

УДК 534.222.2

ЗАВИСИМОСТЬ ТРОТИЛОВОГО ЭКВИВАЛЕНТА ПОДВОДНОГО ВЗРЫВА ОТ СОДЕРЖАНИЯ ГИДРИДА АЛЮМИНИЯ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ МАТЕРИАЛЕ

© 2024 г. М. Н. Махов*

*Федеральный исследовательский центр химической физики
им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: mnm13makhov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 22.05.2023;

после доработки 14.06.2023;

принята в печать 20.06.2023

Полученные результаты продемонстрировали возможность существенного повышения теплоты взрыва (ТВ) и тротилового эквивалента (ТЭ) по энергии ударной волны при подводном взрыве за счет добавления алюминия (Al) и гидрида алюминия (AlH_3) к взрывчатому веществу (ВВ). Несмотря на то, что составы с AlH_3 уступают по ТВ алюминийсодержащим аналогам, по количеству молей газообразных продуктов преимущество принадлежит композициям с AlH_3 . Замена Al на AlH_3 в смеси с ВВ приводит к повышению массовых значений ТЭ. Последнее особенно заметно в случае, когда базовое ВВ имеет положительный кислородный баланс. Однако составы с AlH_3 проигрывают композициям с Al по величине объемного эквивалента.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, алюминий, гидрид алюминия, теплота взрыва, ударная волна, тротиловый эквивалент.

DOI: 10.31857/S0207401X24010093 **EDN:** mfxngy

ВВЕДЕНИЕ

Порошкообразный алюминий широко используется в качестве горючей добавки для повышения мощности взрывчатых веществ (ВВ). Однако неполнота его окисления и потери, связанные с образованием конденсированной фазы, препятствуют трансформации запасенной энергии в работу расширяющихся продуктов взрыва. Замена Al в смеси с ВВ на AlH_3 может в значительной мере ослабить влияние отмеченных негативных факторов. Основанием для такого вывода является, прежде всего, возможность образования дополнительного количества газообразных продуктов при разложении AlH_3 . Кроме того, можно предположить, что выделение водорода из AlH_3 будет способствовать созданию активной поверхности и увеличению скорости горения металла. Однако эффекты, связанные с высвобождением водорода, могут проявляться по-разному в зависимости от характера процесса. Так, авторы работы [1], анализируя данные по горению модельных композиций на основе перхлората аммония, пришли к выводу, что «механизм влияния AlH_3 на скорость горения твердых ракетных топлив обусловлен не образованием активного, непокрытого окисной пленкой Al, а выделением водорода в области вблизи поверхности горения». Результаты, представленные в [1], показали, что замена Al марки

АСД-6 и нанодисперсного Al на AlH_3 с размером частиц 20 мкм в рассмотренных системах приводит, как правило, к увеличению скорости горения и снижению показателя степени в законе горения. По мнению авторов [1], полученные данные позволяют рассматривать AlH_3 «как модификатор горения топливных композиций».

В работе [2] расчетным путем показано, что добавление AlH_3 в систему перхлорат аммония — каучук в большей степени повышает удельный импульс, чем введение Al. Аналогичные результаты получены авторами работы [3] при расчете удельного импульса ракетных топлив на основе перхлората аммония, в состав которых включены Al и AlH_3 . Расчетные данные по удельному импульсу и скорости ракеты, приведенные в работе [4], также свидетельствуют о высокой баллистической эффективности модельных топлив, содержащих AlH_3 .

В литературе имеется ограниченный объем информации о свойствах смесей ВВ с AlH_3 . Из расчетных результатов, представленных в работе [5], следует, что AlH_3 в меньшей степени, чем Al, снижает скорость детонации тетранитрат пентаэритрита (ТЭН).

Метательная способность характеризует один из важнейших видов действия ВВ. Методика исследования торцевого метания, известная как М-40 (ана-

лог мктодики М-60), в нашей стране принята в качестве базовой [6]. Проведенные ранее исследования продемонстрировали возможность повышения метательной способности ВВ за счет добавления порошкообразного AlH_3 [7]. Расчетным путем показано, что дополнительный прирост метательной способности при замене Al на AlH_3 может быть получен для композиций на основе ВВ с положительным кислородным балансом (КБ).

Одной из областей применения взрывчатых материалов является проведение взрывных работ под водой. В экспериментах по исследованию параметров подводного взрыва определяются профили давления в ударной волне и фазы колебаний газового пузыря, в частности период первой пульсации. Обычно с использованием результатов измерения профиля давления и в соответствии с законом подобия строятся зависимости избыточного давления, удельного импульса и плотности потока энергии в ударной волне от величины отношения $(M^{1/3}/R)$, где M — масса заряда, R — расстояние от центра взрыва [8]. Обобщающей характеристикой является энергия ударной волны.

При разработке способа расчета тротилового эквивалента (ТЭ) подводного взрыва, предложенного в работе [9], принималось во внимание, что процесс отбора энергии при взрыве зависит от свойств продуктов взрыва и, прежде всего, от количества выделившегося газа. С учетом этого был введен характеристический параметр:

$$\varphi = QN^{1/4}, \quad (1)$$

где Q — теплота взрыва (ТВ), N — число молей газообразных продуктов взрыва. Входящие в (1) характеристики нормированы на соответствующие значения для тротила: $Q = 4.354$ МДж/кг, $N = 32.12$ моль/кг).

Статистической обработкой массива экспериментальных данных получено соотношение для оценки ТЭ по энергии ударной волны:

$$G = \varphi(1 - 1.294\alpha^2), \quad (2)$$

где α — массовая доля Al в смеси с ВВ.

В работе [9] представлены расчетные данные, полученные для модельных композиций, содержащих ВВ с различным КБ. Результаты расчета подтвердили возможность существенного повышения ТЭ за счет добавления Al к ВВ. Максимальный прирост ТЭ следует ожидать в случае композиций на основе ВВ с положительным КБ. Расчет показал также слабое различие значений ТЭ для составов, содержащих Al с размером частиц 0.1, 7 и 15 мкм.

Для анализа перспектив использования энергетического материала требуется наличие данных не только по целевому параметру, но и по комплексу характеристик этого материала. К таким характеристикам, в частности, относится чувствительность к внешним воздействиям. В связи с тем, что наиболее распространенным видом несанкционированного воздействия является механическое (удар, трение), чувствительности к такому виду действия уделяется особое внимание исследователей. Современные представления о чувствительности энергетических материалов и методах ее определения отражены, в частности, в публикациях А.В. Дубовика [10–12]. Важные результаты получены авторами работы [13], которые установили корреляционную связь критической температуры самовоспламенения ВВ с критическим давлением инициирования взрыва, а также проанализировали влияние скорости реакции термического разложения и ТВ на чувствительность ВВ.

Предлагаемая работа посвящена сравнению смесей ВВ с Al и AlH_3 по тротиловому эквиваленту, учитывающему энергию ударной волны при подводном взрыве. Вопросы, связанные с чувствительностью и другими характеристиками составов, заслуживают отдельного рассмотрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения исследований рассматривались модельные композиции на основе двух известных мощных ВВ с различным КБ. Октоген (циклотетраметилентетранитрамин) обладает отрицательным КБ, равным -21.6% . Бис(тринитроэтил)нитрамин (БТНЭН) относится к классу ВВ-окислителей. Кислородный баланс этого ВВ равен $+16.5\%$.

Гидрид алюминия имеет несколько полиморфных модификаций. Однако лишь α -фаза стабильна при нормальных условиях. При расчетах энтальпия образования AlH_3 принималась равной -11.42 кДж/моль, а плотность — 1.47 г/см³ [14]. В формулах (1) и (2) в качестве базовой характеристики используется ТВ. На рис. 1 и 2 представлены расчетные кривые, отражающие влияние массовой доли Al и AlH_3 в композициях с ВВ на теплоту взрыва и число молей газообразных продуктов. Оценки выполнены по разработанным ранее методам [15, 16]. При расчетах предполагалось, что металл и водород гидрида участвуют в реакции. Размер частиц ВВ, Al и AlH_3 принимался равным 15 мкм при плотности заряда, составляющей 0.95 от теоретически максимальной плотности. Символами на рис. 1 и 2 обозначены экспериментальные значения ТВ составов с Al.

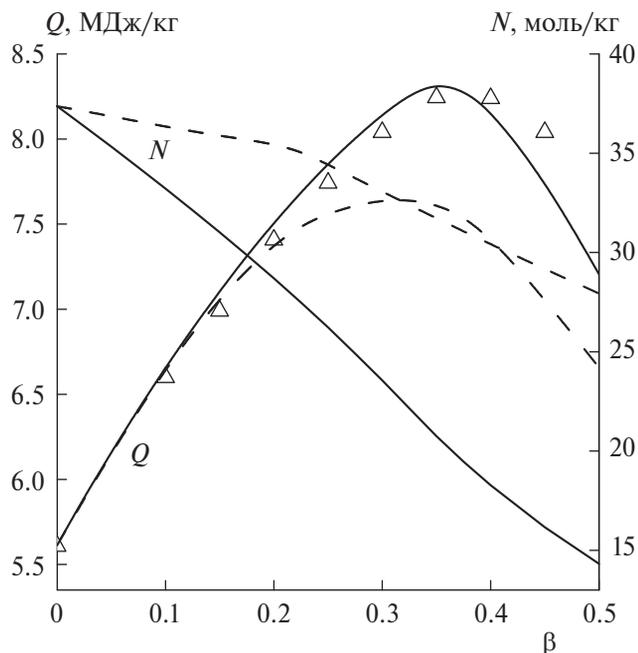


Рис. 1. Теплота взрыва (Q) и число молей газообразных продуктов взрыва (N) в зависимости от β массовой доли Al (сплошные линии) и AlH_3 (штриховые линии) в смеси с октогеном. Символы — экспериментальные значения теплоты взрыва алюминийсодержащих составов.

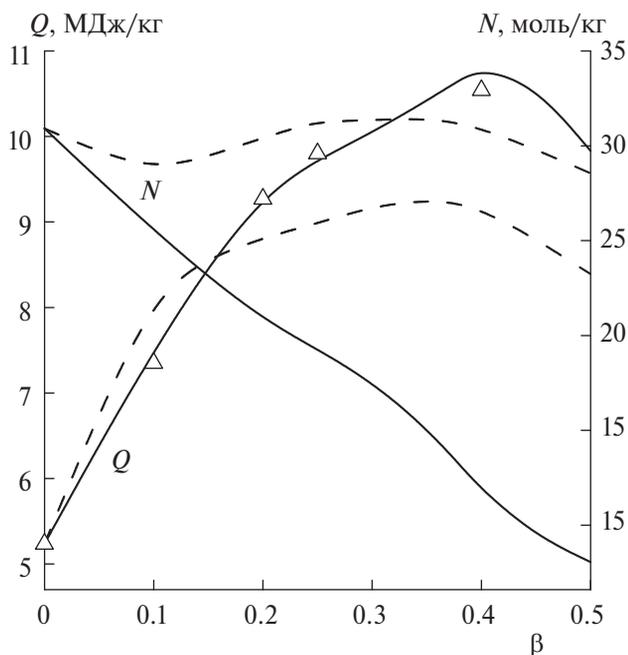


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для композиции с веществом БТНЭН.

Измерения ТВ осуществлялись с использованием калориметрической установки с бомбой внутренним объемом 1.7 л. В состав вводили Al с размером частиц 15 мкм и активностью (массовой долей несвязанного металла) 0.99. Заряд состоял из прессованных таблеток диаметром 12 мм. Вес образца составлял 12—15 г.

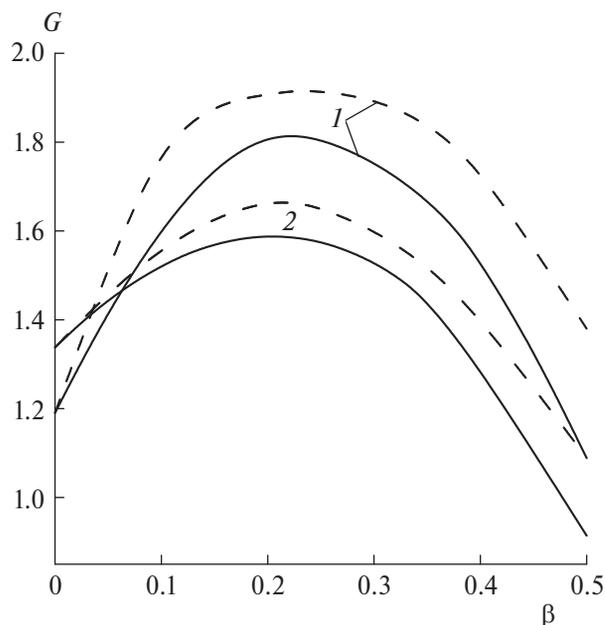


Рис. 3. Зависимость тротилового эквивалента по энергии ударной волны от массовой доли Al (сплошные линии) и AlH_3 (штриховые линии) в смеси с БТНЭН (1) и октогеном (2).

Заряд помещали в оболочку из нержавеющей стали с толщиной стенки 6 мм. Особенности экспериментального определения ТВ алюминизированных ВВ рассмотрены в работе [17].

Как следует из рис. 1 и 2, добавление Al и AlH_3 к ВВ существенно повышает ТВ. Сопоставление данных, представленных на этих рисунках, свидетельствует о том, что ТВ выше у смесей, содержащих БТНЭН, то есть ВВ с положительным КБ. Композиции с AlH_3 по теплоте взрыва уступают составам с Al как в случае октогена, так и БТНЭН. Основная причина этого — отрицательная энтальпия образования AlH_3 . Однако количество молей газообразных продуктов значительно выше у смесей с AlH_3 .

Расчетные кривые на рис. 3 иллюстрируют влияние массовой доли Al и AlH_3 в композициях с октогеном и БТНЭН на тротильный эквивалент. Из полученных данных следует, что использование Al и AlH_3 в качестве добавки к ВВ существенно увеличивает ТЭ, причем в большей степени у составов с БТНЭН. При этом значения ТЭ выше у композиций с AlH_3 . Последнее особенно заметно для составов на основе БТНЭН (см. рис. 4).

В практике применения взрывчатых материалов часто фиксируется объем заряда, что обусловлено, например, калибром. Однако рассмотренные выше значения ТЭ отражают соотношение «эквивалентных» масс. Для перехода на «эквивалентные» объемы необходимо эти значения умножить на от-

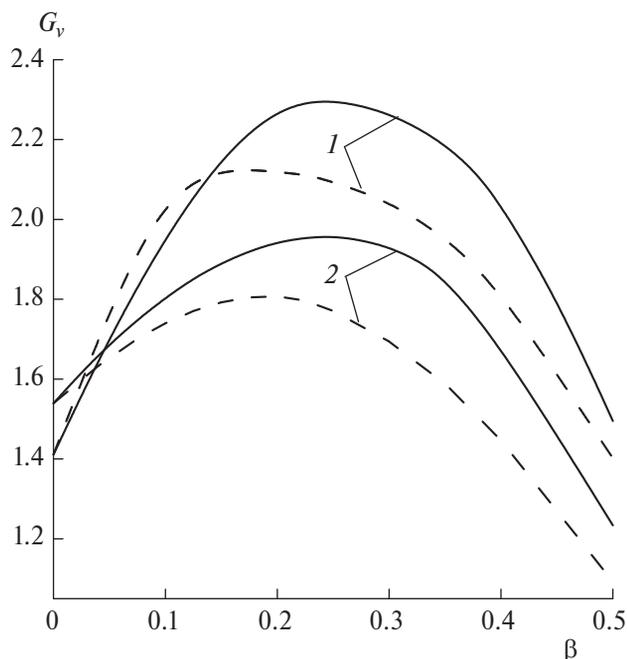


Рис. 4. Зависимость объемного тротилового эквивалента по энергии ударной волны от массовой доли добавки. Обозначения те же, что и на рис. 3

ношение плотностей зарядов исследуемого материала и тротила. В случае «эквивалентных» объемов наблюдается иная картина, чем при рассмотрении «эквивалентных» масс, а именно: составы с AlN_3 проигрывают композициям с Al по объемному ТЭ (рис. 4). Причина этого заключается в более низкой плотности зарядов с AlN_3 по сравнению с алюминиевыми содержащими системами.

Таким образом, результаты показали, что замена Al на AlN_3 во взрывчатом составе может обеспечить дополнительное повышение массового ТЭ по энергии ударной волны подводного взрыва. Однако указанное преимущество композиций с AlN_3 теряется при переходе к объемным эквивалентам.

Работа выполнена в рамках госзадания по теме «1.5. Фундаментальное исследование энергонасыщенных материалов и электрохимических систем с целью повышения эффективности и безопасности их применения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черный А.Н., Наумов Б.А., Березин М.В., Левшенков А.И., Синдицкий В.П. // Успехи в химии и хим. технологии. 2008. Т. 22. № 4. С. 45.
2. Паушкин Я.М. Жидкие и твердые химические ракетные топлива / Под ред. Фокина А.И. М.: Наука, 1978.
3. Weiser V., Eisenreich N., Koleczko A., Roth E. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2007. V. 32. № 3. P. 213; <https://doi.org/10.1002/prep.200700022>
4. Лемперт Д.А., Нечипоренко Г.Н., Шастин А.В. и др. // Хим. физика. 2003. Т. 22. № 4. С. 64.
5. Селезнев А.А., Крекнин Д.А., Лашков В.Н. и др. // Хим. физика. 1998. Т. 17. № 1. С. 76.
6. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва (в 2-х томах) / Под ред. Орленко Л.П. Т. 1. М.: Физматлит, 2002.
7. Махов М.Н. // Горение и взрыв. 2021. Т. 14. № 1. С. 83; <https://doi.org/10.30826/CE21140111>
8. Bjarnholt G. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1980. V. 5. P. 67; <https://doi.org/10.1002/prep.19800050213>
9. Махов М.Н. // Горение и взрыв. 2022. Т. 15. № 4. С. 105; <https://doi.org/10.30826/CE22150411>
10. Дубовик А.В. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 76; <https://doi.org/10.31857/S0207401X21080021>
11. Дубовик А.В. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 3. С. 49; <https://doi.org/10.31857/S0207401X22030050>
12. Дубовик А.В. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 11; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23030056>
13. Назин Г.М., Корсунский Б.Л., Казаков А.И., Набатова А.В., Самойленко Н.Г. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 49; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23030123>
14. Энергетические конденсированные системы, 3-е изд. / Под ред. Жукова Б.П. М.: Янус-К, 2000.
15. Makhov M.N. // Proc. 33rd Intern. Annual Conf. of ICT. Pfnzntal: Fraunhofer Institute for Chemical Technology, 2002. P. 73.
16. Makhov M.N. // Proc. 36th Intern. Annual Conf. of ICT and 32nd Intern. Pyrotechnics Seminar. Pfnzntal: Fraunhofer Institute for Chemical Technology, 2005. P. 122.
17. Махов М.Н. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 71; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20090083>

DEPENDENCE OF THE TNT EQUIVALENT OF AN UNDERWATER EXPLOSION ON THE CONTENT OF ALUMINUM HYDRIDE IN THE ENERGY MATERIAL

M. N. Makhov

Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

e-mail: mmn13makhov@yandex.ru

Abstract—The results obtained show that the addition of aluminum (Al) and aluminum hydride (AlH_3) to the explosive significantly increases the heat of explosion and the TNT equivalent (TE) of an underwater explosion. The compositions with AlH_3 are inferior to the Al-containing counterparts in the heat of explosion. However, the formulations with AlH_3 have the advantage in terms of the number of moles of gaseous products. Replacing Al with AlH_3 weakly affects the TE in terms of the energy of gas bubble, while the TE in terms of the energy of shock wave is higher for the mixtures with AlH_3 . The latter is especially noticeable in the case of the explosive with a positive oxygen balance. However, the compositions with AlH_3 are inferior to the Al-containing mixtures in the volumetric TE.

Keywords: explosion, aluminum, aluminum hydride, heat of explosion, shock wave, TNT equivalent.

REFERENCES

1. N. Chernyy, B. A. Naumov, M. V. Berezin, A. I. Levshenkov, and V. P. Sinditskiy, *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii* (Mosk.) — Advances in Chemistry and Chemical Technology 22(4), 45 (2008).
2. Ya. M. Paushkin, in *Liquid and Solid Chemical Rocket Fuels*, Ed. by A. I. Fokin (Nauka, Moscow, 1978) [in Russian].
3. V. Weiser, N. Eisenreich, A. Koleczko, and E. Roth, *Propellants, Explosives, Pyrotech.* 32(3), 213 (2007). <https://doi.org/10.1002/prop.200700022>
4. Lempert, G. N. Nechiporenko, A. V. Shastin, et al., *Khim. Fiz.* 22(4), 64 (2003)
5. Seleznev, A. A., D. A. Kreknin, V. N. Lashkov, et al., *Khim. Fiz.* 17(1), 76 (1998).
6. S. G. Andreev, A. V. Babkin, F. A. Baum, et al., *Physics of Explosion*, Ed. by L. P. Orlenko (Fizmatlit, Moscow, 2002), Vol. 1 [in Russian].
7. M. N. Makhov, *Gorenie Vzryv* 14(1), 83 (2021). <https://doi.org/10.30826/CE21140111>
8. G. Bjarnholt, *Propellants, Explosives, Pyrotech.* 5, 67 (1980). <https://doi.org/10.1002/prop.19800050213>
9. M. N. Makhov, *Gorenie Vzryv* 15(4), 105 (2022). <https://doi.org/10.30826/CE22150411>
10. A. V. Dubovik, *Russ. J. Phys. Chem. B* 15(4), 696 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1990793121040151>
11. A. V. Dubovik, *Russ. J. Phys. Chem. B* 16(2), 260 (2022). <https://doi.org/10.1134/S1990793122020051>
12. A. V. Dubovik, *Russ. J. Phys. Chem. B* 17(2), 369 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123020057>
13. G. M. Nazin, B. L. Korsunskiy, A. I. Kazakov, A. V. Nabatova, and N. G. Samoylenko, *J. Phys. Chem. B* 17(2), 406 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123020124>
14. *Energy condensed systems*, 3rd ed. Ed. by B. P. Zhukov (Yanus-K, Moscow, 2000) [in Russian].
15. M. N. Makhov, in *Proceedings of the 33rd International Annual Conference of ICT* (Fraunhofer Inst. Chem. Technol., Pfinztal, 2002), p. 73.
16. M. N. Makhov, in *Proceedings of the 36th International Annual Conference of ICT and 32nd International Pyrotechnics Seminar* (Fraunhofer Inst. Chem. Technol., Pfinztal, 2005), p. 122.
17. M. N. Makhov, *Russ. J. Phys. Chem. B* 14(5), 821 (2020). <https://doi.org/10.1134/S1990793120050085>