

## КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЗРЫВЧАТЫХ И ГАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

Представлен оперативный метод оценки взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ. Отличительной особенностью данного подхода 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 его безопасности и эффективности.

The article suggested executive method for investigation of detonation's, gaseous and explosives parameters of the modern industrial explosives. Determination content of toxic gas, explosives parameters and comparative strength of the explosives carry out simultaneously for assessment of level their safety and efficiently.

Тенденция увеличения объемов производства ВВ на местах, приближенных к ведению взрывных работ, и относительного уменьшения объемов применения тротила способствовала разработке и широкому использованию в России эмульсионных ВВ и смесевых ВВ с различными энергетическими добавками. По данным Ростехнадзора, на сегодняшний день зарегистрировано более 800 наименований ВВ. В свою очередь, это затрудняет их унификацию, сертификацию и стандартизацию.

Появилась необходимость разработать совершенно новые способы проверки работоспособности промышленных ВВ, так как известные стали неприемлемыми для промышленных ВВ с большим критическим диаметром. Известно, что важнейшей характеристикой заряда взрывчатого вещества при разрушении горного массива является его энергия. Но из-за неполноты протекания химических реакций, особенно при использовании современных грубоисперсных смесевых ВВ, изготавливаемых на местах применения, выделяемая энергия не соответствует расчетным значениям, что, безусловно, следует учитывать при выборе параметров взрывных работ. Изучению этих закономерностей необходимо уделять первоочередное внимание, так как от

них зависит весь дальнейший процесс расчета и проектирования взрывов.

Этот вопрос неоднократно рассматривался на конференциях различного уровня по взрывному делу, в решениях которых было рекомендовано сконцентрировать внимание на разработку научных основ, критериев оценки и методик определения взрывчатых и газовых характеристик промышленных ВВ в целях объективной оценки уровня их безопасности и эффективности. Горный институт КНЦ РАН, где сохранилась научная школа взрывников, обладающая большим опытом, специалистами для проведения исследований и необходимой научной и производственной базой, активно участвует в реализации этой концепции.

Для этих целей совместно с ОАО «Апатит» создан и оснащен современной аппаратурой подземный испытательный полигон (рис.1) и разработан комплекс методик для определения взрывчатых и газовых характеристик промышленных ВВ. Все разработанные методики являются оригинальными и (судя по публикациям и сообщениям на научных конференциях) вызывают интерес у научной общественности.

**Разработка метода и средств регистрации скорости детонации.** Скорость дето-

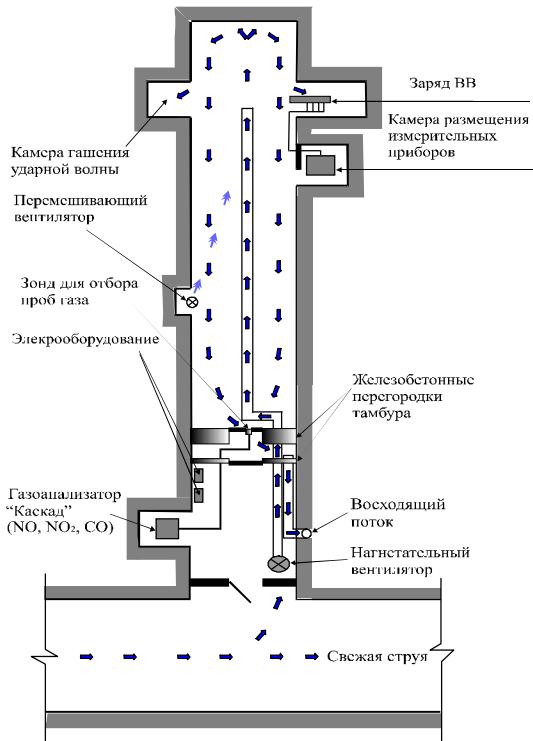


Рис.1. Схема подземного испытательного полигона



Рис.2. Внешний вид прибора ОВР-1

нации – одна из основных характеристик взрывчатого вещества. Изучение зависимости скорости детонации от химического состава, плотности ВВ, дисперсности компонентов и условий взрывания позволяет сделать важные выводы о механизме протекания детонационного процесса. Экспериментальные значения скорости детонации, наряду с другими характеристиками, позволяют оценить эффективность действия ВВ при их практическом использовании.

Отечественная измерительная аппаратура для изучения скорости детонации не-

посредственно в шпурах или скважинах в натурных условиях уступает зарубежным аналогам. Поэтому нами совместно с Полярно-геофизическим институтом для измерения скорости детонации разработан комбинированный метод, сочетающий в себе достоинства оптического и хронографического методов, и изготовлен опытный образец прибора ОВР-1 (рис.2). Суть метода заключается в следующем: светящийся фронт детонационной волны регистрируется оптоволоконными кабелями, размещенными на определенных расстояниях во взрывчатом веществе, другие концы кабелей подсоединяются к фотоприемному устройству, которое, в свою очередь, соединено с электронным секундомером. Фотоприемное устройство преобразует световые импульсы в электрические импульсы, включающие и останавливающие секундомер. В качестве датчиков и передающих линий нами был выбран многомодовый оптоволоконный кабель типа ОВК-62,5/125. По измеренным значениям времени и длине измерительных участков определяется скорость детонации.

Основные характеристики оптоволоконного измерителя скорости детонации следующие:

Количество каналов	4
Измеряемые временные интервалы, мкс	0-999,9
Дискретность отчета, мкс	0,1
Напряжение питания, В	7-12
Масса прибора, кг	1

С использованием данного прибора выполнен ряд экспериментальных исследований по оценке скорости детонации различных промышленных взрывчатых веществ. В качестве примера приведены результаты исследований по определению влияния содержания алюминия на скорость детонации при взрыве стехиометрических смесей АС-ДТ-А1 (где АС – аммиачная селитра; ДТ – дизельное топливо). Состав смесей приведен в табл.1. Для приготовления смесей использовали гранулированную аммиачную селитру по ГОСТ 2-85 и алюминиевый порошок ПА-4 (крупность 20-50 мкм).

Таблица 1

Компонентный состав исследуемых смесей, %

Смесь	Al	ДТ	АС
1	3	4,5	92,5
2	6	3,7	90,3
3	8	3,1	88,9
4	–	5,5	94,5

Смеси АС-ДТ заряжали в трубы диаметром 100 мм с толщиной стенки 5 мм. Плотность заряжания 1,04-1,05 г/см<sup>3</sup>. В заряды добавляли 2 % воды. Скорость детонации измеряли с использованием оптоволокна на двух базах по 8 см, расположенных на расстоянии от инициатора 7 и 9 калибров. Инициатор – два патрона аммонита 6ЖВ, общая масса 400 г.

Анализ приведенных данных показывает, что смеси АС-ДТ-АЛ даже на обычной гранулированной селитре обладают хорошими детонационными свойствами. Скорость детонации возрастает почти прямо пропорционально содержанию алюминия (рис.3).

Применение оптоволоконного регистратора позволяет также производить измерение скорости детонации непосредственно в шпурах или скважинах, что не всегда возможно осуществить другими методами.

**Методика оценки степени реализации потенциальной энергии в зоне реакции детонационной волны промышленных ВВ по экспериментальным значениям скорости детонации.** На энерговыделение при детонации промышленных ВВ существенное влияние оказывает компонентный со-

став смеси, дисперсный состав компонентов, равномерность и качество их перемешивания, наличие воды, диаметр заряда, плотность заряжания и др. Учесть все эти факторы в расчетных методах определения теплоты взрыва не представляется возможным. Кроме того, существующие на горнорудных предприятиях способы и средства приготовления смесевых ВВ не позволяют достичь равномерного распределения компонентов. Поэтому только экспериментальные методы в конкретных условиях могут дать представление о теплоте взрыва, максимально приближенной к реальным значениям.

Оценка степени реализации потенциальной энергии ВВ во фронте детонационной волны основывается на сравнении максимально возможных скоростей детонации испытуемых ВВ и реальных их значений, полученных в натурных условиях, с использованием соотношения  $D^2 \sim Q_{взр}$ , вытекающего из теории детонации, в предположении о том, что идеальной скорости детонации соответствует 100-процентная реализация потенциальной энергии ВВ. Впервые такой подход к определению полноты разложения смесевых промышленных ВВ был применен К.К.Шведовым. Нами для расчета энергетических и детонационных характеристик промышленных ВВ был использован хорошо апробированный эмпирический экспресс-метод, разработанный в ИПХФ РАН (А.Н.Афанасенков и др.). Согласно этому методу скорость детонации  $D_d$  рассчитывается в предположении полного выделения потенциальной энергии ВВ в детонационной волне:

$$D_d = 3,231 \sqrt{\rho^2 Q_{взр} V} + 2641, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность ВВ, г/см<sup>3</sup>;  $Q_{взр}$  – теплота взрыва, ккал/кг;  $V$  – объем газообразных продуктов взрыва, л/кг.

В качестве примера рассмотрим применение данной методики для оценки степени реализации потенциальной энергии при взрыве смесей АС-ДТ-ТНТ (тротил). Результаты расчетов, полученные с использованием экспресс-метода, приведены в табл.2. Анализ приведенных данных показывает, что для рассматриваемых смесей выполня-

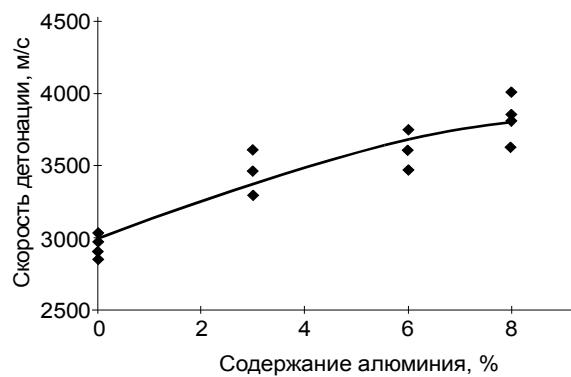


Рис.3. Зависимость скорости детонации от содержания алюминия в смесях АС-ДТ

## Расчетные энергетические и детонационные характеристики различных типов ВВ

Состав ВВ, %	Плотность, * г/см <sup>3</sup>	Теплота взрыва, ккал/кг	Объем газов, л/кг	Расчетная скорость детонации, м/с
ТНТ-21; АС-79	0,92	1031	893,4	5493,8
ТНТ-20; АС-79,67; ДТ-0,33	0,82	1032	897,2	5190,4
ТНТ-15; АС-83,38; ДТ-1,62	0,82	1007	916,6	5186,4
ТНТ-10; АС-87,1; ДТ-2,9	0,82	981,6	935,7	5180,1
ТНТ-5; АС-90,81; ДТ-4, 19	0,81	955,7	955,1	5141,4
АС-94,5; ДТ-5,5	0,8	930,3	974,2	5101,7

\* Экспериментальные значения

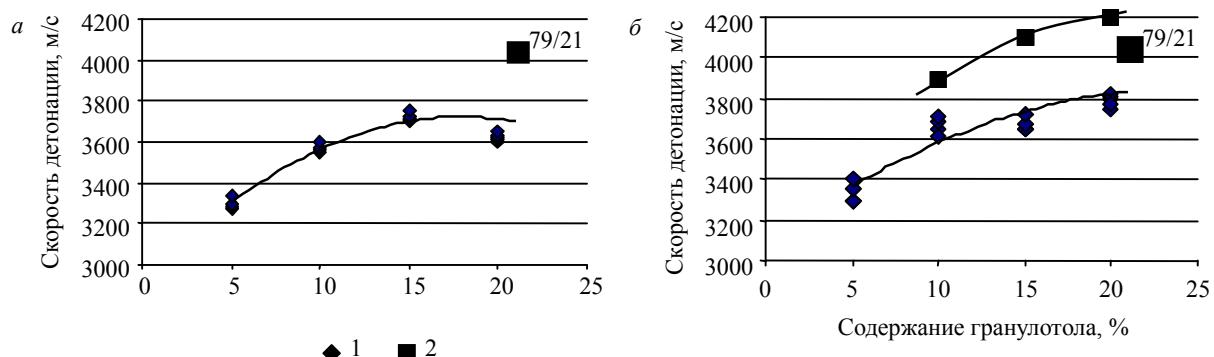


Рис.4. Скорость детонации смесей ТНТ-АС-ДТ в зарядах диаметром 100 мм (1) и в скважинах диаметром 250 мм (2)

ется условие  $D^2 \sim Q_{\text{взр}}$ , а их соотношение ориентировочно можно определить по зависимости  $Q_{\text{взр}} = 36,4D^2$  (где  $D$  – скорость детонации, км/с).

Для выявления реальных детонационных и энергетических характеристик ВВ были проведены испытания в полигонных и натурных условиях. В первой серии экспериментов для их оценки были выбраны составы с содержанием гранулированного тротила крупностью 2-5 мм от 5 до 20 % (рис.4, а), а во второй – с крупностью тротила 1-2 мм при том же процентном соотношении (рис.4, б). В качестве окислителя была использована пористая аммиачная селитра ОАО «Акрон» со средним размером гранул 1,78 мм. Скорость детонации измеряли на двух базах, расположенных на удалении не менее 10 диаметров заряда от плоскости инициирования. Длина зарядов изменялась от 15 до 24 диаметров заряда. В экспериментах использовали стальные трубы диаметром 100 мм. Из рис.4, а видно, что

при уменьшении содержания тротила с 15 до 5 % в обоих случаях наблюдается снижение скорости детонации ВВ, причем скорости детонации далеки от расчетных.

Исходя из экспериментальных данных следует, что тротил все-таки является основным компонентом, определяющим скорость детонации смесей ТНТ-АС-ДТ. Наиболее высокая скорость детонации характерна для граммонита 79/21, изготовленного из гранул селитры с использованием чешуек тротила. При уменьшении крупности тротила до 1-2 мм происходит заметное повышение скорости детонации. Это особенно характерно для смесей, содержащих 15-20 % тротила.

В результате замеров скорости детонации смесей ТНТ-АС-ДТ в зарядах диаметром 250 мм в натурных условиях установлено, что имеет место та же тенденция увеличения скорости детонации с возрастанием доли содержания тротила (рис.4, б), а использование в смесях тротила крупностью

1-2 мм приводит к повышению скорости детонации до уровня граммонита 79/21.

Количественные данные по реализации потенциальной энергии ВВ во фронте детонационной волны были получены с использованием соотношения  $D^2 \sim Q_{\text{взр}}$ . Из табл.3 следует, что в скважинах диаметром 100 мм выделяется 40-50 % от полной энергии смесей ТНТ-АС-ДТ. При взрыве в скважинах 250 мм реализация потенциальной энергии достигает 61 %, что хорошо согласуется с известными данными о степени завершенности химических реакций, которая для гранулированных и суспензионных ВВ составляет 0,5-0,7.

Таблица 3

**Степень реализации потенциальной энергии смесей ТНТ-АС-ДТ в зависимости от компонентного состава и диаметра заряда, %**

Состав ВВ, %	Смесь с тротилом крупностью, мм	
	2-5	1-2
ТНТ-5; АС-90,81 (пористая); ДТ-4,19	41	41
ТНТ-10; АС-87,1 (пористая); ДТ-2,9	45	50
ТНТ-15; АС-83,38 (пористая); ДТ-1,62	49/60,5	51
ТНТ-20; АС-79,67 (пористая); ДТ-0,33	47/61	52
ТНТ-21(чешуйки); АС-79 (гранулы)	—	52
Граммонит 10-АП	—	—/56
Граммонит 15-АП	—	—/64

*Примечание.* В числителе и знаменателе для диаметра заряда соответственно 100 и 250 мм.

**Методика измерения количества ядовитых газов, образующихся от взрыва ВВ.** Особую сложность представляет оценка количества ядовитых газов, образующихся при взрыве ВВ. Это стало особенно актуальным после решения Ростехнадзора об обязательном проведении экологической экспертизы всех применяемых взрывчатых веществ.

Для определения количества токсичных газов, образующихся при взрыве ВВ, используются в основном лабораторные методы взрывания небольших зарядов в стальных цилиндрах с глухим днищем и съемной крышкой, носящих название бомб (бомбы Долгова, Бихеля, Апина и др.). Они предназначены для экспериментального определе-

ния состава продуктов взрыва индивидуальных ВВ.

Современные грубодисперсные ВВ имеют низкую чувствительность и большой критический диаметр, поэтому для организации стационарного детонационного процесса необходимо работать с зарядами большой массы, что невозможно осуществить в лабораторных условиях. Для оценки газовой вредности грубодисперсных ВВ наиболее приемлем метод, разработанный в ВостНИИ. Для этих целей изготовлена герметичная взрывная камера, в которой можно взрывать заряды массой до 1 кг ВВ. Однако данный метод также обладает существенными недостатками, так как приходится работать практически с открытыми зарядами ВВ. Более точные результаты получаются при определении состава газообразных продуктов взрыва ВВ с использованием специальных взрывных камер, позволяющих воспроизводить реальные условия взрыва.

С другой стороны, на сегодняшний день нет единого мнения по количественным параметрам взрывания при определении газовой вредности грубодисперсных ВВ, таких как: масса взываемого ВВ, тип применяемой оболочки (открытый заряд, в бумажной оболочке, асбестоцементных или стальных трубах), плотность заряжания, наличие забойки. От этих параметров существенным образом зависит полнота протекания детонационного процесса и, как следствие, количество образовавшихся ядовитых газов.

Таким образом, исследование различных сочетаний указанных параметров позволит выработать наиболее приемлемое решение при оценке газовой вредности промышленных ВВ.

Нами разработан комбинированный метод для исследования количества токсичных газов, выделяющихся при взрывах различных видов ВВ, который реализован в условиях подземного испытательного полигона (см. рис.1). Суть метода заключается в следующем: с помощью двух изолирующих железобетонных перемычек создается испытательная камера, в камере производится взрыв заряда ВВ, а после взрыва анализ газов осуществляется по бескамерной схеме.

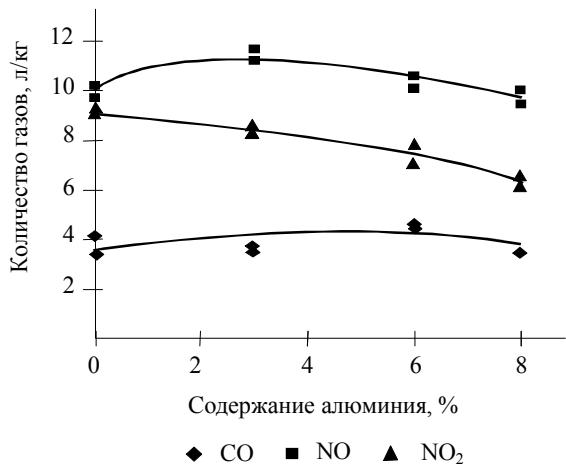


Рис.5. Зависимость количества ядовитых газов в продуктах взрыва от содержания алюминия в смесях АС-ДТ

Нами для этих целей использовался многокомпонентный газоанализатор «Каскад-312.4» (производство ЗАО «ОПТЭК», Санкт-Петербург), позволяющий измерять в широком диапазоне одновременно массовую концентрацию окиси углерода (CO), окиси (NO) и двуокиси азота (NO<sub>2</sub>), а также производить контроль содержания в воздухе кислорода, углекислого газа и температуры воздуха.

Проведение замеров токсичных газов производится по следующей схеме. В проеме окна стальной двери первой железобетонной перемычки устанавливали зонд для отбора проб газа. Затем закрывали стальную дверь второй железобетонной перемычки и производили взрыв заряда ВВ в различных оболочках. После взрыва заряда ВВ включали одновременно нагнетательный и всасывающий вентиляторы и начинали непрерывные измерения концентрации газов.

Измерения продолжали до тех пор, пока концентрация не уменьшалась до уровня порога чувствительности газоанализатора. После проведения измерений, с учетом известного количества воздуха, подаваемого в камеру, и массы ВВ, с помощью специально разработанной программы производили численное интегрирование по формуле

$$V = \int_0^Q CdQ, \quad (2)$$

где  $C$  – концентрация исследуемого газа;  $Q$  – объем воздуха прокачанного вентиляционной установкой.

В результате получали объем окиси углерода, окиси и двуокиси азота, выделяющихся при взрыве 1 кг ВВ.

Разработанный метод позволяет оперативно и качественно оценивать газовую вредность промышленных ВВ. Замеры количества ядовитых газов показали, что с увеличением содержания алюминия в смесях АС-ДТ происходит снижение их доли в продуктах взрыва, что говорит о более полном протекании химических реакций (рис.5).

**Методика определения относительного взрывного эффекта различных ВВ с помощью измерительных стальных колец.** Основные характеристики взрывчатых веществ – бризантное (местное) и фугасное (общее) действие взрыва.

Бризантность непосредственно измеряется подрывом стандартной навески ВВ массой 20 г в базальтовом кубическом блоке ребром 150 мм, помещенном в стальной контейнер; определяют выход дробленой фракции. Однако такой способ не всегда удобен, и бризантность чаще оценивают косвенными методами: путем измерения импульса взрыва по степени обжатия свинцового цилиндра, медного крешера или по отклонению баллистического маятника.

Наиболее распространенный метод измерения бризантности – по Гессу – обжатие свинцового цилиндра. Бризантность, измеренная этим методом, обычно составляет 7-30 мм. Существуют также различные вариации метода.

Однако все указанные методы не позволяют оценивать бризантность мощных и смесевых ВВ из-за их большого критического диаметра, что требует применения больших зарядов ВВ. По этим причинам в исследованиях часто используют различные видоизмененные пробы Гесса. Например, гранулированные смесевые ВВ испытывают путем обжатия свинцового столбика, помещенного в стальное кольцо, что увеличивает степень его обжатия.

Также были сделаны попытки определения бризантности по пробиванию сталь-

ной плиты. Но еще в своих ранних работах М.А.Садовский показал, что эти методы не дают полного представления о бризантности, так как время, в течение которого возмущения, вызванные взрывом, охватывают всю область местного действия, будут заведомо меньше полного времени действия давления взрыва.

На сегодняшний день наибольшее распространение определения относительной работоспособности получил метод воронкообразования при взрыве определенного заряда в песке. Однако этот метод также обладает существенными недостатками, так как на форму воронки и ее размер существенным образом будут влиять влажность песка и его дисперсный состав. Наибольшее влияние на размер воронки выброса будет оказывать объем выделившихся при взрыве газов. Поэтому в научно-технической литературе нередко можно встретить сравнительные результаты испытаний, в которых ВВ с меньшими энергетическими характеристиками, но большим объемом газов по работоспособности представляют выше, чем граммонит 79/21, который, как правило, принимают за эталонное ВВ.

Также известны методы определения работоспособности по измерению импульса ударной волны и оценке развития газового пузыря при взрыве заряда в аквариуме с водой и взрыве открытого заряда. Первый метод дает положительные результаты, но требует создания больших бассейнов, чтобы исключить влияние отраженных волн от дна и его бортов, а при взрыве открытого заряда результаты наблюдений значительно отличаются друг от друга из-за явления разброса поверхностного слоя заряда, при котором часть взрывчатого вещества не успевает детонировать и передать свою энергию ударной волне. Кроме того, при измерении импульса ударной волны датчики давления необходимо располагать в непосредственной близости от заряда, что приводит к их разрушению. Но и самое главное – многие промышленные смесевые взрывчатые вещества вообще не взрываются в открытом заряде.

Нами предложен оперативный метод определения бризантного действия, осно-

ванный на расширении стального кольца, надетого на стальную трубу со взрывчатым веществом. В результате многочисленных экспериментов было выявлено, что измерительное кольцо необходимо изготавливать из стали 45 при соотношении внутреннего диаметра к внешнему 1:(2,5-3,0). Сталь 45 была выбрана из тех соображений, что она обладает довольно значительным относительным удлинением (16 %) и большим сопротивлением на разрыв. Внутренний диаметр определяется диаметром взываемой трубы. Проведенные эксперименты также показали, что для того, чтобы обеспечить сохранность измерительного кольца, необходимо использовать достаточно прочные и толстостенные трубы. Для грубодисперсных ВВ этим условиям отвечают трубы с внутренним диаметром 45 мм и толщиной стенки 10 мм. Нами применялись бесшовные трубы с внутренним диаметром 45 мм и внешним – 64 мм, выполненные из стали марки 20. Место размещения стального кольца на трубе определялось действием максимального импульса взрыва на боковую поверхность. По данным Ф.А.Баума, максимальный импульс для детонации заряда в открытой трубе достигается на расстоянии 0,54-0,6 длины трубы от начала инициирования, что было и принято за основу при проведении экспериментов. Кроме оценки степени расширения стального кольца в этом методе предусмотрено измерение скорости детонации на участке расположения кольца.

В качестве примера на рис.6 приведены результаты сравнительной оценки работоспособности алюминизированных ВВ с различными типами порошков алюминия и их содержанием в составах. Полученные данные о деформировании стальных колец убедительно свидетельствуют о разной полной работе взрыва в зависимости от вида ВВ.

Сравнение относительной работоспособности можно производить по отношению объемов образовавшихся полостей при взрыве различных ВВ по отношению к аммониту 6ЖВ. С другой стороны, относительную работоспособность можно определить по результатам разрушения стальных

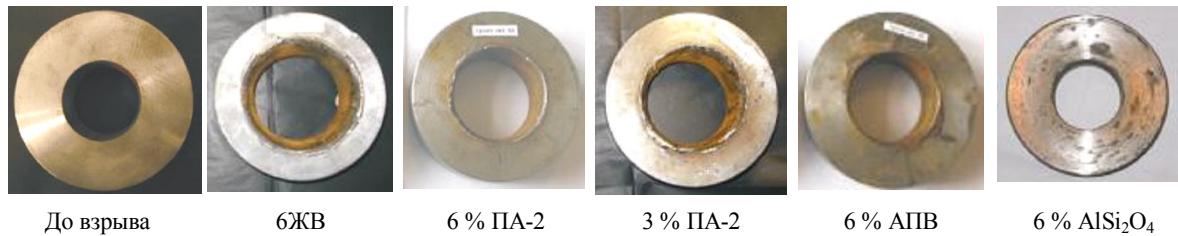


Рис.6. Результаты расширения измерительных колец после взрыва различных составов ВВ



Рис.7. Результаты разрушения стальных колец при взрыве различных составов ВВ

колец. Для этих целей были использованы тонкостенные трубы, что позволило довести измерительные кольца до разрушения.

Были выполнены сравнительные испытания граммонита 79/21, гранулита АС-8, смеси АС-ДТ и смесей на порошке силикоалюминия. Из рис.7 следует, что наибольшим дробящим действием обладает граммонит 79/21, на втором месте стоит гранулит АС-8, на третьем – гранулит 5МП на МПАС с 6-процентным содержанием силикоалюминия крупностью 150-300 мкм и на четвертом – гранулит 5МП с 6-процентным содержанием алюминиевого порошка ПА-2.

**Заключение.** Совместно с ОАО «Апатит» создан и оснащен современной аппаратурой подземный испытательный полигон и разработан комплексный метод оценки энергетических характеристик и относительной

взрывной эффективности современных промышленных ВВ. Метод основан на изучении детонационных и газовых характеристик, оценке степени высвобождения потенциальной энергии в зоне реакции детонационной волны и позволяет изучать вышеуказанные параметры в едином экспериментальном цикле, что обеспечивает качественно новый уровень испытаний и аттестации современных взрывчатых материалов на безопасность, эффективность и экологическую чистоту.

Горный институт КНЦ РАН совместно с ОАО «Апатит» может производить исследования и испытания ВВ по заказам других предприятий. В данном случае полигону должен быть придан статус регионального или федерального объекта, а разработанные методики утверждены в соответствующих инстанциях.