

УДК 534.222.2

## МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ СМЕСЕЙ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С ПОЛОЖИТЕЛЬНЫМ И ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ КИСЛОРОДНЫМ БАЛАНСОМ

© 2024 г. М. Н. Махов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: mmn13makhov@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.01.2024

После доработки 12.02.2024

Принята в печать 20.02.2024

Проанализированы возможности повышения метательной способности (МС) энергетических материалов за счет создания смесей взрывчатых веществ (ВВ), обладающих положительным и отрицательным кислородным балансом. Для расчетов в качестве ВВ-окислителей были выбраны относительно новые соединения: 3,6-динитро-1,4-бис(тринитрометил)-1,4-дигидропиразоло[4,3-с]пиразол; 4,4'5,5'-тетранитро-2,2'-бис(тринитрометил)-2Н,2'Н-3,3'-бипиразол; 2-динитрометил-5-нитротетразол. Функцию ВВ-горючего выполняли вещества октоген и CL-20. Из расчетов следует, что МС октогена заметно возрастет при добавлении к нему указанных окислителей, а введение окислителей в состав с веществом CL-20 приведет лишь к незначительному повышению МС.

**Ключевые слова:** взрывчатое вещество, алюминий, кислородный баланс, метательная способность, теплота взрыва.

**DOI:** 10.31857/S0207401X24080076

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Метательная способность (МС) является одной из важнейших характеристик взрывчатого вещества (ВВ). Измерения этого параметра позволяют не только сопоставлять ВВ по метательному действию, но и изучать процесс расширения продуктов взрыва (ПВ). Лабораторные методы исследования МС в основном подразделяются на два типа: разлет цилиндрических оболочек и метание металлических пластин с торца заряда. К первому типу относится методика Т-20 [1, 2], которая отличается от прототипа — метода “Цилиндр-тест”, разработанного в США [3, 4], несколько меньшим размером и способом регистрации движения оболочки.

Результаты исследований по методике расширения оболочек служат как для сравнения взрывчатых веществ по МС, так и для построения уравнения состояния ПВ (например, в форме JWL (Jones—Wilkins—Lee) с эмпирическими константами для каждого ВВ [5]). Кроме того, эти данные часто используются для нахождения энергии Гарни (названа в честь разработчика модели),

которая рассчитывается на основе допущения об однородности плотности ПВ на каждой стадии расширения [3, 6–9].

Базовым методом, принадлежащим ко второму типу, является известная отечественная методика М-40 (аналог М-60 и М-20), в которой исследуется процесс ускорения стальной пластины толщиной 4 мм, метаемой с торца цилиндрического заряда длиной и диаметром 40 мм в канале толстостенной стальной оболочки [1]. Мерой МС обычно служит скорость пластины (как правило, в относительных единицах), а в качестве стандартной базы измерений принимается расстояние в 40 мм от торца заряда.

Результаты выполненных ранее исследований МС свидетельствуют о том, что в настоящее время дисперсный алюминий (Al) является одним из перспективных материалов для использования в качестве горючей добавки в составах метательного действия [10–13]. При изучении алюминизированных ВВ особое внимание исследователей всегда уделялось взрывчатым композициям с нанодисперсным Al. В частности, с использованием

методики М-20 определена МС структурированных на наноуровне композитов, содержащих нанодисперсный алюминий и октоген (1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктан) [13]. Вопреки ожиданиям оказалось, что композиты с равномерным распределением наночастиц алюминия в матрице октогена по МС не обладают преимуществом перед составами, содержащими Al с размером частиц порядка нескольких микрон. Однако в дальнейшем было показано, что композиты с наночастицами Al могут по МС превосходить смеси с микроразмерными частицами Al при резко отрицательном кислородном балансе (КБ) основного ВВ [14], который рассчитывается (в %) по формуле  $800(2c - b - 4a)/M$  для молекулы  $C_aH_bO_cN_d$ , где  $M$  – молекулярный вес.

Полуэмпирический метод расчета МС индивидуальных и алюминизированных ВВ был разработан ранее с использованием экспериментального массива данных и предположения о зависимости коэффициента трансформации химической энергии в кинетическую от объемного числа молей газообразных ПВ [15]. В усовершенствованном методе, основанном на модели Гарни, используется выражение для активной массы ВВ в случае как радиального, так и торцевого метания [16]. Полуэмпирические соотношения позволяют рассчитывать скорости медной оболочки и стальной пластины в условиях методик Т-20 и М-40 соответственно. Расчет МС для индивидуальных ВВ осуществляется на основе калориметрических значений теплоты взрыва (ТВ). При отсутствии экспериментальных данных ТВ индивидуальных ВВ рассчитывается по методу, предложенному в работе [17]. В случае алюминийсодержащих композиций оцениваются эффективная полнота окисления Al, тепловой эффект и состав ПВ для рассматриваемых стадий расширения [15, 16].

Ранее было показано, что выводы, полученные при исследовании МС с применением методик М-40 и Т-20, во многом совпадают [14, 15, 18]. В связи с этим в предлагаемой работе рассматриваются данные, соответствующие условиям испытаний по методу М-40.

Традиционным способом повышения мощности взрывчатых материалов является синтез новых ВВ, превосходящих по параметрам имеющиеся аналоги. Известно, что наибольшей величиной МС обладают сбалансированные по содержанию горючих и окислительных элементов

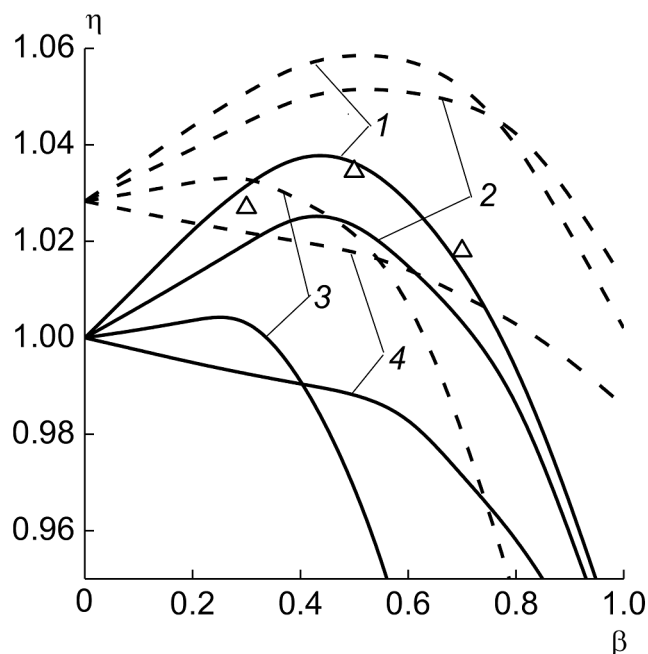
высокоплотные энергоемкие ВВ. К сожалению, тенденция к повышению чувствительности к внешним воздействиям с увеличением энергосодержания ВВ препятствует практическому использованию многих веществ. Примером такого соединения служит 4,4'-динитро-3,3'-дiazенофуросан (ДДФ). По оценке, выполненной с использованием метода работы [16], это взрывчатое вещество по МС (М-40) должно превосходить октоген на рекордную величину в 10%. Однако чрезвычайно высокая чувствительность ДДФ к механическим воздействиям резко ограничивает возможность практического использования данного ВВ [19].

Следует отметить, что при рассмотрении возможностей применения взрывчатого вещества необходимо наличие информации по широкому спектру его параметров. К таким параметрам, в частности, относится чувствительность к внешним воздействиям. Наиболее распространенным видом несанкционированного воздействия является механическое (удар, трение). Современные представления о чувствительности энергетических материалов и методах ее определения отражены, в частности, в публикациях А.В. Дубовика [20–22]. Важные результаты получены авторами работы [23], которые проанализировали влияние скорости реакции термического разложения и ТВ на чувствительность ВВ и установили корреляционную связь критической температуры самовоспламенения ВВ с критическим давлением инициирования взрыва.

В предлагаемой работе анализируются результаты расчета МС, выполненного по методу работы [16]. Рассмотрение других характеристик не входило в задачу исследования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

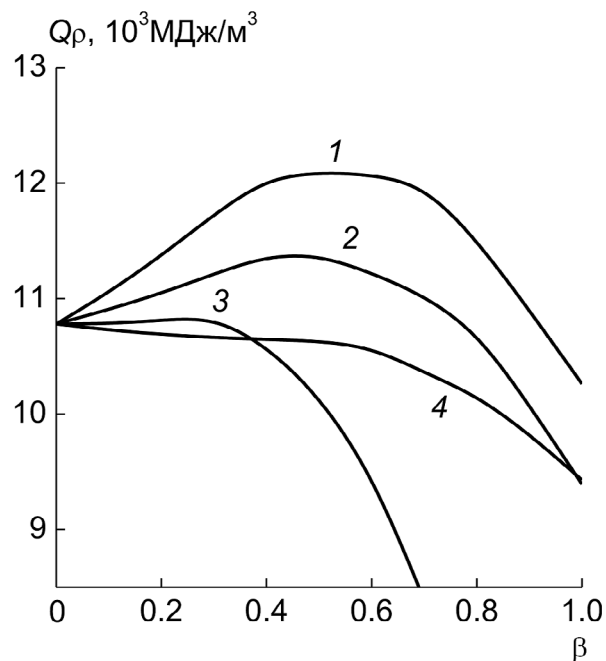
Одной из причин недостаточно высокой мощности многих ВВ является дефицит кислорода в молекуле. Объединение ВВ-окислителя (положительный КБ) и ВВ-горючего (отрицательный КБ) может способствовать созданию системы, превосходящей по МС каждое из составляющих смесь веществ. Полученные ранее экспериментальные и расчетные результаты исследования МС свидетельствуют о перспективности разработки взрывчатых систем типа ВВ-окислитель/ВВ-горючее [16, 24]. Так, из полученных данных следует, что композиция, содержащая в качестве



**Рис. 1.** Относительная скорость пластины ( $\eta$ ) в зависимости от массовой доли ВВ-окислителя в бинарной композиции с октогеном ( $\beta$ ); сплошные линии – бинарные смеси, штриховые – составы с добавкой 12.5% Al. ВВ-окислители: 1 – БТНЭН, 2 – ГНФ, 3 – АДНА, 4 – ДНГ. Символы – экспериментальные значения для состава БТНЭН/октоген.

ВВ-окислителя бис-(2,2,2-тринитроэтил)нитрамин (БТНЭН), а в качестве ВВ-горючего – октоген, превосходит по МС каждое из отдельно рассматриваемых веществ. Однако не всегда добавка ВВ с положительным КБ будет способствовать повышению МС вещества с отрицательным КБ.

Расчетные кривые, представленные на рис. 1, отражают влияние концентрации ВВ-окислителя в композициях с октогеном на относительную скорость пластины. Следует отметить, что в настоящее время октоген является одним из наиболее распространенных веществ, используемых в составах бризантного действия. Некоторые исходные данные для октогена приведены в табл. 1, где  $\Delta H_f^\circ$  – стандартная энтальпия образования. В качестве ВВ с положительным КБ (указан в скобках) рассматривались следующие соединения: БТНЭН (+16.5%), ГНФ (гидразиниевая соль нитроформа, +13.1%), АДНА (аммониевая соль динитрамида, +25.8%), ДНГ (1,2-динитрогуанидин, +5.4%). Расчет выполнен для брутто-формулы и максимальной плотности бинарной композиции. Для проведения экспериментов составы БТНЭН/октоген готовились при длительном смешении



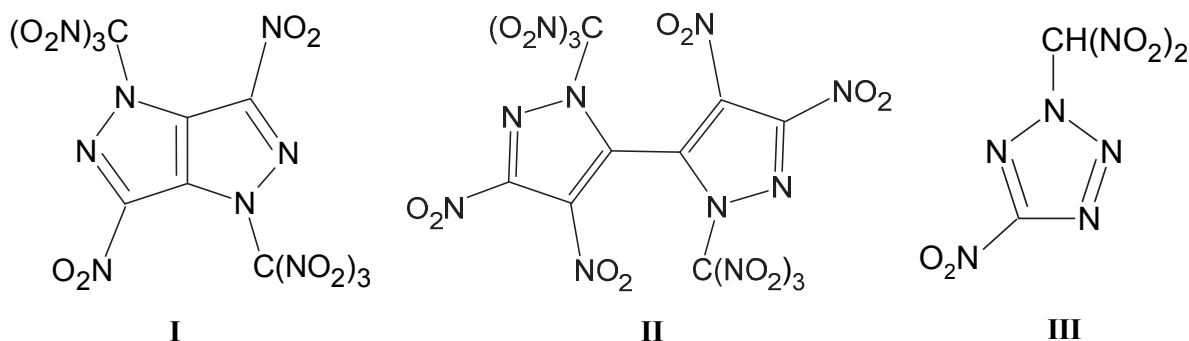
**Рис. 2.** Объемное значение ТВ ( $Q_p$ ) в зависимости от массовой доли ВВ-окислителя в бинарной композиции с октогеном ( $\beta$ ); цифровые обозначения те же, что и на рис. 1.

компонентов на рольгангах в емкости с фарфоровыми шарами под слоем инертной жидкости [24].

Как следует из рис. 1, добавление БТНЭН к октогену повышает МС. Удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений МС свидетельствует о том, что в условиях, соответствующих методике М-40, осуществляется активное взаимодействие продуктов разложения веществ, входящих в данную смесь. Добавка ГНФ, хотя и в меньшей степени, но также увеличивает МС октогена. Введение вещества АДНА не создает заметного эффекта. Использование ДНГ в составе с октогеном следует признать нецелесообразным, так как с повышением содержания этого вещества МС композиции снижается.

В экспериментах по методике М-40 объем заряда остается постоянным. С учетом этого в качестве важного параметра, влияющего на МС взрывчатого материала, следует рассматривать запас энергии в единице объема. На рис. 2 представлены расчетные зависимости, отражающие влияние концентрации ВВ-окислителя на объемные значения ТВ бинарных композиций с октогеном. Сравнение указывает на соответствие кривых на рис. 1 и 2.

Схема 1.



На рис. 1 приведены также зависимости для тройных композиций, содержащих 12.5% Al с размером частиц 7 мкм. Количество алюминиевой добавки выбрано из тех соображений, что концентрация Al, соответствующая максимальному повышению МС, лежит в диапазоне 10–15% [12, 14, 18]. Необходимо заметить, что в случае алюминизированных композиций взрывчатое вещество, даже обладая отрицательным КБ, играет роль окислителя металла, так как Al активно взаимодействует с ПВ этого взрывчатого вещества. Как видно из рис. 1, добавка Al повышает МС рассматриваемых составов.

На основе анализа данных можно выделить основные требования, которые следует предъявлять к ВВ-окислителю при выборе его в качестве возможного компонента для составов метательного действия. К таким требованиям относятся: высокий КБ, высокая плотность монокристалла и, желательно, положительная энтальпия образования.

Характер влияния окислителя зависит и от параметров ВВ-горючего. Одним из наиболее мощных в ряду известных к настоящему времени ВВ является CL-20 (2,4,6,8,10,12-гексанитро-2,4,6,8,10,12-гексаазаизовюрцитан). Это ВВ обладает слабо отрицательным КБ, положительной энтальпией образования и высокой плотностью монокристалла. (см. табл. 1).

Рисунок 3 иллюстрирует влияние концентрации вещества АДНА на МС смесей с тремя ВВ-горючими. В качестве последних рассматривались CL-20, октоген и 2,4,6-тринитротолуол (ТНТ). Из рис. 3 следует, что добавление АДНА к CL-20 снижает МС. Само вещество CL-20 обладает высокой МС и существенно превосходит по этому параметру октоген. Как уже отмечалось, введение АДНА в состав с октогеном не дает за-

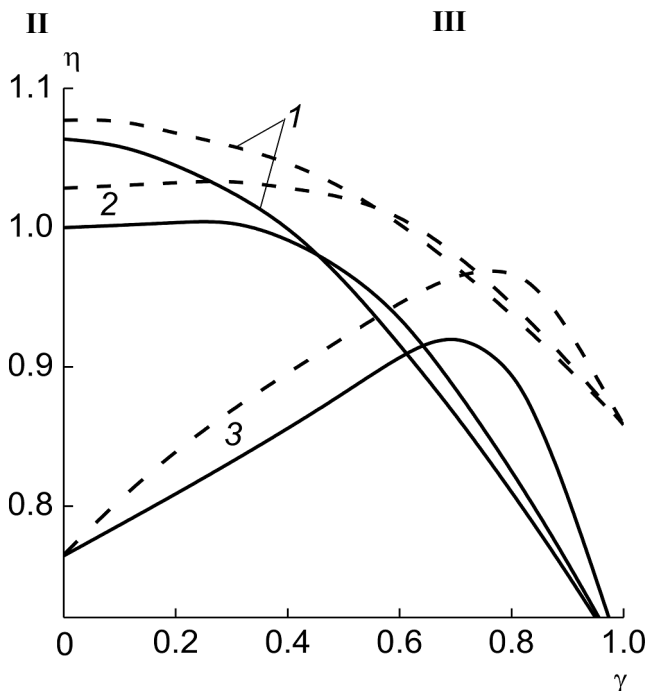


Рис. 3. Относительная скорость пластины ( $\eta$ ) в зависимости от массовой доли вещества АДНА в бинарной композиции с ВВ ( $\gamma$ ); ВВ: 1 – CL-20, 2 – октоген, 3 – ТНТ; сплошные линии – бинарные смеси, штриховые – составы с добавкой 12.5% Al.

метного эффекта. Однако добавление АДНА к ТНТ, обладающему резко отрицательным КБ (–74%) и умеренной мощностью, повышает метательную способность ТНТ (несмотря на это, композиция с ТНТ по МС уступает не только CL-20, но и октогену).

В последние годы синтезированы и активно исследуются ВВ с положительным КБ. Ниже представлены расчетные результаты, характеризующие влияние трех выбранных ВВ-окислителей на МС композиций, содержащих в качестве ВВ-горючего октоген и CL-20. Рассматривались следующие ВВ-окислители: 3,6-динитро-1,4-бис(тринитрометил)-1,4-дигидропиразоло[4,3-с]пиразол (I) [28, 29]; 4,4'5,5'-тетранитро-2,2'-

Таблица 1. Исходные параметры ВВ

| ВВ      | Формула              | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | $\Delta H_f^\circ$ , кДж/моль | КБ, % |
|---------|----------------------|----------------------------|-------------------------------|-------|
| Октоген | $C_4H_8O_8N_8$       | 1.902 [25]                 | 85.8 [27]                     | –21.6 |
| CL-20   | $C_6H_6O_{12}N_{12}$ | 2.044 [26]                 | 374.9 [27]                    | –11.0 |
| I       | $C_6O_{16}N_{12}$    | 1.997                      | 580.3                         | +12.9 |
| II      | $C_8O_{20}N_{14}$    | 2.021                      | 522.5                         | +10.5 |
| III     | $C_2HO_6N_7$         | 1.970                      | 311.4                         | +11.0 |

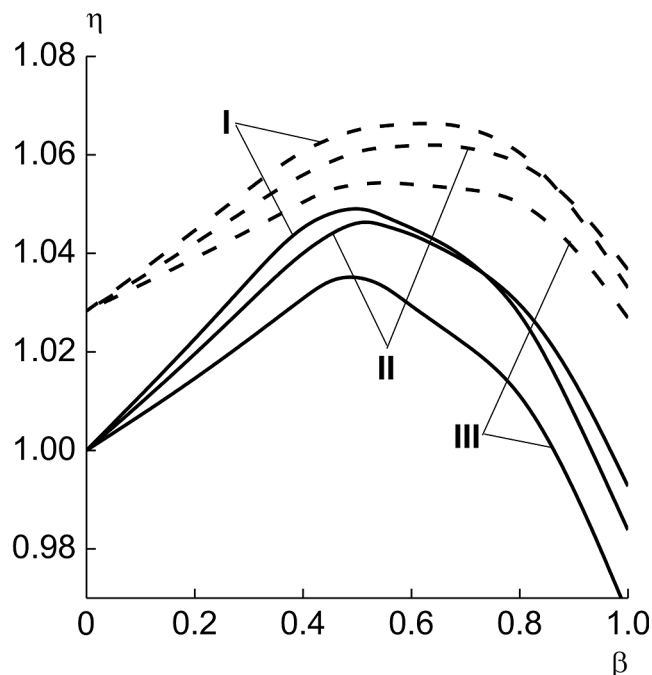


Рис. 4. Относительная скорость пластины ( $\eta$ ) в зависимости от массовой доли ВВ-окислителя в бинарной композиции с октогеном ( $\beta$ ); сплошные линии — бинарные смеси, штриховые — составы с добавкой 12.5% Al. Римские цифры соответствуют различным ВВ-окислителям (обозначения см. в тексте).

бис(тринитрометил)-2Н,2'Н-3,3'-бипиразол (II) [29, 30]; 2-динитрометил-5-нитротетразол (III) [31, 32].

Результаты расчетов, представленные в работах [29, 32], свидетельствуют о высоком потенциале указанных ВВ как возможных компонентов твердых ракетных топлив. Авторы этих публикаций использовали экспериментальные значения плотностей и расчетные величины энтальпий образования веществ I–III. Эти данные и внесены в табл. 1. На Схеме 1 приведены структурные формулы соединений.

Следует подчеркнуть, что выбранные ВВ-окислители обладают высокой плотностью и относительно высокой энтальпией образования. Результаты расчетов МС композиций с октогеном иллюстрирует рис. 4, из которого следует, что

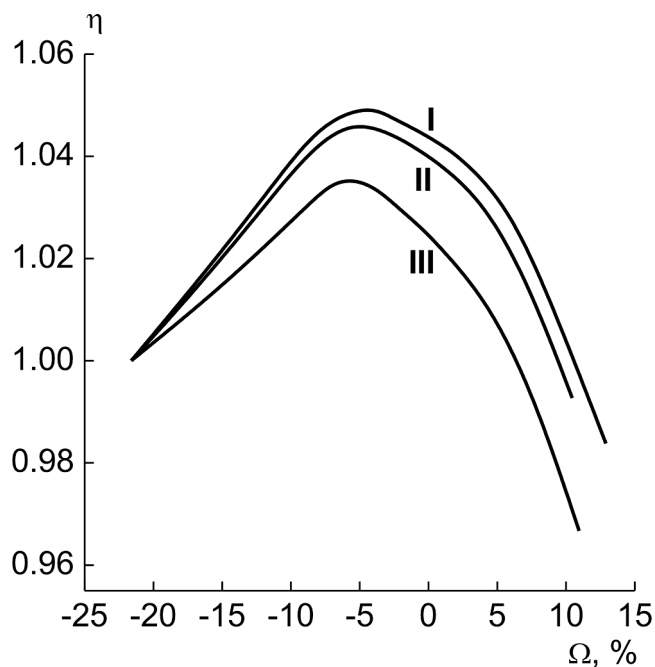
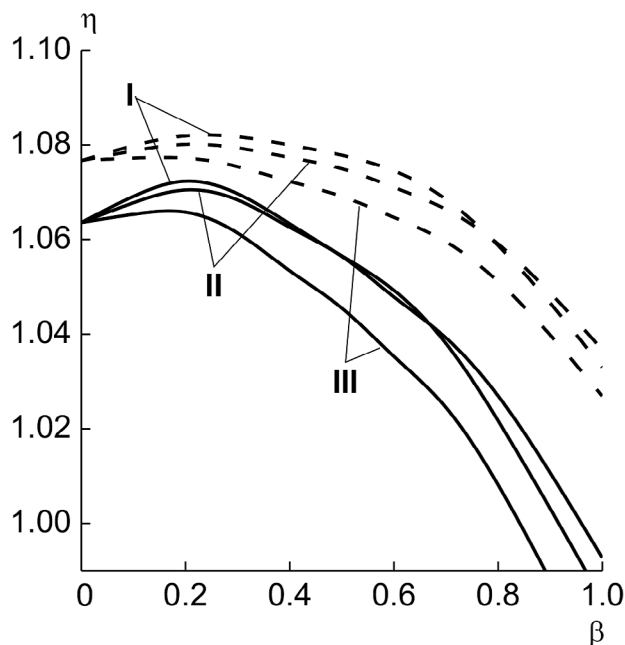


Рис. 5. Относительная скорость пластины ( $\eta$ ) в зависимости от КБ бинарной композиции с октогеном ( $\Omega$ ). Цифровые обозначения те же, что и на рис. 4.

добавление ВВ-окислителей повышает метательную способность октогена. Наибольший прирост соответствует веществу I (на ~5% по скорости пластины при оптимальном соотношении концентраций ВВ). Такая смесь по МС превосходит состав БТНЭН/октоген (см. рис. 1). На рис. 5 представлены зависимости МС от КБ бинарных смесей с октогеном. Обращает на себя внимание тот факт, что оптимальное содержание компонентов соответствует небольшому по абсолютной величине отрицательному КБ.

Как уже отмечалось, CL-20 обладает слабо отрицательным КБ и положительной энтальпией образования. По плотности монокристалла это вещество даже несколько превосходит рассматриваемые ВВ-окислители (см. табл. 1). Из зависимостей, представленных на рис. 6, следует, что прирост МС при добавлении ВВ-окислителей к CL-20 не превышает 1%. Добавка Al к составам



**Рис. 6.** Относительная скорость пластины ( $\eta$ ) в зависимости от массовой доли ВВ-окислителя в бинарной композиции с CL-20 ( $\beta$ ); сплошные линии — бинарные смеси, штриховые — составы с добавкой 12.5% Al. Цифровые обозначения те же, что и на рис. 4 и 5.

на основе октогена и CL-20 обеспечивает дополнительное увеличение МС (см. рис. 4, 6). Однако в случае октогена даже смесь с веществом I и алюминием по МС лишь достигает уровня CL-20.

Таким образом, МС композиции, объединяющей в своем составе ВВ с положительным и отрицательным КБ, зависит от сочетания свойств этих взрывчатых веществ. Выбранные три относительно новых ВВ-окислителя по величине энтальпии образования и плотности монокристалла превосходят октоген. Введение этих окислителей в состав с октогеном повышает МС. Однако добавление ВВ-окислителей к CL-20 создает лишь незначительный эффект. Полученные результаты подтверждают также возможность дополнительного повышения МС за счет введения порошкообразного алюминия во взрывчатый состав.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. и др. Физика взрыва. В 2-х т. / Под ред. Орленко Л.П. Т. 1. М.: Физматлит, 2002.
2. Методы исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / Под ред. Жерноклетова М.В. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
3. Hardesty D.R., Kennedy J.E. // Combust. and Flame. 1977. V. 28. № 1. P. 45.
4. Hornberg H. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1986. V. 11. P. 23.
5. Finger M., Lee E., Helm F. H. et al. // Proc. 6th Sympos. (Intern.) on Detonation. Arlington: ONR ACR-221, 1976. P. 710.
6. Gurney R.W. // Report BRL 405. Army Ballistic Research Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, USA, 1943.
7. Kamlet M.J., Finger M. // Combust. and Flame. 1979. V. 34. P. 213.
8. Koch A., Arnold N., Estermann M. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2002. V. 27. № 6. P. 365. <https://doi.org/10.1002/prep.200290007>
9. Danel J.-F., Kazandjian L. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2004. V. 29. № 5. P. 314. <https://doi.org/10.1002/prep.200400060>
10. Махов М.Н. // Горение и взрыв / Под. ред. Фролова С.М. М: Торус Пресс, 2008. Вып. 1. С. 93.
11. Махов М.Н. // Горение и взрыв. 2015. Т. 8. № 2. С. 256.
12. Давыдов В.Ю., Губин А.С. // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 6. С. 49.
13. Гоголя М.Ф., Махов М.Н., Бражников М.А. и др. // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 2. С. 85.
14. Махов М.Н. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 4. С. 51. <https://doi.org/10.7868/S0207401X18040064>
15. Махов М.Н., Архипов В.И. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 8. С. 36.
16. Махов М.Н. // Горение и взрыв. 2023. Т. 16. № 2. С. 110. <https://doi.org/10.30826/CE23160209>
17. Махов М.Н., Архипов В.И. // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 3. С. 87.
18. Махов М.Н., Гоголя М.Ф., Долгобородов А.Ю. и др. // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40. № 4. С. 96.
19. Акимов Л.Н., Афанасьев Г.Т., Шетинин В.Г., Пенекин В.И. // Хим. физика. 2002. Т. 21. № 3. С. 93.
20. Дубовик А.В. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 8. С. 76. <https://doi.org/10.31857/S0207401X21080021>
21. Дубовик А.В. // Хим. физика, 2022. Т. 41. № 3. С. 49. <https://doi.org/10.31857/S0207401X22030050>
22. Дубовик А.В. // Хим. физика, 2023. Т. 42. № 3. С. 11. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23030056>
23. 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>
24. Архипов В.И., Махов М.Н., Пенекин В.И. // Хим. физика. 1993. Т. 12. № 12. С. 1640.
25. Энергетические конденсированные системы. 3-е изд. / Под ред. Жукова Б.П. М.: Янус-К, 2000.
26. Simpson R.L., Urtiew P.A., Ornellas D.L. et al. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1997. V. 22. № 5. P. 249.

27. Иноземцев Я.О., Иноземцев А.В., Махов М.Н., Воробьёв А.Б., Матюшин Ю.Н. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 12. С. 39.  
<https://doi.org/10.31857/S0207401X21120074>
28. Mohammad K., Thaltiri V., Kommu N., Vargeese A.A. // Chem. Commun. 2020. V. 56. № 85. P. 12945.  
<https://doi.org/10.1039/D0CC05704E>
29. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 9. С. 45.  
<https://doi.org/10.31857/S0207401X2209014X>
30. Dalinger I.L., Suponitsky K.Yu., Shkineva T.K., Lempert D.B., Sheremetev A.B. // J. Mater. Chem. A. 2018. V. 6. № 30. P. 14780.  
<https://doi.org/10.1039/C8TA05179H>
31. Zhao X.X., Li S.H., Wang Y. et al. // J. Mater. Chem. A. 2016. V. 4. № 15. P. 5495.  
<https://doi.org/10.1039/C6TA01501H>
32. Зюзин И.Н., Гудкова И.Ю., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 9. С. 52.  
<https://doi.org/10.31857/S0207401X20090149>

# ACCELERATION ABILITY OF THE MIXTURES OF EXPLOSIVES WITH POSITIVE AND NEGATIVE OXYGEN BALANCE

M. N. Makhov

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

*E-mail: mmn13makhov@yandex.ru*

The possibilities of increasing the acceleration ability (AA) of energetic materials due to creation of compositions combining high explosives (HE) with positive and negative oxygen balance are analyzed. For calculations, three relatively new compounds were selected as HE-oxidizers: 3,6-dinitro-1,4-bis(trinitromethyl)-1,4-dihydropyrazolo[4,3-c]pyrazole; 4,4',5,5'-tetranitro-2,2'-bis(trinitromethyl)-2H,2'H-3,3'-bipyrazole; 2-dinitromethyl-5-nitrotetrazole. HMX and CL-20 performed the function of HE-fuel. From the calculations it follows that the AA of HMX increases markedly with the addition of mentioned oxidizers, and the introduction of oxidizers into the composition with CL-20 leads to a slight increase in AA.

**Keywords:** high explosive, aluminum, oxygen balance, acceleration ability, heat of explosion

## REFERENCES

1. 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].
2. *Methods for studying the properties of materials under intense dynamic loads*. Ed. by M.V. Zhernokletov (RFNC-VNIIF, Sarov, 2003) [in Russian].
3. D.R Hardesty and J. E. Kennedy, *Combust. Flame* **28**, 45 (1977).
4. H. Hornberg, *Propell. Explos. Pyrotech.* **11**, 23 (1986).
5. M. Finger., E. Lee., F.H. Helm, et al., in *Proceedings of the 6th International Symposium on Detonation*, ONR ACR-221 (Office of Naval Res., Arlington, 1976), p. 710.
6. R.W. Gurney, Report BRL 405, Army Ballistic Research Laboratories (Aberdeen Proving Ground, MD, USA, 1943).
7. M.J. Kamlet and M. Finger, *Combust. Flame* **34**, 213 (1979).
8. A. Koch, N. Arnold, and M. Estermann, *Propell., Explos., Pyrotech.* **27** (6), 365 (2002).  
<https://doi.org/10.1002/prep.200290007>
9. J.-F. Danel and L. Kazandjian, *Propell., Explos., Pyrotech.* **29** (5), 314 (2004).  
<https://doi.org/10.1002/prep.200400060>
10. M.N. Makhov, in *Combustion and Explosion*, Ed. S.M. Frolov (Toris Press, Moscow, 2008), No. 1, p. 93 [in Russian].
11. M.N. Makhov, *Gorenie Vzryv* **8** (2), 256 (2015).
12. V.Yu. Davydov and A. S. Gubin, *Russ. J. Phys. Chem. B* **5** (3), 491 (2011).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793111030183>
13. M.F. Gogulya, M.N. Makhov, M.A. Brazhnikov, et al., *Combust., Explos., Shock Waves* **44**, 198 (2008).
14. M.N. Makhov, *Russ. J. Phys. Chem. B* **12** (2), 258 (2018).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793118020203>
15. M.N. Makhov and V.I. Arkhipov, *Russ. J. Phys. Chem. B* **2** (4), 602 (2008).
16. M.N. Makhov, *Gorenie Vzryv* **16** (2), 110 (2023).  
<https://doi.org/10.30826/CE23160209>
17. M.N. Makhov and V.I. Arkhipov, *Fiz. Goreniya Vzryva* **25** (3), 87 (1989).
18. M.N. Makhov, M.F. Gogulya, A.Yu. Dolgoborodov, et al., *Fiz. Goreniya Vzryva* **40** (4), 96 (2004).
19. L.N. Akimova, G.T. Afanashev, V.G. Shchetinin, and V.I. Pepekin, *Khim. Fizika*. **21** (3), 93 (2002).
20. A.V. Dubovik, *Russ. J. Phys. Chem. B* **15** (4), 696 (2021).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793121040151>
21. A.V. Dubovik, *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (2), 260 (2022).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793122020051>
22. A.V. Dubovik, *Russ. J. Phys. Chem. B* **17**(2), 369 (2023).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793123020057>
23. G.M. Nazin, B.L. Korsunskiy, A.I. Kazakov, A.V. Nabatova, and N.G. Samoylenko, *Russ. J. Phys. Chem. B* **17** (2), 406 (2023).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793123020124>
24. V.I. Arkhipov, M.N. Makhov, and V.I. Pepekin, *Khim. Fizika*. **12** (12), 1640 (1993).
25. *Energy condensed systems*, 3rd ed. Ed. by B.P. Zhukov (Yanus-K, Moscow, 2000) [in Russian].
26. R.L. Simpson, P.A. Urtiew, D.L. Ornellas, et al., *Propell., Explos., Pyrotech.* **22** (5), 249 (1997).
27. Ya.O. Inozemtsev, A.V. Inozemtsev, M.N. Makhov, A.B. Vorobev, and Yu.N. Matyushin, *Russ. J. Phys. Chem. B* **54** (6), 1005 (2021).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793121060178>
28. K. Mohammad, V. Thaltiri, N. Kommu, and A.A. Vargeese, *Chem. Commun.* **56**, 12945 (2020).  
<https://doi.org/10.1039/D0CC05704E>
29. I.N. Zyuzin, I.Yu. Gudkova, and D.A. Lempert, *Russ. J. Phys. Chem. B* **16** (5), 902 (2022).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793122060240>
30. I.L. Dalinger, K.Yu. Suponitsky, T.K. Shkineva, D.B. Lempert, and A.B. Sheremetev, *J. Mater. Chem. A* **6** (30), 14780 (2018).  
<https://doi.org/10.1039/C8TA05179H>
31. X.X. Zhao, S.H. Li, Y. Wang, et al., *J. Mater. Chem. A* **4** (15), 5495 (2016).  
<https://doi.org/10.1039/C6TA01501H>
32. I.N. Zyuzin, I.Yu. Gudkova, and D.A. Lempert, *Russ. J. Phys. Chem. B* **14** (5), 804 (2020).  
<https://doi.org/10.1134/S1990793120050140>