

УДК 622.235

ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ



С. А. КОЗИРЕВ,
главный научный сотрудник, д-р техн. наук,
skozirev@goi.kolasc.net.ru



Е. А. ВЛАСОВА,
старший научный сотрудник, канд. техн. наук



А. В. СОКОЛОВ,
научный сотрудник

Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, Россия

Введение

Одной из важнейших проблем горного производства остается необходимость повышения эффективности взрывного разрушения горных пород. Горный институт КНЦ РАН на протяжении длительного времени занимается разработкой и совершенствованием технологий взрывной отбойки на подземных рудниках и карьерах Кольского полуострова [1, 2]. На всех этапах внедрения различных типов взрывчатых веществ (ВВ) специалисты института выполняли оценку их детонационных и энергетических характеристик для обоснования области рационального применения. Для определения эффективности действия промышленных ВВ разработан комплексный метод оценки их взрывчатых характеристик и газовой вредности. Для этих целей совместно с КФ АО «Апатит» создан и оснащен современной аппаратурой подземный испытательный полигон. Отличительной особенностью метода является то, что определение количества токсичных газов, детонационных параметров и относительной работоспособности ВВ проводится в едином экспериментальном цикле, что дает возможность всесторонне рассмотреть особенности действия каждого заряда ВВ и объективно оценить уровень безопасности и эффективности их применения. На комплексный метод

На основе результатов измерений скорости детонации в шпуровых и скважинных зарядах рассчитаны фактические значения теплоты взрыва различных составов эмульсионных взрывчатых веществ. Показано, что фактические значения теплоты взрыва всегда ниже значений, приводимых в Технических условиях. Фактическое тепловыделение зависит от диаметра заряда и количества гранулированных фаз в смесевых составах.

Ключевые слова: эмульсионные взрывчатые вещества, теплота взрыва, скорость детонации, буровзрывные работы, фактическое тепловыделение, диаметр скважин.

DOI: 10.17580/gzh.2020.09.06

оценки взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ получены два патента РФ.

С появлением взрывчатых смесей, изготавливаемых на местах потребления, много внимания уделялось изучению их свойств и возможностей. Эти работы были начаты в конце 80-х годов прошлого столетия с разработки технологий приготовления и применения загущенных водосодержащих акватолов, которые длительное время изготавливали и применяли в карьерах Оленегорского и Костомукшского ГОКов и ОАО «Апатит». Использование акватолов позволило значительно уменьшить потребность предприятий во взрывчатых веществах заводского изготовления, снизить перевозки взрывоопасных грузов и обеспечить стабильную работу в сложившихся на то время экономических условиях.

В связи с запретом применения граммонита 79/21 из-за повышенного пыления чешуированного тротила при пневмозарядки и заводского гранулирования АС-8 на подземных рудниках ОАО «Апатит» стали использовать гранулиты-МП местного приготовления на основе смеси пористой и гранулированной селитры. Проведенные сотрудниками Горного института сравнительные испытания бестротилового ВВ показали, что по работоспособности гранулиты уступают граммониту 79/21. Для эффективного использования в подземных условиях смесевых алюмосодержащих ВВ были изучены их детонационные характеристики и газовая вредность в зависимости от компонентного состава, типа применяемых селитр, крупности алюминиевых порошков и их содержания, плотности заряжения и подобраны оптимальные составы для конкретных горно-геологических условий. На основании экспериментальных исследований установлена возможность применения алюмосодержащих составов для отбойки руды в системе разработки с подэтажным обрушением и торцовым выпуском.

По результатам выполненных работ коллективу сотрудников института в 1998 г. присуждена премия Правительства Российской Федерации, а по всему буровзрывному комплексу только за последние 30 лет получены 32 патента РФ и свидетельства на изобретения, значительное число из которых успешно реализованы на практике.

При переходе на новые ВВ местного изготовления при отбойке руды глубокими скважинами были выявлены недостатки их применения: в ряде случаев не было достигнуто требуемое качество дробления руды; ухудшились показатели выпуска; увеличились потери и разубоживание; в процессе заряжания зафиксированы случаи превышения предельно допустимых норм по концентрации паров нефтепродуктов и тротила. Трагические случаи, произошедшие на горнорудных объектах страны, вынудили Ростехнадзор в нормативном порядке ориентировать предприятия на ограничение, а затем и полный уход от пневмозаряжания. Альтернативой алюминий- и тротилосодержащим ВВ во всем мире служат эмульсионные взрывчатые вещества (ЭВВ). По своим технологическим свойствам последние не имеют себе равных как по безопасности применения, так и по водоустойчивости, экологической безопасности, а также степени механизации и автоматизации всего комплекса работ по изготовлению и применению ВВ.

В последние годы КФ АО «Апатит» одним из первых в России полностью перешел на ЭВВ при отбойке на подземных горных работах. В связи с тем, что в России впервые применялись ЭВВ на подземных горных работах, а зарубежные партнеры не полностью раскрывают всю информацию о эксплуатационных и взрывчатых характеристиках, потребовалось определить область их рационального использования в конкретных горно-геологических условиях. Для этого необходимо оценить физические и детонационные характеристики ЭВВ в целях отработки параметров заряжания и взрывания, выбора способа инициирования и массы боевика и обоснования рациональных параметров буровзрывных работ (БВР). Также следовало выполнить аудит взрывчатых свойств эмульсионных ВВ, применяемых на открытых горных работах.

Энергетические характеристики эмульсионных ВВ, применяемых на рудниках Кольского полуострова

Россия занимает 3-е место в мире (после США и Китая) по использованию промышленных ВВ. В 2018 г. потребление ВВ выросло и составило 1900 тыс. т. Вблизи мест применения изготовлено 1460 тыс. т (75 %), из них объем выпуска эмульсионных взрывчатых веществ составил 1120 тыс. т (данные Годового отчета Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору). На горных предприятиях Мурманской области объем потребления ВВ составляет около 130 тыс. т. На рудниках и карьерах КФ АО «Апатит», Кольской ГМК и АО «Олкон» применяют ЭВВ производства компании Orica; в карьерах АО «Ковдорский ГОК» – Махат; в условиях «Северо-западной фосфорной компании» – ЭВВ производства компании «Нитро Сибирь». В структуре себестоимости БВР значительную статью затрат обуславливает стоимость ВВ, поэтому обоснование области их рационального применения является актуальной задачей.

Основными взрывчатыми характеристиками ВВ являются: теплота взрывчатого превращения, работоспособность, скорость детонации, давление во фронте детонационной волны. При расчете параметров БВР чаще всего используют теплоту взрыва ВВ как основной оценочный показатель его работоспособности. Теплота взрыва характеризует потенциальную возможность ВВ совершать работу при расширении продуктов взрыва и позволяет судить о запасе энергии, определяющем температуру, давление продуктов взрыва и скорость детонации. Строго говоря, теплота взрыва – это энергетический параметр, отражающий химический элементный состав ВВ. Это то количество тепла, которое выделится при взрывчатом превращении химической энергии всех связей в тепловую. Рассчитывают общий тепловой эффект химических реакций во фронте детонационной волны и реакций, длящихся при расширении продуктов взрыва. Расчет продуктов взрыва осуществляют по стандартной термохимической программе с применением уравнения состояния идеального газа. Описанный подход возможен только для так называемых индивидуальных ВВ, когда процесс взрывчатого превращения происходит в объеме одной молекулы. Для рассматриваемых промышленных взрывчатых смесей, характеризующихся неидеальностью детонации, нет стандартной программы расчета состава продуктов взрыва. По-прежнему пользуются разработанными ранее эмпирическими методами на основе приближенных правил записи процесса взрывчатого превращения [3–7].

Авторами использовано известное правило Бринкли – Вильсона, в соответствии с которым состав продуктов взрыва вычисляется, исходя из общих законов химической термодинамики, но с некоторыми допущениями [8]. Детонация – это окислительный процесс, описываемый ограниченным набором простейших реакций окисления. Предполагается, что реакции «идут» до полного расходования окисляющего реагента и с определенным приоритетом. Известно [9], что состав продуктов взрыва зависит от относительного содержания кислорода во взрывчатом веществе. Эмульсионные ВВ имеют отрицательный кислородный баланс. Считается, что в случае, когда кислорода недостаточно для окисления всех горючих элементов, он участвует только в тех реакциях, которые сопровождаются наибольшим выделением тепла. При окислении водорода и углерода (горючих элементов в составе ВВ) преимущественно протекает реакция окисления водорода как энергетически более выгодная. Оставшаяся часть кислорода расходуется на окисление углерода, при этом будет преобладать реакция окисления углерода до CO_2 , которая происходит с большим выделением тепла, чем реакция образования окиси углерода. Следует отметить, что все процессы взаимодействия вероятностны и происходят на определенных стадиях расширения продуктов взрыва. Далее, зная состав продуктов взрыва, по закону Гесса, основанному на первом законе термодинамики, можно рассчитать общий тепловой эффект, который определяется только начальным и конечным состоянием системы [10]. В настоящее время разработаны и другие методы расчета теплоты взрыва ВВ [11, 12].

Для оценки энергетических показателей теоретически возможных схем взаимодействия компонентов взрывчатой смеси

Таблица 1. Эмульсионные ВВ (эмульзиты марок ВЭТ)

Аммиачная селитра	Эмульсионная матрица		Смесь эмульсионной матрицы с 30 % гранулированной фазы (ВЭТ-700)		Смесь эмульсионной матрицы с 70 % гранулированной фазы (ВЭТ-300)	
			Разновременное разложение компонентов смеси	Полное взаимодействие продуктов взрыва	Разновременное разложение компонентов смеси	Полное взаимодействие продуктов взрыва
<i>Брутто-формула</i>						
$H_{50}N_{25}O_{37,5}$		$C_6H_{69,57}N_{18,45}O_{37,51}$		$C_{4,13}H_{69,32}N_{20,31}O_{37,64}$		$C_{4,11}H_{59,37}N_{22,16}O_{36,32}$
<i>Номер записи реакции взрывчатого превращения</i>						
1		2		3		4
<i>Состав продуктов взрыва, моль</i>						
H ₂ O	25,0	34,78	24,22	31,96	36,41	29,68
CO	–	2,73	2,32	2,58	3,32	1,59
CO ₂	–	–	–	1,55	–	2,52
C	–	3,27	1,50	–	0,64	–
N ₂	12,5	9,23	6,47	10,15	2,77	11,08
O ₂	6,25	–	–	–	–	–
<i>Рассчитанная теплота взрыва, ккал/кг</i>						
378		685		470		753
Теплота взрыва по ТУ, ккал/кг				654		779

были выполнены расчеты продуктов взрыва и далее теплоты взрыва. В соответствии с гидродинамической теорией детонации скорость пропорциональна квадрату теплоты, выделяемой на фронте детонационной волны. Поэтому скорость детонации промышленных взрывчатых составов связана с фактическим тепловыделением, степенью реализации и детонационным давлением при взрыве [13]. Реализацию потенциальной энергии ВВ $Q_{взр}$ во фронте детонационной волны оценивали по ее связи со скоростью детонации D : $D^2 \sim Q_{взр}$, исходя из предположения, что «идеальной скорости детонации» соответствует 100%-ная реализация потенциальной энергии ВВ. Идеальную скорость детонации (максимально возможная скорость при данной плотности ВВ) рассчитывали по эмпирической формуле [8]. Степень реализации – отношение расчетной теплоты взрыва $Q_{взр}$ к фактической $Q_{факт}$. Детонационное давление $P_{дет}$, ГПа, определяли по известной формуле [14, 15] с учетом экспериментальных значений скорости детонации D , м/с, и плотности заряда ρ , кг/м³:

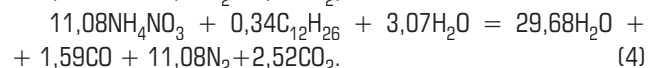
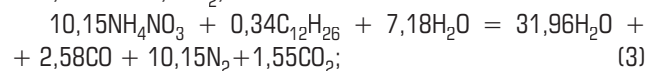
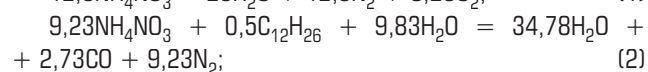
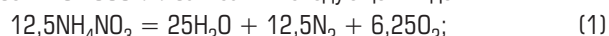
$$P_{дет} = \rho D^2 / (n + 1),$$

где ρ – плотность заряда, кг/м³; D – скорость детонации, м/с; n – соответствующий типу ВВ показатель политропы

Расчет теплоты взрыва смесевое эмульсионное ВВ

Смесевые эмульсионные ВВ с позиции гомогенности очень неоднородны по своему составу, и неоднородность зависит от свойств гранулированной фазы (количества, размера, пористости), что сказывается на «механизме детонации». Для рассматриваемых взрывчатых смесей характерно стадийное протекание реакций в детонационной волне. Взрывное превращение растянуто во времени: на начальном этапе происходит разложение аммиачной селитры, начинается окисление топливной фазы с последующим взаимодействием продуктов. В процессе возможны различные схемы взаимодействия: от крайнего случая, когда разложение компонентов смеси происходит отдельно

и одновременно (и ожидаемое прибавление энергии добавочного компонента в детонационную теплоту не происходит), до случая полного взаимодействия продуктов взрыва. Компоненты взрывчатой смеси (селитра эмульсионной матрицы и селитра сухой фазы) вследствие значительной разницы в геометрических размерах разлагаются одновременно и по отдельности же взаимодействуют с продуктами взрыва. Рассмотрим расчет теплоты взрыва смесевое эмульсионное ВВ – эмульзитов марок ВЭТ, применяемых в условиях АО «Ковдорский ГОК» и содержащих различное количество гранулированной фазы. Расчет выполнен для 1 кг взрывчатой смеси. Реакции взрывчатого превращения аммиачной селитры (1); эмульсионной матрицы (2); смеси, содержащей 30 % гранулированной селитры в сухой фазе – ВЭТ-700 (3) и смеси, содержащей 70 % гранулированной селитры в сухой фазе – ВЭТ-300 (4) записаны в следующем виде:



Брутто-формулы смесей, номера записи уравнений реакции, составы продуктов взрыва, рассчитанная теплота взрыва и значения, приведенные в Технических условиях (ТУ), представлены в табл. 1.

По термохимическим расчетам теплота взрыва смесевое эмульсионное ВВ с 30 % гранулированной фазы в зависимости от протекания реакции взрывчатого разложения может находиться в диапазоне от 470 до 753 ккал/кг. Для ВВ с 70 % гранулированной фазы, более неоднородной смеси, диапазон шире: от 672 до 844 ккал/кг. В ТУ указаны значения 654 и 779 ккал/кг.

Следует отметить, что ЭВВ различных производителей имеют схожие составы. В Технических условиях на ЭВВ приводятся

Таблица 2. Экспериментальные и фактические (полученные с использованием скорости детонационной волны) энергетические характеристики смесевых эмульсионных ВВ (эмультивы марок ВЭТ)

Марка ВЭТ	Теплота взрыва $Q_{\text{взр}}$ по ТУ, ккал/кг	Диаметр заряда, мм	Экспериментальная скорость детонации, м/с	Фактическая теплота взрыва $Q_{\text{факт}}$, ккал/кг	Степень реализации потенциальной энергии ВВ	Детонационное давление, ГПа
300	779	165	4640	638	0,82	7,8
		200	4892	671	0,80	8,6
			4600	635	0,81	7,5
		250	4945	673	0,80	8,8
			5253	710	0,91	10,2
			5279	693	0,89	10,9
			4819	685	0,88	7,8
700	654	200	4860	670	0,86	8,4
			5051	605	0,93	9,2
			5285	634	0,97	10,1
			5264	631	0,96	10,0
			4835	579	0,89	8,4
		250	5201	611	0,93	10,1
			4979	594	0,91	9,0
			5455	641	0,93	11,1
			5209	636	0,97	9,4
			5262	627	0,96	10,1

расчетные показатели взрывчатых характеристик без указания условий применения ВВ. Поэтому для оптимального использования ЭВВ требуется оценка их взрывчатых свойств на практике.

Определение детонационных и энергетических характеристик ЭВВ для открытых горных работ

Скорость детонации является основой для определения энергетических характеристик ВВ. Она изменяется в зависимости от диаметра, плотности, размера частиц ВВ, степени герметизации зарядной камеры, жесткости окружающей ВВ среды и принятого способа инициирования заряда [15–17].

В экспериментах внутрискважинные измерения скорости детонации осуществляли комплектом оборудования компании MREL, который включал измерительный прибор HandiTrap II, высокоомный измерительный провод и соединительный коаксиальный кабель. Процесс записи основан на дискретном считывании изменения сопротивления измерительного провода в процессе его сгорания в детонационной волне и последующем программном преобразовании этого изменения в виде графика «время – расстояние». Программное обеспечение дает возможность определять по графику (или его отдельным частям) скорость детонации двумя методами: двух крайних точек (промежуточные точки между двумя крайними точками не учитывают); линейной регрессии (с учетом всех точек, находящихся между двумя указанными крайними точками) [18].

Оценку взрывчатых характеристик эмультивов ВЭТ, применяемых на руднике «Железный» АО «Ковдорский ГОК», проводили с 2016 по 2018 г. Всего за время проведения работ были выполнены 25 измерений скорости детонации и получены 17 результативных записей (табл. 2).

Видно, что теплота взрыва эмультива ВЭТ-300 выше теплоты взрыва эмультива ВЭТ-700, как это и представлено в ТУ. Отличие

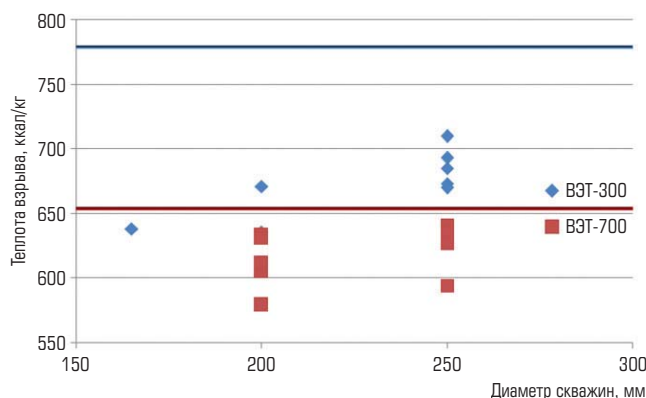


Рис. 1. Фактическое (маркеры) и расчетное тепловыделение (горизонтальные линии) при взрыве зарядов эмультива ВЭТ в скважинах различного диаметра

в том, что фактические значения теплоты взрыва эмультива ВЭТ-300 составляют 80–90 % нормированного в ТУ значения. Для эмультива ВЭТ-700 этот диапазон находится в пределах 90–97 %. В обоих случаях расчетная величина тепловыделения не достигается.

Наглядно это показано на рис. 1, где представлены данные фактических значений теплоты взрыва в зависимости от диаметра скважинных зарядов. Линиями показана теплота взрыва эмультивов по ТУ: красная соответствует эмультиву ВЭТ-700, синяя – эмультиву ВЭТ-300.

Для эмультива ВЭТ-300 значения теплоты взрыва по ТУ значительно отличаются от фактических, пересчитанных по экспериментальным данным (даже для скважин диаметра 250 мм). Для зарядов эмультива ВЭТ-700 энергосодержание в рассматриваемых условиях взрыва гораздо ближе к расчетному. В скважинных

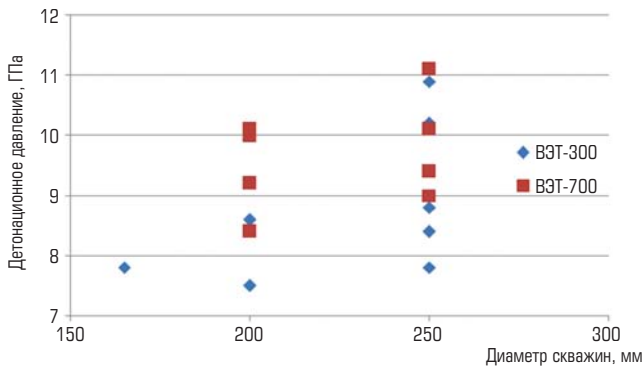


Рис. 2. Детонационное давление, развивающееся при взрыве зарядов эмульита ВЭТ

зарядах диаметром 250 мм выделение энергии при использовании эмульита ВЭТ-700 составляет 90 % и более потенциально возможной.

Важным показателем эффективности применения ВВ является давление на фронте детонационной волны. От его величины и продолжительности действия зависят и форма, и величина полезной работы взрыва. Считается, что чем выше давление детонации, тем больше дробящее действие взрыва. На **рис. 2** приведены расчетные данные (см. табл. 2) по давлению детонации при взрыве зарядов эмульита ВЭТ в скважинах различного диаметра.

Все полученные значения укладываются в диапазон от 8 до 11 ГПа. Разница в детонационном давлении для различных типов эмульита ВЭТ не установлена, как и для зарядов в скважинах различного диаметра.

Определение детонационных и энергетических характеристик эмульсионных ВВ для подземных горных работ

В мировой практике накоплен большой опыт применения эмульсионных взрывчатых веществ при зарядании скважин в подземных условиях. В настоящее время при зарядании шпуров и скважин на подземных рудниках КФ АО «Апатит» используют эмульсионную матрицу «Сабтэк Вэлкро» производства ЗАО «ОрикаСиАйЭс», которая предназначена для изготовления ЭВВ «Сабтэк Вэлкро» непосредственно в зарядной полости. Эмульсионная матрица имеет высокую степень диспергирования и большую площадь контакта окислителя и горючего, благодаря чему при оптимальной плотности зарядания достигается высокая скорость детонации в шпуровых зарядах. Критический диаметр открытого заряда ЭВВ «Сабтэк» составляет 32 мм, а в стальной трубе со стенкой толщиной 3 – 15 мм, что и предопределило возможность его применения в шпурах.

Выше указывалось, что в Технических условиях приводятся усредненные параметры или пределы детонационных и взрывчатых характеристик. Поэтому в реальных условиях потребовалась оценка взрывчатых свойств ЭВВ «Сабтэк» для обоснования области их рационального применения.

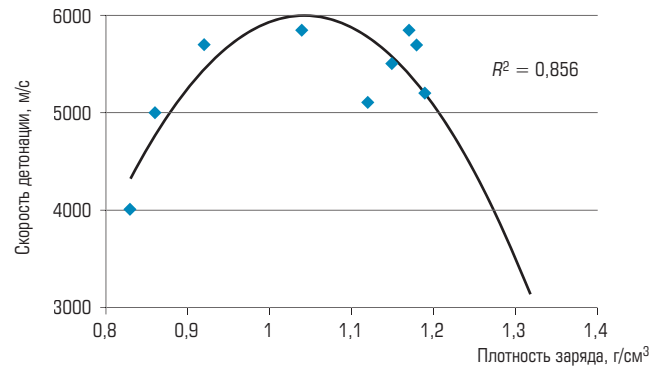


Рис. 3. Зависимость скорости детонации от плотности зарядания ЭВВ «Сабтэк»

R – коэффициент корреляции

Первоначально в полигонных условиях были проведены эксперименты по оценке скорости детонации и бризантного действия взрыва в зависимости от плотности зарядания. Разная плотность зарядания достигалась путем введения в эмульсионную матрицу водного раствора нитрита натрия различной концентрации. Скорость детонации оценивали оптоволоконным методом, а бризантное действие – по степени расширения и разрушения стального кольца, надетого на трубу [19]. В результате проведенных экспериментов установлено, что наилучшие характеристики взрывания обеспечиваются при плотностях зарядания в диапазоне 1,14–1,17 г/см³, что соответствует и максимальной скорости детонации, а наименьшим разрушающим действием обладают заряды с плотностью меньше 0,9 г/см³. Увеличение плотности зарядания более 1,2 г/см³ хотя и приводит к уменьшению скорости детонации, но за счет роста объемной концентрации энергии в заряде усиливает бризантное действие взрыва. Обобщенные данные зависимости скорости детонации от плотности зарядания ЭВВ «Сабтэк» приведены на **рис. 3**.

Из представленных данных следует, что зависимость скорости детонации носит немонотонный характер, а максимум скоростей достигается в диапазоне плотностей 1,05–1,17 г/см³.

Для определения реальных взрывчатых характеристик ЭВВ «Сабтэк» были проведены эксперименты, которые выполняли в натуральных условиях при установленных ранее оптимальных плотностях зарядания [19]. За период 2016–2018 гг. было выполнено 10 измерений скорости детонации в скважинах диаметром 89 и 102 мм, а также 8 измерений в шпурах диаметром 43 мм. На основе измерений рассчитаны фактическая теплота взрыва, полнота тепловыделения и детонационное давление (**табл. 3**).

Из полученных данных следует, что, как и для эмульитов ВЭТ, с увеличением диаметра заряда повышаются фактическая теплота взрыва (**рис. 4**) и степень реализации потенциальной энергии взрыва.

Несмотря на высокую степень однородности состава, фактические значения теплоты взрыва зарядов ЭВВ «Сабтэк» всегда ниже значений, приводимых в Технических условиях. Так, при шпуровой отбойке снижение составляет до 20 % энергии заряда по ТУ.

Таблица 3. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик ЭВВ «Сабтэк»

Теплота взрыва $Q_{взр}$ по ТУ, ккал/кг	Диаметр заряда, мм	Экспериментальная скорость детонации, м/с	Фактическая теплота взрыва $Q_{факт}$ ккал/кг	Степень реализации потенциальной энергии ВВ	Детонационное давление, ГПа
793	43	4900	634	0,80	8,5
		5180	666	0,84	9,3
		5190	674	0,85	9,5
		4800	619	0,78	8,1
		5167	666	0,84	9,3
		4860	626	0,79	8,3
		5046	650	0,82	8,9
	4720	611	0,77	8,0	
	89	5450	735	0,93	11,4
		5442	742	0,94	11,6
		5349	734	0,93	11,4
		5500	721	0,91	11,0
		5245	707	0,89	10,5
	102	5700	769	0,97	12,5
		5600	755	0,95	12,0
5550		748	0,94	11,8	
5451		735	0,93	11,4	
5327		718	0,91	10,9	

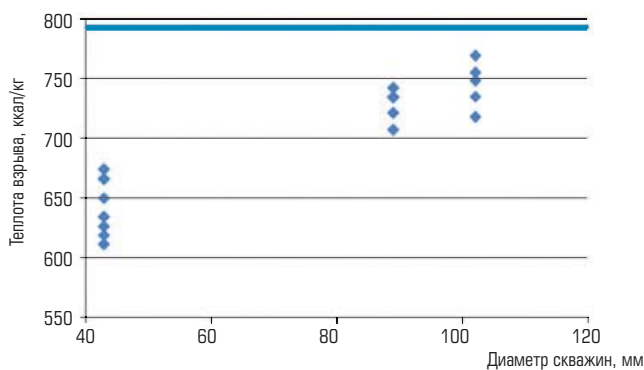


Рис. 4. Фактическое (маркеры) и расчетное тепловыделение (горизонтальная линия) при взрыве зарядов ЭВВ «Сабтэк» в скважинах различного диаметра

Заключение

Проведенные исследования показали, что при расчете параметров БВР нельзя руководствоваться ни теплотой взрыва, приведенной в Технических условиях, ни усредненной расчетной величиной, полученной по скорости детонации. Наиболее точные


расчеты параметров буровзрывных работ могут быть получены, если принимать во внимание фактическую теплоту взрыва для каждого диаметра скважин.

На основе результатов измерений скорости детонации в шпуровых и скважинных зарядах рассчитаны фактические значения теплоты взрыва различных составов эмульсионных взрывчатых веществ. Показано, что фактические значения теплоты взрыва всегда ниже значений, приводимых в Технических условиях. Фактическое тепловыделение зависит от диаметра заряда и количества гранулированной фазы в смесевых составах.

На примере подземных рудников Хибин впервые в России отработана технология ведения взрывных работ с использованием эмульсионных взрывчатых веществ, базирующаяся на выявленных закономерностях газификации ЭВВ типа «Сабтэк» в вертикальных восходящих скважинах при различной температуре эмульсии, и на этой основе определены оптимальные параметры их заряжания, инициирования и взрывания для повышения интенсивности дробления горных пород и снижения законтурных нарушений в тыльную часть массива горных пород. Разработанная технология позволила повысить эффективность и безопасность взрывных работ на подземных рудниках.

Библиографический список

- Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kalyuzhny A. S. Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines // Eurasian Mining. 2019. No. 2. P. 23–26. DOI: 10.17580/em.2019.02.05
- Нестеров К. В., Кузнецов М. В. Развитие ресурсной базы АО «Кольская ГМК» // Цветные металлы. 2019. № 11. С. 16–21. DOI: 10.17580/tsm.2019.11.01
- Викторов С. Д. Взрывное разрушение массивов горных пород – основа прогресса в горном деле // ГИАБ. 2015. Отдельный выпуск 1. Труды научного симпозиума «Неделя горняка-2015». С. 63–75.
- Lee J., Persson P.-A. Detonation Behavior of Emulsion Explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1990. Vol. 15. Iss. 5. P. 208–216.
- Соснин В. А., Межеричкий С. Э., Печенев Ю. Г., Михайлюкова А. И., Севастьянов А. Б. Особенности механизма детонации эмульсионных взрывчатых веществ // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. № 19. С. 28–33.
- Меньшиков П. В., Сеницын В. А., Шеменев В. Г. Определение детонационного давления и температуры взрыва промышленных эмульсионных взрывчатых веществ, применяемых на карьерах Урала // Успехи современного естествознания. 2017. № 7. С. 96–102.

7. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., Kovalenko I. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives // *Mining of Mineral Deposits*. 2019. Vol. 13. Iss. 3. P. 22–30.
8. Пацюк В. В., Лавров В. В. Методы испытаний низкочувствительных ВВ (методические рекомендации). – Черноголовка, 1991. – 146 с.
9. Поздняков З. Г., Росси Б. Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 253 с.
10. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. – М.: Физматгиз, 1959. – 800 с.
11. Маслов И. Ю., Горинов С. А., Козырев С. А. К вопросу о расчете удельной теплоты взрыва эмульсионных взрывчатых веществ и гранэммитов // *Взрывное дело*. 2020. № 126/83. С. 51–67.
12. Симонов П. С., Тептеев Г. Н. Анализ взрывчатых характеристик и условий применения эмульсионных взрывчатых веществ // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2019. Т. 10. № 1. С. 8–12.
13. Власова Е. А., Державец А. С., Козырев С. А., Кутын Н. Г., Фильчаков А. А. Оценка взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ // *Взрывное дело*. 2008. № 99/56. С. 119–136.
14. Шведов К. К., Анисимов В. Н. Концепция и реальные пути создания промышленных ВВ для качественного дробления крепких горных пород // *Горная промышленность*. 2008. № 1(77). С. 26–32.
15. Qiujiu Wu, Liu Tan, Sen Xu, Dabin Liu, Li Min. Study on Thermal Decomposition Characteristics of Ammonium Nitrate Emulsion Explosive in Different Scales // *Journal of Energetic Materials*. 2018. Vol. 36. Iss. 2. P. 202–210.
16. Castedo R., Natale M., López L. M., Sanchidrián J. A., Santos A. P. et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 112. P. 290–301.
17. Sanchidrián J. A., Castedo R., López L. M., Segarra P., Santos A. P. Determination of the JWL Constants for ANFO and Emulsion Explosives from Cylinder Test Data // *Central European Journal of Energetic Materials*. 2015. Vol. 12. No. 2. P. 177–194.
18. Фокин В. А. Проектирование и производство буровзрывных работ при постановке уступов в конечном положении на предельном контуре глубоких карьеров. – Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. – 231 с.
19. Козырев С. А., Соколов А. В., Власова Е. А. Определение относительного взрывного эффекта промышленных ВВ по расширению стального кольца // *Взрывное дело*. 2007. № 97/54. С. 140–147. 

«GORNYI ZHURNAL», 2020, № 9, pp. 47–53
DOI: 10.17580/gzh.2020.09.06

Estimation of factual energetics of emulsion explosives by experimental detonation velocity test data

Information about authors

S. A. Kozыrev¹, Chief Researcher, Doctor of Engineering Sciences, kozar@goi.kolasc.net.ru

E. A. Vlasova¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences

A. V. Sokolov¹, Researcher

¹Mining Institute, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

Abstract

Consumption of industrial explosives in Russia is growing thanks to the increased production of emulsion explosives and their mixtures with granular ammonium nitrate. Mines in the Murmansk Region use mainly explosive emulsion mixtures manufactured by Orica, Maxam and Nitro Sibir. The cost of drilling and blasting is mainly constituted by the cost of explosives; therefore, the rational use of explosives is a critical objective to be met.

In drilling and blasting designs, the heat of explosion is used as the main energy indicator of the explosives used. To calculate the heat of explosion, it is necessary to know the composition of the explosion products, which is not always possible. This article presents the calculation of characteristics of the explosion products by the well-known Brinkley–Wilson rule. The heat of explosion was calculated by the Hess law.

Then, in accordance with the hydrodynamic theory of detonation, assuming that the detonation velocity is proportional to the square of the explosion heat emitted at the front of the detonation wave, using the experimental values of the detonation velocity obtained for the industrial explosive compositions under consideration, the authors calculated the actual heat release and the potential energy of the explosion. The proposed approach was used in analyzing the results of detonation velocity measurements in blastholes in Zhelezny mine of Kovdor Mining and Processing Plant and in underground mines of Apatit (during heading and stoping operations).

Based on the measurements, the authors have determined the actual values of explosion heat in case of various compositions of emulsion explosives depending on the blasthole diameter. The actual explosion heat of charges of emulsion explosives are always lower than the values given in their specifications. It is shown that the actual heat release depends on the diameter of the charge and on the amount of granular phase in the mixed compositions.

Keywords: emulsion explosives, explosion heat, detonation velocity, drilling and blasting operations, actual heat release, blasthole diameter.

References

1. Rybin V. V., Konstantinov K. N., Kalyuzhny A. S. Integrated approach to slope stability estimation in deep open pit mines. *Eurasian Mining*. 2019. No. 2. pp. 23–26. DOI: 10.17580/em.2019.02.05
2. Nesterov K. V., Kuzenkov M. V. Expanding Kola MMC'S resource base. *Tsvetnyye Metally*. 2019. No. 11. pp. 16–21. DOI: 10.17580/tsm.2019.11.01

3. Viktorov S. D. The explosive destruction of the rock is the basis of progress in mining. *GIAB*. 2015. Special issue 1. *Proceedings of international scientific symposium "Miner's Week-2015"*. pp. 63–75.
4. Lee J., Persson P.-A. Detonation Behavior of Emulsion Explosives. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1990. Vol. 15, Iss. 5. pp. 208–216.
5. Sosnin V. A., Mezheritskiy S. E., Pechenev Yu. G., Mikhaylyukova A. I., Sevastyanov A. B. Mechanism of detonation of emulsion explosives. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*. 2016. Vol. 19, No. 19. pp. 28–33.
6. Menshikov P. V., Sinityn V. A., Shemenev V. G. Determination of detonation pressure and explosion temperature of industrial emulsion explosives used at Ural quarries. *Uspekhi sovremennoy estestvoznaniya*. 2017. No. 7. pp. 96–102.
7. Kononenko M., Khomenko O., Savchenko M., Kovalenko I. Method for calculation of drilling-and-blasting operations parameters for emulsion explosives. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. Vol. 13, Iss. 3. pp. 22–30.
8. Patsyuk V. V., Lavrov V. V. Testing of low-speed explosives (Technical guide). Chernogolovka, 1991. 146 p.
9. Pozdnyakov Z. G., Rossi B. D. Industrial explosions and blasting agents. Reference book. 2nd enlarged and revised edition. Moscow: Nedra, 1977. 253 p.
10. Baum F. A., Stanyukovich K. P., Shekhter B. I. Physics of Explosion. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 800 p.
11. Maslov I. Yu., Gorinov S. A., Kosyrev S. A. To the question of calculation of specific heat of explosion of emulsion explosives and granemites. *Vzryvnoe delo*. 2020. No. 126/83. pp. 51–67.
12. Simonov P. S., Tepteev G. N. Explosive properties and application conditions of emulsion explosives: Overview. *Aktualnye problemy sovremennoy nauki, tekhniki i obrazovaniya* 2019. Vol. 10, No. 1. pp. 8–12.
13. Vlasova E. A., Derzhavets A. S., Kozыrev S. A., Kutin N. G., Filchakov A. A. Explosive characteristics and gas toxicity of industrial explosives. *Vzryvnoe delo*. 2008. No. 99/56. pp. 119–136.
14. Shvedov K. K., Anisimov V. N. Concept and actual approach to the creation of industrial explosives for effective shattering hard rock. *Gornaya promyshlennost*. 2008. No. 1(77). pp. 26–32.
15. Qiujiu Wu, Liu Tan, Sen Xu, Dabin Liu, Li Min. Study on Thermal Decomposition Characteristics of Ammonium Nitrate Emulsion Explosive in Different Scales. *Journal of Energetic Materials*. 2018. Vol. 36, Iss. 2. pp. 202–210.
16. Castedo R., Natale M., López L. M., Sanchidrián J. A., Santos A. P. et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 112. pp. 290–301.
17. Sanchidrián J. A., Castedo R., López L. M., Segarra P., Santos A. P. Determination of the JWL Constants for ANFO and Emulsion Explosives from Cylinder Test Data. *Central European Journal of Energetic Materials*. 2015. Vol. 12, No. 2. pp. 177–194.
18. Fokin V. A. Designing and implementation of drilling and blasting operations during final sloping of benches in deep pits. Apatity: Izdatelstvo KNTs RAN, 2004. 231 p.
19. Kosyrev S. A., Sokolov A. V., Vlasova E. A. Determination of blasting effect of industrial explosives by expansion of a steel ring. *Vzryvnoe delo*. 2007. No. 97/54. pp. 140–147.