

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-2-18-23

УДК 541.126.550.834

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОТЫ ВЗРЫВА ПРИМЕНЯЕМЫХ
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА КОНЕЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ****THE INFLUENCE OF THE HEAT OF EXPLOSION USED
EXPLOSIVES ON THE FINAL RESULTS****Масаев Юрий Алексеевич,**

канд. техн. наук, профессор, e-mail: masaev-62@mail.ru

Yury A. Masaev, C. Sc. in Engineering, Professor**Масаев Владислав Юрьевич¹,**

канд. техн. наук, доцент, e-mail: masaev-62@mail.ru

Vladislav Yu. Masaev, C. Sc. in Engineering, Associate ProfessorКузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian
Federation**Аннотация:**

Взрывчатые вещества применяют не только для добычи полезных ископаемых, но и для целого ряда других промышленных надобностей. И их применение наряду с положительными факторами влечет и к целому ряду отрицательных – загазованность атмосферы, нарушение экологии местности, разрушению близлежащих сооружений, провоцированию землетрясений. При добыче полезных ископаемых взрывным способом основными показателями качества взрыва являются: равномерное дробление горной массы без негабаритных кусков и мельчайших фракций; небольшой разброс взорванной массы; хороший отрыв горной породы на глубину шпура или скважины; качественное оконтуривание забоя и не провоцирование различных геодинамических проявлений. На каждый вид взрывных работ рассчитывается и составляется паспорт буровзрывных работ и определяются основные параметры: глубина шпуров или скважин и их количество; масса заряда в шпуре или скважине. Для их обеспечения необходимо использование определенных организационно-технических мероприятий. Исследования показали, что не всегда результаты взрыва совпадают с расчетными величинами, и одной из главных причин является то, что не учитывается теплота взрыва применяемых взрывчатых веществ, которая является мерой запаса потенциальной энергии ВВ. При проведении исследований проводились взрывания двух типов взрывчатых веществ с различной теплотой взрыва в идентичных условиях и производилась сравнительная оценка результатов взрыва. Было установлено влияние теплоты на изменение числа и глубины шпуров, качество разрушения породы, объем образуемых газообразных продуктов, а при массовых взрывах на открытых работах и на параметры сейсмических волн.

Ключевые слова: взрывчатое вещество; теплота взрыва; удельный расход ВВ; газообразные продукты взрыва; сейсмические волны.

Abstract:

Explosives are used not only for mining, but also for a number of other industrial needs. And their use, along with positive factors, also leads to a number of negative ones – pollution of the atmosphere, violation of the ecology of the area, destruction of nearby structures, provoking earthquakes. When mining with an explosive method, the main indicators of the quality of the explosion are: uniform crushing of the rock mass without oversized pieces and the smallest fractions. Small drop-off of the exploded mass; good separation of rock to the depth of a hole or well; high-quality delineation of the face and not provoking various geodynamic manifestations. For each type of blasting, a passport of drilling and blasting operations is calculated and compiled, and the main parameters are determined: the depth of boreholes or wells and their number; the mass of the charge in the borehole or well. And to ensure them, it is necessary to use certain organizational and technical measures. Studies have shown that the

explosion results do not always coincide with the calculated values and one of the main reasons is that the heat of the explosion of the used explosives, which is a measure of the potential energy reserve of EXPLOSIVES, is not taken into account. during the research, two types of explosives with different explosion heat were detonated under identical conditions and the results of the explosion were compared. The influence of heat on the change in the number and depth of boreholes, the quality of rock destruction, the volume of gaseous products formed, and in the case of mass explosions in open works and on the parameters of seismic waves was established.

Key words: explosive substance; heat of explosion; specific explosive flow rate; gaseous products of explosion; seismic waves.

При добыче полезных ископаемых широкое распространение получил взрывной способ разрушения (отбойки) горных пород, на эффективность которого, помимо физико-механических свойств горных пород и технологии производства работ, огромное влияние оказывает запас потенциальной энергии взрывчатого вещества (ВВ).

Запас потенциальной энергии напрямую связан с теплотой взрыва ВВ. Метод расчета теплоты взрыва предложил еще в середине XIX в. русский академик Г. И. Гесс.

Согласно теории Г. И. Гесса, тепловой эффект химических реакций зависит только от начального и конечного состояния системы и не зависит от промежуточных стадий. Рассматривая смеси ВВ, принимается, что взрывчатое вещество является некоторым промежуточным состоянием исходных компонентов, а конечным их состоянием являются образующиеся продукты взрыва. В этом случае теплота взрыва равна разнице между теплотой образования продуктов взрыва и теплотой образования ВВ.

Полученная теплота взрыва соответствует постоянному давлению (Q_p). Взрыв же практически происходит при постоянном объеме вещества и определять следует теплоту взрыва при постоянном объеме (Q_v).

Связь этих двух показателей Г. И. Гесс выразил следующей зависимостью:

$$Q_v = Q_p + AP(V_2 - V_1)$$

где A – механический эквивалент тепла ($A = 427 \text{ кгс} \cdot \text{м/ккал}$); P – конечное давление продуктов взрыва; V_1 и V_2 – начальный объем продуктов взрыва.

При расширении продуктов и снижении давления до атмосферного давления и температуры до $+18^\circ\text{C}$ величина $AP(V_2 - V_1) = 0,58$, тогда зависимость примет вид:

$$Q_v = Q_p + 0,58n$$

где n – число молей газов, образующихся при взрыве 1 кг ВВ. (В справочных характеристиках ВВ указана теплота образования продуктов взрыва при постоянном давлении – Q_p).

Найденная теплота взрыва (Q_v) служит характеристикой запаса потенциальной энергии ВВ (E) и их взаимосвязь выражается зависимостью

$Q_v = (0,85 \div 0,87)E$. (Потенциальная энергия (E) – это полный запас энергии ВВ, который мог бы быть реализован в идеальных условиях, то есть без каких-либо химических потерь). Исходя из приведенного равенства, можно отметить, что $E \approx 1,15Q_v$.

Эффективность и безопасность при производстве буровзрывных работ как на открытых работах, так и в подземных условиях зависит от целого ряда факторов, основными из которых являются энергетические параметры взрывчатого вещества, свойства горных пород и технология производства взрывных работ.

Исследование большого количества паспортов буровзрывных работ, особенно для сооружения горных выработок в угольных и рудных шахтах, показало, что все они рассчитываются по однотипной методике, в которой при выборе параметров взрывных работ принимаются две характеристики ВВ – работоспособность и бризантность, а при оценке эффективности взрыва – удельный расход ВВ и удельный расход бурения на 1 м. Определяющими параметрами при разработке паспортов буровзрывных работ являются количество шпуров, их глубина и масса заряда ВВ на шпур, при этом учитываются в основном организационно-технические факторы и не учитывается запас потенциальной энергии рекомендуемого ВВ, выражаемый через теплоту взрыва. К техническим факторам относятся: средства бурения; погрузки; транспортирования; заряжания; вентиляции; число и расположения шпуров в забое; свойства и расход ВВ; кусковатость взорванной массы; точность оконтуривания проектного сечения горной выработки и др. К организационным факторам относятся условия, которые должны обеспечить минимальные трудовые и стоимостные затраты, отнесенные к 1 м подвигания горной выработки за цикл, и оптимальную последовательность выполнения операций проходческого цикла.

Нами были проведены сравнительные исследования влияния теплоты взрыва применяемых взрывчатых веществ на основные показатели результатов взрыва: качество дробления и разброс взорванной массы; удельный расход ВВ; оконтуривание горной выработки и

нарушенность законтурного массива; повреждения крепи горных выработок. В качестве ВВ были приняты аммонит АП-5ЖВ с теплотой взрыва 907 ккал/кг (3500 кДж/кг) и детонит М с теплотой взрыва 1377 ккал/кг (5786 кДж/кг). Качество дробления взорванной горной породы является одним из основных показателей производства взрывных работ при сооружении горных выработок в породах с различным коэффициентом крепости и играет важную роль при выборе погрузочных и транспортных средств. При взрывании в идентичных условиях при использовании ВВ с повышенной теплотой взрыва (детонит М) выход фракций до 100 мм выше на 7,5 %, а фракций более 300 мм почти в два раза меньше, чем при использовании аммонита АП-5ЖВ. Эти соотношения изменяются с изменением коэффициента крепости горных пород, но порядок почти одинаков. Основной разброс взорванной массы при применении детонита М располагался на расстоянии 4–5 м от груди забоя, а максимальный достигал 9-11 метров, при использовании аммонита АП-5ЖВ эти показатели составляли соответственно 6-7 м и 12-16 м.

При повышенном выходе крупных фракций и разбросе взорванной породы наблюдались повреждения крепи горной выработки. Так, при проходке выработок по породам с коэффициентом крепости по шкале проф. М. М. Протодяконова $f = 4-6$, при использовании ВВ с теплотой взрыва 1377 ккал/кг относительное число повреждений крепи в 1,25 раза меньше, чем при использовании ВВ с теплотой взрыва 907 ккал/кг, в породах $f = 7-9$ это соотношение составляет 2,78, в породах с $f = 10-12$ – 4,34 раза, в породах с $f = 13-15$ – 4,35 раза, а в породах с $f = 16-18$ – в 4,66 раза.

Одним из важных показателей при проходке горных выработок является четкость оконтуривания профиля горной выработки, что существенно будет влиять на устойчивость обнажений при эксплуатации горных выработок. Исследования показали, что при проходке горных выработок по породам средней крепости с $f = 4-6$ использование ВВ с теплотой взрыва 1377 ккал/кг приводит к нарушенности законтурного массива на 30-35 % больше, чем при использовании ВВ с теплотой взрыва 907 ккал/кг, а с повышением коэффициента крепости значительного нарушения законтурного массива не происходит. Но на нарушенность законтурного массива существенное влияние оказывает угол наклона оконтуривающих шпуров к проектному контуру горной выработки, расстояние между оконтуривающими шпурами, линия наименьшего сопротивления зарядов ВВ, весовое количество ВВ, приходящееся на единицу длины шпура. Исследования нарушенности законтурного массива с использованием ультразвуковой аппаратуры показали, что по всей длине выработки породный массив получает после взрыва нарушенность глубиной 0,5-1,0 м. Кроме

того, через некоторый интервал расстояния, соответствующий длине применяемой внутренней забойки, имеются дополнительные пояса ослабления массива с общей глубиной до 0,7-1,35 м. Исследование трещиноватости кернов, извлеченных из законтурного массива, показало, что на глубине 10-20 см в породном массиве возникает весьма густая сетка трещиноватости, на глубине до 40 см сетка трещиноватости становится значительно реже, а на глубине 1 м и более распространяются отдельные трещины. Общую зону нарушенности породы вокруг выработки, пройденной буровзрывным способом, можно разделить на область трещинообразования, непосредственно прилегающую к контуру выработки и простирающуюся вглубь породного массива в рассматриваемых породах до 0,3-0,5 м, и область волнового ослабления породы, простирающуюся за область трещинообразования до глубины 1,1-1,5 м. Было установлено также, что значительное влияние на величину зоны нарушенности и ее состояние оказывает расстояние между оконтуривающими шпурами, причем влияние расстояния между оконтуривающими шпурами на область трещинообразования и область волнового ослабления не одинаково.

Применение взрывчатых веществ с различной теплотой взрыва оказывает существенное влияние и на один из важных показателей качества и эффективности взрывных работ – удельный расход ВВ. Так, с увеличением глубины шпуров при использовании одного и того же ВВ с теплотой взрыва 907 ккал/кг удельный расход ВВ изменяется следующим образом: при применении шпуров глубиной от 1,5 м до 2,0 м удельный расход увеличивается от 1,5 кг/м³ до 1,75 кг/м³, что составляет 16%; с увеличением глубины шпуров от 2,0 м до 2,5 м удельный расход увеличился с 1,79 кг/м³ до 2,25 кг/м³, что составляет 25%, а в шпурах глубиной от 2,5 м до 3,0 м увеличение удельного расхода ВВ происходит с 2,16 кг/м³ до 2,54 кг/м³ и эффективность удельного расхода составила разницу в 17%.

При применении ВВ с теплотой взрыва 1377 ккал/кг в шпурах глубиной от 1,5 м до 2,0 м величина удельного расхода ВВ составила от 0,80 кг/м³ до 1,04 кг/м³ с разницей значений 26%, а в шпурах глубиной от 2,0 м до 2,5 м величина удельного расхода составила от 1,23 кг/м³ до 1,29 кг/м³ с разницей значений 4%. При зарядании шпуров глубиной от 2,5 м до 3,0 м удельный расход увеличился от 1,26 кг/м³ до 15 кг/м³ при разнице значений в 19%.

Приведенный сравнительный анализ использования ВВ с различной теплотой взрыва в идентичных условиях показал, что при применении аммонита АП-5ЖВ с теплотой взрыва 907 ккал/кг по сравнению с детонитом М с теплотой взрыва 1377 ккал/кг удельный расход

увеличивается: при глубине шпуров 1,75 м – на 1%; при глубине шпуров 2,0 м – на 2%; при глубине шпуров 2,25 м – на 3%; при глубине шпуров 2,5 м – на 4%; при глубине шпуров 2,75 м – на 5%.

Как можно заметить, с увеличением глубины шпуров увеличивается влияние теплоты взрыва применяемых ВВ на целый ряд факторов – изменение числа пробуриваемых шпуров, расстояние между шпурами, коэффициент использования шпуров, трудоемкость работ по бурению и заряданию шпуров, качество разрушения горных пород и оконтуривания горных выработок, объем образуемых газообразных продуктов взрыва и, в конечном итоге, на экологическую обстановку в забое сооружаемых горных выработок и стоимость проведения горной выработки. Поэтому для повышения эффективности и безопасности буровзрывных работ необходимо совершенствовать ассортимент взрывчатых веществ с высокой теплотой взрыва и вносить изменения в методику расчета основных параметров буровзрывных работ для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий. Помимо рассмотренных факторов, влияющих на качество буровзрывных работ, производимых в подземных условиях и связанных с теплотой взрыва применяемых ВВ, эта связь имеет не мало важное значение и при добыче полезных ископаемых открытым способом. Разработка месторождений полезных ископаемых открытым способом основана на массовой отбойке больших объемов горной породы, и это связано с применением больших масс одновременно взрывааемых зарядов ВВ, достигающих 300, а в некоторых случаях до 1000 т. И в таких условиях необходимо решать две задачи – обеспечение требуемой степени дробления горной породы и защиты инженерных сооружений от возведения сейсмических колебаний. На проявления сейсмических колебаний существенное влияние оказывают условия заложения заряда ВВ – глубина, степень зажатости разрушаемой среды, число обнаженных поверхностей, рельеф поверхности, горно-геологические условия залегаемых пород, интенсивность колебаний по поверхности уступа разреза не являются равномерными. Более интенсивные колебания наблюдаются ближе к краю уступа по сравнению с противоположной частью борта, в центральной же части интенсивность колебаний незначительна. В большинстве случаев колебания откоса борта уступа в 1,5-2,0 раза выше, чем колебания горизонтальной площадки на данном расстоянии. Основной причиной различия интенсивности сейсмических колебаний в идентичных условиях являются свойства взрывчатых веществ, применяемых при массовых взрывах, влияние

которых выражается в распределении затрат энергии на дробление и возбуждение сейсмических колебаний, их частотных характеристик и времени воздействия. По этим характеристикам оценивают сейсмическую опасность для наземных сооружений, которая зависит как от конструктивных особенностей, так и от их пространственного расположения относительно источника колебаний.

В связи с этим очень важное значение приобретает правильное определение радиуса опасной зоны по сейсмическому воздействию на различные объекты и сооружения при производстве массовых взрывов с использованием большого количества одновременно взрывааемых взрывчатых веществ.

В Правилах безопасности радиус опасной зоны по сейсмическому воздействию рекомендовано определять по формуле:

$$r_c = K_z \cdot K_c \cdot \alpha \cdot \sqrt[3]{Q}$$

где K_z – коэффициент, зависящий от свойств грунта в основании охраняемого здания и сооружения, изменяется от 5 до 20; K_c – коэффициент, зависящий от типа зданий и характера застройки, изменяется от 1 до 2; α – коэффициент, зависящий от условия взрывания, изменяется от 1 до 0,5; Q – вес взрывааемого заряда ВВ.

Ранее в наших исследованиях было отмечено, что определение радиуса опасной зоны на основе веса взрывааемых зарядов ВВ дает не точные результаты. Для примера был произведен расчет радиуса опасной зоны при использовании 26 видов ВВ с различной теплотой взрыва, но одинакового веса взрывааемых зарядов ВВ (10000 кг), и был получен один и тот же радиус опасной зоны (646 м). Но при применении ВВ с наибольшим запасом потенциальной энергии параметры сейсмических колебаний будут совершенно иными, и в расчетную формулу было предложено ввести коэффициент запаса энергии ВВ. В этом случае при тех же условиях взрывания радиус сейсмически опасной зоны был получен: при взрывании детонита М с теплотой взрыва 5786 кДж/кг – 892 м, а при взрывании эмульсолита А-20,п с теплотой взрыва 3020 кДж/кг – 465 м, т. е. в два раза меньше, что имеет существенное значение.

Проведенные исследования доказывают, что в расчетах параметров буровзрывных работ для обеспечения качественных показателей взрыва, безопасности, улучшения экологической обстановки необходимо учитывать запас потенциальной энергии применяемых взрывчатых веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин А.И., Перепелицын А.Н., Гаврилов Н.И. Основные проблемы взрывного дела и пути их решения. Концепция повышения безопасности и эффективности применения ВМ промышленного назначения в Российской Федерации / Всероссийская конференция «О состоянии взрывного дела в Российской Федерации. Основные проблемы и пути их решения / Всероссийская конференция (28-30 мая). Сб. докладов и статей. Изд-во МГТУ, 2002. с. 5-17.
2. Масаев Ю.А. исследование методов управления энергией взрыва / Ю.А. Ма-саев, Е.В. Заречнева // Новые технологии в угольной отрасли. II Региональная конференция. – Белово, 2010. – С.57-61.
3. Еременко А.А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на железорудных месторождениях Западной Сибири / А.А. Кушнеров. – Новосибирск «Наука», 2013. - 191.
4. Кутузов Б.Н. Безопасность взрывных работ в промышленности / Б.Н. Кутузов, - М.: Недра, 1992. - 543.
5. Копытов А.И. Взрывные работы в горной промышленности / А.И. Копытов, Ю.А. Масаев, В.В. Першин. – Новосибирск, «Наука», 2013. – 511 с.
6. Станюкович К.П. Неустойчивое движение сплошной среды. «Наука», – Москва, 1971. – 854 с.
7. Кушнеров П.И. Безопасность взрывных работ при электровзрывании на угольных и сланцевых шахтах. «Кузбассвуиздат». – Кемерово, 2005. – 537 с.
8. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. «Наука». – Москва, 1974. – 223 с.
9. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. «Недра». – Москва, 1976. – 271 с.
10. Коростовенко В.В. Технология и безопасность взрывных работ / В.В. Коростовенко, С.А. Вохмин, А.П. Андриевский. : – Красноярск, 2005. – 118 с.
11. Руководство по проектированию, организации и проведению массовых взрывов на подземных рудниках филиалов Евразруды. : – Новокузнецк, 2008. – 265 с.
12. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах». : – Москва, ЗАО «НТЦ исследовании проблем промышленной безопасности», 2015. – 328 с.
13. Лебедев А.В. Современное состояние и перспективы совершенствования предохранительных ВВ /А.В. Лебедев, В.П. Доманов // Вестник НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2005. - №2. – С.3-6.
14. Масаев Ю.А. Исследование закономерностей формирования импульса давления в зарядной полости / Ю.А. Масаев, В.В. Першин, Н.В. Мильбергер // Известия вузов. Горный журнал. – Екатеринбург, № 1, 2015 – С. 93-101.
15. Масаев Ю.А. Массовые взрывы при добыче угля открытым способом и их влияние на сейсмические проявления в Кузбассе / Ю.А. Масаев, А.И. Копытов, В.Ю. Масаев, С.Е. Ильина // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. Вып. 4, ООО «ВостЭКО». : – Кемерово, 2016. – С. 48-55.

REFERENCES

1. Subbotin A.I., Perepelitsyn A.N., Gavrilov N.I. The Main problems of explosive business and ways to solve them. The concept of increasing the safety and effectiveness of industrial VM applications in the Russian Federation / all-Russian conference on the state of explosives in the Russian Federation. Main problems and ways to solve them / All-Russian conference (may 28-30). Comp. d. and articles. MGSU publishing house, 2002. p. 5-17.
2. Masaev Yu.A. Research of explosion energy management methods / Yu.A. Ma-saev, E.V. Zarechneva // New technologies in the coal industry. II Regional conference. - Belovo, 2010. - P. 57-61.
3. Eremenko A.A. Improving the technology of drilling and blasting operations in the same-ore deposits of Western Siberia / A.A. Kushnerov. - Novosibirsk "Science", 2013. - 191.
4. Kutuzov B.N. Safety of explosive works in industry / B. N. Kutuzov, - M.: Nedra, 1992. - 543.
5. Kopytov A.I. Explosive works in the mining industry / A.I. Kopytov, Yu.A. Masaev, V.V. Pershin. Novosibirsk, Nauka, 2013, 511 p.
6. Stanyukovich K.P. Unsteady motion of a continuous medium. Nauka, Moscow, 1971, 854 p.
7. Kushnerov P.I. Safety of blasting operations during electric explosion at coal and shale mines. "Kuzbassvuzizdat". Kemerovo, 2005, 537 p.
8. Hanukaev A.N. Physical processes at breaking of rocks by explosion. «Science». - Moscow, 1974. - 223 p.

9. Mosinets V.N. Crushing and seismic action of explosion in rocks. «Subsoil». - Moscow, 1976. - 271 p.
10. Korostovenko V.V. Technology and safety of explosive works / V.V. Korostovenko, S.A. Vokhmin, A.P. Andrievsky. Krasnoyarsk, 2005, 118 p.
11. Guidelines for the design, organization and conduct of mass explosions in underground mines of branches of Evrazruda. Novokuznetsk, 2008, 265 p.
12. Federal norms and rules in the field of industrial safety "safety Rules for blasting operations". :- Moscow, JSC "STC research of industrial safety problems", 2015. - 328 p.
13. Lebedev A.V. Current state and prospects for improving safety EXPLOSIVES /A.V. Lebedev, V. P. Domanov // Bulletin of the NTS VostNII. - Kemerovo, 2005. - no. 2. - P. 3-6.
14. Mashaev Yu.A. Research of regularities of formation of pressure pulse in the charging cavity / Yu.A. Mashaev, V.V. Pershin, N.V. Milberger // University news. Mining journal. - Yekaterinburg, No. 1, 2015-Pp. 93-101.
15. Mashaev Yu.A. Mass explosions in open-pit coal mining and their influence on seismic manifestations in Kuzbass / Yu.A. Mashaev, A.I. Kopytov, V.Yu. Mashaev, S.E. Ilyina // Bulletin of the scientific center for the safety of work in the coal industry. Issue 4, LLC "Vosteco".: – Kemerovo, 2016. - P. 48-55.

Поступило в редакцию 31.01.2020
Received 31 January 2020