

Исследование детонации промышленных эмульсионных взрывчатых веществ электромагнитным методом

С.Ю. Панфилов¹✉, Г.А. Дудник¹, В.А. Тихонов¹, Д.И. Михеев², Н.О. Мельников², Н.И. Акинин²

¹ ООО «АЗОТТЕХ», г. Москва, Российская Федерация

² Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация

✉ s.panfilov@azottech.ru

Резюме: В статье рассматривается исследование электромагнитным методом детонационных характеристик промышленных эмульсионных взрывчатых веществ, играющих важнейшую роль при проведении взрывных работ. Получение опорных значений детонационных характеристик и апробация методики проводились на образцах «Березит®» марки Э-100 в зарядах с оболочкой диаметром 45 мм из поливинилхлорида. В результате проведенных исследований отработана методика исследования детонационных характеристик промышленных эмульсионных взрывчатых веществ электромагнитным методом. Получены опорные профили изменения массовой скорости продуктов детонации, необходимые для последующих исследований в зарядах большего диаметра с учетом внесения изменений рецептурного состава и способов изготовления промышленных эмульсионных взрывчатых веществ. Установлено характерное для водонаполненных составов отсутствие выраженного химпика, причины такого проявления представляют большой научный интерес, а учитывая прямое влияние на создаваемое давление и, как следствие, результаты дробления породы, закладывают основы совершенствования рецептур ПВВ.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, промышленные эмульсионные взрывчатые вещества, энергоёмкие эмульсии, детонация, детонационные характеристики, скорость детонации, электромагнитный метод

Для цитирования: Панфилов С.Ю., Дудник Г.А., Тихонов В.А., Михеев Д.И., Мельников Н.О., Акинин Н.И. Исследование детонации промышленных эмульсионных взрывчатых веществ электромагнитным методом. *Горная промышленность*. 2024;(6):111–115. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-111-115>

Studying detonation of commercial emulsion explosives using the electromagnetic method

S.Yu. Panfilov¹✉, G.A. Dudnik¹, V.A. Tikhonov¹, D.I. Mikheev², N.O. Melnikov², N.I. Akinin²

¹ AZOTTECH LLC, Moscow, Russian Federation

² Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

✉ s.panfilov@azottech.ru

Abstract: The article reviews a study of the detonation characteristics of commercial emulsion explosives, which play an important role in blasting operations, using the electromagnetic method. Obtaining the reference values of detonation characteristics and validation of the method were carried out using samples of Berezit® E-100 grade in charges inside 45 mm PVC pipes. As the result of these studies, a method of studying the detonation characteristics of commercial emulsion explosives using the electromagnetic method was developed. Reference profiles of changes in the mass velocity of the detonation products were obtained, which are necessary for subsequent studies in a larger diameter charges, taking into account changes in the formulation and manufacturing methods of the industrial emulsion explosives. The lack of a pronounced chemical peak has been established, which is characteristic of the water-based compositions. The reasons of this phenomenon are of great scientific interest, and considering the direct effect on the generated pressure and consequently the results of rock crushing, they lay the foundation for improving the formulations of commercial explosives.

Keywords: explosives, commercial emulsion explosives, energy-intensive emulsions, detonation, detonation characteristics, detonation velocity, electromagnetic method

For citation: Panfilov S.Yu., Dudnik G.A., Tikhonov V.A., Mikheev D.I., Melnikov N.O., Akinin N.I. Studying detonation of commercial emulsion explosives using the electromagnetic method. *Russian Mining Industry*. 2024;(6):111–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-111-115>

Введение

Свойства промышленных взрывчатых веществ определяют результаты проведения буровзрывных работ и обеспечение промышленной безопасности при добыче полезных ископаемых. На сегодняшний день наибольшее распространение получили промышленные эмульсионные взрывчатые вещества (ПЭВВ), которые склонны к саморазрушению в процессе хранения и применения. Образующиеся некондиционные эмульсии обычно утилизируют взрыванием или сжиганием на месте проведения работ в соответствии с требованиями Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при взрывных работах», но могут быть и регенерированы путём извлечения исходных компонентов: раствора окислителя (водного раствора аммиачной селитры или ее смеси с нитратами натрия/кальция) и топливного раствора с эмульгатором, их очистки и последующего возвращения в технологический процесс получения ПЭВВ.

Ранее в работах [1; 2] разработаны способ и технология регенерации некондиционных эмульсионных полуфабрикатов промышленных взрывчатых веществ. Получены опытные образцы эмульсии «Березит®», изготовленные с применением регенераторов, исследованы их физико-химические свойства и установлено соответствие их требованиям ТУ 2241-002-431204295932-2010 «Невзрывчатые компоненты эмульсионных промышленных взрывчатых веществ «Эмульсия «Березит®». При этом сравнительных исследований взрывчатых свойств ПЭВВ, получаемых на основе эмульсионных кондиционных полуфабрикатов и полученных из регенераторов, не проводилось, а они должны соответствовать требованиям ТУ 7276-003-431204295932-2010 «Промышленные эмульсионные взрывчатые вещества «Березит®».

Детонационные характеристики играют важнейшую роль при проведении взрывных работ и подтверждении соответствия контролируемых показателей качества ПЭВВ. В технических условиях на ПЭВВ «Березит®» основным показателем, определяемым в соответствии с ГОСТ 14839.19–69 «Взрывчатые вещества промышленные. Методы определения полноты детонации», метод «А», является полнота детонации открытого заряда диаметром 120 мм и длиной 1000 мм. Такие испытания требуют специальных полигонов и использования большого объема исследуемых веществ, что в случае первичных экспериментальных разработок требует много времени и затруднительно.

Для возможности проведения ускоренных сравнительных лабораторных испытаний различных ПЭВВ целью настоящей работы ООО «АЗОТТЕХ» совместно с РХТУ им. Д.И. Менделеева является отработка методики экспериментального исследования детонационных характеристик, позволяющих оценить эффективность ПЭВВ, изготавливаемых из регенераторов в сравнении с ПЭВВ, получаемых на основе эмульсионных кондиционных полуфабрикатов.

Методы и материалы

Одной из задач проводимых лабораторных исследований взрывного превращения ПЭВВ является получение представительных результатов, позволяющих фиксировать возможные изменения детонационного процесса с учетом запланированных изменений в объектах исследования. Измерение полноты детонации демонстрирует только факт реализации детонационного процесса в текущих внешних условиях взрывания, практически никак не указывая на источник проблемы возможного отказа,

кроме геометрических параметров заряда и начального импульса, что в целом достаточно только для подтверждения применимости ПЭВВ. Измерения скоростей детонации и динамики их изменения в масштабных зарядах более представительно, но все же недостаточно ввиду сложности данного показателя, не позволяющего более детально рассмотреть формирование и развитие детонационного процесса, что необходимо для понимания возможных причин отклонения от нормативных значений. Кроме того, оперативное проведение подобных исследований в лабораторных условиях практически нереализуемо, а натурные и масштабные эксперименты сохраняют достаточно сильную зависимость от условий проведения исследований [3–5], затрудняя выявление критических параметров, и направлены скорее на определение эффективных показателей практического применения. Для повышения аналитической презентативности использован электромагнитный метод измерения массовой скорости продуктов взрыва за фронтом детонационной волны [6–8], позволяющий получить более детальное представление о процессе детонации в исследуемых ПЭВВ и в перспективе провести сравнение с другими взрывчатыми системами промышленного назначения. Этот метод исследования продолжает активно развиваться, совершенствуя точность измерений [9; 10], необходимую преимущественно при исследованиях нанодисперсных смесей и индивидуальных ВВ, а также применяется в комбинированных методах исследования детонационных процессов [11], оставаясь относительно высокоинформативным методом исследования детонационных процессов.

Вкратце сущность метода заключается в измерении ЭДС, генерируемой проводником, движущимся в постоянном магнитном поле. Принципиальная схема представлена на рис. 1.

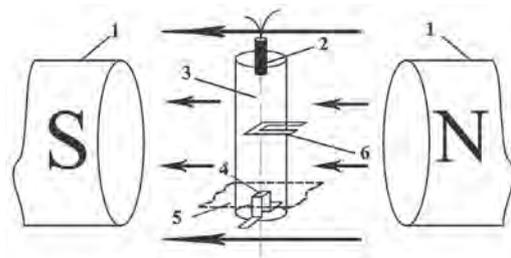


Рис. 1
Принципиальная схема измерения электромагнитным методом:

- 1 – полюса магнита;
- 2 – иницииатор; 3 – заряд;
- 4 – П-образный датчик;
- 5 – рабочая плоскость П-образного датчика;
- 6 – дополнительный датчик для измерения скорости детонации (опционально)

Fig. 1
A principal diagram of measurements using the electromagnetic method:

- 1 - magnet poles;
- 2 - primer; 3 - charge;
- 4 - flat-topped sensor;
- 5 - working plane of the flat-topped sensor; 6 - additional sensor to measure the detonation velocity (optional)

Горизонтальная площадка П-образного датчика используется в качестве движущегося проводника, вовлекаемого в движение совместно с продуктами взрывного превращения.

Основной сложностью является создание такой измерительной части, в которой обеспечивается химическая стабильность исследуемых ПЭВВ и целостность проводника как до испытаний, так и при воздействии характерных для взрывных процессов экстремальных давлений и тем-

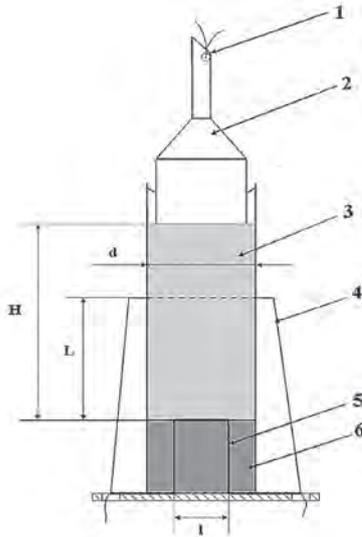


Рис. 2
Схема подготовленного заряда для определения параметров детонационных волн электромагнитным методом:
1 – инициатор;
2 – промежуточный заряд, обеспечивающей генерацию плоской детонационной волны;
3 – исследуемый состав;
4 – «рвущийся» датчик;
5 – П-образный датчик;
6 – парафин; d – диаметр заряда, мм; H – длина заряда, мм; L – расстояние между датчиками, мм; l – длина проводящего датчика, мм

Fig. 2
A schematic diagram of the prepared charge for determining the detonation wave parameters using the electromagnetic method:
1 - primer; 2 - booster that generates a flat detonation wave;
3 - composition to be studied; 4 - blasted sensor;
5 - flat-topped sensor;
6 - paraffin; d - charge diameter, mm; H - charge length, mm; L - distance between the sensors, mm; l - length of the conductive sensor, mm

ператур, что отчасти было решено модифицированием методики [12], в которой электромагнитный датчик устанавливался на границе взрывчатый состав–парафин, с последующей коррекцией результатов, связанных с выносом датчика из взрывчатого состава. Схема заряда представлена на рис. 2.

Разница во времени между сигналами от «рвущегося» и П-образного датчика позволяет рассчитать скорость детонации на конечном участке заряда L , а длина заряда H проектируется с учетом стабилизации детонационного процесса внутри заряда исследуемого состава.

Подготовленный заряд с датчиками переносился в бронеканнеру, устанавливался между полюсами электромагнита строго вертикально с расположением центральной оси заряда непосредственно над датчиком. Датчики соединялись спайкой с коаксиальным кабелем, подключаемым к осциллографу. Постоянное однородное магнитное поле создавалось электромагнитом во взрывозащищенном исполнении с питанием постоянным током от генератора ПН-175. Достижимая величина магнитной индукции при токе в 24 А составляла 0,21 Тл, обеспечивая эффективное вертикальное разрешение осциллограмм. Иницирование осуществлялось взрывотехнической сборкой, идентичной по производительности иницирующему заряду капсуля-детонатора КД №8. Генерация и проведение к испытываемому составу плоской ударной волны достигались за счет использования специально подготовленного промежуточного детонатора.

Генерируемая проводящим П-образным датчиком ЭДС фиксируется цифровым осциллографом. Получаемые зна-



Рис. 3
Внешний вид подготовленного к эксперименту заряда

Fig. 3
Appearance of the charge ready for the test

чения ЭДС прямо пропорциональны скорости движения рабочей плоскости П-образного датчика с учетом магнитной индукции и длины рабочей плоскости.

В работе использован цифровой осциллограф Rigol DS-4024 (чувствительность от 1 мВ, временная развертка от 2 нс).

Получение опорных значений детонационных характеристик и апробация методики проводились на образцах ПЭВВ «Березит®» марки Э-100, приготовленных в лабораторных условиях из сырья без применения регенератов некондиционных эмульсионных матриц, представляющих собой механическую смесь эмульсионной матрицы «Березит®» марки «СБ1» и газогенерирующей добавки нитрит натрия. Исследования проводились в зарядах с ПВХ оболочкой диаметром 45 мм, плотность исследуемого ПЭВВ составила 0,987 г/см³. Промежуточный заряд изготавливался из пенталита, обеспечивая формирование плоской ударной волны в веществе [13] с выходным импульсом порядка 7 км/с. Внешний вид собранного заряда, исследуемого электромагнитным методом во взрывной камере, представлен на рис. 3.

Результаты

В результате проведенных экспериментов получен профиль изменения массовой скорости в детонационной волне с учетом корректирующих зависимостей модифицированной методики, который представлен на рис. 4.

Скорость детонации составила около 4,8 км/с, что указывает на сформированность детонационного процесса и отсутствие влияния промежуточного детонатора.

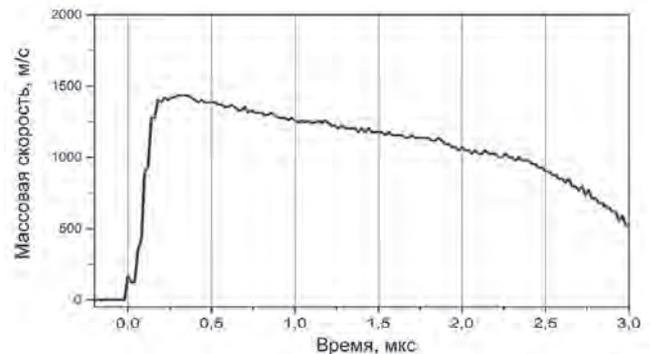


Рис. 4
Профиль изменения массовой скорости ПЭВВ «Березит®» марки Э-100 (d = 45 мм)

Fig. 4
A mass velocity change profile of Berezit® grade E-100 commercial emulsion explosive (d = 45 mm)

Обсуждение результатов

Некоторое снижение скорости детонации относительно заявленных в ТУ 7276-003-431204295932-2010 «Промышленные эмульсионные взрывчатые вещества «Березит®» характеристик логично согласуется с технически вынужденным уменьшением диаметра заряда при проведении первичных экспериментов в силу параллельно проводимой калибровки объемов выборки измерительного оборудования. Однако, стоит заметить, что для жидких и водонаполненных систем характерна кругая, практически пороговая динамика роста скорости детонации до предельных значений при незначительном росте диаметра заряда сверх фактического критического диаметра [8; 14]. В дальнейших исследованиях планируется увеличить геометрию зарядов и получить регламентированные значения скорости детонации для ПЭВВ на основе кондиционных сырьевых компонентов.

На рис. 5 представлено сравнение профилей массовой скорости ПЭВВ «Березит®» марки Э-100 с «Аммонитом №6ЖВ».

Детонационные профили массовой скорости других водонаполненных взрывчатых систем имеют схожие характерные изменения формы в области «химпика», выражающиеся в его усеченном характере в сравнении с сухими смесевыми ПВВ и индивидуальными ВВ [15]. Такой же эффект наблюдается в случае ПЭВВ на примере «Березит®» марки Э-100, что особенно заметно в сравнении с профилем «Аммонита №6ЖВ». Отсутствие характерного «химпика» логично указывает либо на сверхбыстрые реакции, характерные для микроструктурированных систем, к которым можно отнести ПЭВВ [16], не регистрируемые при текущем разрешении осциллографа, либо, что с учетом ширины «химпика» Аммонита №6ЖВ представляется более вероятным, на отсутствие интенсивного энерговыделения, расходуемого на движение продуктов взрывного превращения в сторону развития процесса. Последнее предположение в случае именно водонаполненных взрывчатых систем вероятнее всего связано с наличием значительных количеств воды в исходном составе, но конкретный механизм реализации пока не ясен. Полученные профили позволяют в перспективе не только сравнить возможность использо-

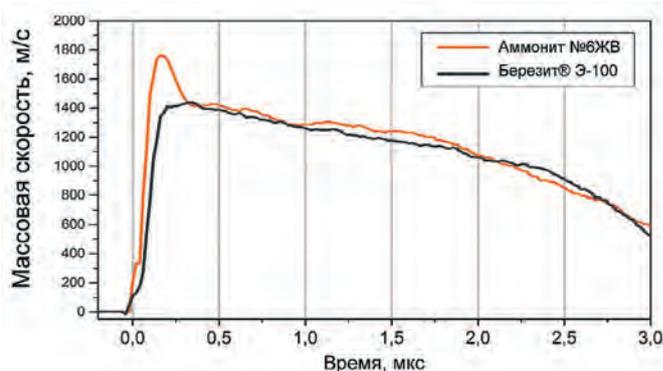


Рис. 5
Профили изменения массовой скорости ПЭВВ «Березит®» марки Э-100 ($d = 45$ мм) и «Аммонит №6ЖВ» ($d = 32$ мм)

Fig. 5
A mass velocity change profiles of Beresit® grade E-100 ($d = 45$ mm) and Ammonite #6ZHV commercial emulsion explosives ($d = 32$ mm)

вания регенерированных сырьевых компонентов для производства ПЭВВ, достигающего по своим характеристикам исходных составов, но и послужат основой в исследовании механизмов развития и потенциальном управлении характеристиками детонационных процессов подобных взрывчатых систем.

Заключение

В результате проведенных исследований отработана методика исследования детонационных характеристик ПЭВВ электромагнитным методом. Получены опорные профили изменения массовой скорости продуктов детонации, необходимые для последующих исследований ПЭВВ в зарядах большего диаметра с учетом внесения изменений рецептурного состава и способов изготовления ПЭВВ.

Установлено характерное для водонаполненных составов отсутствие выраженного «химпика», причины такого проявления представляют большой научный интерес, а учитывая прямое влияние на создаваемое давление и, как следствие, результаты дробления породы, закладывают основы совершенствования рецептур ПВВ.

Список литературы / References

1. Панфилов С.Ю., Дудник Г.А., Султанов Е.В., Булушев Д.А., Мельников Н.О., Акинин Н.И. Разработка способа переработки эмульсионного полуфабриката промышленных эмульсионных взрывчатых веществ. *Химическая промышленность сегодня*. 2024;(1):13–17.
Panfilov S.Yu., Dudnik G.A., Ultanov E.V., Bulushev D.A., Melnikov N.O., Akinin N.I. Method development for industrial emulsion explosives semi-product retreatment. *Chemical Industry Developments*. 2024;(1):13–17. (In Russ.)
2. Панфилов С.Ю., Дудник Г.А., Тихонов В.А., Назаров С.С., Мельников Н.О., Н.И. Акинин Разработка технологии регенерации некондиционных эмульсионных полуфабрикатов промышленных взрывчатых веществ. *Горная промышленность*. 2024;(2):57–62. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-57-62>
Panfilov S.Yu., Dudnik G.A., Tikhonov V.A., Nazarov S.S., Melnikov N.O., Akinin N.I. Development of a method to reclaim off-grade emulsion semi-finished products of industrial explosives. *Russian Mining Industry*. 2024;(2):57–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-57-62>
3. Kabwe E. Velocity of detonation measurement and fragmentation analysis to evaluate blasting efficacy. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018;10(3):523–533. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.12.003>
4. Mertuszka P., Kramarczyk B., Pytlik M., Szumny M., Jaszcz K., Jarosz T. Implementation and verification of effectiveness of bulk emulsion explosive with improved energetic parameters in an underground mine environment. *Energies*. 2022;15(17):6424. <https://doi.org/10.3390/en15176424>
5. Мишнев В.И., Плотников А.Ю., Галимьянов Ал.А., Казарина Е.Н., Галимьянов Ан.А., Гевало К.В. Влияние эмульсионных взрывчатых веществ на скорость детонации скважинного заряда. *Горная промышленность*. 2022;(6):69–73. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-69-73>
Mishnev V.I., Plotnikov A.Y., Galimyanov Al.A., Kazarina E.N., Galimyanov An.A., Gevalo K.V. The effect of emulsion explosives on the completeness of the detonation of the borehole charge. *Russian Mining Industry*. 2022;(6):69–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-6-69-73>

6. Зайцев В.М., Похил П.Ф., Шведов К.К. Электромагнитный метод измерения скорости продуктов взрыва. *Доклады АН СССР*. 1960;132(6):1339–1340. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/rus/dan23746> (дата обращения: 02.09.2024).
Zaitsev V.M., Pokhil P.F., Shvedov K.K. An electromagnetic method for measuring the speed of explosion products. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 1960;132(6):1339–1340. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/rus/dan23746> (accessed: 02.09.2024).
7. Дремин А.Н., Шведов К.К., Веретенников В.А. Исследование детонации аммонита ПЖВ-20 и некоторых других ВВ. *Взрывное дело*. 1963;(52/9):10–25.
Dremin A.N., Shvedov K.K., Veretennikov V.A. Research into detonation of ammonite PZhV-20 and some other explosives. *Explosion Technology*. 1963;(52/9):10–25. (In Russ.)
8. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К. *Детонационные волны в конденсированных средах*. М.: Наука; 1970. 164 с.
9. Li J., Lu Q., Wu Z., Zhang D., Ding Y., Zhou G., Zhang G. Design of an electromagnetic particle velocity measurement system based on superconducting magnet. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022;71:6004610. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3189745>
10. Ershov A.P. On electromagnetic measurements of particle velocity. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2023;59(5):582–590. <https://doi.org/10.1134/S0010508223050076>
11. Peng W., Yang S., Shu J., Chen L., Zhang X. Experimental investigation of shock response to an insensitive explosive under double-shock wave. *International Journal of Impact Engineering*. 2023;173:104489. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104489>
12. Хотин В.Г., Пономарев В.А., Ахачинский А.В., Бачурин С.П., Козлов А.И. *Определение параметров детонационных и ударных волн электромагнитным методом*. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева; 1980. 20 с.
13. Гречковский Б.Ф. *Теоретические и практические основы управления формой детонационной волны во взрываемом заряде*. Донецк: Восточный издательский дом; 2001. 110 с.
14. Юношев А.С., Пластинин А.В., Рафейчик С.И. Скорость детонации эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного полимерными микробаллонами. *Физика горения и взрыва*. 2017;53(6):132–137. <https://doi.org/10.15372/FGV20170616>
Yunoshev A.S., Plastinin A.V., Rafeichik S.I. Detonation velocity of an emulsion explosive sensitized with polymer microballoons. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2017;53(6):738–743. <https://doi.org/10.1134/S0010508217060168>
15. Акинин Н.И., Анников В.Э., Михеев Д.И., Соболева Л.И., Бригадин И.В. Детонация водно-гелевых взрывчатых составов на основе зерненного пироксилинового пороха. *Взрывное дело*. 2017;(118-75):19–28.
Annikov V.E., Mikheev D.I., Akinin N.I., Soboleva L.I., Brigadin I.V. Detonation of water gel explosive based on grained single-base powder. *Explosion Technology*. 2017;(118-75):19–28. (In Russ.)
16. Ершов А.П., Андреев В.В., Кашкаров А.О., Лукьянов Я.Л., Медведев Д.А., Прууэл Э.Р. и др. Детонация ультрадисперсных взрывчатых веществ. *Физика горения и взрыва*. 2021;57(3):111–118. <https://doi.org/10.15372/FGV20210311>
Ershov A.P., Andreev V.V., Kashkarov A.O., Luk'yanov Y.L., Medvedev D.A., Prueuel E.R. et al. Detonation of ultrafine explosives. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2021;57(3):356–363. <https://doi.org/10.1134/S0010508221030114>

Информация об авторах

Панфилов Сергей Юрьевич – главный инженер, ООО «АЗОТТЕХ», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: s.panfilov@azottech.ru

Дудник Геннадий Анатольевич – технический директор, ООО «АЗОТТЕХ», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: g.dudnik@azottech.ru

Тихонов Виталий Александрович – генеральный директор, ООО «АЗОТТЕХ», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: v.tikhonov@azottech.ru

Михеев Денис Иголевич – кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: mikheev.d.i@muctr.ru

Мельников Никита Олегович – доцент кафедры техносферной безопасности, Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: melnikov.n.o@muctr.ru

Акинин Николай Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой техносферной безопасности, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва, Российская Федерация; e-mail: akinin.n.i@muctr.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.10.2024

Поступила после рецензирования: 26.11.2024

Принята к публикации: 02.12.2024

Information about the authors

Sergey Yu. Panfilov – Chief Engineer, AZOTTECH LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: s.panfilov@azottech.ru

Gennady A. Dudnik – Technical Director, AZOTTECH LLC, Moscow, Russian Federation; e-mail: g.dudnik@azottech.ru

Vitaly A. Tikhonov – Director General, AZOTTECH LLC, Moscow, Russian Federation

Denis I. Mikheev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department Technosphere Safety, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: mikheev.d.i@muctr.ru

Nikita O. Melnikov – Associate Professor, Department Technosphere Safety, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: melnikov.n.o@muctr.ru

Nikolai I. Akinin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation; e-mail: akinin.n.i@muctr.ru

Article info

Received: 15.10.2024

Revised: 26.11.2024

Accepted: 02.12.2024