

РАЗРАБОТКА МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВЗРЫВЧАТОГО МАТЕРИАЛА И СОЗДАНИЕ ИЗ НЕГО РЕЖУЩИХ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

В.Е. Митков¹, В.А. Белин², П.К. Шишков¹

¹ Горно-геологический университет имени Св. Ивана Рильского, София, Болгария

² ГИ НИТУ «МИСиС», Москва, Россия, e-mail: bvamggu@mail.ru

Аннотация: Представлены теоретические и практические исследования по созданию и изучению нового малочувствительного взрывчатого вещества с высокими взрывчатыми характеристиками, обеспечивающего безопасную эксплуатацию при промышленных и специальных взрывных работах, и изготовление из него режущих кумулятивных зарядов, предназначенных для выполнения широкого спектра взрывных работ. Полимер со взрывчатым веществом работает в различных условиях. Он нечувствителен к внешним механическим воздействиям, при нагревании не воспламеняется, но при разложении полимерного материала наблюдается повышение давления и разрушение образца. В зависимости от количественного содержания взрывчатого вещества (ВВ) установлено, что смесь может соответствовать взрывчатым характеристикам тротила, и в то же время быть нечувствительной к стандартным детонаторам. Режущий кумулятивный заряд может использоваться в промышленных и специальных целях. Он имеет пластиковую основу, легко режется, быстро и удобно наклеивается на различные неровные поверхности, что делает его чрезвычайно удобным в использовании. Разработанное малочувствительное пластичное взрывчатое вещество имеет высокую скорость детонации, более 7400 м/с, и может использоваться для изготовления зарядов различной формы в зависимости от их назначения.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, малочувствительное взрывчатое вещество, взрывные работы, взрывчатый полимер, режущий кумулятивный заряд, тротил, газообразные продукты, взрывные технологии, бурение.

Для цитирования: Митков В. Е., Белин В. А., Шишков П. К. Разработка малочувствительного энергетического взрывчатого материала и создание из него режущих кумулятивных зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 108–120. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_108.

Insensitive and high-powered explosive material development to manufacture cumulative charge cutters

V.E. Mitkov¹, V.A. Belin², P.K. Shishkov¹

¹ University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski», Sofia, Bulgaria

² Mining Institute, National University of Science and Technology «MISIS»,
Moscow, Russia, e-mail: bvamggu@mail.ru

Abstract: The article presents the theoretical and applied research aimed at development and investigation of an insensitive and high-powered explosive for safe commercial and special blasting operations, and at design of cumulative charge cutters using this explosive material. Explosive polymers operate differently in different conditions. Explosive polymers are insensitive to external mechanical impact and inflammable in heating, but pressure increases in the sample and the sample fractures when polymers decompose. Depending on the content of an explosive, it is found that the explosive and polymer composition can provide explosive characteristics of trinitrotoluene while keeping insensitive relative to standard detonators. A cumulative charge cutter can be used for the industrial and special purposes. It has a plastic carrier, is readily cuttable, and can be quickly and conveniently glued on any uneven surface, which makes it extremely suitable in application. The developed insensitive explosive polymer has a high detonation velocity, over 7400 m/s, and can be used to manufacture charges of various shape subject to the task assignment.

Key words: explosive, insensitive explosive, blasting, explosive polymer, cumulative charge cutter, trinitrotoluene, gaseous products, blasting technologies, drilling

For citation: Mitkov V. E., Belin V. A., Shishkov P. K. Insensitive and high-powered explosive material development to manufacture cumulative charge cutters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5):108-120. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_108.

Введение

Заряды различных типов взрывчатых веществ широко используются в горнодобывающей промышленности, строительстве, машиностроении и других сферах жизнедеятельности человека, а взрывные технологии — в металлообработке, сварке, штамповке, резке и др. Часто технологические операции с использованием взрывчатых веществ, такие как бурение глубоких (до 1000 м) скважин, удаление сломанных сверл, инструмента и крепежа, дробление негабаритных материалов, сварка биметаллов, операции в агрессивных и радиоактивных средах и многие другие операции являются наиболее эффективными, дешевыми, а иногда и единственно возможными. Только с помощью взрыва можно в короткие сроки успешно решить задачи по демонтажу и сносу крупномасштабных пространственных конструкций, зданий и сооружений [1–3].

При проведении взрывных работ в современных условиях все больше вни-

мания следует уделять безопасности при работе со взрывчатыми веществами. Исследование показало, что большинство взрывчатых веществ, используемых во многих странах Европы, крайне чувствительны к механическим и тепловым воздействиям. Используемые в настоящее время малочувствительные взрывчатые вещества очень дороги. Это стимулирует работы по созданию нового недорогого малочувствительного взрывчатого вещества, обеспечивающего безопасную работу при проведении промышленных и специальных взрывных работ. В результате было создано подобное вещество, безопасное для использования и транспортировки [4, 5].

Чтобы обеспечить безопасность взрывных работ, необходимо соблюдать строгие правила в работе и использовать взрывчатые вещества с высокими показателями взрывобезопасности, такими как: чувствительность к удару, чувствительность к трению, возможность про-

стрелки пульей, чувствительность к тепловому импульсу, чувствительность к электрической и тепловой искре, чувствительность к инициирующему импульсу, передача детонации на расстоянии, скорость детонации, тротиловый эквивалент, действие воздушно-ударной волны [6, 7].

При взрыве заряда взрывчатого вещества выделяется огромное количество энергии (от 900 до 1500 ккал/кг) за несколько микросекунд и образуется до 1 м³ газообразных продуктов детонации под давлением в сотни тысяч атмосфер [8, 9]. Скорость детонации достигает 8000 м/с. Продукты детонации, воздействуя на преграды, совершают работу по фрагментации и метанию любых предметов. Если при простом взрыве эта энергия «разлетается» во все стороны, то при кумулятивном она «собирается» в определенном направлении [10].

Кумулятивный эффект — значительное усиление локального действия взрыва в одном направлении. Этот эффект достигается за счет использования зарядов, имеющих на одной из сторон углубление, называемое кумулятивным. Если такой заряд инициируется с противоположной стороны, то эффект действия в направлении оси углубления значительно больше, чем действие обычных зарядов [11]. При покрытии кумулятивного углубления тонкой металлической оболочкой проникающее действие заряда многократно возрастает [12, 13].

Изготовление таких кумулятивных зарядов из взрывчатых веществ с высокой скоростью детонации, пластичностью и малой чувствительностью к механическим, тепловым и другим воздействиям типа V-10 [14] позволяет безопасно решать ряд задач не только в хозяйственном секторе экономики, но и в специальных операциях, таких как борьба с терроризмом.

Методы исследования

Работы по исследованию и внедрению малочувствительных взрывчатых веществ в промышленности ведутся в течение длительного времени.

С развитием химической промышленности регистрируются новые взрывчатые вещества, и их количество постоянно растет. К сожалению, большинство из них имеют либо низкую химическую стойкость, либо высокую чувствительность к внешним воздействиям.

Изготовление и применение малочувствительных взрывчатых веществ должно быть безопасным при производстве различных зарядов на «штатных» заводах или на местах производства взрывных работ. В этом отношении, за исключением пластичных взрывчатых веществ, все остальные достаточно безопасны при прессовании или изготовлении литых изделий. Однако ассортимент таких веществ невелик. По этой причине было необходимо продолжить поиск малочувствительных и мощных взрывчатых веществ, обладающих невысокой стоимостью, и безопасных в изготовлении для массового использования.

Использование пластических взрывчатых веществ дало новое направление в разработке малочувствительных взрывчатых веществ.

Преимуществом является легкость изготовления зарядов из пластичных взрывчатых веществ, которые также используются в некоторых армейских боеприпасах. Основным недостатком пластических взрывчатых веществ является их неспособность сохранять форму и взрывоопасные свойства при длительных изменениях температуры окружающей среды.

Из опыта использования пластических взрывчатых веществ стало ясно, что введение пластификаторов во взрывчатое вещество снижает его чувствительность. Исходя из этого, в основном

для нужд вооруженных сил, началось использование взрывчатых веществ на основе гексогена и октогена с добавлением различных пластификаторов и эластификаторов. В результате получено

новое семейство взрывоопасных смесей с высокими взрывчатыми характеристиками, низкой чувствительностью к внешним воздействиям и высокой термической стойкостью (табл. 1).

Таблица 1

Название и состав некоторых малочувствительных взрывчатых веществ
Names and compositions of some insensitive explosives

Название	Процент взрывчатого вещества	Название и содержание пластификатора
X-0242	Октоген 92%	Полимер 8%
EDC-37	Октоген / Нц 91%	Полиуретан 9%
PBXN-5	Октоген 95%	Фторэластомер 5%
PBXN-106	Гексоген 75%	Полиэтиленгликоль 25%
LX-14-0	Октоген 95,5%	«Estane» и «5702-F1» 4,5%
LX-10-0	Гексоген 95%	«Витон-А» 5%
LX-10-1	Октоген 94,5%	«Витон-А» 5,5%
PBX-9501	Октоген 95%	«Estane» 2,5%; бис-(2,2-динитропропил)-формал 2,5%
PBX-9404	Октоген 94%	Нитроцеллюлоза 3%; «CEF» 3%
LX-09-1	Октоген 93,3%	Бис-(2,2-динитропропил)-формал 4,4%; бис-(2-фтор-2,2-динитроэтил)-формал 2,3%
LX-09-0	Октоген 93%	Бис-(2,2-динитропропил)-формал 4,6%; бис-(2- фтор-2,2-динитроэтил)-формал 2,4%
LX-07-2	Октоген 90%	«Витон-А» 10%
PBX-9011	Октоген 90%	«Estane» и «5703-F1» 10%
LX-044	Октоген 85%	«Витон-А» 15%
LX-11-0	Октоген 80%	«Витон-А» 20%
LX45	Гексанитротилбен 95%	«Kel-F 800» 5%
LX-16	ТЭН 96%	«FPC461» 6%
PBX-9604	Гексоген 96%	«Kel-F 800» 4%
PBX-9407	Гексоген 94%	«FPC461» 6%
PBX-9205	Гексоген 92%	Полистирол 6%; Диоктилфталат 2%
PBX-9007	Гексоген 90%	Полистирол 9,1%; Диоктилфталат 0,5%; смола 0,4%
PBX-9010	Гексоген 90%	«Kel-F 3700» 10%
PBX-9502	ТАТБ 95%	«Kel-F 800» 5%
LX-17-0	ТАТБ 92,5%	«Kel-F 800» 7,5%
PBX-9503	ТАТБ 80%; Октоген 15%	«Kel-F 800» 5%

Создание нового малочувствительного взрывчатого вещества

С учетом последних тенденций в обеспечении безопасности при работе с опасными веществами существует реальная потребность в создании и применении взрывчатых веществ, отвечающих повышенным требованиям безопасности. Это потребовало, с участием авторов данной работы, создания нового малочувствительного взрывчатого вещества, которое отвечало бы следующим заранее заданным условиям:

- скорость детонации — не менее 7200 м/с;
- низкая чувствительность к внешним воздействиям и отсутствие воспламенения или детонации;
- возможность изготавливать заряды различной формы и размеров;
- высокая термическая стойкость;
- широкий диапазон рабочих температур: $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Вновь созданное взрывчатое вещество основано на гексогене, октогене или ТЭНе и может содержать:

- взрывчатое вещество — от 80 до 95%;

- силиконовую резину — от 5 до 20%;
- борную кислоту — от 5 до 10%;
- гидроксид алюминия — от 5 до 10%.

В зависимости от цели применения заряда могут использоваться различные комбинации вышеупомянутых материалов, например:

1. Изготовление зарядов для специальных взрывных работ в промышленности, спецподразделений полиции и армии в виде кумулятивных зарядов и сосредоточенных зарядов, применяемых для разрушения стальных конструкций, железобетонных и кирпичных стен.

2. Изготовление термостойких зарядов, рабочая безопасная температура которых выше, чем у стандартных взрывчатых веществ, для скважинных технологий при добыче жидких и газообразных углеводородов.

3. Изготовление зарядов, нечувствительных к капсюльным средствам и неэлектрическим системам инициирования.

Разработанное взрывчатое вещество характеризуется:

- безопасностью при изготовлении зарядов в заводских и полевых услови-

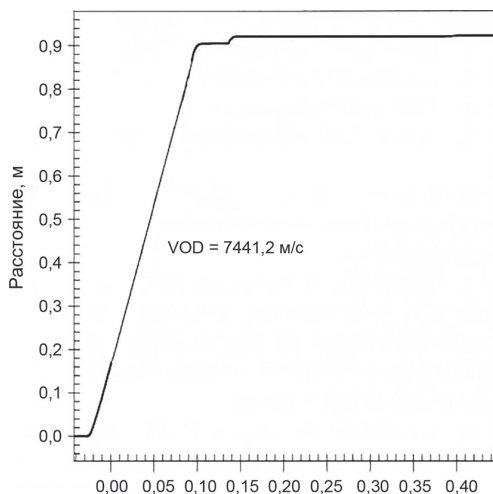


Рис. 1. Графический результат измерения скорости детонации (VOD) гибкого кумулятивного заряда ВВ
Fig. 1. Graph of measured detonation velocities of flexible cumulate explosive charge

ях за счет отсутствия термической обработки и пластичности ВВ;

- созданием зарядов такой формы и размера, которые невозможны для большинства взрывчатых веществ;
- высокой устойчивостью к внешним динамическим воздействиям, включая испытания на прострел пульей;
- низкой чувствительностью к капсюльным средствам инициирования, включая КД № 8.

Разработанное взрывчатое вещество было использовано для изготовления гибкого кумулятивного заряда с массой 100 г/м и испытано на скорость детонации в соответствии с требованиями стандарта Болгарии EN BDS 13631-14, аналога ГОСТ РФ 14839.19-69.

Для этого был использован современный прибор для исследования процесса детонации «Microtrap» фирмы «MREL» (Канада). Результаты исследования показаны на рис. 1.

Помимо низкой чувствительности, новое взрывчатое вещество имеет более низкий класс опасности в соответствии с «Европейским соглашением о между-

народной дорожной перевозке опасных грузов» (ДОПОГ), тем самым снизит затраты на транспортировку и хранение продукции, оснащенной им, особенно при транспортировке больших количеств на авиационном транспорте.

Расчет параметров режущего кумулятивного заряда

Форма поперечного сечения режущего кумулятивного заряда показана на рис. 2.

При построении физико-математической модели процесса работы заряда были приняты следующие условия:

- детонация заряда ВВ происходит одновременно по всему сечению режущего заряда, что соответствует плоской форме фронта детонационной волны, распространяющейся вдоль заряда;
- движение каждого элемента кумулятивной оболочки (КО) осуществляется в направлении нормали к ее средней части в недеформированном состоянии;
- скорость движения каждого элемента оболочки выполняется по экспоненциальной зависимости;

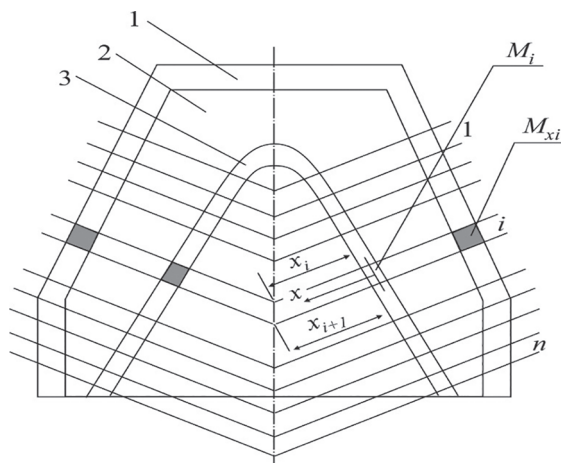


Рис. 2. Схема поперечного сечения разделения расчетных: участков 1...n для определения кинематических параметров кумулятивного ножа: 1 – внешняя оболочка РКЗ; 2 – взрывчатое вещество; 3 – кумулятивная оболочка

Fig. 2. Cross-section of sectioning of sites 1...n to calculate kinematic parameters of cumulative cutter: 1 – external shell; 2 – explosive; 3 – cumulative shell

• процесс формирования «кумулятивного ножа» при сборке элементов футеровки в плоскости симметрии режущего кумулятивного заряда (РКЗ) описывается гидродинамической теорией кумуляции.

Для проведения необходимых расчетов поперечное сечение режущего заряда делят плоскостями, перпендикулярными средней поверхности оболочки, на n частей. Для каждого полученного таким образом сечения определяются массы включенных элементов корпуса M_{ki} , футеровки M_i и заряда ВВ m_i . Конечная скорость метания произвольно взятого i -го элемента может быть определена из уравнения баланса энергии для однократной односторонней утечки продуктов детонации (ПД) и рассчитывается по формуле:

$$V_i = 0,353D \sqrt{\frac{3\beta_i}{3 + \beta_i}}, \quad (1)$$

где $\beta_i = m_{ai} / M_i$ — коэффициент нагрузки; m_{ai} — активная масса ВВ в i -ом сечении, вычисляемая по формуле:

$$m_{ai} = m_i / 2(l + M_{ki} - M_i / M_i + M_{ki} + m_i), \quad (2)$$

где m_i , M_{ki} — масса ВВ и внешней оболочки заряда в i -ом сечении, если у заряда нет внешней оболочки ($M_{ki} = 0$), тогда

$$m_{ai} = m_i / 2(M_i + m_i).$$

Если у заряда нет внешней оболочки, то значение $M_{ki} = 0$ и при определении V_i можно использовать следующую зависимость:

$$V_i = 1,2D \sqrt{\frac{1 + (32/27)\eta_{i-1}}{1 + (32/27)\eta_{i+1}}}, \quad (3)$$

где $\eta_i = (\delta_{ei}\rho_e / \delta_i\rho_0)$; δ_i , δ_{ei} и ρ_0 , ρ_e — толщина и плотность оболочки и ВВ соответственно в i -ом сечении заряда [15].

Важно отметить, что элемент оболочки развивает скорость V_i , определяемую формулами (1) и (3), не мгновенно, а в

процессе ускорения, преодолевая некоторое расстояние. Это обстоятельство может быть существенным для верхних элементов оболочки, путь перемещения которых от исходного положения до точки отрыва в плоскости симметрии RZ x_i (см. рис. 2) невелик. Следовательно, в случае с вышеуказанными элементами может возникнуть ситуация, когда они не смогут набрать полную скорость до момента отрыва. В этом случае возможно формирование кумулятивного ножа с отрицательным значением градиента осевых скоростей в его передней части (первые элементы ножа движутся медленнее, чем последующие). Это экспериментально доказано в [16].

Для учета влияния динамики разгона элементов оболочки от продуктов детонации используется подход, используемый при описании процесса разгона цилиндрических фрагментирующих оболочек [17]. В соответствии с этим подходом закон движения элементов оболочки записывается в виде:

$$V_{0i} = V_i(1 - \exp\{-t / \tau_i\}), \quad (4)$$

где V_{0i} , τ_i и V_i — соответственно скорость отрыва, характерное время разгона и асимптотическая скорость движения i -го элемента оболочки, определяемая по (1) или (3).

Дифференцируя выражение (4) по времени, находим ускорение движения элемента оболочки

$$a_{0i} = dV_{0i} / dt = (V_i / \tau_i) \exp\{-t / \tau_i\},$$

из которого характерное время разгона при начальном условии $t = 0$ можно определить:

$$(dV_{0i} / dt)_0 = V_i / \tau_i = p_{\max} S_i / M_i, \quad (5)$$

где p_{\max} — максимальное давление ПД, $p_{\max} = \rho_e D^2 / 4$; S_i — поверхность i -го элемента оболочки. Тогда, учитывая, что $M_i = \rho_0 \delta_i S_i$, получаем:

$$\tau_i = 4V_i \delta_i \rho_0 / \rho_e D^2. \quad (6)$$

Таблица 2

Зависимость скорости разгона элементов оболочки от времени**Time dependences of runaway speed of shell**

t/τ_i	1	2	3	4	5
V_{0i}/V_i	0,63	0,86	0,95	0,98	0,99

Интегрируя выражение (4) по времени, можно получить расстояние, пройденное i -ым элементом оболочки за случайно выбранный момент времени:

$$X_i(t) = V_{0i} + V_i \tau_i (\exp\{-t/\tau_i\} - 1). \quad (7)$$

Скорость разгона элементов оболочки согласно (4) в зависимости от времени относительно характерного времени разгона иллюстрируется данными табл. 2. Из приведенных данных следует, что 95% конечной скорости метания элементов оболочки достигается за время τ_i прохождения в соответствии с формулой (7), расстояния $X_i = 2,05V_i \tau_i$.

Если в формулу (7) подставить текущее значение расстояния X_i (см. рис. 2), которое необходимо пройти от соответствующего элемента оболочки до момента сложения в плоскости симметрии РКЗ, получим трансцендентное уравнение для определения текущего времени его движения τ_i . С учетом этого времени по уравнению (4) вычисляется скорость V_{0i} каждого i -го элемента в момент концентрации материала оболочки.

Параметры кумулятивного ножа, образующегося при эксплуатации РКЗ, определяются на основе гидродинамической теории кумуляции с учетом влияния механических свойств материала оболочки. В соответствии с этой теорией скорость элементов кумулятивного ножа можно определить по формуле:

$$V_{ji} = V_{0i} \frac{\cos(\varphi_i)}{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)} - \sin(\varphi_i), \quad (8)$$

где φ_i — угол отклонения вектора скорости выброса элемента из оболочки от нормали к ее поверхности в момент сбора; α_i — динамический угол сбора (рис. 3).

Для определения глубины сдвига при действии РКЗ на перегородки из различных материалов на основе расчетных параметров формируемого кумулятивного ножа необходимы дополнительные данные, характеризующие процессы его деформации и разрушения отдельных фрагментов. Приблизительно предполагаем, что длина l_i элемента кумулятивного ножа в момент начала воздействия на преграду равна его начальной длине l_{0i} (см. рис. 3), либо $l_i = l_{0i}$. Тогда глубину проникновения элемента кумулятивного ножа в преграду с учетом твердости и прочности последней можно описать формулой:

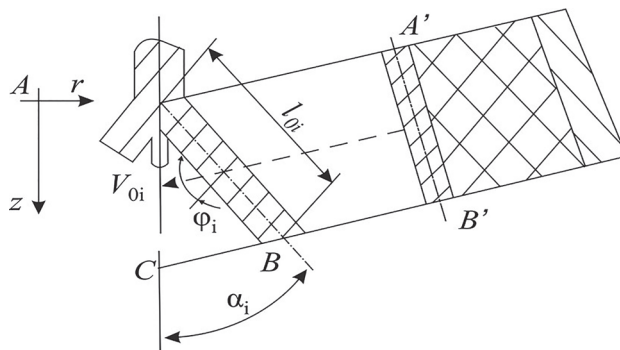


Рис. 3. Схема формирования элементов кумулятивного ножа

Fig. 3. Schematic of formation of cumulative cutter elements

Таблица 3

Экспериментальная и расчетная глубины среза в стальной преграде под действием РКЗ
Actual and design cutting depth in steel barrier under the action of cumulative charge cutter (CCC)

№ опыта	a , мм	δ_e , мм	δ , мм	L_e , мм	L_c , мм	$(L_c - L_e) / L_e$, %
1	25	14	2	30	34,9	16,3
2	50	28	2	60	67,5	12,5
3	50	28	4	70	71,6	2,2



Рис. 4. Общий вид режущего кумулятивного заряда из ВВ V-10

Fig. 4. General view of cumulative charge cutter made of explosive V-10

$$\frac{L_i}{l_i} = \frac{1 - \left(\frac{\rho_T}{\rho_j} \right) \left(\frac{2H_D}{\rho_T V_{ji}^2} \right)}{\sqrt{1 + \left(1 - \frac{\rho_T}{\rho_j} \right) \left(\frac{\rho_T}{\rho_j} \right) \left(\frac{2H_D}{\rho_T V_{ji}^2} \right)} + \sqrt{\frac{\rho_T}{\rho_j} \left(\frac{2H_D}{\rho_T V_{ji}^2} \right)}} \quad (9)$$

где ρ_T, ρ_j – плотности прегородки и струи; V_{ji} – конечная скорость элемента; H_D – динамическая твердость материала прегородки.

Результаты экспериментов

В табл. 3 приведены экспериментальные (L_e) и расчетные (L_c) значения глубины резания для трех пластических зарядов (ПЗ) из ВВ V-10 в термоусадочной пленке с суммарным углом выемки 90° , шириной a , толщиной слоя ВВ δ и толщиной кумулятивной оболочки δ_e . Корпус изготовлен из стали марки «Сталь 3».

Основные взрывные характеристики малочувствительного ВВ V-10: $\rho_e =$

1,66 г/см³; $D = 7400$ м/с. На рис. 4 показан общий вид ПЗ малочувствительного ВВ V-10.

Из полученных экспериментальных результатов, отраженных в табл. 3, видно, что представленная методика удовлетворительна для инженерных расчетов и достаточно точно описывает полученные экспериментальные результаты.

Для инженерных расчетов режущего действия линейных зарядов без металлической оболочки кумулятивной выемки можно использовать соотношение:

$$L = (0,5 - 0,7) D_e, \quad (10)$$

где D_e – диаметр режущего заряда.

Помимо экспериментов, представленных в табл. 3, была проведена серия экспериментов с РКЗ без металлической оболочки. Таблица 4

Глубина проникновения (срезания) кумулятивной струи в зависимости от массы РКЗ

Penetration depth (cutting) of cumulative jet versus mass of CCC

Масса заряда, г/м	Разрезает стальной лист толщиной, мм
70	3,00
100	5,00
150	6,00
200	8,00
250	9,00
400	12,00
500	14,00
800	20,00
1200	28,00

ской кумулятивной оболочки. Задача заключалась в разработке гибкой конструкции заряда, позволяющей снизить его вес, стоимость и расширить область применения. Полученные результаты представлены в табл. 4.

Благодаря своей надежности и качеству, новый усовершенствованный заряд может использоваться для различных целей при проведении промышленных взрывных работ [18–20] и для специального применения. Это эффективная струйная система, где требуются очень точные операции резания или проникновения. Благодаря разнообразию различных масс на единицу длины и способности резать металл до необходимой глубины, он может более успешно применяться для обработки (резки) металла взрывом [21–24]. Его простое закрепление на разрушаемом объекте, благодаря гибкости и способности к самоприклеиванию, значительно упрощает процесс разрушения.

Разработанный кумулятивный заряд легко режется, водоустойчив и прошел испытания с целью определения его чувствительности к механическим воздействиям. Результаты испытаний полностью удовлетворительны. При воспламенении процесс перехода горения в детонацию отсутствует, но наблюдается спокойное горение вплоть до полного сгорания взрывчатого вещества.

Заключение

Из результатов исследований, проведенных при создании нового малочувствительного пластичного взрывчатого

вещества, можно сделать следующие основные выводы:

1. Разработанное малочувствительное пластичное взрывчатое вещество имеет высокую скорость детонации более 7400 м/с и может использоваться для изготовления зарядов различной формы в зависимости от их назначения.

2. Созданное взрывчатое вещество безопасно для использования и транспортировки и имеет относительно невысокую стоимость для взрывчатого вещества своего класса.

3. Разработанное пластичное ВВ может быть эффективно использовано для изготовления режущих кумулятивных зарядов и других изделий промышленного и специального назначения.

4. Режущие кумулятивные заряды могут изготавливаться в зависимости от конкретных требований с разной массой, что позволяет использовать их для резки металла в определенных местах, не повреждая прилегающие участки или элементы.

5. Предполагается, что такие заряды можно будет изготавливать из утилизируемых боеприпасов, что обеспечит их невысокую стоимость.

Вклад авторов

Митков В.Е. — генерация идеи исследования и постановка задачи исследования;

Белин В.А. — генерация идеи исследования и постановка задачи исследования;

Шишков П.К. — анализ результатов исследования и подготовка данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mollova Z.* Blast load analysis and effect on building structures // *Journal of Mining and Geological Sciences.* 2019, vol. 62, no. 2, pp. 75–81.
2. *Mollova Z.* New insights into the impact of blast wave on the human body // *Journal of Mining and Geological Sciences.* 2019, vol. 62, no. 2, pp. 70–75.
3. *Mollova Z., Penev V.* Control of blast-induced seismic action generated by technological blastings // *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal.* 2020, vol. 1, pp. 64–67.

4. *Penev V., Mollova Z.* Design optimization of drilling and blasting operations: a case study on copper ore mining in Asarel // *Journal of Mining and Geological Sciences*. 2020, vol. 63, pp. 84–88.

5. *Belin V., Mollova Z.* Influence of the type of donor charges on the detonation rate of low-sensitivity explosives // *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 1(47), pp. 112–119.

6. *Anastasov D., Valkanov N., Totev L., Mitev I., Dachev G.* Geomechanical dimensioning and implementation of innovative systems for mining out of vein deposits / 25th World Mining Congress. Astana, Kazakstan, 2018, UIA Org ID C2307, pp. 1328–1335.

7. *Mitev I.* Basic positions in the numerical modeling of a subway tunnel on a new Austrian tunnel method // *Mining and Geology Magazine*. 2018, pp. 36–42.

8. *Mitev I.* Three measured calculation pattern of vertical shaft part of an intermediate ventilation and water-driven station from the third line of the metro in Sofia // *Mining and Geology Magazine*. 2019, no. 3, pp. 31–37.

9. *Koprev I., Alexandrova E., Georgiev D., Balev C.* Research the properties and applicability of the solid incorporated from the discoloration in Maritsa East Mining EAD as a road construction raw material // *Mining and Geology Magazine*. 2019, no. 8-9, pp. 41–46.

10. *Dachev G., Bautarov A., Kutzarov K., Mitev I., Balev V., Evtimov H.* Prospects for the future development of the Varba-Banatians, Sixth National Scientific and Technology Conference «Technology and Practices in Underground Mining and Mining Construction» 1–4 October 2018, Devin, pp. 51–61.

11. *Stoycheva N., Shishkov P.* Innovative formulations for a new generation of low-speed explosive compositions, designed for blasting in tender conditions and for extraction of rock-cladding materials // *Journal of Mining and Geological Sciences*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. 94–99.

12. *Stoycheva N., Shishkov P.* Non-detonating charges in polymer housings for smooth splitting of rock blocks during primary extraction and secondary cutting // *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*. 2020, vol. 1, pp. 85–89.

13. *Stoycheva N., Shishkov P.* Comparative analysis of the techniques for detachment of natural stone blocks from the massif with flexible high-explosive charges and bulk-expanding chemical compositions // *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*. 2021, vol. 2, pp. 63–67.

14. *Stoycheva N., Shishkov P.* Optimization of non-detonating charges in polymer housings for cautious blasting activities in dimension stone quarries // *Annual of the University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski»*. 2021, vol. 64, pp. 87–91.

15. *Mitkov V. Todorov P., Genchev V.* Application for issuance of a patent of an invention of explosive polymer No. 110005 / 27.11.2007, Patent Office, 2007. 9 p.

16. *Mitkov V.* Production of explosives for civilian purposes. ИК «St. Ivan Rilski», 2007, 387 p.

17. *Орленко Л. П.* Физика взрыва. Изд. 3-е, перераб. Т. 2. — М.: Физматлит, 2002. — 656 с.

18. *Zaid I. O., Hawkyard J. B., Jonson W.* Experiments in plate cutting by shaped high explosive charges // *Journal of Mechanical Engineering Science*. 1971, vol. 13, no. 1, pp. 13–25.

19. *Белин В. А., Курузов Б. Н., Ганопольский М. И., Оверченко М. Н.* Технология и безопасность взрывных работ. Т. 10. Взрывное дело. Кн. 2. — М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2016. — 423 с.

20. *Бунин Ж. В., Нутфуллоев Г. С.* Методика исследования действия зарядов взрывчатых веществ с кумулятивным эффектом в разнопрочных горных породах. — М.: Изд-во РГГУ, 2014. — 50 с.

21. *Курузов Б. Н., Белин В. А.* Проектирование и организация взрывных работ. — М.: Изд-во «Горная книга», 2012. — С. 281–292.

22. *Дам Чонг Тханг, Белин В. А., Нгуен Тхань Донг* Эмпирические исследования образования воронки вытроса и явления камуфлетта при взрывании сосредоточных зарядов в среде глины под водой // *Взрывное дело*. — 2018. — № 119/76. — С. 49–61.

23. Болотова Ю. Н. Влияние конструкции заряда взрывчатого вещества на формирование сейсмозврывных волн // Взрывное дело. – 2021. – № 133/90. – С. 149–157.

24. Мухутдинов А. Р., Гарифуллин Р. Ш., Ефимов М. Г., Александров В. Н. Компьютерное моделирование процесса кумуляции зарядов баллистического топлива // Взрывное дело. – 2020. – № 126/83. – С. 198–206. **ПТЭ**

REFERENCES

1. Mollova Z. Blast load analysis and effect on building structures. *Journal of Mining and Geological Sciences*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. 75–81.

2. Mollova Z. New insights into the impact of blast wave on the human body. *Journal of Mining and Geological Sciences*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. 70–75.

3. Mollova Z., Penev V. Control of blast-induced seismic action generated by technological blastings. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials Journal*. 2020, vol. 1, pp. 64–67.

4. Penev V., Mollova Z. Design optimization of drilling and blasting operations: a case study on copper ore mining in Asarel. *Journal of Mining and Geological Sciences*. 2020, vol. 63, pp. 84–88.

5. Belin V., Mollova Z. Influence of the type of donor charges on the detonation rate of low-sensitivity explosives. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, vol. 13, no. 1(47), pp. 112–119.

6. Anastasov D., Valkanov N., Totev L., Mitev I., Dachev G. Geomechanical dimensioning and implementation of innovative systems for mining out of vein deposits. *25th World Mining Congress, Astana, Kazakstan, 2018, UIA Org ID C2307*, pp. 1328–1335.

7. Mitev I. Basic positions in the numerical modeling of a subway tunnel on a new Austrian tunnel method. *Mining and Geology Magazine*. 2018, pp. 36–42.

8. Mitev I. Three measured calculation pattern of vertical shaft part of an intermediate ventilation and water-driven station from the third line of the metro in Sofia. *Mining and Geology Magazine*. 2019, no. 3, pp. 31–37.

9. Koprev I., Alexandrova E., Georgiev D., Balev C. Research the properties and applicability of the solid incorporated from the discoloration in Maritsa East Mining EAD as a road construction raw material. *Mining and Geology Magazine*. 2019, no. 8-9, pp. 41–46.

10. Dachev G., Bautarov A., Kutzarov K., Mitev I., Balev V., Evtimov H. Prospects for the future development of the Varba-Banatians, *Sixth National Scientific and Technology Conference «Technology and Practices in Underground Mining and Mining Construction» 1–4 October 2018, Devin*, pp. 51–61.

11. Stoycheva N., Shishkov P. Innovative formulations for a new generation of low-speed explosive compositions, designed for blasting in tender conditions and for extraction of rock-cladding materials. *Journal of Mining and Geological Sciences*. 2019, vol. 62, no. 2, pp. 94–99.

12. Stoycheva N., Shishkov P. Non-detonating charges in polymer housings for smooth splitting of rock blocks during primary extraction and secondary cutting. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*. 2020, vol. 1, pp. 85–89.

13. Stoycheva N., Shishkov P. Comparative analysis of the techniques for detachment of natural stone blocks from the massif with flexible high-explosive charges and bulk-expanding chemical compositions. *Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials*. 2021, vol. 2, pp. 63–67.

14. Stoycheva N., Shishkov P. Optimization of non-detonating charges in polymer housings for cautious blasting activities in dimension stone quarries. *Annual of the University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski»*. 2021, vol. 64, pp. 87–91.

15. Mitkov V. Todorov P., Genchev V. *Application for issuance of a patent of an invention of explosive polymer*. Patent No. 110005. 27.11.2007, Patent Office, 2007. 9 p.

16. Mitkov V. *Production of explosives for civilian purposes*. IK «St. Ivan Rilski», 2007, 387 p.

17. Orlenko L. P. *Fizika vzryva*. Izd. 2-e. T. 2 [Physics explosion, 2nd edition. vol. 2], Moscow, Fizmatlit, 2002, 656 p.

18. Zaid I. O., Hawkyard J. B., Jonson W. Experiments in plate cutting by shaped high explosive charges. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 1971, vol. 13, no. 1, pp. 13 – 25.

19. Belin V. A., Kutuzov B. N., Ganopol'skiy M. I., Overchenko M. N. *Tekhnologiya i bezopasnost' vzryvnykh rabot*. T. 10. Vzryvnoe delo. Kn. 2 [Technology and safety of explosive work. Vol. 10 Explosion technology, book 2], Moscow, Izd-vo «Gornoe delo» OOO «Kimmeriyskiy tsentr», 2016, 423 p.

20. Bunin Zh. V., Nutfulloev G. S. *Metodika issledovaniya deystviya zaryadov vzryvchatykh veshchestv s kumulyativnym efektom v raznoprochnykh gornykh porodakh* [Methods of studying the actions of the charges of explosives with cumulative effect in all-wheel rocks], Moscow, Izd-vo RGGU, 2014, 50 p.

21. Kutuzov B. N., Belin V. A. *Proektirovanie i organizatsiya vzryvnykh rabot* [Design and organization of explosive work], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2012, pp. 281 – 292.

22. Dame Chong Thhang, Belin V. A, Nguyen Than Dong. Empirical studies of the formation of the funnels farmers and yavla. *Explosion technology*. 2018, no. 119/76, pp. 49 – 61.

23. Bolotova Yu. N. Influence of the design of the charge of an explosive on the formation of seismic waves. *Explosion technology*. 2021, no. 133/90, pp. 149 – 157.

24. Mukhutdinov A. R., Garifullin R. Sh., Efimov M. G., Alexandrov V. N. Computer modeling of the process of cumulation charges of ballistic fuel. *Explosion technology*. 2020, no. 126/83, pp. 198 – 206. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Митков Валери Емилов¹ — д-р техн. наук, профессор,

Декан Горно-технологического факультета,

e-mail: valery.mitkov@mgu.bg,

ORCID ID: 0000-0001-5316-6408,

Белин Владимир Арнольдович — д-р техн. наук, профессор,

ГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: bvamggu@mail.ru,

Шишков Петар Крастев¹ — д-р, доцент,

e-mail: peter.shishkov@mgu.bg,

¹ Горно-геологический университет имени Св. Ивана Рильского,

1700 София, Болгария.

Для контактов: Белин В.А., e-mail: bvamggu@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.E. Mitkov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Dean of the Faculty of Mining Technology,

e-mail: valery.mitkov@mgu.bg,

ORCID ID: 0000-0001-5316-6408,

V.A. Belin, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: bvamggu@mail.ru,

Mining Institute, National University of Science

and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,

P.K. Shishkov¹, Dr., Assistant Professor,

e-mail: peter.shishkov@mgu.bg,

¹ University of Mining and Geology «St. Ivan Rilski»,

1700 Sofia, Bulgaria.

Corresponding author: V.A. Belin, e-mail: bvamggu@mail.ru.

Получена редакцией 11.01.2022; получена после рецензии 14.02.2022; принята к печати 10.04.2022.

Received by the editors 11.01.2022; received after the review 14.02.2022; accepted for printing 10.04.2022.