, находящемся на расстоянии l от ее нижнего торца, определяется соотношением

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{ин}}{S_c}, \quad (7)$$

где $F_{ин} = m_{з1} (a+g)$ – сила инерции забойки; g – ускорение силы тяжести; $m_{з1} = [\rho_3(l_3 - 1) + \rho_6 l_6] \cdot S_c$ – масса части комбинированной забойки, находящейся выше уровня l ; S_c – сечение скважины.

Элементарная сила бокового распора забойки dF_{δ} для кольцевого бесконечно малого элемента площади контакта высотой dl от уровня l составляет

$$dF_{\delta} = K_o \sigma_{сж} dS_{\delta} = K_o [\rho_3(l_3 - 1) + \rho_6 l_6] dS_{\delta}, \quad (8)$$

где K_o – коэффициент компрессионного распора; $dS_{\delta} = \pi d_c dl$ – площадь боковой поверхности элемента dl забойки.

Тогда элементарная сила трения равна $dF_{мп} = \pi k_{мп} K_o \rho_3 (a+g) \times d_c [\rho_3(l_3 - 1) + \rho_6 l_6] dl$.

Интегрируя в пределах длины забойки, находим

$$F_{мп} = \pi k_{мп} K_o (a+g) d_c \int_0^{l_3} [\rho_3(l_3 - 1) + \rho_6 l_6] dl = A \cdot a (m_z + 2m_6), \quad (9)$$

где $A = 2k_{мп} K_o \frac{1}{d_c}$; m_z и m_6 – соответственно массы нижней и верхней частей забойки.

Поскольку $a \gg g$, то пренебрегаем величиной g . Уравнение движения забойки с учетом (9) имеет вид

$$P(\tau) S_c - F_{тр} = m_z a$$

или

$$P(\tau) = [(\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6) (1+A) + A \rho_6 l_6] \frac{1}{l_{66}} L_{\tau}'' \quad (10)$$

Принимая во внимание, что

$$L_{\tau} = \frac{1(\tau)}{l_{66}} \quad \text{и учитывая (1), из выражения}$$

(10) получим

$$L_{\tau}'' = k_1 \cdot \frac{1}{L_{\tau} \gamma}, \quad (11)$$

где

$$k_1 = \frac{P}{[(\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6) (1+A) + A \rho_6 l_6] \frac{1}{l_{66}}}$$

Коэффициенты k_1 и k связаны соотношением

$$k_1 = \frac{k}{1+A \left(1 + \frac{k}{k_2} \right)}, \quad (12)$$

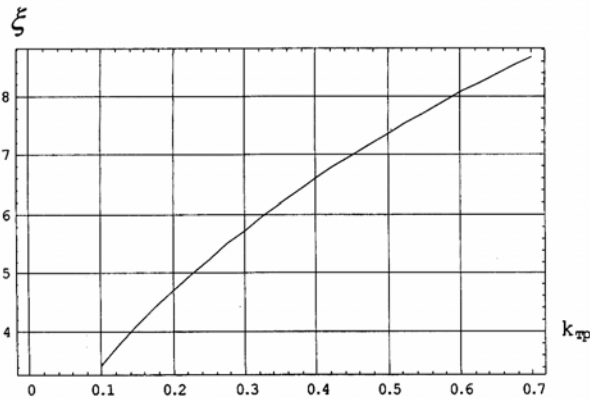


Рис. 3

где $k_2 = \frac{P}{\rho_s l_s l_{\text{св}}}$.

Непосредственно видно, что

$$\frac{k}{k_2} = \frac{m_s}{m_s + m_s} \quad (13)$$

При $m_s = 0$ (отсутствие водяной компоненты забойки) имеем

$$k_1 = \frac{k}{1+A} \quad (14)$$

Очевидно уравнение (11) отличается от уравнения (3) только постоянным множителем k_1 , отличным от k . Поэтому, используя решение дифференциального уравнения (3) в виде (4), получим

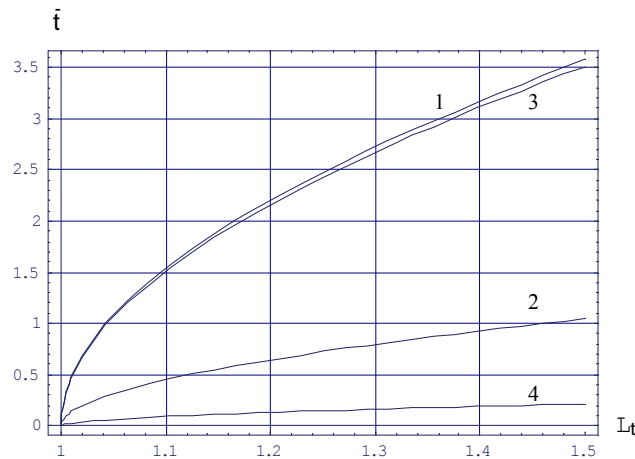


Рис. 4

$$\tau = \sqrt{\frac{[(\rho_s l_s + \rho_s l_s)(1+A) + A \rho_s l_s] l_{\text{св}}}{P}} \times \sqrt{\frac{\gamma-1}{2}} \cdot f(L_t, \gamma) \quad (15)$$

или, в безразмерных переменных

$$\bar{\tau} = \sqrt{1+A \left(1 + \frac{k}{k_2}\right)} \cdot f(L_t, \gamma)$$

Таким образом, при движении комбинированной забойки в длинном канале с учетом сил трения ее сыпучей части, а также инерционного влияния верхней водяной части, время вылета уве-

личивается в $\xi = \sqrt{1+A \left(1 + \frac{k}{k_2}\right)}$ раз.

Естественно, рассмотренный случай реализуется при малой длине забойки, когда она занимает небольшую часть скважины.

Коэффициент компрессионного расхода K_o при первичной компрессии грунтов мало зависит от их структуры и обычно равен $0,75 \pm 0,05$ [1].

Расчетная зависимость величины ξ от коэффициента трения k_{mp} , полученная на ЭВМ при $l_c = 17$ м; $l_s = 17/10$ м;

$$l_{\text{св}} = \frac{2}{3} \cdot 17 \text{ м}; \quad l_s = 0,2 \text{ м};$$

$\gamma = 1,25$ и $d_c = 0,25$ м и приведенная на рис. 3, показывает существенный рост ξ с увеличением k_{mp} . Так, при возрастании k_{mp} от 0,1 до 0,7 параметр ξ увеличивается от 3,4 до 8,6.

Зависимости безразмерного времени вылета забойки от величины L_t , полученные расчетным путем при $k_{mp} = 0,1$ и вышеприведенных значениях остальных параметров, пред-

ставлены на рис. 4 (кривая 1 – с учетом трения при наличии воды, 2 – без его учета, 3 – при отсутствии воды с учетом трения). Далее расчеты проведены при указанных числовых значениях величин. Расхождение расчетных значений величины времени вылета забойки при адиабатическом приближении с учетом и без учета сил трения составляет $\xi = 3,410$ раза даже при малом $k_{тр} = 0,1$.

Отметим, что при наличии и отсутствии воды при учете трения (кривые 1 и 3) расхождение результатов незначительно и составляет 1,019 раза. Это связано с тем, что масса водяной компоненты комбинированной забойки в расчетном варианте составляет 0,0437 часть от массы нижней твердой компоненты. Проведен также расчет движения забойки при наличии только ее водяной части (рис. 4, кривая 4). Продолжительность вылета водяной забойки с длиной 0,2 м сравнительно мала.

Рассмотрим влияние длины водяной части $l_в$ комбинированной забойки на время ее вылета при постоянных параметрах ее нижней части (рис. 5). Результаты расчета показывают, что параметр ξ сравнительно мало изменяется с ростом $l_в$, что обусловлено незначительным влиянием инерционных свойств водяной части забойки.

Диаметр скважины также существенно влияет на величину параметра ξ (рис. 6). В частности, с ростом d_c от 0,1 м до 0,25 м параметр ξ уменьшается в 1,540 раза.

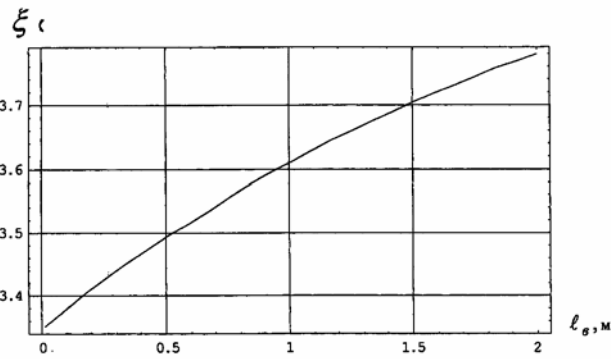


Рис. 5

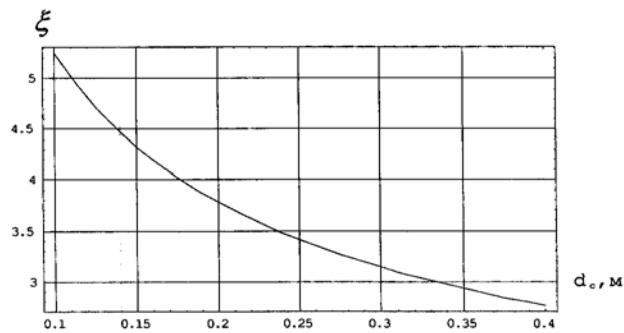


Рис. 6

Определим степень диспергации водяной компоненты забойки при ее вылете из скважины. Предварительно найдем скорость забойки в момент ее вылета. Используя уравнение (3) имеем

$$L'_т = \sqrt{2 k_1 \left(\frac{1}{\gamma-1} \right) \sqrt{1-L_т^{1-\gamma}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P}{[(\rho_3 l_3 + \rho_в l_в) (1+A) + A \rho_в l_в] l_{вв}} \left(\frac{1}{\gamma-1} \right) \times \sqrt{1-L_т^{1-\gamma}}}$$

Скорость забойки $V = l_{вв} L'_т$ в момент ее вылета из скважины при $L_т = L = 1,5$ равна

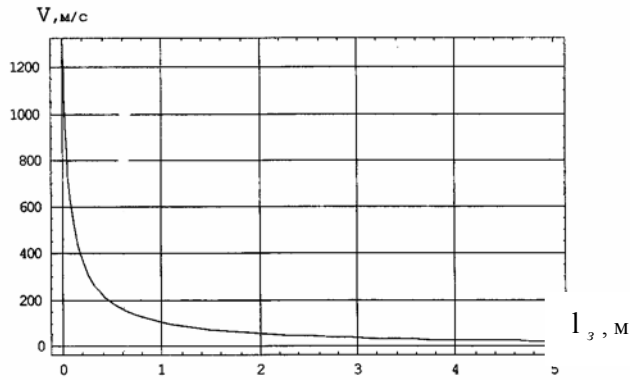


Рис. 7

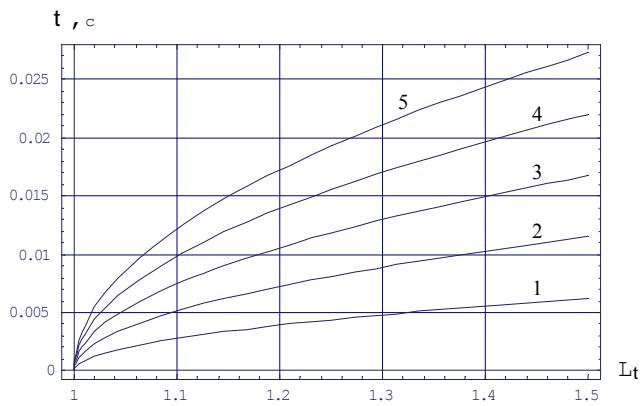


Рис. 8: 1 - $l_3 = 1$ м; $l_3 = 2$ м; $l_3 = 3$ м; $l_3 = 4$ м; $l_3 = 5$ м.

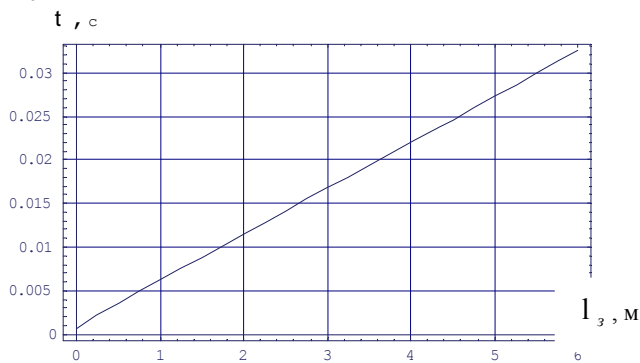


Рис. 9

$$v = \frac{2 \cdot P \cdot l_{\text{св}}}{\sqrt{[(\rho_3 l_3 + \rho_6 l_6) (1 + 2k_{\text{сп}} k_v \frac{l_3}{d_c}) + 2k_{\text{сп}} k_v \frac{l_3}{d_c} \rho_6 l_6] \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right)^{\gamma}}}} \times \sqrt{1 - L^{1-\gamma}} \quad (16)$$

При взрыве заряда граммонита 79/21

создаваемое в скважине максимальное давление составляет $P = 4,896 \cdot 10^9$ Па. Числовые значения остальных величин даны выше. Зависимость скорости вылета комбинированной забойки и соответственно ее верхней водяной части, полученное по формуле (16), от длины твердой части забойки представлена на рис. 7. Скорость вылета забойки резко снижается при длине ее ниж-

ней части до 1 м и практически остается постоянной при дальнейшем увеличении величины l_3 . Положение забойки в скважине в процессе ее ускоренного движения определяется относительной величиной L_{τ} . Изменение этой величины во времени для разных длин l_3 , полученное расчетным путем по формуле (15), показано на рис. 8. Расчетное время вылета забойки (время «запирания» скважины) в зависимости от длины ее нижней твердой части представлено на рис. 9. Непосредственно из этого рисунка видно, что указанная зависимость имеет практически линейный характер. Для времени $\tau = 0,013$ с, согласно рис. 9, длина нижней твердой части забойки составляет $l_3 \approx 2$ м.

Многочисленными опытами, произведенными со струйными форсунками с цилиндрическим отверстием,

показано, что при увеличении скорости истечения жидкости (или перепада давлений на форсунке) размеры капель уменьшаются. При этом капли становятся более однородными по размерам. Медианный

диаметр капель воды, образующихся в результате диспергации при $v = 200-250$ м/с составляет 17-20 мкм [2]. Такое сверхтонкое распыление водяной части забойки позволяет организовать интенсивное снижение температуры продуктов взрыва и эффективное пылеподавление при массовых взрывах. Поскольку скорость вылета забойки мало зависит от количества воды в ее верхней части, то существует воз-

можность выбора этого количества для оптимального пылеподавления.

Таким образом, применение комбинированной забойки с водяной составляющей в ее верхней части позволяет устранить основные причины образования ПГО и осуществить эффективное пылеподавление при одновременном увеличении продолжительности действия взрывного импульса на массив горных пород, соответственно улучшить дробление и повысить степень разупрочнения массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М., Стройиздат, 1979. 304 с.

2. Weis M., Worsham C. Atomization in high velocity air – streams, American Institute Chemical Engineering Journal, V. 11, No. 1, 1965.

Коротко об авторах

Гончаров С.А. – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой,

Дугарцыренов А.В. – кандидат технических наук, доцент,

Каркашадзе Г.Г. – доктор технических наук, профессор,

кафедра «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный университет.

Семенов В.В. – горный инженер, Стойленский ГОК.

РУКОПИСИ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ

МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

- Шагарова О.Н. «Зависимость технологических показателей от изменения конструктивных параметров рабочих элементов гидроциклона» (422/11-05 — 20.07.05) 4 с.
- Козлов В.А. «Взаимодействие электронов проводимости при прохождении тока в металлах» (423/11-05 — 20.07.05) 5 с.
- Гончарук А.В. «Анализ подходов к управлению ресурсами предприятия» (424/11-05 — 29.07.05) 9 с.
- Воробьева А.Н., Дьячков С.С. «Рационализация конструкции крепи шахтного ствола и ее расчет по программе COSMOS/M» (425/11-05 — 01.08.05) 8 с.
- Бекренев С.С. «Исследование методов оценки запасов угля в недрах с позиции стратегического развития компании» (426/11-05 — 01.08.05) 6 с.
- Ландер А., Филиппов К. «Прогнозирование динамики транзакций в АСУ «Процессинговый центр Банка Москвы»» (427/11-05 — 30.08.05) 11 с.

