© О.А. Мишедченко, В.Н. Романов, И.М. Паланкоев, 2015

УДК 622.235.67:622.26

О.А. Мишедченко, В.Н. Романов, И.М. Паланкоев

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСОМ ВЗРЫВА ПРИ ПРОХОДКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШАХТНЫХ СТВОЛОВ

Обоснована актуальность управления импульсом взрыва при проведении вертикальных шахтных стволов. Теоретически обоснованы параметры шпуровых рефракторов. Приведены результаты промышленных испытаний.

Ключевые слова: импульс взрыва, гиперзвуковое обтекание, параметры рефрактора, баллистический маятник, шпуровой заряд, буровзрывные работы, проведение, горная выработка.

Буровзрывные работы в стволе должны обеспечить точно соответствующую проекту форму и размеры поперечного сечения ствола, равномерное дробление породы для обеспечения максимальной производительности погрузочной машины и высокого коэффициента использования шпуров.

Известно, что взрывчатые вещества представляют собой химические соединения или механические смеси, которые под воздействием внешнего импульса (нагревания, трения, удара и т.п.) детонируют. При взрыве патрона аммонита 6ЖВ массой 200 г при энергии взрыва 4190 кДж/кг выделяется 838 кДж энергии. При скорости детонации 3,5 км/с, время взрыва составляет $0{,}2:3500 = 5{,}7\cdot10^{-5}$ с, а выделяемая в момент взрыва мощность равна

$N = 838\cdot10^{3} : 5{,}7\cdot10^{-5} =$
$=15\cdot10^{8}$ Дж/с14,6 млн кВт

В момент взрыва образуется значительное количество газов (700–1000 *л*), которые выделяемым теплом нагреваются до температуры 1900–4500 °С. Такие высокие температуры газов взрыва имеют место, благодаря высокой скорости детонации, малому времени выделению энергии и весьма малому теплообмену продуктов взрыва с окружающей средой. В связи с чрезвычайно большими скоростями детонации, в зоне заряда развиваются в начальный момент весьма высокие давления (10^{6}–10^{10} МПа и более), которые обеспечивает более разрушительное (бризантное) действие взрыва вблизи заряда.

По современным представлениям взрывная реакция (детонация) распространяется с постоянной, характерной для данного ВВ и диаметра заряда, скоростью, т.е. имеют место само распространяющийся процесс, не требующий дополнительного подвода энергии. При детонации энергия выделяется за счет химической реакции окисления водорода и углерода в оксид (CO) и диоксид (CO_2) углерода кислородом, входящим в состав молекул компонентов твердого ВВ.

В настоящее время для порошкообразных ВВ до сих пор пользуются твердой детонацией, разработанной в 1887 г. выдающимся ученым П. Гюгонио, который вывел фундаментальной уравнение, описывающее развитие ударного фронта на основе законов сохранения массы, импульса и энергии при переходе через разрыв.

Согласно этой теории распространение взрыва по ВВ обусловлено распространением по нему ударной вол-

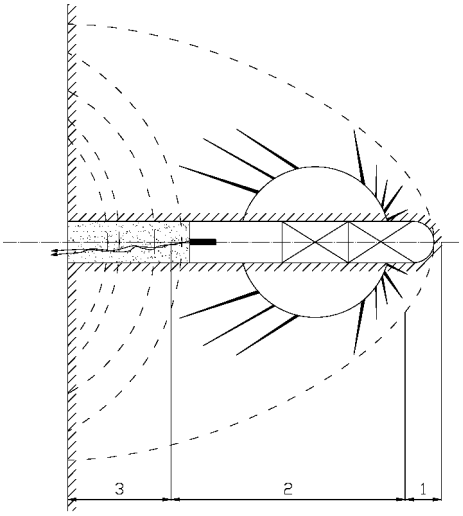


Рис. 1. Схема взрывного разрушения шпура: 1 – донная часть, 2 – колонковая часть, 3 – устьевая часть

ны с постоянной скоростью, то есть имеет место само распространяющийся процесс, не требующий дополнительного подвода энергии, то есть адиабатический процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой.

Процессы формирования и распространения ударных волн по ВВ по этой теории описывается законами распространения волн в газах – распространение плоской ударной волны в трубе, заполненной газом.

Такая предпосылка обуславливается тем, что на фронте ударной волны твердые ВВ испаряются и поэтому состояние вещества лучше описывается уравнениями газодинамики, то есть с современной точки зрения, это низкоскоростной процесс. Ученые, поддерживающие эту теорию [4], тем не менее, отмечают существенные несовпадения позиций этой теории с результатами практики, по этому отмечается: «Детонация – это сложное газодинамическое явление, детали которого в настоящее время недостаточно хорошо изучены, но в целом оно объясняется распространением ударных волн по массе ВВ. Ударная вона в массе ВВ возбуждается однократным начальным импульсом от внешнего источника».

С позиций газодинамических явлений можно объяснить явления, возникающие в порохообразных ВВ и динамитов на основе тринитроглицеринов. Но с разработкой высокобризантных и инициирующих ВВ, новых средств взрывания и совершенствования технологии взрывного дела уже более 50 лет перешли в пробойно-струйный механизм детонации, с позиций которых будет рассмотрен далее процесс взрывных работ в стволах.

Совершенствование взрывчатых веществ (ВВ) не приводит к соответствующему повышению эффективности их использования, так как современные ВВ с существенно меньшим содержанием тротила являются менее мощными, имеют более низкую детонационную способность, а значительная часть энергии взрыва расходуется нерационально. Поэтому возникает необходимость в дополнительных научных исследованиях, направленных на совершенствование существующих и разработку новых средств управления импульсом взрыва, которые обеспечивают улучшение технико-экономических показателей горнопроходческих работ.

Идея предлагаемой в данной статье разработки состоит в использовании в шпуре (скважине) рефракторов для перераспределения импульса взрыва, воздействующего на разрушаемые горные породы, из осевого направления в радиальное.

Согласно теории Ньютона [1] давление на элемент поверхности тела зависит только от ориентации этого элемента по отношению к набегающему потоку частиц и не зависит от остальной части тела. Очевидно при этом, что сопротивление тела опреде-

ляется только формой его головной части, поскольку только эта часть тела испытывает столкновение с частицами; теория Ньютона не дает возможности найти давление на участки поверхности тела, лежащие в его «аэродинамической тени» (внутри конуса Маха с углом при вершине 2α). При обтекании сильно вытянутого вдоль потока тела (напоминающего иглу) в непосредственной близости перед острием возникает возмущение плотности воздуха $\Delta\rho > 0$. Это возмущение в неподвижном воздухе распространялось бы в виде сферических волн, радиус которых увеличивался бы во времени. В сверхзвуковом потоке эти возмущения сносятся потоком ПД и остаются внутри конуса возмущений (конуса Маха). При обтекании сверхзвуковым потоком конического тела линии потока как бы «преломляются» на поверхности уплотнений воздуха. Для классификации течения применяется число Маха $M = v/c$ (отношение скорости течения к скорости звука в данном месте течения). В невозмущенном сверхзвуковом потоке $M > 1$. На поверхности конуса Маха из-за повышения плотности скорость звука возрастает, $M = 1$. У поверхности конуса воздух разрежен и его обтекание носит дозвуковой характер ($M < 1$).

Согласно [2] суммарный импульс взрыва удлиненного заряда ВВ, приходящийся в любую точку плоскости, определяется из выражения

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2},$$

где I_1, I_2 – импульсы взрыва вдоль оси и перпендикулярно оси распространения детонационной волны, соответственно. Поэтому изменение импульса по длине заряда не носит характера линейной зависимости.

Перераспределением УД и ПД из осевого направления в радиальное можно управлять параметрами модифицированного рефрактора, который вводится в конструкцию шпурового заряда первым от дна шпура.

Сила лобового сопротивления существенно зависит от формы обтекаемого тела. Для установления рациональной геометрической формы этой части рефрактора были проведены испытания с использованием металлических шаров различных диаметров. Установлено, что рабочей зоной (часть сферы, которая изменяет направление движения УВ и ПД) – является шаровой сегмент с диаметром $d = 0{,}75 \cdot d_{сф}$. Точное решение задачи об обтекании сверхзвуковым потоком тел вращения [3] показывает, что их коэффициенты сопротивления практически переста-

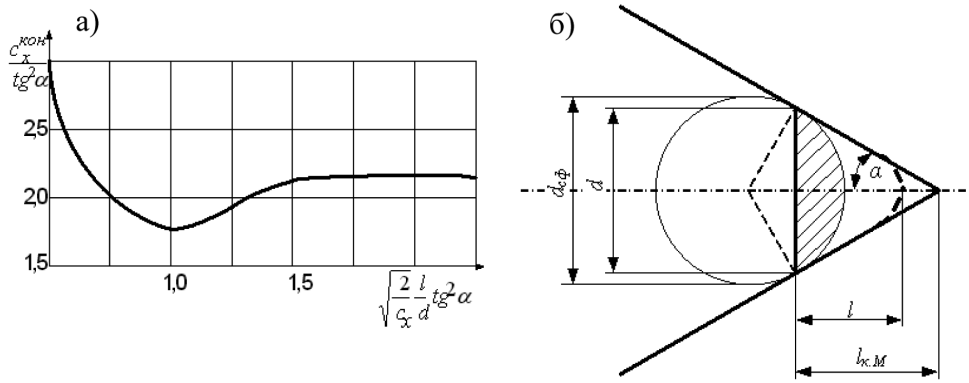


Рис. 2. Обтекание сверхзвуковым потоком тел вращения: а) коэффициент сопротивления затупленного конуса; б) параметры конуса Маха и затупленного конуса

ют меняться уже при числах M порядка 3–4 и составляют 0,92 и 0,6 для сферы и конической поверхности, соответственно. Закругление головной части способствует отрыву потока от поверхности тела, что приводит к уменьшению лобового сопротивления (рис. 1, *а*). Коэффициент сопротивления затупленного конуса зависит от полуугла раствора при его вершине и выражается формулой

$$c_x^{кон} = \frac{2}{t^2} \cdot \left(1 + 2 \cdot \int_0^t \Delta p \cdot t \cdot dt \right) \cdot tg^2\alpha,$$

где $t = 2\sqrt{\frac{2}{c_x}} \cdot \frac{l}{d} \cdot tg^2\alpha$,

l – длина затупленного конуса, мм; d – диаметр основания конуса, мм; α – полуугол раствора при вершине конуса, град.

При коэффициент сопротивления конуса имеет минимум, причем относительное уменьшение сопротивления по сравнению с острым конусом

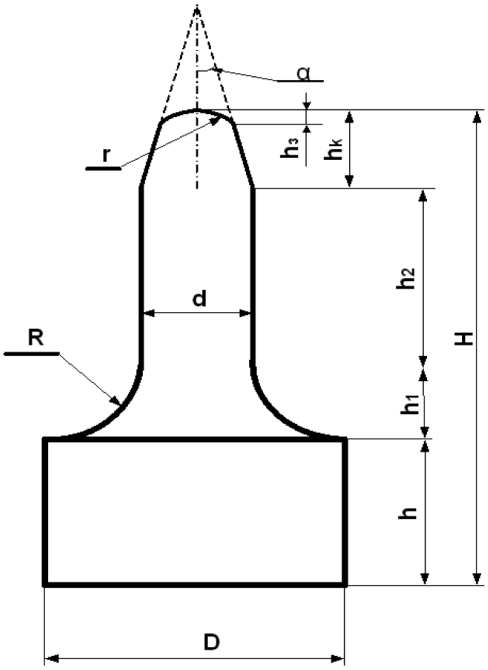


Рис. 3. Рациональная форма рефрактора

достигает 10%. Следовательно, при обтекании тел вращения потоком с гиперзвуковой скоростью небольшое затупление переднего конца тела, препятствующее вдавливанию рефрактора в патрон ВВ, не увеличивает сопротивления тела.

С учетом полученных результатов построен конус Маха (рис. 2, *б*). Его длина определяется из выражения

$$l_{к.М} = \frac{d \cdot ctg\alpha}{2} \text{ , а угол } \alpha = \arccos\frac{d}{d_{сф}}.$$

Эквивалентный ему затупленный конус имеет длину, определяемую из соотношения l/d. Для придания рефрактору длиной H устойчивости при его применении в горизонтальных и наклонных шпурах необходимо наличие цилиндрической части диаметром D, равным диаметру заряда ВВ. Однако, ее длина h должна быть минимальной, чтобы не оставались «стаканы». Высота криволинейной части ($H - h$) должна быть достаточной для разворота УВ и ПД. Поскольку рефрактор однородный, достаточно, чтобы его центр веса располагался в цилиндрической части. Следовательно, масса m_1 цилиндрической части должна быть большей или равной массе m_2 криволинейной части, то есть $V_1 \cdot \rho_1 \geq V_2 \cdot \rho_2$. Поскольку плотности ρ_1 и ρ_2 равны, рефрактор будет устойчив при

$$V_1 = \pi\frac{D^2}{4} \cdot h \text{, где } h \geq \frac{4 \cdot V_2}{\pi \cdot D^2} \text{ [5].}$$

Существенное влияние на перераспределение осевого импульса в радиальный оказывает форма сопряжения хвостовой и цилиндрической частей рефрактора. Поверхность сопряжения может быть образована дугами окружности, лемнискатами, параболами и другими кривыми второго порядка. Необходимым условием является плавность профиля, обеспечивающая разворот потока ПД, движущегося с дозвуковой скоростью

Сравнение показателей БВР до и после внедрения рефракторов

Наименование	Значение		Отклонение
	до	после	
Количество шпуров, шт	78	68	-15,4%
Количество шпурометров, м	101,40	101,85	+0,44%
КИШ	0,77	0,99	+22,0%
Удельный расход ВВ, кг/м^3	1,65	1,47	-10,9%

($M < 1$) внутри конуса Маха. Отраженные многократно от стенок шпура продукты взрыва, соударяясь с криволинейной поверхностью сопряжения хвостовой и цилиндрической частей рефрактора, также перераспределяются в радиальном направлении от заряда. Наиболее полно этому требованию соответствует дуга окружности радиусом R. Следовательно, рациональная форма рефрактора имеет вид, изображенный на рис. 3.

Внедрение результатов

Опытно-промышленное внедрение паспортов БВР с применением разработанных конструкций шпуровых рефракторов произведено при проведении горных выработок на шахте Обуховская Кемерово.

При проведении западного полевого магистрального штрека были применены рефракторы модифицированной конструкции. Горно-геологические условия проведения: категория шахты по газу – 1 –я; по пыли – опасная. Коэффициент крепости породы – 5–6. Сечение выработки вчерне – 21,6 м^2. Тип ВВ – аммонит Т – 19. В соответствии с действующим паспортом БВР до внедрения бурилось 78 шпуров. После внедрения нового паспорта БВР общее количество шпуров уменьшилось до 68 за счет увеличения расстояния между шпурами вследствие более эффективного использования энергии взрыва. Сравнение показателей БВР до и после применения рефракторов сведены в таблице.

Аналогичные результаты получены при использовании рефракторов на других шахтах: КИШ повысился в среднем на 13%, количество шпуров сократилось на 18%, удельный расход ВВ сократился в среднем на 12% [8].

Установлено, что применение шпуровых рефракторов уменьшает осевой импульс взрыва в 2,4 раза и увеличивает радиальный импульс в 1,39 раза. Это позволяет интенсифицировать БВР за счет сокращения числа шпуров и повышения КИШ, что обеспечивает возрастание скорости проведения горных выработок на 8–12%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. Собр. трудов акад. А.Н. Крылова, т. 7. – М.-Л.: Изд. АН СССР, 1936. – С. 663–676, 682–687.

2. *Баум Ф.А. и др.* Физика взрыва / Под. ред. Ф.А. Баума. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1975. – С. 304–316, 329–337.

3. *Черный Г.Г.* Течения газа с большой сверхзвуковой скоростью. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 220 с.

4. *Шкуматов А.Н., Калякин С.А.* Перераспределение импульса взрыва при помощи рефракторов // Взрывное дело. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2007. – Вып. № 98/55. – С. 120–128.

5. *Шкуматов А.Н.* Разработка средств интенсификации БВР при строительстве горных выработок / Перспективы развития восточного Донбасса: сборник научных трудов. – Новочеркасск, 2008. – Ч. 1. – С. 167–173. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Мишедченко Ольга Анатольевна – ассистент,
Романов Владислав Николаевич – кандидат технических наук, доцент,
Паланкоев И.М.,
МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.235.67:622.26

EXPLOSION-GENERATED PULSE CONTROL IN SHAFT SINKING

Mishedchenko O.A.[1], Assistant,
Romanov V.N.[1], Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Palankoev I.M.[1],
[1] Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

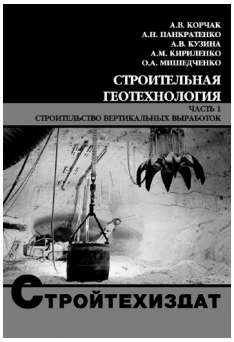
The actuality of the explosive impulse control for bore-explosive technology of mining excavations' building is analyzed. The blast (bore) hole refractors' parameters are validated. Results of laboratory and industrial tests are described. The future directions are defined.

Key words: explosion-generated pulse, hypersonic flow-past, refractor parameters, ballistic pendulum, blasthole charge, drilling-and-blasting, drivage, underground excavation.

REFERENCES

1. N'yuton I. *Matematicheskie nachala natural'noi filosofii. Sobrnik trudov akademika A.N. Krylova* , t. 7 (Mathematical elements of natural philosophy. Academician A.N. Krylov's collected works, vol 7), Moscow–Leningrad, Izd. AN SSSR, 1936, pp. 663–676, 682–687.
2. Baum F.A. *Fizika vzryva*. Pod. red. F.A. Bauma. 2-e izd. (Physics of explosion. Baum F.A. (Ed.), 2nd edition), Moscow, Nauka, 1975, pp. 304–316, 329–337.
3. Chernyi G.G. *Techeniya gaza s bol'shoi sverkhzvukovoi skorost'yu* (Gas flows with high hypersonic speed), Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury, 1959, 220 p.
4. Shkumatov A.N., Kalyakin S.A. *Vzryvnoe delo*, vyp. no 98/55 (Blasting, issue no 98/55), Moscow, ZAO «MVK po vzryvnomu delu», 2007, pp. 120–128.
5. Shkumatov A.N. *Perspektivy razvitiya vostochnogo Donbassa: sbornik nauchnykh trudov, ch. 1* (Development prospects for the Eastern Donbass: Collection of scientific papers, part 1), Novocherkassk, 2008, pp. 167–173.

НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Строительная геотехнология.
Часть 1. Строительство вертикальных выработок
Корчак А.В., Панкратенко А.Н., Кузина А.В., Кириленко А.М., Мишедченко О.А.
Год: 2014
Страниц: 113
ISBN: 978-5-98672-387-7
UDK: [622.016.23+622.233](075.8)
Изложены цели и задачи строительной геотехнологии как науки. Приведены существующие технологии строительства вертикальных горных выработок. Особое внимание уделено выбору технологического оборудования для оснащения и проходки стволов. В приложении приведены в сокращенном виде проекты производства работ на проходку глубокого ствола для горной промышленности и монтажного ствола в городском подземном строительстве.