

А.Н. Шкуматов, С.А. Калякин
(ДонНТУ, г.Донецк, Украина)

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИМПУЛЬСА ВЗРЫВА ПРИ ПОМОЩИ РЕФРАКТОРОВ

В статье выполнено теоретическое обоснование формы рефрактора, расположенного в шпуровом или скважинном заряде ВВ для повышения эффективности взрывных работ за счет перераспределения импульса взрыва из осевого направления в радиальное.

Анализ состояния технологии строительства горных выработок на шахтах и рудниках Украины показывает, что основной объем проведения приходится на долю буровзрывных работ. В угольной промышленности для радикального совершенствования развития горных работ необходимо [1] до 2010 года подготовить 24 новых горизонта и блока, что требует ежегодного ввода в эксплуатацию не менее 18-20 стволов. Объемы проведения полевых магистральных выработок целесообразно увеличить не менее чем в 2 раза. Это также требует совершенствования буровзрывной технологии, т.к. энергия взрыва используется недостаточно эффективно, о чем свидетельствует коэффициент использования шпуров (КИШ), находящийся в пределах 0,7-0,9.

Исследованию физических процессов, протекающих при взрыве заряда ВВ, управлению импульсом взрыва и определению его энергии посвящено значительное число исследований. Особое внимание в них уделено влиянию формы разрушаемого объекта, подвергающегося воздействию ударной волны (УД) и продуктов детонации (ПД), на эффективность взрывных работ. В работах, выполненных еще в 30-40-х годах XX века, была произведена оценка сопротивления тел при очень большой сверхзвуковой скорости с помощью методов аэродинамики. Было обращено внимание на то, что картина обтекания тела газом с очень большой сверхзвуковой скоростью близко напоминает рассматривавшуюся еще Ньютоном [2] картину движения тел в сопротивляющейся среде, состоящей из отдельных, не взаимодействующих между собой частиц. Из рассуждений Ньютона вытекает, что давление, действующее на обращенный вперед элемент обтекаемого тела, пропорционально квадрату синуса угла встречи элемента с частицами среды. В работе [3] была получена приближенная формула для расчета давлений на поверхности головной части профилей и тел вращений при очень большой сверхзвуковой скорости обтекания, уточняющая формулу Ньютона. Начало систематических исследований в области аэродинамики больших сверхзвуковых скоростей можно связать с работами конца 40-х годов прошлого столетия. В них установлено, что при обтекании тонкого тела сверхзвуковым потоком возмущения скорости частиц, малые по сравнению со скоростью набегающего потока, могут не быть малыми по сравнению со скоростью звука. В этих условиях многие выводы линейной теории, столь

эффективной при изучении обтекания тонких тел с умеренной сверхзвуковой скоростью, становятся неприемлемыми, так что при теоретических исследованиях необходимо сохранять нелинейные члены в уравнениях, описывающих движение газа. Это обстоятельство существенно осложняет методы расчета обтекания тел потоком с большой сверхзвуковой скоростью по сравнению со случаем умеренных сверхзвуковых скоростей. При обтекании ПД тел различной геометрической формы возникает подобная картина.

В работе [4], выполненной в РФЯЦ (Российский федеральный ядерный центр), теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что форма и угловые характеристики, определяющие пространственную ориентацию отражающей поверхности, являются важным элементом управления действием взрыва при взаимодействии с этой поверхностью УВ и потоков ПД. При этом отражающая поверхность может как уменьшать, так и увеличивать действие взрыва в требуемом направлении. Одной из основных характеристик такого воздействия можно считать импульс, сообщаемый этой конструкции ПД и зависящий от ее геометрии и ориентации относительно заряда ВВ.

В работе [5], выполненной в СО РАН под руководством А.В. Герасимова, предложены математические модели, описывающие поведение конструкций под действием ударных и взрывных нагрузок. Приведены результаты численного моделирования деформационных процессов в образцах различной геометрии. Установлено, что при наличии внутри испытываемого образца полости при воздействии УВ происходит повышение давления, образец разрушается («схлопывается»), и происходит усиление осевого импульса.

Необходимо также отметить работы [6, 7], в которых было исследовано влияние формы заряда на разрушение твердых тел и горных пород взрывом. В результате установлено, что при неизменной массе заряда ВВ с уменьшением диаметра заряда и увеличением его длины показатель дробимости уменьшается, а средний диаметр куска породы увеличивается. Поскольку при этом плотность заряжания шнура уменьшается, то снижается и давление продуктов детонации на стенки шнура. Но для сокращения выхода негабарита необходимо уменьшать расстояние между зарядами, что приводит к увеличению объема буровых работ и отрицательно сказывается на скоростях проведения горных выработок. Поэтому данный метод имеет ограниченную область применения и его целесообразно использовать в оконтуривающих шнурах.

Идея управления импульсом взрыва также получила свое развитие в работах Н.В. Мельникова и Л.Н. Марченко [8, 9]. Авторами предложен метод конструирования зарядов с использованием воздушных промежутков. При взрыве в скальных горных породах (на выброс) было установлено, что, создавая в заряде воздушные промежутки, можно существенно изменить характер течения процесса взрыва, а именно, значительно снизить пиковое

давление и увеличить время активного воздействия его на окружающую среду.

Продолжением данных исследований явилась работа коллектива под руководством Э.И. Ефремова [10], в которой определены рациональные параметры буровзрывных работ при направленном разрушении массива конструкцией заряда с воздушной полостью в донной части шпура. Устройство полостей в конце шпура позволяет заметно увеличить эффективность взрыва, расширить зону разрушающего действия взрыва без увеличения заряда.

Повышению эффективности использования энергии взрыва также способствует применение забойки, надежно запирающей ПД в зарядной камере [11]. В МакНИИ и КГУ им. Т.Г. Шевченко разработаны два забоечных состава: ЗВС-1 и ВМК-1. Состав ЗВС-1 получен на основе взрывоподавляющего порошка КСВ-30. Состав ВМК-1 получен механическим перемешиванием определенного количества серийно выпускаемых химических веществ: карбамида и хлорида калия с добавлением воды. В этом случае управление энергией взрыва достигнуто за счет подбора компонентов забоечного материала, длины и массы забойки. Их применение на шахтах ПО «Донецкуголь» и «Краснодонуголь» увеличило радиус зоны трещинообразования вокруг шпуров на 10%, что свидетельствует об увеличении радиального импульса взрыва заряда ВВ.

Общим для рассмотренных источников является установление влияния конструкции заряда ВВ на распределение энергии взрыва. Однако нерешенной остается задача более полного (близкого к 90°) осесимметричного перераспределения импульса в радиальный. Поэтому важное значение в теоретическом и практическом плане приобретает обоснование формы рефрактора - устройства для искривления / преломления УВ и ПД, а также конструкций шпуровых зарядов с их применением для повышения эффективности буровзрывных работ.

Управлять характером взрывного разрушения массива можно изменением величины и направления импульса взрыва. Полный импульс можно разделить на две составляющие:

$$I_{BB} = \sqrt{I_{\perp}^2 + I_{\parallel}^2}, \quad (1)$$

где $I_{\perp}$ - радиальный импульс, действующий в перпендикулярном к оси цилиндрического заряда направлении, Н·с;

$I_{\parallel}$ - осевой, действующий параллельно оси заряда, Н·с.

Исследование механизма обтекания ударной волной и продуктами детонации рефрактора, состоящего из тел вращения кривых второго порядка, выполнено с использованием положений технической газодинамики. Учитывая, что давление на преграду, оказываемое УВ и ПД, движущимися с

большой сверхзвуковой скоростью, зависит от формы ее головной части и площади сечения, контактирующей с этим потоком, определена рациональная форма модифицированного рефрактора.

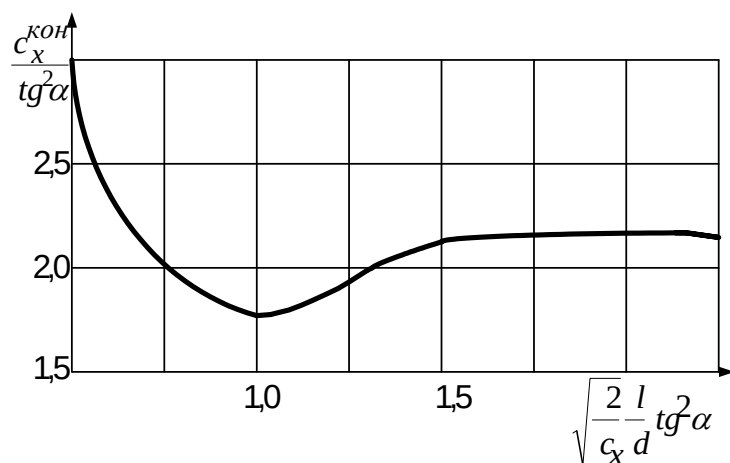


Рис. 1. Коэффициент сопротивления затупленного конуса

Закругление головной части способствует отрыву потока от поверхности, что приводит к уменьшению лобового сопротивления. Точное решение задачи об обтекании сверхзвуковым потоком тел вращения показывает, что их коэффициенты сопротивления практически перестают меняться уже при числах M порядка 3-4 и составляют 0,92 и 0,6 для сферы и конической поверхности,

соответственно. Небольшое затупление конуса приводит к уменьшению коэффициента сопротивления по сравнению с острым конусом (рис.1).

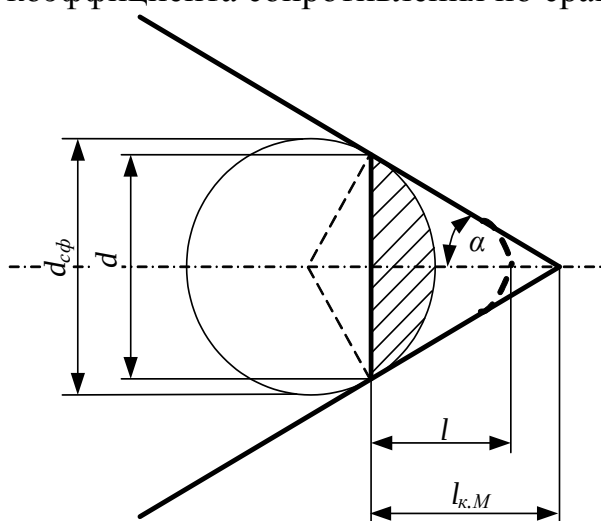


Рис. 2. Параметры конуса Маха и затупленного конуса

Значение c_x также зависит от угла раствора при вершине конуса. Учитывая вышеизложенное, определена рациональная форма хвостовой части рефрактора – затупленный конус, сопрягающийся с цилиндром малого диаметра d , находящимся в «аэродинамической тени». Для определения параметров затупления хвостовой части рефрактора был построен конус Маха (рис. 2). Его длина определяется как

$$l_{\text{к.М}} = \frac{d \cdot \operatorname{ctg} \alpha}{2}, \quad (2)$$

где полуугол раствора $\alpha = \arccos \frac{d}{d_{\text{сф}}}$.

Эквивалентный ему затупленный конус имеет длину l , которая определяется из соотношения $\frac{l}{d} \approx \frac{0,96}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \sqrt{\frac{c_x}{2}}$.

Рациональная форма модифицированного рефрактора имеет вид, изображенный на рис.3. 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

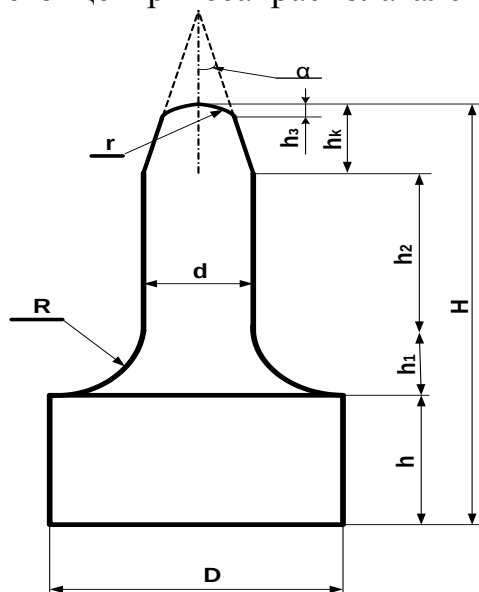


Рис. 3. Рациональная форма рефрактора

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

$$V_1 = \pi \frac{D^2}{4} \cdot h, \quad (3)$$

где $h \geq \frac{4 \cdot V_2}{\pi \cdot D^2}$ - минимально допустимая длина цилиндрической части рефрактора.

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 [12]. Необходимым условием является плавность профиля, обеспечивающая разворот потока ПД, движущегося с дозвуковой скоростью ($M < 1$) 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.

При определении влияния рефрактора на радиальный импульс взрыва зарядов ВВ были проведенные испытания на баллистическом маятнике и на свинцовых цилиндрах. Результаты испытаний приведены в табл.1.

Таблица 1

Перераспределение импульса взрыва модифицированным рефрактором

Конструкция заряда	Импульс взрыва, Н·с			Изменение импульса взрыва			
	осевой	радиаль- ный	пол- ный	осевого		радиального	
				Н·с	%	Н·с	%
Без рефрактора	12,9	16,9	21,3	0	0	0	0
С модифицированным рефрактором	10,9	19,0	21,9	-2,0	-15,5	+2,1	+12,4

Анализ результатов показывает, что полный импульс взрыва остается постоянным (различие в 0,6 Н·с или в 2,8% возникло за счет точности измерений). Осевой импульс при этом уменьшился с 12,9 Н·с до 10,9 Н·с (на 15,5%), а радиальный – увеличился с 16,9 Н·с до 19,0 Н·с (на 12,4%).

Внедрение рефракторов разработанной конструкции на шахте «Трудовская» ПО Донуголь позволило увеличить длину шпуров с 1,30 м до 1,55 м (на 19,2%). Соответственно длина заходки возросла с 1,00 м до 1,53 м (на 53,0%), скорость проведения повысилась на 23%. КИШ увеличился с 0,77 до 0,99 (на 22%). Удельный расход ВВ снизился с 1,65 кг/м³ до 1,47 кг/м³ (на 10,9%), а количество шпуров сократилось с 78 до 66 (на 15,4%).

Список литературы

1. *Дубов Е.Д.* Горное хозяйство шахт: состояние и перспективы // Уголь Украины. - 2005. - №6. - С. 3-5.
2. *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.
3. *Busemann A.* Aerodynamischer Auftrieb bei Überschallgeschwindigkeit. Atti Acad. D'Italia (5 Volta Conv.), Roma, 1936.
4. *Лебедев М.А., Лебедев Д.М.* Влияние формы преграды на ее стойкость к действию взрыва // VII Забабахинские научные чтения. Тез. докл. – Снежинск, 2003. - <http://www.vniitf.ru/rig/konfer/7zst/reports/s2/2-39.pdf>.
5. *Герасимов А.В., Крестулева Р.А., Михайлов В.Н.* Математическое моделирование воздействия ударных волн на образцы различной геометрии из градиентных материалов // VI Забабахинские научные чтения. Тез. докл. – Снежинск, 2001. – <http://www.vniitf.ru/events/2001/ZST/thesis/sec1/1-4r.htm>.
6. *Ханукаев А.Н., Долгов К.А.* О затратах энергии в ближней зоне взрыва. Записки ЛГИ, т. III, вып. I. – М.: Недра, 1966.
7. *Долгов К.А.* Исследование энергоемкости и эффективности процесса разрушения горных пород взрывом. Автореф. дис... канд. техн. наук: 312. – Л., 1969. – 20 с.
8. *Мельников Н.В., Марченко Л.Н.* Методы повышения коэффициента полезного использования энергии взрывчатого вещества путем изменения конструкции заряда // Уголь. - 1985. – № 2. – С. 28-32.
9. *Жариков И.Ф., Марченко Л.Н.* Исследование механизма действия удлиненных зарядов при взрыве в твердой среде // Взрывное дело. - М.: Недра, 1972.- Вып. № 71/28. – С. 81- 90.
10. Разработать и внедрить способ направленного разрушения напряженных пород длинными шпуровыми зарядами с воздушными промежутками в донной части: Отчет по НИР (промежуточный) / ИГТМ АН УССР - № 379/10/4. – Днепропетровск, 1979. – 68 с.
11. *Джигрин А.В.* Забойка как средство повышения эффективности и безопасности взрывных работ скважинным методом // Взрывное дело. – М.: ЗАО «МВК по взрывному делу», 2006. - Вып. № 96/53. – С. 24-31.
12. Пат.21007 Україна МПК⁶ E21F 5/00 Забивка для шпурів і свердловин / *С.О. Калякін, О.М. Шкуматов* (Україна) – № u 200609978; замовл.18.09.06; надрук. 15.02.07.–Бюл. № 2.