

П.А. БРАГИН
С.А. ГОРИНОВ
И.Ю. МАСЛОВ

**ОПЕРАТИВНЫЕ
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
ПОЛНОТЫ
ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ
ПРИ ВЗРЫВЕ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ
МЕСТНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

**ГОРНЫЙ
ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
БЮЛЛЕТЕНЬ № 9
СПЕЦИАЛЬНЫЙ
ВЫПУСК 35**



**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»**

П.А. Брагин
С.А. Горинов
И.Ю. Маслов

**ОПЕРАТИВНЫЕ
МЕТОДЫ ОЦЕНКИ
ПОЛНОТЫ
ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ
ПРИ ВЗРЫВЕ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ
МЕСТНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

ГОРНЫЙ
ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЙ
БЮЛЛЕТЕНЬ № 9
СПЕЦИАЛЬНЫЙ
ВЫПУСК 35

МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ГОРНАЯ КНИГА»
2015



Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых» СанПиН 1.2.1253-03, утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124-94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 77.99.60.953.Д.014367.12.14

Брагин П.А., Горинов С.А., Маслов И.Ю.

Оперативные методы оценки полноты тепловыделения при взрыве промышленных ВВ местного производства. Отдельные статьи: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2015. — № 9 (специальный выпуск 35). — 32 с. — М.: Издательство «Горная книга»

ISSN 0236-1493

Приведены методики полевого экспериментально-аналитического определения полноты тепловыделения при взрыве зарядов промышленных ВВ местного производства. Экспериментально показано, что при детонации промышленных ВВ местного производства теплота фактического тепловыделения ниже теоретической на 20—40 %. Экспресс-оценка полноты тепловыделения при взрыве ВВ позволяет более точно осуществлять проектирование буровзрывных работ, что важно для организаций, выполняющих данные работы, и более объективно оценивать качество изготавливаемых на горном предприятии ВВ, что важно для организаций, осуществляющих экспертный контроль за качеством ВВ.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, добыча, горное предприятие, подводный взрыв-тест, буровзрывные работы.

УДК 662.2:622.81

ISSN 0236-1493

© П.А. Брагин, С.А. Горинов,

И.Ю. Маслов, 2015

© Издательство «Горная книга», 2015

© Дизайн книги. Издательство

«Горная книга», 2015

ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОЛНОТЫ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ МЕСТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Приведены методики полевого экспериментально-аналитического определения полноты тепловыделения при взрыве зарядов промышленных ВВ местного производства. Экспериментально показано, что при детонации промышленных ВВ местного производства теплота фактического тепловыделения ниже теоретической на 20—40 %. Экспресс-оценка полноты тепловыделения при взрыве ВВ позволяет более точно осуществлять проектирование буровзрывных работ, что важно для организаций, выполняющих данные работы, и более объективно оценивать качество изготавливаемых на горном предприятии ВВ, что важно для организаций, осуществляющих экспертный контроль за качеством ВВ.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, добыча, горное предприятие, подводный взрыв-тест, буровзрывные работы.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ В настоящее время при взрывной отбойке горной массы широкое распространение получили взрывчатые вещества, изготавливаемые непосредственно на местах применения. Это позволяет снизить затраты на взрывные работы, повысить их безопасность и уменьшить риски, связанные с перевозкой и хранением штатных ВВ.

Однако при изготовлении промышленных ВВ для взрывной отбойки на горнодобывающих предприятиях в силу ряда технологических, квалификационных и других особенностей сложно обеспечить постоянство качества изготавливаемых ВВ. Особенно это касается горнодобывающих предприятий в труднодоступных и малообжитых районах Полярного Урала, Восточной Сибири и Дальнего Востока. Значительная удаленность этих предприятий от обжитых районов страны и отсутствие хорошей транспортной инфраструктуры неизбежно приводит к сложности поставок сырья (полуфабрикатов) надлежащего качества для производства ВВ. Это безусловно отражается на конечном качестве ВВ, в том числе на полноте тепловыделения при взрыве данных ВВ.

Значения теплоты взрыва применяемых ВВ используются в современных методиках расчета параметров БВР [1-8]. Поэтому знание фактической величины тепловой энергии, выделяющейся при взрыве заряда ВВ, является очень важным при проектировании буровзрывных работ.

В виду значительных критических и предельных диаметров современных смесевых и водосодержащих ВВ, изготавливаемых на местах применения, прямое измерение теплоты взрыва в калориметрической бомбе невозможно, т.к. необходимо взрывать заряды весом 8-10 кг и более.

Экспериментальная оценка разрушительных свойств таких ВВ вышла за рамки традиционных лабораторий и переместилась на полигоны и (или) непосредственно на производство (опытно-промышленные взрывы) [9, 10].

Применение экспериментального метода по измерению или оценке энергии Гарнея (метод «тест-цилиндра» [11, 12]) возможно только в условиях стационарного хорошо оборудованного полигона, обслуживаемого высококвалифицированными специалистами. При этом такой полигон должен быть оснащен:

- или дорогостоящими приборами импульсной рентгено-съемки [11];
- или уникальной измерительной аппаратурой (измерительный блок, снабженный игольчатыми контактами [12]);
- или сам по себе быть уникальным (специально подготовленная подземная изолированная выработка, оснащенная аппаратурой по измерению скорости детонации и количественному анализу газообразных продуктов взрыва [13]).

Организация полигона, способного осуществлять оценку или определение энергии Гарнея целесообразно организовывать в научных центрах по совершенствованию промышленных ВВ, но никак не для регулярного экспресс-контроля за качеством выпускаемого на горном предприятии ВВ.

Применение метода воронкообразования при тест-взрыве в горной породе [10] или в песчаной ванне [4-6] в случае с широко распространенными наливными ЭВВ имеют следующие сложности:

- диаметр 76 мм для тест-заряда массой 3,63 кг или размеры сосредоточенного заряда 4,5 кг [10] могут быть недостаточными для реализации в них детонации с полным разложением ЭВВ;

— наличие даже двух полностью идентичных участка горных пород является всегда проблемным вопросом даже в пределах одного полигона;

— предполагаемое возбуждение в тест-зарядах ЭВВ пересажой детонации [6] должно быть инструментально фиксируемым или по скорости детонационного процесса, или по замеру количества ядовитых газов;

— размеры песчаных ванн для проведения тест-взрывов должны быть достаточно велики во избежание влияния плотных грунтов дна и бортов ванны на характер выброса песка при взрыве.

Применение подводных взрыв-тестов [14]:

— требует очень большого водоема и специальной измерительной аппаратуры;

— не обеспечивает необходимую степень расширения взрывных газов [12] (при взрыве в горных породах наблюдается 10-20-кратное увеличение объемов взрывных газов до окончания процесса их эффективного разрушения среды [11], а при взрыве в воде приборами фиксируется практически 1000-кратное увеличение).

Определенный интерес для экспресс-тестов представляет методика «ВостНИИ» по обжатию стандартного свинцового крешера Гесса через массивную наковальню и воздушный промежуток, показавшая свою работоспособность в ряде экспериментов [15, 16]. Однако ограничение массы ВВ при тест-взрыве величиной 1 кг делает данную методику малоприменимой при оценке работоспособности ВВ с критическим диаметром более 60 мм.

В настоящей работе рассматриваются методы оперативной оценки полноты тепловыделения при взрыве промышленных ВВ местного производства, которые осуществимы в условиях даже удаленных и труднодоступных горных предприятий.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ Полагаем, что поведение взрывных газов при расширении описывается двухполитропным приближением [17]:

$$P = \begin{cases} P_n \left(\frac{V_n}{V} \right)^k & \text{при } V_n \leq V \leq V^*, \\ P_n \left(\frac{V_n}{V^*} \right)^k \left(\frac{V^*}{V} \right)^\gamma & \text{при } V > V^*, \end{cases}$$

где V_* — удельный объем продуктов взрыва в точке сопряжения политропы и адиабаты; k — показатель политропы взрывных газов; γ — коэффициент адиабаты. Согласно [17], между фактической удельной теплотой взрыва Q_v и скоростью детонации D имеется взаимосвязь:

$$Q_v = \frac{D^2}{2(n^2 - 1)}, \quad (1)$$

где n — показатель политропы взрывных газов при однополитропном описании их расширения.

Согласно [18]:

$$D^2 = \frac{2(k^2 - 1)Q_v}{1 + \frac{2(k - \gamma)}{\gamma - 1} \left(\frac{k}{k + 1} \right)^k \left(\frac{1}{k \alpha \rho_0} \right)^{k-1} - \frac{(k + 2)(k - 1)(k - n)}{n(k + 1)^2}}, \quad (2)$$

где $K_+ = 4,4$ (эмпирический коэффициент) [18]; α — удельный коловолн продуктов детонации; $\rho_{вв}$ — плотность ВВ.

На основании (1), (2) имеем следующее уравнение для определения n :

$$n^2 - 1 = \frac{k^2 - 1}{1 + \frac{2(k - \gamma)}{\gamma - 1} \left(\frac{k}{k + 1} \right)^k \left(\frac{1}{K_+ \alpha \rho_{вв}} \right)^{k-1} - \frac{(k + 2)(k - 1)(k - n)}{(k + 1)^2} n}. \quad (3)$$

Согласно [17] при оценочных расчетах можно принимать $\gamma \approx 1,25$.

Разрешая (3), на основании (1) определяем Q_v .

Полнота тепловыделения η при взрыве оценивается по формуле

$$\eta = \frac{Q_v}{Q_0}, \quad (4)$$

где Q_0 — расчетная (теоретическая) удельная теплота взрыва. Q_0 определяется из уравнения разложения вещества ВВ, которое по-

лучают методом Г.А.Авакяна [19] или в соответствии с принципом Бринкли-Вильсона [17] (дают близкие значения Q_0).

Таким образом, величина полноты тепловыделения может быть оценена, если известны плотность, скорость детонации и коэффициент политропы k .

Измерение плотности ВВ не вызывает экспериментальных затруднений. Для измерения скорости детонации широко используются приборы, основанные на непрерывном измерении сопротивления специального кабеля, помещаемого в заряд ВВ (метод «НИСД») [20].

Для измерения k предложены представленные ниже способы.

1. Метод «водяной ванны».

Опыты удобно проводить с размещением цилиндрического заряда ВВ в резервуаре с водой. Вода является средой с надежно определенной ударной адиабатой [17, 21], не вступает в экзотермическую реакцию с продуктами взрыва и легкодоступна.

Одна из возможных схем измерений представлена на рис.1. Данная схема позволяет осуществлять непрерывную фиксацию скорости разрушения измерительного кабеля, как в ВВ, так и вблизи заряда.

На участке кабеля, расположенного в заряде ВВ, измерения показывают скорость детонации взрывчатого вещества D , а на участке, расположенном в воде — скорость распространения ударной волны D_x .

Рассмотрим параметры ударной волны в воде при взрыве удлиненного безоболочечного заряда ВВ. Введем следующие обозначения: k , γ — коэффициенты политропы и адиабаты продуктов взрыва; $\rho_{вв}$, ρ_{H_2O} — плотности ВВ и воды; P_H , P_x — давления во фронте детонационной волны и фронте ударной волны в воде, соответственно; u_e — массовая скорость воды за фронтом ударной волны.

Давление в ударной волне в воде равно:

$$P_x = \rho_{H_2O} D_x u_e. \quad (5)$$

Ударную адиабату воды принимаем в виде [21]

$$D_x = 1483 + 25306 \lg \left(1 + \frac{u_e}{5190} \right) \quad (м/с). \quad (6)$$

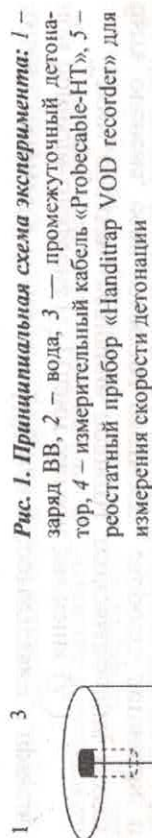


Рис. 1. Принципиальная схема эксперимента: 1 — заряд ВВ, 2 — вода, 3 — промежуточный детонатор, 4 — измерительный кабель «Probable-NT», 5 — реостатный прибор «Handitar VOD recorder» для измерения скорости детонации

Скорость движения частиц воды под действием продуктов взрыва при скольжении ударе может быть найдена из выражения [17, 21]

$$u_e = \frac{2kD}{k^2 - 1} \left(1 - \left(\frac{P_x}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right) \quad (7)$$

Учитывая, что [17, 21] $P_H = \frac{P_{BB} D^2}{k+1}$, на основании (5)–(7) получаем следующее уравнение для определения коэффициента поlitропы продуктов взрыва k :

$$\frac{1}{k+1} \cdot \left(1 - \frac{k^2 - 1}{2k} z \right)^{\frac{2k}{k-1}} = \frac{1483 + 25306 \lg \left(1 + \frac{D}{5190} z \right)}{P_{BB} D_{BB}} \quad (8)$$

$$\text{где } z = \frac{u_e}{D} = \frac{5190}{D} \left(10^{\frac{D_x - 1483}{25306}} - 1 \right).$$

Уравнение (8) решается любым численным методом.

2. Метод «пластины-свидетеля»

В основе данного метода лежит фиксация разрушений в толстой металлической пластине при торцевом воздействии на нее в плотную примыкающего цилиндрического заряда испытываемого ВВ. Длина заряда составляет 6–10 диаметров заряда.

Иницирование заряда осуществляется от удаленного от пластины конца заряда.

Квадратная пластина (размером $l \times h$, где l — длина стороны; h — толщина) располагается на горизонтальной податливой подушке (сухой просеянный крупный песок) глубиной H (см. рис. 2).

Глубина H подбирается экспериментально, чтобы избежать дополнительной деформации пластины при излишней податливости материала подушки. Полагаем, что l в 30–40 раз больше h и $l > R_0$ (определение R_0 см. ниже).

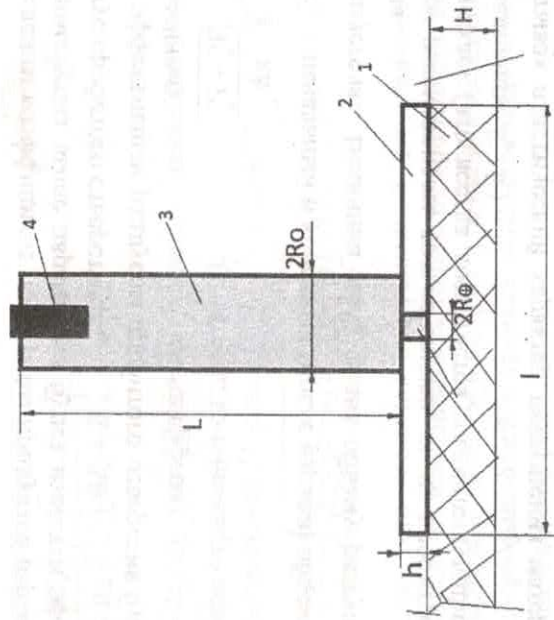


Рис. 2. Принципиальная схема эксперимента при реализации метода «пластина-свидетель»

Пластина представлена материалом, который разрушается при пластическом деформировании (металл: мягкие сорта стали, бронза, медь и т.п.) и характеризуется следующими параметрами: P_m — начальная плотность материала; σ_* — временное сопротивление; A, B, n — параметры ударной адиабаты материала пластины

$(P = P_0 + A \left(\frac{P}{P_m} \right)^n - B$, где P, P_0 — текущее и начальное давление в материале; ρ — плотность среды при давлении P). Считаем данные параметры заданными.

На пластине вертикально расположен цилиндрический «безоболочечный» заряд ВВ (оболочка имеет малую массу и прочность, например: картон), характеризующийся следующими параметрами: L, R_0 — длина и радиус заряда, соответственно; P_{Ad} — начальная плотность ВВ; k, D — коэффициент политропы продуктов взрыва и скорость детонации, соответственно; β — массовая доля твердого материала в продуктах взрыва; W — массовая скорость продуктов взрыва за фронтом детонационной волны ($W = D/(k+1)$).

Определим коэффициент политропы продуктов взрыва, если кроме упомянутых выше параметров будет известен эффективный радиус пробитого отверстия $R_{\oplus}$.

Под эффективным радиусом пробитого отверстия будем понимать величину

$$R_{\oplus} = \sqrt{\frac{V_o - V_k}{\pi h}}, \quad (9)$$

где V_o , V_k — начальный и конечный (после взрыва) объемы «пластины-свидетеля». Величина $\pi h R_{\oplus}^2$ равна объему разрушенного материала.

Будем рассматривать только случаи, когда пробитое отверстие возникает (это всегда достигается соответствующим изменением величины R_o/h).

Учитывая пластический характер разрушения материала, в качестве критерия принимаем условие [22] (энергетический принцип):

$$s \geq h \sqrt{2\sigma_s \rho_m}, \quad (10)$$

где s — величина удельного импульса на поверхности плиты, при которой происходит ее полное разрушение.

Введем дополнительные обозначения: τ — текущее время; u_x — начальная скорость смещения границы «продукты взрыва-пластина», обусловленная сжимаемостью материала пластины; D_x — скорость распространения по продуктам детонации отраженной волны сжатия. Примем момент выхода детонационной волны на границу «ВВ-пластина» — $\tau_i = 0$.

Согласно [17, 21] при набегании плоской детонационной волны на металлическую преграду начальное давление в отраженных газобразных продуктах взрыва P_x превышает давление во взрывных газах P_* на фронте падающей волны. Величина u_x находится из условия, что скорости движения продуктов взрыва и материала плиты на границе их раздела равны между собой:

$$u_x = \frac{D}{k+1} \left(1 - \sqrt{2k \frac{\vartheta - 1}{\sqrt{(k+1)\vartheta + (k-1)}}} \right) =$$

$$= \sqrt{\frac{9P_*}{\rho_m} \left(1 - \left(\frac{A}{\theta P_* + B} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}, \quad (11)$$

где $\vartheta = D_o/D_*$ (коэффициент усиления давления в продуктах взрыва при отражении от пластины).

Принимая, что D_x равно [17]:

$$D_x = \frac{D}{k+1} \left(\sqrt{\frac{k}{2} [(k+1)\vartheta + (k-1)]} - 1 \right), \quad (12)$$

и учитывая, что давление в отраженной детонационной волне слабо зависит от координаты, а только от времени, на основании [17] определяем давление в момент τ в продуктах взрыва (ПВ) в области, примыкающей к границе «ПВ-пластина» и неохваченной боковой волной разрыва:

$$P(\tau) \equiv \frac{9P_*}{\left(1 + \frac{u_x}{D_x} \right)^k \left(1 + \frac{D\tau}{L} \right)^k}, \quad (13)$$

Обозначим через $\tau_*(r)$ — время прихода боковой волны разрыва в точку на границе раздела сред, удаленную от оси заряда на расстояние r . Тогда удельный импульс, переданный материалу пластины в данном месте, равен

$$s(r) = \int_0^{\tau_*(r)} P(\tau) d\tau + 2\beta \frac{k+1}{k} P_* \tau_*(r), \quad (14)$$

где второе слагаемое учитывает упругий удар мельчайших частиц твердой фазы, содержащейся в продуктах детонации, по пластине.

$$\text{Величина } \tau_*(r) = (R_o - r)/c, \quad (15)$$

где c — скорость звука в продуктах взрыва на границе «ПВ-пластина». В оценочных расчетах принимаем:

$$c \approx \frac{kD}{k+1} \vartheta^{\frac{k-1}{2k}}. \quad (16)$$

На основании (13)–(15) (при $\frac{L}{2R_0} \geq 6$) получаем

$$s(r) = \frac{P_*(R_0 - r)}{c} \left[\frac{9}{\left(1 + \frac{u_x}{D_x}\right)^k} + \frac{2(k+1)}{k} \beta \right] \quad (16)$$

На основании экспериментальных данных по динамической сжимаемости металлов [21] можно показать, что сталь Ст.3 и медь в широком диапазоне P_* (0,5–1,0 ГПа) и k (2,5–3,0) имеет значение $9 \approx 2$. При $9 \approx 2$ величина $9/(1 + u_x/D_x)^k \approx 1,58$. Тогда на основании (10), (15), (16), для «пластин-свидетелей» из указанных материалов, получаем

$$\frac{R_{0\oplus}}{R_0} \approx 1 - \frac{1,76kh}{R_0} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_s \rho_m}}{\rho_{\text{вз}} D \left(1,58 + \frac{2(k+1)}{k} \beta\right)} \quad (17)$$

Зависимость (17) разрешается относительно k .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ. Для оценки полноты тепловыделения при детонации промышленных ВВ изготавливаемых на местах применения были проведены опытно-полигонные опыты.

1. Метод «водяной ванны»

Осуществлен взрыв 90-миллиметрового заряда эмульсионного ВВ плотностью 1,06 г/см³ в воде (см. рис. 2). Длина заряда – 1000 мм, инициатор – патрон аммонита 6ЖВ массой 200г. Оболочка заряда – полиамидная ткань. Способ сенсibilизации – гранулы пенополистирола диаметром 8–10 мм и насыпной плотностью 0,06 г/см³. Дозирование пенополистирола на смешение с эмульсией – объемное, на 3 объема эмульсии 2 объема гранул пенополистирола. Химический состав эмульсионной матрицы: раствор окислителей — 75% NH₄NO₃; 15% Ca(NO₃)₂; 10% H₂O; топливная смесь — 25% эмульгатор (РЭМ-5); 75% минеральное масло (И-20А). Процентное отношение окислителя и топливной фазы в эмульсии — 92%; 8%. Плотность эмульсии до сенсibilизации — 1,414 г/см³.

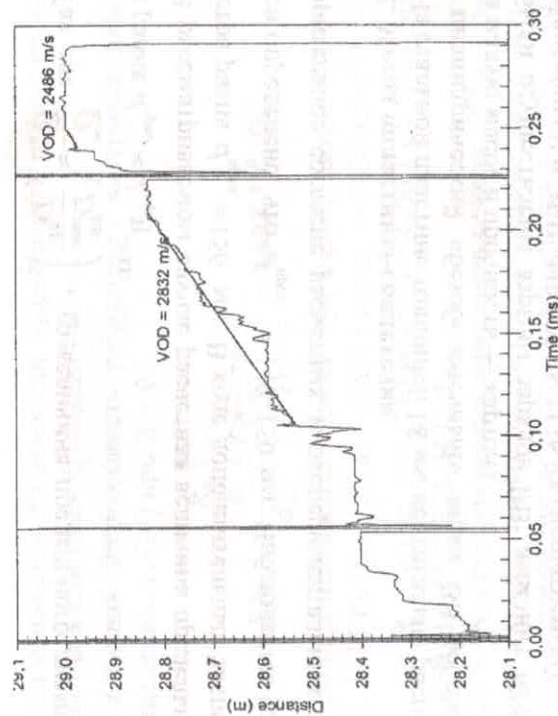


Рис. 3. Зависимость изменения длины заряда «Эмульпора», плотностью 1,06 г/см³ и диаметром 90 мм, от времени при взрыве в воде. Оболочка заряда – полиамидная ткань

Результаты измерения скорости детонации представлены на рис. 3.

На основании вышеприведенной методики расчета параметров взрывчатого процесса имеем следующее значения интересующих нас показателей: $k = 2,5$; $\eta = 1,93$; $u_e = 496$ м/с; $Q_v = 352$ ккал/кг; $Q_m = 682,1$ ккал/кг; $\eta = 0,516$.

При расчетах принимали следующие значения параметров: $\gamma = 1,25$ [17]; $\alpha = 0,45$ см³/г [18]. Величина Q_0 определена из уравнения разложения вещества ЭВВ в соответствии с принципом Бринкли-Вильсона.

Оценим корректность полученного результата.

Согласно [23] для жидких ВВ наблюдается выполнение со-

$$\text{отношения } \frac{D_{\text{ВВ}}}{D_{\text{ВВ}}^{\text{max}}} \approx \left(\frac{d_{\text{зв}}}{d_{\text{пред}}} \right)^{0,6}, \text{ где } d_{\text{зв}} - \text{диаметр заряда}$$

ВВ и предельный диаметр, соответственно; $D_{\text{ВВ}}^{\text{max}}$ – идеальная скорость детонации.

Так как $\frac{Q_v}{Q_m} \approx \left(\frac{D_{BB}}{D_{max}} \right)^2$, то величина предельного диаметра будет равна $d_{пред} \approx d_{зр} \cdot \eta^{-0,833}$.

В рассматриваемом случае расчетная величина предельного диаметра равна $d_{пред} \approx 156$ мм. В ходе дополнительных экспериментов определено, что $d_{пред} = 140-150$ мм. Наблюдается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

2. Метод «пластины-свидетеля»

На стальной пластине толщиной 18 мм вертикально располагали цилиндрический «безоболочечный» заряд ВВ (оболочка имела малую массу и прочность — картон).

Были осуществлены взрывы зарядов ВВ: аммонит № 6ЖВ (калибровочный) и ЭВВ «ИРЕГЕЛЬ 1136 Р» (испытываемый).

В ходе опытов регистрировались: плотность ВВ, скорость детонации, диаметр заряда, толщина пластины, плотность материала пластины, длина заряда, масса разрушенного материала в пробитом отверстии. Длина заряда назначалась из выполнения условия $\frac{L}{2R_0} \geq 5$.

Первоначально определялась удельная энергоемкость разрушения стали, из которой изготовлены пластины.

Для этого использовались результаты пробивания пластины при взрыве заряда аммонита № 6ЖВ (рис. 4).

Имеем следующие экспериментальные данные $M = 2,9575$ кг; $\rho_m = 7830$ кг/м³; $h = 0,018$ м; $\beta = 0$; $R_0 = 0,1$ м; $\rho_* = 1100$ кг/м³; $D = 4866,1$ м/с.

Коэффициент политропы k продуктов взрыва аммонита № 6ЖВ при плотности $\rho_* = 1100$ кг/м³ принимали равным 2,63 [18].

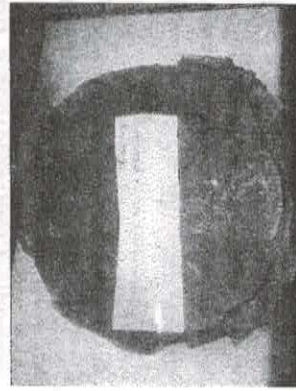


Рис. 4. Результаты пробития металлической пластины зарядом Аммонита 6ЖВ

На основании (9) находили эффективный радиус пробитого отверстия в пластине $R_0 = 0,0817$ м.

Удельная энергоемкость разрушения материала пластины определялась из (10) при $\beta = 0$.

$$\sigma_* = 0,806 \cdot \left(\frac{1 - \frac{R_0}{R_v}}{\rho_m} \right)^2 \left(\frac{\rho_{BB} D R_0}{k h} \right)^2 = 4,407 \cdot 10^8 \text{ Па.} \quad (18)$$

Экспериментальные данные при взрыве заряда ЭВВ «ИРЕГЕЛЬ 1136 Р» (рис. 5): $M = 2,8573$ кг; $\rho_m = 7830$ кг/м³; $h = 0,018$ м; $\beta = 0$; $R_0 = 0,1$ м; $\rho_* = 1330$ кг/м³; $D = 4900,1$ м/с. Химический состав ЭВВ «ИРЕГЕЛЬ 1136 Р»:

30% — гранулированная аммиачная селитра, 70% — эмульсионная матрица «Ирегель», газогенерирующая добавка в виде водного раствора нитрита натрия, концентрации 15%, в количестве необходимом для придания ЭВВ заданной плотности.

Химический состав эмульсионной матрицы: раствор окислителя — 82% NH_4NO_3 ; 18% H_2O ; топливная смесь — 30% эмульгатор (РЭМ-5); 80% дизельное топливо (марки «З»). Процентное отношение окислителя и топливной смеси в эмульсии — 92,4%; 7,6%. Плотность эмульсии до сенсibilизации — 1,31 г/см³.

Эффективный радиус пробитого отверстия в пластине равен $R_0 = 0,0804$ м.

На основании (17)–(19) определяем коэффициент политропы продуктов взрыва ИРЕГЕЛЯ:

$$k = 0,806 \cdot \left(1 - \frac{R_0}{R_v} \right) \frac{\rho_{BB} D R_0}{h \sqrt{\sigma_* \rho_m}} = 3,08. \quad (20)$$

Подставляя значение (20) в (3), определяем $n = 2,46$. Тогда на основании (1): $Q_v = 568$ ккал/кг.

При расчетах принимали следующие значения параметров: $\gamma = 1,25$ [17]; $\alpha = 0,45$ см³/г [18].

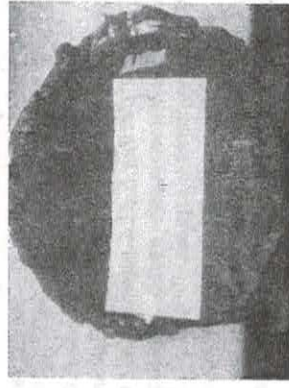


Рис. 5. Результаты пробития металлической пластины зарядом ЭВВ «ИРЕГЕЛЬ 1136 Р»

Величина $Q_d = 725$ ккал/кг определена из уравнения разложения ИРЕГЕЛЯ в соответствии с принципом Бринкли-Вильсона. Следовательно, при использовании 200-миллиметровых зарядов ИРЕГЕЛЯ коэффициент полноты тепловыделения составляет $\eta = 0,78$.

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показали, что при детонации промышленных ВВ изготавляемых на местах применения теплота фактического тепловыделения ниже теоретически рассчитанного на 20–40 %.

Разработаны методики обработки экспериментальных данных для расчета полноты тепловыделения при взрыве зарядов ВВ.

Оценка полноты тепловыделения при взрыве ВВ позволит более полно оценить качество изготавляемых на горном предприятии ВВ, что важно, как для горнодобывающих предприятий, так и для организаций, осуществляющих, как проектирование буровзрывных работ, так и экспертный контроль за качеством ВВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Мосинев В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра, 1976. — 271с.
2. Мосинев В.Н., Абрамов А.В. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород. М.: Недра, 1982. — 248с.
3. Кулузов Б.Н., Белин В.А. Проектирование и организация взрывных работ. М., изд. «Горная книга», 2012. — 416с.
4. Поляк Г.А., Левчик С.П., Кукиб Б.Н. Оценка эффективности предохранительных ВВ по результатам взрывов в песке // Взрывное дело № 68/25, М., Недра, 1970, С.111–115.
5. Кукиб Б.Н., Иоффе В.Б., Александров В.Е. Оценка работоспособности по результатам взрывов в песке // Взрывное дело № 84/41, М., Недра, 1982, С.83–89.
6. Афанасенков А.Н., Котова Л.И., Кукиб Б.Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва, 2001, Т.37, № 3, С.115–125.
7. Вайнштейн Б.И., Чернов К.С., Песоцкий М.К. Анализ методов определения работоспособности ВВ // Взрывное дело № 84/41, М., Недра, 1982, С.75–83.
8. Соснин В.А., Смирнов С.П., Сахитов Р.Х. Оценка работоспособности и полноты взрывчатого превращения эмульсионных промышленных составов // Физика горения и взрыва, 1998, Т.34, № 5, С.118–121.
9. Викторов С.Д. Детонационные характеристики ифзанитов // Ежегодный сборник V Научно-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. М., роталпринт СФТП ИФЗ АН СССР, 1974, С.18–24.

10. Демидюк Г.П. О методах оценки взрывных свойств простейших ВВ // Взрывное дело № 74/31, М., Недра, 1974, С.119–133.
11. Рабочие характеристики эмульсионных взрывчатых веществ. Кудило С., Кохличек П., Тржчинский В.А., Зеeman С. // Физика горения и взрыва, 2002, Т.38, № 4, С.95–102.
12. Nyberg U., Arvanitidis I., Olsson M., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives // Explosives and Blasting Technique. Holmberg (ed). — 2003, Swets @ Zeitlinger, Lisse, p.181–213.
13. Оценка взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ. Власова Е.А., Державец А.С., Козырев С.А. и др. // Взрывное дело № 99/56, М.: 2008, С.119–136.
14. Bjarnholt G. Suggestions on standard for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // Propellants and Explosives. 1980. V. 5, № 2/3. P.67–74.
15. Викторов С.Д., Старшинов А.В., Жамьян Ж. Экспериментальная оценка и сравнение работоспособности смесевых взрывчатых веществ различного состава. // Взрывное дело № 105/62, М.: 2011, С.142–150.
16. Определение взрывной эффективности промышленных ВВ по обжатию свиного столба через воздушный промежуток. Старшинов А.В., Литовка О.Б., Колпаков В.И., Григорьев Г.С. // Взрывное дело № 103/60, М.: 2010, С.178–188.
17. Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. — М.: Физматлит, 1959. — 800с.
18. Кулузов Б.Н., Горинов С.А. Расчет детонационных параметров аммиачно-селитренных ВВ. // ГИАБ, 2010, № 6, с.40–49.
19. Авакин Г.Л. Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ. М.: Изд-во ВИА, 1964. — 84с.
20. Метод непрерывного измерения скорости детонации зарядов промышленных ВВ. И.Ю. Маслов, В.В. Пупков и др. // Взрывное дело № 96/53, Москва, МКВД при АГН, 2006.
21. Орленко Л.П. Физика удара и взрыва. — М., Физматлит, 2008. — 304с.
22. Власов О.Е. Основы теории действия взрыва. — М.: Изд. ВИА, 1957. — 408 с.
23. Куж М.А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М., Недра, 1980. — 453с.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Брагин Павел Александрович – главный специалист по буровзрывным работам, pavelbragin83@mail.ru,
 Горинов Сергей Александрович – кандидат технических наук, akaz2006@yandex.ru,
 Маслов Илья Юрьевич – кандидат технических наук, ilmaslov@mail.ru,
 ООО «Глобал Майнинг Эксплозив-Раша».

OPERATIONAL METHODS OF EVALUATION OF HEAT LIBERATION COMPLETENESS DURING BLAST OF LOCALLY PRODUCED INDUSTRIAL EXPLOSIVES

In this study, the methods are given for experimental and analytical determination of heat liberation completeness during the blast of locally produced industrial explosives. Experiments show that the actual heat liberation is 20–40 % lower than the theoretical value during the detonation of locally produced industrial explosives. Rapid evaluation of heat liberation completeness during the blast should allow us to design drilling-and-blasting operations more accurately, which is important for organizations performing such works, and to evaluate more objectively the quality of the explosives produced at mining enterprises, that it is important for organizations, engaged on expert control of explosives produced.

Key words: explosives, mining, mining company, underwater explosion-test drilling-and-blasting.

TIMELINESS OF THE STUDY. Today, locally produced explosives are widely used in rock mass blasting. This allows reducing the costs of blasting operations, increasing operational safety and reducing risks associated with the transportation and storage of approved explosives.

However, it is difficult to ensure a consistent quality of manufactured explosives during production of industrial explosives for blasting at mining enterprises due to a number of technological, qualification and other peculiarities. This applies especially to the mining enterprises in remote and low populated areas such as Polar Urals, Eastern Siberia and the Far East. Significant remoteness of these enterprises from the populated areas of the country and the lack of good transport infrastructure inevitably leads to difficulties in the supply of raw materials (semi-finished products) of adequate quality for explosives production. This certainly affects the final quality of explosives including heat liberation completeness during the blast of such explosives.

The values of explosion heat of the applied explosives are used in modern methods for BVR parameters calculation [1–8]. Therefore,

knowing the actual value of thermal energy released during the blast of the explosive charge is very important for designing of drilling-and-blasting operations.

Due to considerable critical and cutoff diameters of modern composite and slurry explosives produced on site, direct measurement of explosion heat in calorimetric bomb is impossible, since one would need to blast charges weighing 8–10 kg and more.

Experimental evaluation of destructive properties of such explosives has gone beyond traditional laboratories and moved to field test sites and (or) directly to production plants (experimental-industrial blasts) [9, 10].

The use of the experimental method of measurement or evaluation of Gurney energy («test barrel» method [11, 12]) is only possible in a stationary well-equipped test site maintained by highly qualified specialists. At that, such test site must be either:

- equipped with expensive pulse radiography devices [11]; or
- equipped with unique measuring instrumentation (measuring unit equipped with needle contacts [12]); or
- unique itself (specially prepared isolated underground working with instrumentation for detonation velocity measurement and quantitative analysis of the gaseous products of explosion [13]).

A test site that allows carrying out the evaluation and determination of Gurney energy is advisable to be organized in scientific centers on the improvement of industrial explosives, but not for regular express control of quality of explosives produced at mining enterprises.

Application of cratering method during the test blasting of rock mass [10] or in a sand bath [4–6] in case of widespread bulk EEs is associated with the following difficulties:

- 76mm diameter for a test charge weighing 3.63kg or sizes of a concentrated 4.5kg charge [10] may be insufficient for implementation of detonation within them with complete EE decomposition;
- the presence of even two completely identical rock areas is always a problem (even within the same test site);
- the proposed excitation of overcompressed detonation in EE test charges [6] must be instrumentally lockable either by detonation process velocity, or by measurement of the amount of toxic gases;
- the sizes of sand baths for test blasts must be large enough in order to avoid the influence of firm bottom soils and bath sides on the nature of sand blowout during the blast.

The use of underwater blast tests [14]:

— requires a very large body of water and special measuring instrumentation;

— does not provide the desired degree of expansion of explosive gases [12] (during rock blasting, a 10-20-fold volume increase of explosive gases is observed before the end of their process of effective destruction of the environment [11]; and during the blast in water, devices indicate almost 1000-fold increase).

VostNII method (on compression of a standard lead Hess crasher through a massive anvil and an air gap), which has shown its performance in a number of experiments [15, 16], represents a certain interest for express tests. However, the weight limit (1 kg) of explosives during a test blast makes this method hardly suitable for evaluation of the performance of explosives with critical diameter greater than 60 mm.

This study considers methods for rapid evaluation of heat liberation completeness during the blast of locally produced industrial explosives, which are feasible even at remote and inaccessible mining enterprises.

STUDY RESULTS We assume that the behavior of explosive gases during expansion is described by two-polytropic approximation [17]:

$$P = \begin{cases} P_n \left(\frac{V_n}{V} \right)^k & \text{при } V_n \leq V \leq V_* \\ P_n \left(\frac{V_n}{V_*} \right)^k \left(\frac{V_*}{V} \right)^\gamma & \text{при } V > V_*, \end{cases}$$

where V_* is the specific volume of explosion products at the point of compound of polytropic curve and adiabatic curve; k — polytropic curve factor of explosive gases; γ — factor of adiabatic curve.

According to [17], there is a correlation between the actual specific heat of explosion and detonation velocity:

$$Q_V = \frac{D^2}{2(n^2 - 1)}, \quad (1)$$

where n is the polytropic curve factor of explosive gases in case of a single-polytropic description of their expansion.

According to [18]:

$$D^2 = \frac{2(k^2 - 1)Q_V}{1 + \frac{2(k - \gamma)}{\gamma - 1} \left(\frac{k}{k+1} \right)^k \left(\frac{1}{K_\alpha \rho_{ex}} \right)^{k-1} - \frac{(k+2)(k-1)(k-n)}{n(k+1)^2}}, \quad (2)$$

where $K_\alpha = 4.4$ (empirical coefficient) [18]; α — specific covolume of detonation products; ρ_{ex} — density of the explosive.

On the basis of (1) and (2), we have the following equation to determine n :

$$n^2 - 1 = \frac{k^2 - 1}{1 + \frac{2(k - \gamma)}{\gamma - 1} \left(\frac{k}{k+1} \right)^k \left(\frac{1}{K_\alpha \rho_{ex}} \right)^{k-1} - \frac{(k+2)(k-1)(k-n)}{(k+1)^2} n} \quad (3)$$

According to [17], we can take $\gamma \approx 1.25$ during estimations.

By solving (3) on the basis of (1), we define Q_V .

Heat liberation completeness η during the blast is estimated according to the formula:

$$\eta = \frac{Q_V}{Q_0}, \quad (4)$$

where Q_V — the calculated (theoretical) specific heat of explosion. Q_0 is determined from the equation of explosive matter decomposition, which is derived by method of G.A. Avakyan [19] or in accordance with the principle of Brinkley-Wilson [17] (giving approximate values of Q_V).

Thus, the value of heat liberation completeness can be estimated, if one knows the density, the detonation velocity and the polytropic curve factor k .

Measurement of density of the explosive causes no experimental difficulties. For measurement of the velocity of detonation, devices are widely used that are based on the continuous measurement of resistance of a special cable placed inside the explosive charge (NMDS method) [20].

The following methods are proposed to measure k .

1. The «water bath» method

Experiments are convenient to carry out with the placement of the cylindrical explosive charge in a water tank. Water is the environment with the reliably determined Hugoniot adiabat [17, 21] and eas-

ily available. Besides, it does not react exothermically with the explosion products.

One of the possible schemes of measurement is shown in Figure 1. This scheme allows us to continuously fix the destruction velocity of the measuring cable (both inside the explosive and near the charge).

On the cable run located inside the explosive charge, measurements show detonation velocity D , and on the cable run located in the water — shock wave propagation velocity D_x .

Let's consider the parameters of the shock wave in the water during the blast of an elongated shell-less explosive charge. We introduce the following designations: k, γ — factors of polytropic curve and adiabatic curve (respectively) of explosion products; ρ_{ex}, ρ_{H_2O} — densities of the explosive and the water (respectively); P_H, P_x — pressures in the detonation wave front and the shock wave front in the water (respectively); u_e — mass velocity of water behind the shock wave front. The pressure in the shock wave in water is equal to:

$$P_x = \rho_{H_2O} D_x u_e \quad (5)$$

Hugoniot adiabat of water is taken as [21]

$$D_x = 1483 + 25306 \lg \left(1 + \frac{u_e}{5190} \right) \quad (m/s), \quad (6)$$

The velocity of the water particles under the influence of explosion products during the sliding impact can be found from the expression [17, 21].

$$u_e = \frac{2kD}{k^2 - 1} \left(1 - \left(\frac{P_x}{P_H} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right), \quad (7)$$

Considering that [17, 21] $P_H = \frac{\rho_{ex} D^2}{k+1}$,

we get the following equation (on the basis of (5)-(7)) to determine the polytropic curve factor of explosion products k :

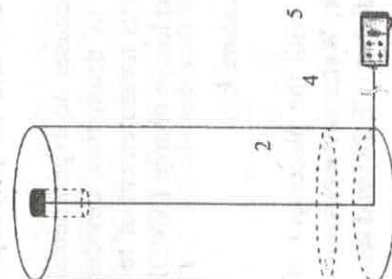


Figure 1. Schematic diagram of the experiment: 1 — explosive charge, 2 — water, 3 — booster, 4 — Proboscable HT measuring cable, 5 — «Handitrap VOD recorder» rheostatic device for detonation velocity measurement

$$\frac{1}{k+1} \left(1 - \frac{k^2 - 1}{2k} z \right)^{\frac{2k}{k-1}} = \frac{1483 + 25306 \lg \left(1 + \frac{D}{5190} z \right)}{D_{BB} \rho_{BB}}, \quad (8)$$

$$\text{where } z = \frac{u_e}{D} = \frac{5190}{D} \left(10^{\frac{D_x - 1483}{25306}} - 1 \right).$$

Equation (8) may be solved by any numerical method.

2. The «witness-plate» method

The basis of this method is the fixation of destruction of a thick metal plate during its end exposure to an immediately adjacent cylindrical charge of the tested explosive. The charge length is from 6 to 10 charge diameters.

Initiation of the charge is carried out from the charge end opposite to the plate.

The square plate (with dimensions $l \times h$, where l is side length, and h is thickness) is located on the horizontal supple cushion (sifted dry coarse sand) with depth H (see Figure 2).

Depth H is chosen experimentally in order to avoid extra deformation of the plate in case of excessive suppleness of cushion material. We suppose that l is 30-40 times more than h , and $l \gg R_0$ (definition of R_0 is given below).

The plate is represented by the material, which is destroyed by plastic deformation (metal: soft grade steel, bronze, copper, etc.) and described by the following parameters: ρ_m — initial density of the material; σ , — ultimate strength; A, B, n — parameters of Hugoniot adiabat of the plate material ($P = P_0 + A \left(\frac{P}{\rho_m} \right)^n - B$, where P and P_0 are the current

and the initial pressures in the material (respectively); ρ is the medium density at pressure P). We assume that these parameters are given.

A cylindrical «shell-less» explosive charge is vertically placed on the plate (the shell has a small mass and durability, for example, cardboard), it is described by the following parameters: L, R_0 — length and radius of the charge, respectively; ρ_{ex} — the initial density of the explosive; k, D — polytropic curve factor of the explosion products and detonation velocity, respectively; β — mass content of solid material in the explosion products; W — mass velocity of the explosion products behind the detonation wave front ($W = D/(k+1)$).

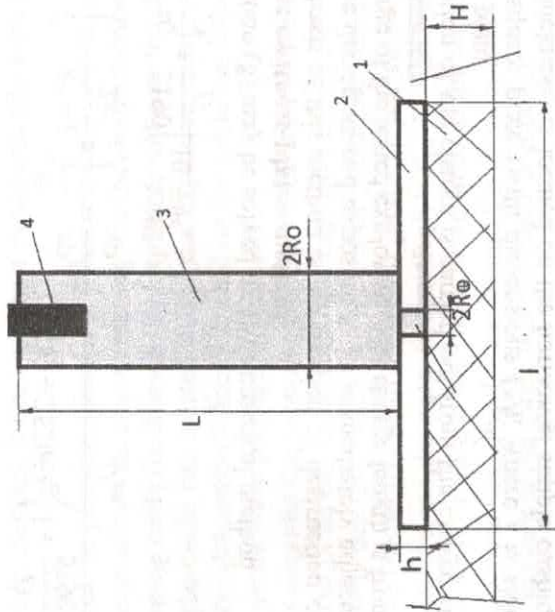


Figure 2. Schematic diagram of the experiment during implementation of the «plate punching» method

Let us define the polytropic curve factor of the explosion products, if the effective radius of the punched hole $R_{\oplus}$ will be known in addition to the above-mentioned parameters.

By the effective radius of the punched hole, we mean the value

$$R_{\oplus} = \sqrt{\frac{V_o - V_k}{\pi h}}, \quad (9)$$

where V_o , V_k are the initial and the final (after the explosion) volumes of «witness-plate». $\pi h R_{\oplus}^2$ value is equal to the volume of destroyed material.

We will consider only those cases, when the punched hole appears (it is always achieved by the corresponding alteration of R_o/h value).

Considering the plastic nature of material destruction, we take the following condition [22] (the energy principle) as the criterion:

$$s \geq h\sqrt{2\sigma\rho_m}, \quad (10)$$

where s is the value of specific impulse on the plate surface, at which its complete destruction takes place.

Let's introduce some additional designations: τ - current time; u_x - initial displacement velocity of the «explosion products-plate» border due to the compressibility of the plate material; D_x - the velocity of propagation of the reflected compression wave in detonation products. Let us take the moment of detonation wave arrival at the «explosive-plate» border as $\tau_i = 0$.

According to [17, 21], during the run up of detonation wave onto the metal barrier, the initial pressure in the reflected gaseous explosion products P_x exceeds the pressure in explosive gases P_o on the front of the incident wave. The value of u_x may be found from the condition that the movement velocities of explosion products and plate material at their interface are equal to:

$$u_x = \frac{D}{k+1} \left(1 - \sqrt{2k} \frac{\vartheta - 1}{\sqrt{(k+1)\vartheta + (k-1)}} \right) = \sqrt{\frac{\vartheta P_o}{\rho_m} \left(1 - \left(\frac{A}{\vartheta P_o + B} \right)^{\frac{1}{n}} \right)}, \quad (11)$$

where $\vartheta = D_o/D_x$ (pressure gain in the explosion products during reflection from the plate).

Assuming that D_x equals to [17]:

$$D_x = \frac{D}{k+1} \sqrt{\frac{k}{2} [(k+1)\vartheta + (k-1)] - 1}, \quad (12)$$

and considering that the pressure in the reflected detonation wave weakly depends on coordinates, but only depends on time, based on [17], we define the pressure at the time τ in the explosion products (EP) in the area adjacent to the «EP-plate» border and unenclosed by lateral discharge wave:

$$P(\tau) \cong \frac{\vartheta P_o}{\left(1 + \frac{u_x}{D_x} \right)^k} \frac{1}{\left(1 + \frac{D\tau}{L} \right)^k}. \quad (13)$$

We denote as $\tau_*(r)$ the arrival time of the lateral discharge wave to the point on the interface that is located at the distance r from the charge axis. Then, the specific impulse transmitted to the plate material at the given point equals to

$$s(r) = \int_0^{\tau_*(r)} P(\tau) d\tau + 2\beta \frac{k+1}{k} P_* \tau_*(r), \quad (6)$$

where the second summand gives consideration to the elastic collision with the plate of the tiniest particles of the solid phase contained in detonation products.

$$\text{The value } \tau_*(r) = (R_0 - r)/c, \quad (14)$$

where c is the speed of sound in the explosion products at the «EP-plate» border. For the estimations, we take: $c \approx \frac{kD}{k+1} g^{2k}$. (15)

Based on (13)-(15), we get (when $\frac{L}{2R_0} \geq 6$)

$$s(r) = \frac{P_*(R_0 - r)}{c} \left[\frac{9}{\left(1 + \frac{u_x}{D_x}\right)^k} + \frac{2(k+1)}{k} \beta \right]. \quad (16)$$

Based on the experimental data about the dynamic compressibility of metals [21], it can be shown that St.3 steel and copper within wide ranges of $P_*(0.5-1.0 \text{ hPa})$ and $k(2.5-3.0)$ have the value of $9 \approx 2$. At $9 \approx 2$, $9/(1 + u_x/D_x)^k \approx 1.58$. Then, based on (10), (15), (16), we obtain the following equation for «witness-plates» of the specified materials:

$$\frac{R_{\oplus}}{R_0} \approx 1 - \frac{1.76kh}{R_0} \cdot \frac{\sqrt{\sigma_m P_m}}{\rho_m D \left(1.58 + \frac{2(k+1)}{k} \beta\right)}. \quad (17)$$

Equation (17) is solved with respect to k .

DISCUSSION OF STUDY RESULTS In order to evaluate heat liberation completeness during detonation of locally produced industrial explosives some polygon experiments have been made.

1. The method of «water bath»

An explosion of 90-millimeter charge of emulsion explosive with 1.06 g/cm³ density has been carried out in the water (see Figure 2). Charge length – 1000 mm, initiator – a 200g chunk of ammonite number 6. Charge shell – polyamide fabric. Sensitization method – expanded polystyrene granules of 8-10mm diameter and 0.06 g/cm³ bulk density. Proportioning of expanded polystyrene for mixing with the emulsion – volumetric, 2 volumes of expanded polystyrene granules for 3 volume of the emulsion. Chemical composition of the emulsion matrix: the solution of oxidizing agents – 75% NH₄NO₃; 15% Ca(NO₃)₂; 10% H₂O; fuel mixture – 25% emulsifier (REM-5); 75% mineral oil (M-20A). Percentages of the oxidizer and the fuel phase of the emulsion – 92%; 8%. Emulsion density before sensitization – 1.414 g/cm³.

Results of detonation velocity measurement are shown in Figure 3.

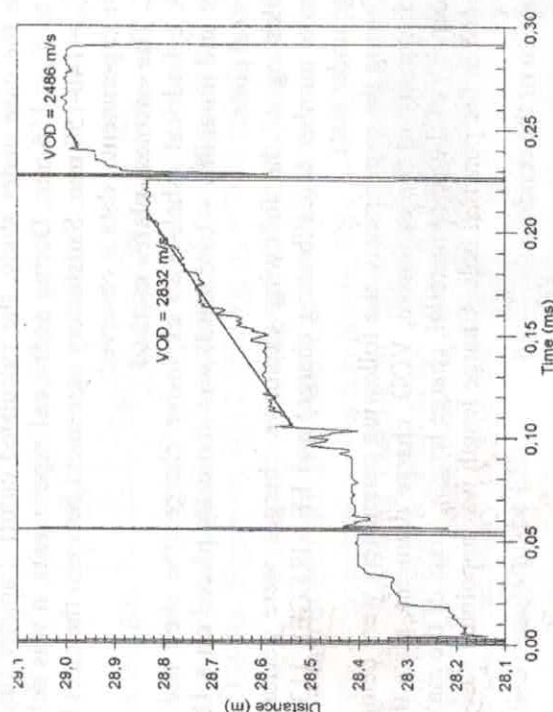


Figure 3. Time dependence of length alteration of Emulpor charge (density 1.06 g/cm³, diameter 90 mm) during explosion in water. Charge shell – polyamide fabric

Based on the above methodology for calculating the parameters of the explosive process, we have the following values of parameters in question: $k = 2.5$; $n = 1.93$; $u_e = 496$ m/s; $Q_v = 352$ kcal/kg; $Q_o = 682.1$ kcal/kg; $\eta = 0.516$.

During calculations, the following parameter values were taken: $\gamma = 1.25$ [17]; $\alpha = 0.45$ cm³/g [18]. Q_o value was defined from the equation of EE matter decomposition in accordance with the Brinkley-Wilson principle.

Let us estimate the correctness of the obtained result.

According to [23], the satisfaction of proportion $\frac{D_{ex}}{D_{max}} \approx \left(\frac{d_{ch}}{d_{co}}\right)^{0.6}$

is observed for liquid explosives, where d_{ch} , d_{co} are the explosive charge diameter and the cutoff diameter, respectively; D_{ex}^{max} is the ideal detonation velocity.

Since $\frac{Q_v}{Q_m} \approx \left(\frac{D_{ex}}{D_{ex}^{max}}\right)^2$, the cutoff diameter value will be equal to $d_{co} \approx d_{ch} \eta^{-0.833}$.

In the case under study, the calculated cutoff diameter value is equal to $d_{co} \approx 156$ mm. During additional experiments, it was defined that $d_{co} = 140-150$ mm. Satisfactory agreement between the calculated and the experimental data is observed.

2. The «witness-plate» method

A cylindrical «shell-less» explosive charge (the shell had low weight and durability – cardboard) was vertically placed on a 18mm thick steel plate.

Blasting of the following explosive charges were performed: ammonite number 6 (calibrating charge) and EE «IREGEL 1136 R» (charge under test).

During the experiments, the following parameters were being recorded: density of the explosive, VOD, charge diameter, plate thickness, density of the plate material, charge length, mass of the material destroyed in the punched hole. Charge length was appointed based on satisfaction of the condition $\frac{L}{2R_o} \geq 5$.

Initially, the volume energy for destruction of steel, of which the plates were made, was defined.

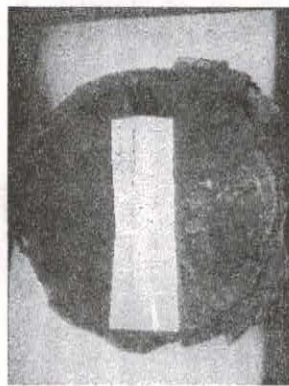


Figure 4. Results of metal plate punching with the charge of ammonite number 6

For this purpose, the results of plate punching during explosion of ammonite number 6 charge (Figure 4) were used.

We have the following experimental data: $M = 2.9575$ kg; $\rho_m = 7830$ kg/m³; $h = 0.018$ m; $\beta = 0$; $R_o = 0.1$ m; $\rho_s = 1100$ kg/m³; $D = 4866.1$ m/s.

Polytropic curve factor k of ammonite number 6 explosion products at density

$\rho_s = 1100$ kg/m³ was taken equal to 2.63 [18].

Based on (9), the effective radius of the punched hole in the plate was found:

$$R_{\Phi} = 0.0817 \text{ m.}$$

The volume energy of plate material destruction was determined from (10) at $\beta = 0$.

$$\sigma_s = 0,806 \cdot \frac{\left(1 - \frac{R_{\Phi}}{R_o}\right)^2}{\rho_m} \left(\frac{\rho_{BB} D R_o}{k h}\right)^2 = 4,407 \cdot 10^8 \text{ Pa.} \quad (18)$$

Experimental data for the explosion of the charge of EE «IREGEL 1136 R» (Figure 5): $M = 2.8573$ kg; $\rho_m = 7830$ kg/m³; $h = 0.018$ m; $\beta = 0$; $R_o = 0.1$ m; $\rho_s = 1330$ kg/m³; $D = 4900.1$ m/s. Chemical composition of EE «IREGEL 1136 R»:

30% — granulated ammonium nitrate, 70% — «Iregel» emulsion matrix, gas generating additive in the form of aqueous solution of sodium nitrite of 15% concentration in the amount necessary to give the specified density to the EE.

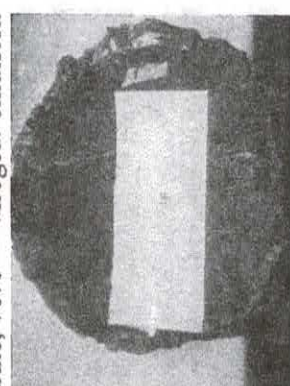


Figure 5. Results of metal plate punching with the charge of EE «IREGEL 1136 R»

The chemical composition of the emulsion matrix: oxidizing solution - 82% NH_4NO_3 ; 18% H_2O ; fuel mixture - 30% emulsifier (REM-5); 80% diesel fuel (class «Z»). Percentages of the oxidizer and the fuel mixture in the emulsion - 92.4%; 7.6%. Emulsion density before sensitization - 1.31 g/cm³.

The effective radius of the hole punched in the plate is equal to:

$$R_{\oplus} = 0.0804 \text{ m.} \quad (19)$$

On the basis of (17) — (19), we determine the polytropic curve factor of the products of IREGEL blast:

$$k = 0.806 \left(1 - \frac{R_{\oplus}}{R_0} \right) \frac{\rho_{\text{ex}} D R_0}{h \sqrt{\sigma \rho_m}} = 3.08, \quad (20)$$

By substituting the value of (20) into (3), we define $n = 2.46$. Then, on the basis of (1):

$Q_0 = 568 \text{ kcal/kg}$. During calculations, the following parameter values were taken: $\gamma = 1.25$ [17]; $\alpha = 0.45 \text{ cm}^3/\text{g}$ [18].

The value of $Q_T = 725 \text{ kcal/kg}$ was determined from the equation of IREGEL decomposition in accordance with the Brinkley-Wilson principle.

Therefore, the heat liberation completeness factor equals to $\eta = 0.78$ when using 200mm IREGEL charges.

CONCLUSIONS

The performed studies have shown that during detonation of industrial explosives produced on site the actual heat liberation is 20-40% lower than the theoretical value.

The methods of experimental data processing were developed for calculation of heat liberation completeness during blasts of explosive charges.

Evaluation of heat liberation completeness during blasts of explosives will allow for more comprehensive estimation of the quality of explosives produced at mining enterprises, which is important for both mining companies and organizations engaged in both the design of drilling-and-blasting operations and the expert quality control of explosives.

REFERENCES

1. Mosinets V.N. Shattering and shock effects of explosion in rock formations. Moscow: Nedra, 1976. p.271

2. Mosinets V.N., Abramov A.V. Destruction of fractured and dislocated rock formations. Moscow: Nedra, 1982. p.248
3. Kutuzov B.N., Belin V.A. Design and organization of blasting operations. Moscow, pub. «Gornaya Kniga», 2012. p.416
4. Polyak G.A., Levchik S.P., Kukib B.N. Evaluation of effectiveness of permissible explosives based on results of blasting in sand // Blasting work No. 68/25, Moscow, Nedra, 1970, pp.111-115.
5. Kukib B.N., Ioffe V.B., Alexandrov V.E. Performance estimation based on results of blasting in sand // Blasting work No. 84/41, Moscow, Nedra, 1982, pp.83-89.
6. Afanasenkov A.N., Kotova L.I., Kukib B.N. On performance of industrial explosives // Physics of combustion and explosion, 2001, vol.37, No.3, pp.115-125.
7. Vainshtein B.I., Chernov K.S., Pesotskiy M.K. Analysis of explosive performance measurement methods // Blasting work No. 84/41, Moscow, Nedra, 1982, pp.75-83.
8. Sosnin V.A., Smirnov S.P., Sakhipov R.Kh. Evaluation of performance and completeness of explosive transformation of industrial compositions // Physics of combustion and explosion, 1998, Vol.34, No.5, pp.118-121.
9. Viktorov S.D. Detonation characteristics of ifzanites // Annual book V - Scientific and technical issues of mineral deposits exploitation. M., offset duplicator, Physical and Technical Mining Issues Sector of the Institute of Physics of the Earth of the USSR, 1974, pp.18-24.
10. Demidyuk G.P. On methods for evaluation of blasting properties of the most simple explosives // Blasting work No. 74/31, Moscow, Nedra, 1974, pp.119-133.
11. Kudzilo S., Kokhlichek P., Trzhchinsky V.A., Zeeman S. Operational characteristics of emulsion explosives // Physics of combustion and explosion, 2002, vol.38, No.4, pp.95-102.
12. Nyber U., Arvanitidis I., Olsson M., Ouchterlony F. Large size cylinder expansion tests on ANFO and gassed bulk explosives // Explosives and Blasting Technique. Holmberg (ed). 2003, Swets @ Zeitlinger, Lisse, p.181-213.
13. Evaluation of blasting properties and gaseous hazard of industrial explosives. E.A. Vlasova, A.S. Derzhavets, S.A. Kozyrev et al. // Blasting work No. 99/56, Moscow: 2008, pp.119-136.
14. Bjarnholt G. Suggestions on standart for measurement and data evaluation in the underwater explosion test // Propellants and Explosives. 1980. V. 5, № 2/3. P.67-74.
15. Viktorov S.D., Starshinov A.V., Zhanyan Zh. Experimental evaluation and comparison of performance of mixed explosives of various composition // Blasting work No. 105/62, Moscow: 2011, pp.142-150.
16. Starshinov A.V., Litovka O.B., Kolpakov V.I., Grigoryev G.S. Determination of explosive effectiveness of industrial explosives by means of compression of a lead column through an air gap // Blasting work No. 103/60, Moscow: 2010, pp.178-188.
17. Baum F.A., Stanyukovich K.P., Shekhter B.I. Physics of explosion. Moscow: Fizmatgiz, 1959. p.800.
18. Kutuzov B.N., Gorinov S.A. Calculation of detonation parameters of ammonium nitrate explosives // Mining Research and Information Bulletin, 2010, No.6, pp.40-49.
19. Avakyan G.L. Calculation of energy and blasting characteristics of explosives. Moscow: pub. VIA, 1964. p.84.

20. Maslov I.Y., Pupkov V.V., et.al. Method of continuous measurement of detonation velocity of industrial explosive charges // Blasting work No. 96/53, Moscow, MKVD at Academy of Mining Sciences, 2006.
21. Orlenko L.P. Physics of impact and explosion. Moscow, Fizmatlit, 2008. p.304.
22. Vlasov O.E. Foundations of blast action theory. Moscow: Pub. VIA, 1957. p.408.
23. Cook M.A. Science of industrial explosives. Moscow, Nedra, 1980. p.453.

ABOUT AUTHORS

Bragin P.A., pavelbragin83@mail.ru, Global Mining Explosive-Russia LLC, Russia,
Gorinov S.A., Ph.D. in Engineering Science, akaz2006@yandex.ru, Global Mining Explosive-Russia LLC, Russia,
Maslov I.Y., Ph.D. in Engineering Science, ilmaslov@mail.ru, Global Mining Explosive-Russia LLC, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ/CONTENT

Брагин П.А., Горинов С.А., Маслов И.Ю. ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОЛНОТЫ ТЕПЛОВОДЕЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ МЕСТНОГО ПРОИЗВОДСТВА.....	3
--	---

<i>Bragin P.A., Gorinov S.A., Maslov I.Y.</i> OPERATIONAL METHODS OF EVALUATION OF HEAT LIBERATION COMPLETENESS DURING BLAST OF LOCALLY PRODUCED INDUSTRIAL EXPLOSIVES	18
---	----

П.А. Брагин
С.А. Горинов
И.Ю. Маслов

ОПЕРАТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ПОЛНОТЫ ТЕПЛОВОДЕЛЕНИЯ ПРИ ВЗРЫВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ МЕСТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Горный информационно-аналитический
бюллетень (научно-технический журнал) № 9
(специальный выпуск 35). Отдельные статьи

Режим выпуска «молнии»
Выпущено в авторской редакции

Компьютерная верстка и подготовка
оригинал-макета И.А. Вершинина
Дизайн обложки О.Ю. Долгошеева
Зав. Производством Н.Д. Урбушкина
Полиграфическое производство Л.Н. Файнгор

Подписано в печать 22.07.15. Формат 60х90/16.
Бумага офсетная № 1. Гарнитура «Times».
Печать трафаретная на цифровом дупликаторе.
Усл. печ. л. 2,0. Тираж 500 экз. Изд. № 2950

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»

Отпечатано в типографии
издательства «Горная книга»

119049 Москва, ГСП-1,
Ленинский проспект, 6, издательство «Горная книга»
Телефон (499) 230-27-80; факс (495) 956-90-40;
тел./факс (495) 737-32-65

