

УДК 662.3 : 547.882

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НЕКОТОРЫХ ТЕТРАЗИНОКСИДОВ КАК КОМПОНЕНТОВ МЕТАТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ. I. ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ СОСТАВЫ

© 2025 г. А. М. Астахов^{1*}, Д. Б. Лемперт²¹Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнёва, Красноярск, Россия²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Россия

*E-mail: alexastachov@mail.ru

Поступила в редакцию 26.04.2024

После доработки 14.08.2024

Принята в печать 20.08.2024

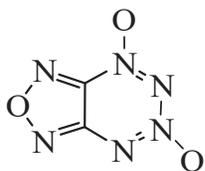
Проведена термодинамическая оценка возможности использования фуразанотетразиндиоксида и тетразинотетразинтетраоксида в двухкомпонентных составах с различными связующими в качестве метательных композиций. Такие композиции позволяют получать очень большие значения силы: 1750 кДж/кг и более. Но это достигается при чрезвычайно высокой температуре продуктов сгорания (выше 5000 К), что совершенно неприемлемо для ствольных систем. Путем увеличения содержания связующего можно понизить температуру газов до допустимого уровня. Однако неизбежное при этом падение силы позволяет рассматривать такие композиции лишь в качестве минометных порохов, а для остальных систем получаемые составы не превосходят по эффективности известные.

Ключевые слова: 1,2,3,4-тетразин-N-оксиды, фуразанотетразиндиоксид (ФТДО), тетразинотетразинтетраоксид (ТТТО), сила пороха, потенциал пороха, теплота сгорания, температура продуктов сгорания.

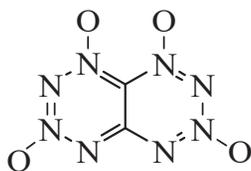
DOI: 10.31857/S0207401X25030053

1. ВВЕДЕНИЕ

[1,2,5]Оксадиазоло[3,4-*e*][1,2,3,4]тетразин-4,6-ди-N-оксид (фуразанотетразиндиоксид (ФТДО)) и [1,2,3,4]тетразино[5,6-*e*][1,2,3,4]тетразин-1,3,6,8-тетра-N-оксид (тетразинотетразинтетраоксид (ТТТО)) являются одними из наиболее мощных синтезированных на сегодняшний день энергонасыщенных соединений [1–3]:



ФТДО



ТТТО

Ранее уже давалась оценка их характеристик как взрывчатых веществ (ВВ) [4–8] и компонентов смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ) [9, 10]. В настоящей работе эти соединения оце-

ниваются как компоненты порохов для ствольных систем.

Простейший и наиболее часто применяемый на практике путь повышения энергетических характеристик порохов заключается в прибавлении мощных ВВ к уже известным пороховым композициям. Например, современный отечественный высокоэнергетический порох НДГПО помимо классической нитроглицерин-нитроцеллюлозной основы содержит 20% октогена в качестве добавки [11].

Другой подход заключается в использовании высокоэнергетического компонента в сочетании с каким-либо полимерным связующим, которое само по себе может и не являться энергонасыщенным соединением. Пример пороховой рецептуры такого типа: 90% гексогена + 10% полиизобутилена [12].

В настоящей работе рассмотрены оба варианта: добавка ФТДО или ТТТО к нитроцеллюлозной

или баллиститной пороховой основе, а также использование в качестве связующего иных полимеров. Следует подчеркнуть, что мы даем лишь первичную термодинамическую оценку возможности использования рассматриваемых веществ в качестве компонентов порохов. Будут ли композиции на их основе в реальности удовлетворять множеству требований, предъявляемых к порохам, без экспериментального изучения их физико-механических свойств и кинетических параметров горения, сказать нельзя. Можно лишь определенно утверждать, что создание таких пороховых составов будет непростой задачей из-за известных неблагоприятных свойств ФТДО и ТТТО: низкой термической и гидролитической стабильности [1–3, 13, 14], высокой чувствительности к механическим воздействиям [15], нестабильности горения и склонности его перехода в детонацию [16].

2. КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ МЕТАТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

В отличие от ФТДО, для которого энтальпия образования и плотность [4–6] известны из экспериментальных данных, для ТТТО на сегодняшний день имеются только расчетные значения [1, 7, 8, 17]. При этом расчетная плотность ТТТО оценивалась в достаточно широком диапазоне: от нереально больших значений $>2.4 \text{ г/см}^3$ [8], высоких, но разумных значений в диапазоне $1.90\text{--}1.99 \text{ г/см}^3$ [7] и, наконец, до значения 1.86 г/см^3 , полученного в работе [17], т.е. она лишь незначительно выше, чем у ФТДО.

В данной работе мы рассматриваем только простейшие двухкомпонентные системы: ФТДО (или ТТТО) и связующее; при этом последнее может иметь сложный состав. В качестве связующих нами рассмотрены:

1) два вида нитроцеллюлозы: пироксилин с максимальной степенью нитрации и содержанием азота 14.1% (НЦ-П) и коллоксилин с содержанием азота 12.0% (НЦ-К) [18];

2) отечественный баллиститный минометный порох НБ, содержащий в своем составе, помимо нитроцеллюлозы, 40% нитроглицерина [18, 19];

3) углеводородное связующее (УС) [9, 10, 20–25];

4) активное связующее (АС) на основе поливинилметилтетразола, пластифицированного смесью нитроглицерина и 2,4-динитразапентана [9, 10, 20–25];

5) полиглицидилазидный полимер (ГАП) [26–28].

Отметим, что УС и АС ранее уже широко рассматривались как связующие в значительном числе модельных композиций СТРТ самого различного состава [9, 10, 20–25], в том числе и содержащих ФТДО и ТТТО в качестве основных компонентов [9, 10, 21, 22, 25]. Объемное содержание связующего в композициях составляло 19% (допустимый технологический минимум) либо было выше. Компонентный состав рассчитывался с шагом до 0.1%.

Силу f , потенциал порохов Π , температуру T_c и коволюм α пороховых газов вычисляли с использованием программы для расчета термодинамических равновесий REAL [29, 30]. Необходимые для расчета характеристики исходных компонентов представлены в табл. 1.

Показатель адиабаты пороховых газов рассчитывали по формуле

$$k = f/\Pi + 1,$$

а теплоту сгорания (калорийность) порохов – по формуле

$$Q_v^{18^\circ\text{C}} = \Pi(1 - 291/T_c).$$

Поскольку сила f , потенциал пороха Π и особенно коволюм α зависят от давления [29, 30], то состав пороха, являющийся оптимальным при одном давлении в стволе, необязательно будет таким же оптимальным при другом значении давления. По этой причине мы проводили термодинамические расчеты при трех значениях давления: 100, 300 и 500 МПа. Выбранные значения давлений примерно соответствуют типовому уровню давлений в стволах в таких артиллерийских системах, заметно различающихся по назначению, как 120-мм миномет [31], 152-мм гаубица [32] и 125-мм танковая пушка [33] соответственно. Кроме различия в величинах давлений в стволе, эти системы заметно различаются по допустимой температуре пороховых газов, что связано с эксплуатационными требованиями к необходимому уровню живучести стволов. Максимально допустимую температуру пороховых газов мы приняли равной 2500, 3000 и 3600 К для гаубицы, танковой

Таблица 1. Некоторые параметры используемых в расчете компонентов

Компонент	Формула	КБ, %	α_k	ρ_0 , г/см ³	ΔH_f^0 , кДж/кг
ФТДО	$C_2N_6O_3$	-10.3	0.750	1.83 [8]	+4313.7 [4]
ТТТО	$C_2N_8O_4$	0	1.000	1.86 [17]	+4297.5 [7]
НЦ-К	$C_{22.74}H_{29.33}N_{8.57}O_{36.08}$	-38.5	0.600	1.66 [18]	-2746.2 [30]
НЦ-П	$C_{20.24}H_{23.67}N_{10.07}O_{37.00}$	-24.5	0.707	1.69 [18]	-2230.4 [30]
НБ	$C_{18.99}H_{26.78}N_{10.61}O_{37.27}$	-22.6	0.725	1.60 [18]	-2240.7 [30]
УС	$C_{72.15}H_{119.21}O_{0.68}$	-330.6	0.003	0.91 [20]	-393.3 [20]
АС	$C_{18.96}H_{34.64}N_{19.16}O_{29.32}$	-41.5	0.531	1.49 [20]	-757.3 [20]
ГАП	$C_3H_5N_3O$	-121.1	0.118	1.30 [26]	+1150 [27]

Примечания: КБ – кислородный баланс, α_k – кислородный коэффициент. Для $C_aH_bN_cO_d$ КБ = $[d - (2a + b/2)] \cdot 1600 / M_w$ и $\alpha_k = d / (2a + b/2)$, где M_w – средневесовая молекулярная масса, реальная для соединения или формальная для состава.

пушки и миномета, соответственно, что отвечает температурам, развиваемым при горении штатных порохов в этих ствольных артиллерийских системах [34].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 показана взаимосвязь силы пороха f и температуры пороховых газов T_c при давлении 100 МПа для составов со связующими на основе нитроцеллюлозы. Для сравнения на этом и последующих рисунках также представлены литературные данные [34–37] для отечественных и зарубежных порохов различного состава, как штатных, так и экспериментальных. Значения силы пороха f приведены в литературе для разных плотностей заряжения (обычно 0.1 или 0.2 г/см³) либо вообще без указания таковой. Они соответствуют различным величинам давлений для разных пороховых составов, поэтому мы использовали относительно крупные размеры маркеров для каждого порохового состава, поскольку о его конкретном значении f можно говорить лишь с определенным приближением.

Прибавление высокоэнтальпийных тетразиноксидов к нитратам целлюлозы закономерно повышает силу таких пороховых композиций, достигающую в пределе 1500 кДж/кг и выше, что существенно больше, чем у штатных порохов. Однако при этом температура пороховых газов возрастает до 5000 К или даже выше, что совершенно недопустимо для ствольных систем. Вопреки ожиданиям, составы, содержащие ФТДО, превосходят по силе и потенциалу аналогичные составы на основе ТТТО, несмотря на лучший кислородный баланс и более высокую теплоту

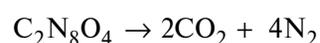
взрывчатого превращения последнего. При этом наибольшая эффективность наблюдается при использовании в качестве связующего коллоксилина, а не более энергоемкой высокоазотной нитроцеллюлозы. Баллиститный порох как связующее показывает промежуточные результаты.

Наблюдаемые закономерности связаны с тем, что такие высокоэнергетические вещества, как ФТДО и ТТТО, имеют очень высокую теплоту взрывчатого превращения (одну из наибольших, если не самую высокую, среди известных энергоемких соединений), но сравнительно невысокое газообразование. Так, согласно схеме Бертло,



$$Q_p = 8.1 \text{ МДж/кг (1935 ккал/кг)}, V_0 = 647 \text{ л/кг}$$

для ФТДО,



$$Q_p = 8.2 \text{ МДж/кг (1967 ккал/кг)}, V_0 = 672 \text{ л/кг}$$

для ТТТО.

Поэтому для них не столь важна повышенная энергоемкость связующего (все равно она будет значительно ниже, чем у рассматриваемых тетразиноксидов), сколько возможность связующего обеспечить, по возможности, большее газообразование. Именно поэтому коллоксилин оказывается предпочтительнее пироксилина и баллиститного пороха.

Из рис. 1 видно, что коллоксилин как связующее может обеспечить приемлемый уровень T_c в сочетании с несколько бóльшим значением силы, чем у штатного отечественного минометного пороха НБ [34] и американских порохов М7,

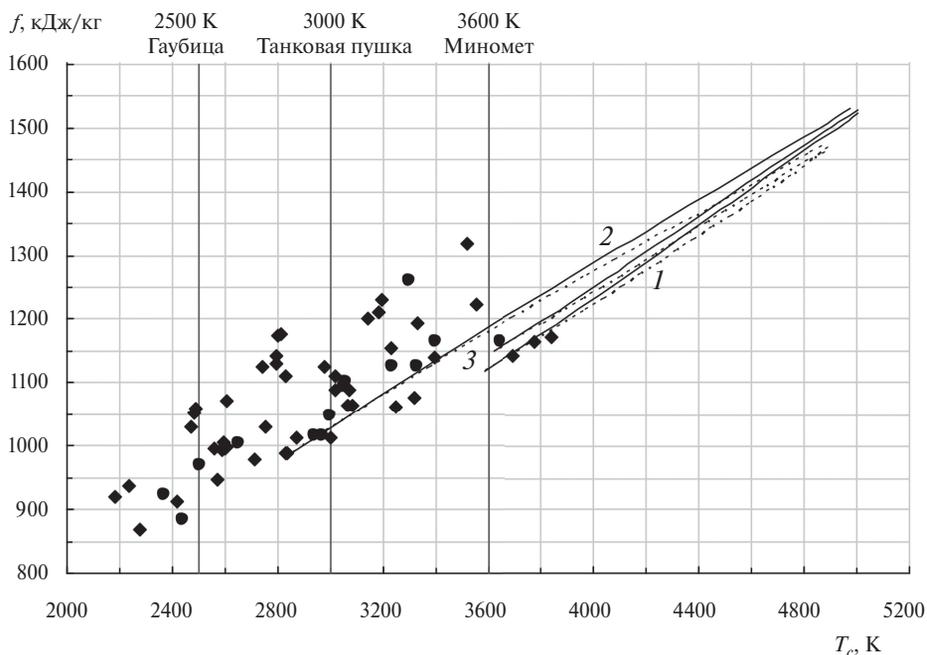


Рис. 1. Расчетная взаимосвязь силы пороха f и температуры пороховых газов T_c при давлении 100 МПа для составов на основе ФТДО (сплошные линии) и ТТДО (штриховые) со связующими на основе нитроцеллюлозы: 1 – пироксилин (N14.1%), 2 – коллоксилин (N12.0%), 3 – баллиститный порох НБ. На этом и последующих рисунках маркерами показаны литературные данные для некоторых штатных и экспериментальных зарубежных (\blacklozenge) и отечественных (\bullet) порохов [34–37].

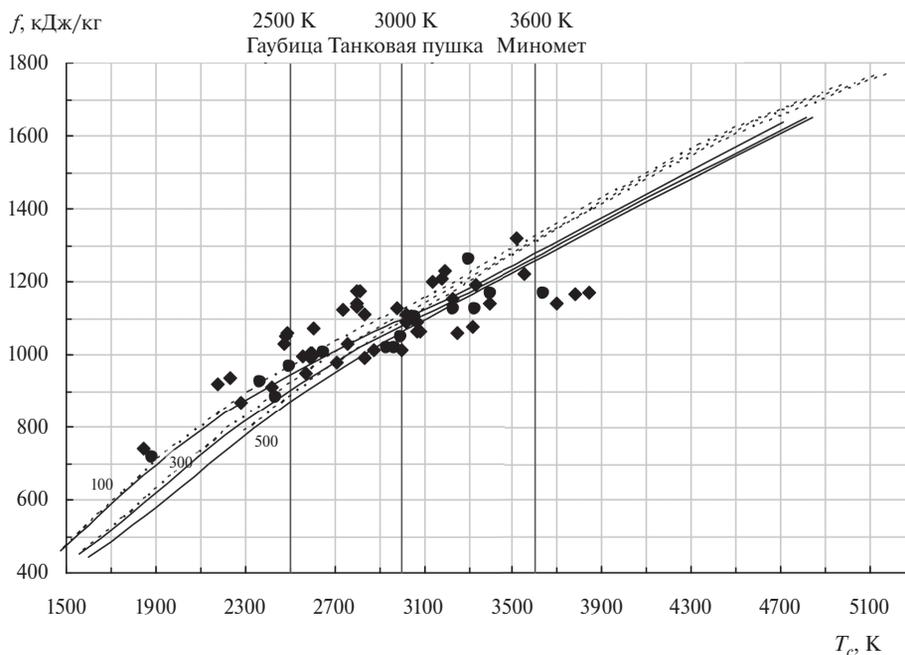


Рис. 2. Расчетная взаимосвязь силы пороха f и температуры пороховых газов T_c при давлениях 100, 300 и 500 МПа для составов на основе ФТДО (сплошные кривые) и ТТДО (штриховые) с углеводородным связующим.

М8, М9 аналогичного назначения [35, 36]. Однако выигрыш невелик и такой порох все равно заметно уступает по силе современным экспериментальным порохам на других компонентах, к тому же более дешевых и безопасных, чем ФТДО [37].

Коллоксилин также позволяет добиться приемлемой температуры пороховых газов и для танковых орудий (рис. 1), но такие композиции существенно уступают по работоспособности уже существующим порохам и поэтому их разработка лишена смысла. Именно поэтому мы не стали

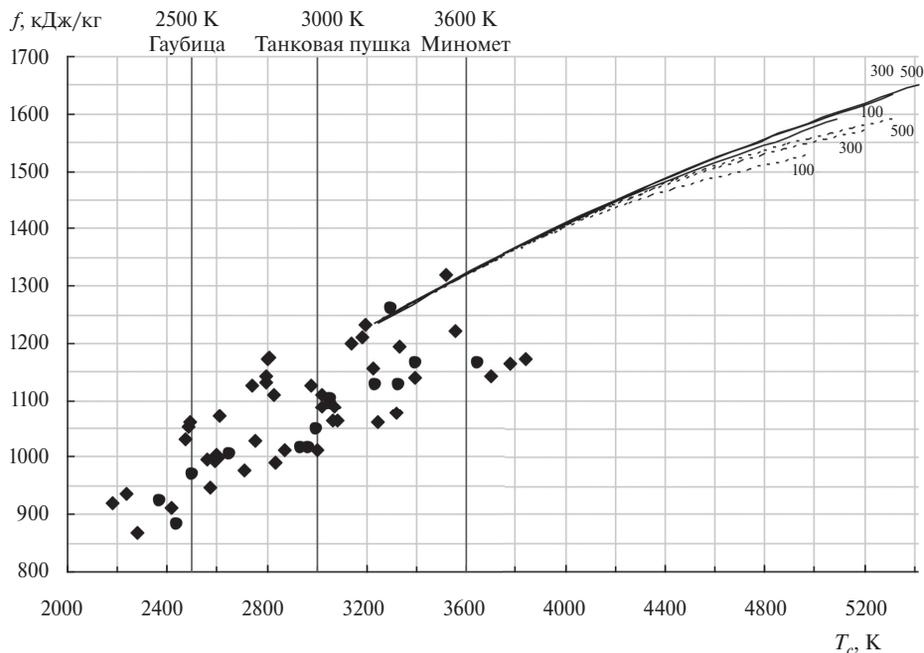


Рис. 3. Расчетная взаимосвязь силы пороха f и температуры пороховых газов T_c при давлениях 100, 300 и 500 МПа для составов на основе ФТДО (сплошные кривые) и ТТДО (штриховые) с активным связующим.

приводить на рис. 1 результаты расчетов при давлениях 300 и 500 МПа.

Из вышесказанного очевидно, что использование ФТДО/ТТДО в сочетании с нитроцеллюлозными связующими вряд ли имеет какие-либо перспективы практического применения. Замена нитроцеллюлозного связующего на углеводородное позволяет значительно улучшить работоспособность тетразиноксидных пороховых композиций (рис. 2). При этом могут быть достигнуты еще большие значения силы, выше 1750 кДж/кг, но опять же при неприемлемом уровне температуры, превышающей 5000 К. В этом случае более эффективным оказывается соединение ТТДО. Его использование позволяет также достичь, при сохранении приемлемого уровня температуры для минометных систем, уровня работоспособности нитраминного пороха КНР300 [37]. Однако компонентный состав последнего (79% гексогена, 8% нитрогуанидина и 13% ГАП) делает его явно более дешевым и безопасным. Углеводородное связующее позволяет также достигнуть уровня приемлемых температур T_c и для других артиллерийских систем. Но из рис. 2 видно, что такие композиции не имеют преимуществ по сравнению со многими уже существующими штатными либо экспериментальными порохами. Кроме того, при содержаниях ФТДО в композиции ниже 78.5–78.7% и ТТДО ниже 75.8–76.2%, что соответствует значе-

нию кислородного коэффициента $\alpha_K < 0.237$ –0.241 (в зависимости от давления), в пороховых газах появляется конденсированный углерод.

Активное связующее также позволяет достичь уровня работоспособности пороха КНР300 при сохранении приемлемой температуры 3600 К для минометных систем (рис. 3). При этом ФТДО и ТТДО оказываются близки по эффективности, а сами значения силы для композиций на их основе в диапазоне температур ≈ 3200 –4000 К малочувствительны к изменению давления, что, несомненно, является положительным свойством. Это можно объяснить отсутствием в пороховых газах равновесных реакций, протекающих с изменением объема, что, в свою очередь, есть следствие значительного содержания кислорода в активном связующем ($\alpha_K = 0.531$).

Полиглицидилазидный полимер в сочетании с ТТДО позволяет даже несколько превзойти по работоспособности нитраминный порох КНР300 при сохранении приемлемой температуры для миномета (рис. 4). На основе ГАП возможно также создание композиций с приемлемыми температурами для танковой пушки и гаубицы, но, как видно из рис. 4, такие составы не превосходят по силе уже известные пороха, что делает их разработку бессмысленной. Кроме того, как и в случае с УС, при содержаниях ФТДО в композиции ниже 48.1–49.1% и ТТДО ниже 44.1–45.2%, что

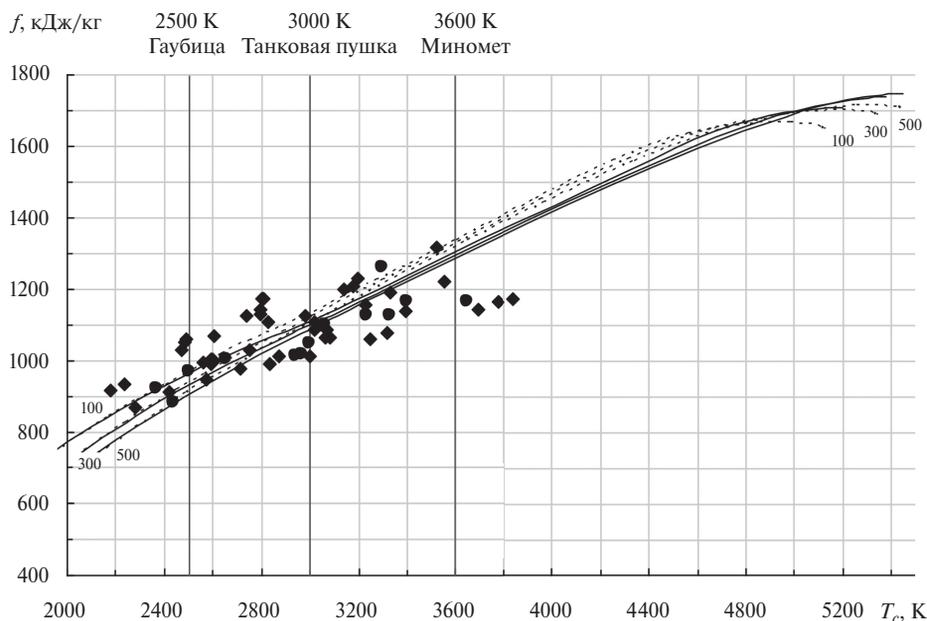


Рис. 4. Расчетная взаимосвязь силы пороха f и температуры пороховых газов T_c при давлениях 100, 300 и 500 МПа для составов на основе ФТДО (сплошные кривые) и ТТДО (штриховые) с глицидилазидным полимером.

Таблица 2. Характеристики некоторых модельных пороховых составов на основе ФТДО и ТТДО с наибольшими параметрами баллистической эффективности для соответствующего связующего (без ограничения максимальной температуры пороховых газов и при ее ограничении уровнем 3600 К)

Состав пороховой композиции, мас. %	КБ, %	α_K	ρ_{max} , г/см ³	p , МПа	f , кДж/кг	P , кДж/кг	$Q_v^{18^\circ C}$, кДж/кг	k	α , дм ³ /кг	T_c , К	n_g , моль/кг	μ_{av} , г/моль
ФТДО82.5/НЦ-К17.5	-15.2	0.700	1.80	100	1531.1	5752.3	5416.1	1.266	1.136	4978	36.99	27.0
ФТДО24.0/НЦ-К76.0	-31.7	0.618	1.65	100	1187.7	5125.7	4711.4	1.232	1.130	3600	39.68	25.2
ТТДО89.7/УС10.3	-33.6	0.462	1.68	500	1769.4	6588.9	6218.2	1.269	1.142	5173	41.14	24.3
ТТДО79.7/УС20.3	-66.2	0.280	1.53	100	1326.0	5265.9	4840.1	1.252	1.311	3599	44.31	22.6
ФТДО84.0/АС16.0	-15.3	0.686	1.77	500	1651.2	6435.3	6089.7	1.257	1.066	5419	36.65	27.3
ФТДО14.2/АС85.8	-37.0	0.546	1.53	100	1322.6	5439.1	4999.3	1.267	1.205	3599	44.20	22.6
ФТДО85.7/ГАП14.3	-26.1	0.523	1.73	500	1750.0	6538.8	6189.4	1.268	1.110	5446	38.65	25.9
ТТДО55.1/ГАП44.9	-54.4	0.314	1.55	100	1342.8	5063.2	4654.2	1.265	1.316	3602	44.84	22.3

Примечание: ρ_{max} — предельное возможное значение плотности при отсутствии пористости, n_g — количество молей газообразных продуктов, μ_{av} — их средномолекулярный вес.

соответствует $\alpha_K < 0.255-0.260$ (в зависимости от давления), в пороховых газах появляется конденсированный углерод.

Что касается максимального значения силы, то оно, так же как и для составов с УС, может достигать 1750 кДж/кг, но при этом расчетная температура пороховых газов оказывается еще выше — почти 5500 К. Очевидно, что в этом случае дополнительно сказывается влияние высокоэнтальпийного азидосодержащего связующего. При этом в составах с максимальными параметрами более эффективным оказывается соединение ФТДО.

Составы некоторых рассмотренных модельных пороховых композиций и их расчетные характеристики представлены в табл. 2. Среди них можно выделить состав ФТДО14.2/АС85.8 с относительно низким содержанием ФТДО, что позволяет надеяться на приемлемый уровень чувствительности такого состава к механическим воздействиям (один из главных факторов, препятствующих применению ФТДО) и выгодно отличает его от других композиций в технологическом плане.

4. ВЫВОДЫ

1. Соединения ФТДО и ТТТО в двухкомпонентных составах со связующими позволяют потенциально получить очень высокие расчетные значения силы f (до 1769 кДж/кг) и потенциала П (до 6589 кДж/кг) пороховых композиций, но это достигается при неприемлемых для практического использования температурах пороховых газов (>5000 К).

2. Увеличение содержания связующего позволяет снизить температуру до приемлемого уровня, пригодного для минометных систем (3600 К). При этом такие составы по работоспособности превосходят штатные минометные пороха и находятся на уровне лучших современных экспериментальных пороховых композиций на основе других компонентов.

3. Двухкомпонентные пороховые композиции на основе ФТДО и ТТТО с приемлемым уровнем температуры пороховых газов для гаубиц и танковых пушек не превосходят по эффективности уже существующие пороха и имеют в продуктах сгорания конденсированный углерод, поэтому их разработка лишена практического смысла.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке одного из авторов (Д.Б. Лемперт) в рамках госзадания Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН (тема № 124020100045-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кленов М.С., Воронин А.А., Чураков А.М., Тартаковский В.А. // Успехи химии. 2023. Т. 92. № 8. С. 1. <https://doi.org/10.59761/RCR5089>
2. Churakov A.M., Ioffe S.L., Tartakovsky V.A. // Mendeleev Commun. 1995. V. 5. № 6. P. 227. <https://doi.org/10.1070/MC1995v005n06ABEH000539>
3. Klenov M.S., Guskov A.A., Anikin O.V., et al. // Angew. Chem. 2016. V. 55. № 38. P. 11472. <https://doi.org/10.1002/anie.201605611>
4. Пепекин В.И., Матюшин Ю.Н., Губина Т.В. // Хим. физика. 2011. Т. 30. № 2. С. 42; <https://doi.org/10.1134/S1990793111020102>
5. Жарков А.С., Калмыков П.И., Бурцев Ю.Н. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. № 8. С. 1785. <https://doi.org/10.1007/s11172-014-0668-6>
6. Чуканов Н.В., Калмыков П.И., Шилов Г.В. и др. // ЖПХ. 2016. Т. 89. Вып. 4. С. 449; <https://doi.org/10.1134/S1070427216040078>
7. Politzier P., Lane P., Murray J.S. // Central Eur. J. Energetic Mater. 2013. V. 10. № 1. P. 37.
8. Christe K.O., Dixon D.A., Vasiliu M. et al. // Prop., Expl., Pyrotech. 2015. V. 40. № 4. P. 463. <https://doi.org/10.1002/prep.201400259>
9. Лемперт Д.Б., Нечипоренко Г.Н., Согласнова С.И. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 5. С. 75.
10. Лемперт Д.Б., Дорофеев Е.М., Согласнова С.И. // Омский науч. вест. Сер. авиационно-ракетное и энергет. машиностр. 2018. Т. 2. № 3. С. 58. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-3-58-62>
11. Валеев Г.Г., Сопин В.Ф., Соков Б.А. Артиллерийские метательные заряды. Казань: ФГУП ГосНИИХП, 2004.
12. Sauer C.W. Solid propellant containing organic oxidizers and polymeric fuel: US Pat. 3117044.
13. Неделько В.В., Захаров В.В., Корсунский Б.Л. и др. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 3. С. 25. <https://doi.org/10.7868/S0207401X13030060>
14. Зеленов В.П., Лобанова А.А., Люкшенко Н.И., Сысолятин С.В., Калашников А.И. // Изв. АН. Сер. хим. 2008. № 7. С. 1358. <https://doi.org/10.1007/s11172-008-0180-y>
15. Теселкин В.А. // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 5. С. 140. <https://doi.org/10.1007/s10573-009-0076-7>
16. Симоненко В.Н., Калмыков П.И., Кискин А.Б. и др. // Там же. 2014. Т. 50. № 3. С. 68. <https://doi.org/10.1134/S0010508214030083>
17. Хакимов Д.В., Дзябченко А.В., Пивина Т.С. // Изв. АН. Сер. хим. 2020. № 2. С. 212. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2748-0>
18. Косточко А.В., Казбан Б.М. Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства. Физико-химические свойства порохов и ракетных твердых топлив: учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 2014.
19. Маршаков В.Н., Крупкин В.Г. // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 3. С. 42; <https://doi.org/10.31857/S0207401X23030111>
20. Lempert D.B., Nechiporenko G.N., Manelis G.B. // Central Eur. J. Energetic Materials. 2006. V. 3. № 4. P. 73.
21. Зюзин И.Н., Гудкова И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 7. С. 24. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2107013X>
22. Зюзин И.Н., Волохов В.М., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 9. С. 18. <https://doi.org/10.31857/S0207401X21090107>
23. Гудкова И.Н., Зюзин И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 1. С. 34. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2201006X>
24. Зюзин И.Н., Гудкова И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 9. С. 45. <https://doi.org/10.31857/S0207401X2209014X>
25. Зюзин И.Н., Гудкова И.Н., Лемперт Д.Б. // Хим. физика. 2022. Т. 41. № 12. С. 36. <https://doi.org/10.31857/S0207401X22120123>
26. Jarocz T., Stolarczyk A., Wawrzekiewicz-Jalowiecka A., Pawlus K., Miszczyszyn K. // Molecules. 2019. V. 24. № 24. P. 4475.

- <https://doi.org/10.3390/molecules24244475>
27. *Diaz E., Brousseau P., Ampleman G., Prud'homme R.E.* // Prop., Expl., Pyrotech. 2003. V. 28. № 3. P. 101. <https://doi.org/10.1002/prep.200390015>
28. *Schedlbauer F.* // Ibid. 1992. V. 17. № 4. P. 164. <https://doi.org/10.1002/prep.19920170404>
29. *Belov G.V.* // Ibid. 1998. V. 23. № 2. P. 86. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4087\(199804\)23:2<86::AID-PREP86>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4087(199804)23:2<86::AID-PREP86>3.0.CO;2-2)
30. *Белов Г.В.* Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы. М.: Научный Мир, 2002.
31. *Кулаков В.В., Ефремов А.А., Каширина Е.И., Каширина О.Ю., Литвин Ю.И.* Артиллерийское вооружение. Ч. I. Минометы. М.: Прометей, 2019.
32. *Кулаков В.В., Шаманов В.А., Уткин В.Е.* Буксируемые артиллерийские орудия 2А65 и 2А18. М.: Прометей, 2022.
33. *Юрко С.В., Безлюдько А.В., Ильющенко Д.Н., Шарипов Р.И., Янковский И.Н.* 125-мм танковая пушка 2А46М. Минск: БНТУ, 2016.
34. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Ч. 1. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного и артиллерийского оружия / Под ред. Королева А.А., Кучерова В.Г. Волгоград: ВолгГТУ, 2002.
35. Military explosives. Technical manual N9-1300-214. Washington, DC: Headquarters department of the army, 1984.
36. Propellant management guide. Savanna, Illinois: U.S. Army Defense Ammunition Center, 1998.
37. *Koch E.-C.* // Prop., Expl., Pyrotech. 2021. V. 46. № 2. P. 174. <https://doi.org/10.1002/prep.202000220>

EVALUATION OF ENERGETIC POTENTIAL OF SOME TETRAZINE OXIDES AS COMPONENTS OF GUN PROPELLANTS. I. TWO-COMPONENT COMPOSITIONS

A. M. Astakhov^{1*}, D. B. Lempert²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russia

²Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Russian Academy of Science, Chernogolovka, Russia

*E-mail: alexastachov@mail.ru

Thermodynamic evaluation of the possibility of using furazanotetrazine dioxide and tetrazinotetrazine tetroxide in two-component compositions with different binders as gun propellants has been carried out. Such compositions allow very high force values, 1750 kJ/kg or more. But this is achieved at the cost of extremely high temperature of combustion products, above 5000 K, which is completely unacceptable for barrel systems. By increasing the binder content it is possible to reduce the temperature of gases to an acceptable level. However, the inevitable drop of force allows to consider such compositions only as mortar propellants, and for other systems the obtained compositions do not exceed the known ones in efficiency.

Keywords: 1,2,3,4-tetrazine *N*-oxides, FTDO, TTTO, composite propellants, powder force, powder potential, heat of combustion, temperature of combustion products.

REFERENCES

- M.S. Klenov, A.A. Voronin, A.M. Churakov, V.A. Tartakovskiy. Russ. Chem. Rev., 2023, **92** (8), 1 (2023). <https://doi.org/10.59761/RCR5089>
- A.M. Churakov, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovskiy. Mendeleev Commun., **5** (6), 227 (1995). <https://doi.org/10.1070/MC1995v005n06ABEH000539>
- M.S. Klenov, A.A. Guskov, O.V. Anikin et al. Angew. Chem., **55** (38), 11472 (2016). <https://doi.org/10.1002/anie.201605611>
- V.I. Pepekin, Yu.N. Matyushin, T.V. Gubina. Russ. J. Phys. Chem. B, **5** (1), 97 (2011). <https://doi.org/10.1134/S1990793111020102>
- A.S. Zharkov, P.I. Kalmykov, Yu.N. Burtsev et al. Russ. Chem. Bull., **63** (8), 1785 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11172-014-0668-6>
- N.V. Chukanov, P.I. Kalmykov, G.V. Shilov et al. Russ. J. Appl. Chem., **89** (4), 566 (2016). <https://doi.org/10.1134/S1070427216040078>
- P. Politzer, P. Lane, and J.S. Murray. Central Eur. J. Energetic Mater., **10** (1), 37 (2013).
- K.O. Christie, D.A. Dixon, M. Vasiliu et al. Prop., Expl., Pyrotech., **40** (4), 463 (2015). <https://doi.org/10.1002/prop.201400259>
- D.B. Lempert, G.N. Nechiporenko, S.I. Soglasnova. Khim. Fizika, **23** (5), 75 (2004) [in Russian].
- D.B. Lempert, E.M. Dorofeenko, S.I. Soglasnova. Omsk Sci. Bull. Ser. Aviation-Rocket and Power Engineering, **2** (3), 58 (2018) [in Russian]. <https://doi.org/10.25206/2588-0373-2018-2-3-58-62>
- G.G. Valeev, V.F. Sopin, B.A. Sokov. *Artilleriiskie metatelnye zaryady (Artillery propellant charges)* (FGUP GosNIIKhP, Kazan', 2004) [in Russian].
- C.W. Sauer. *Solid propellant containing organic oxidizers and polymeric fuel*, US Pat. 3117044 (1964).
- V.V. Nedel'ko, V.V. Zakharov, B.L. Korsunskii et al. Russ. J. Phys. Chem. B, **7** (2), 113 (2013). <https://doi.org/10.1134/S19907931130200480207401X13030060>
- V.P. Zelenov, A.A. Lobanova, N.I. Lyukshenko, S.V. Sysolyatin, A. I. Kalashnikov. Russ. Chem. Bull., **57** (7), 1384 (2008). <https://doi.org/10.1007/s11172-008-0180-y>
- V.A. Teselkin. Combust., Explos., Shock Waves, **45** (5), 632 (2009). <https://doi.org/10.1007/s10573-009-0076-7>
- V.N. Simonenko, P.I. Kalmykov, A.B. Kiskin et al. Combust., Explos., Shock Waves, **50** (3), 306 (2014). <https://doi.org/10.1134/S0010508214030083>
- D.V. Khakimov, A.V. Dzyabchenko, T.S. Pivina. Russ. Chem. Bull., **69** (2), 212 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2748-0>
- A.V. Kostochko, B.M. Kazban. *Porokha, raketnye tverdye topliva i ikh svoistva. Fiziko-khimicheskie svoistva porokhov i raketnykh tverdykh topliv: uchebnoe posobie (Powders, solid rocket propellants and their properties. Physiko-chemical properties of powders and solid rocket propellants: tutorial guide)* (INFRA-M, Moscow, 2022) [in Russian].
- V.N. Marshakov, V.G. Krupkin. Russ. J. Phys. Chim. B, **17** (4), 399 (2023). <https://doi.org/10.1134/S1990793123020112>
- D.B. Lempert, G.N. Nechiporenko, G.B. Manelis. Central Eur. J. Energetic Materials, **3** (4), 73 (2006).
- I.N. Zyuzin, I.Yu. Gudkova, D.B. Lempert. Russ. J. Phys. Chem. B, **15** (4), 611 (2021). <https://doi.org/10.1134/S1990793121040138>

22. I.N. Zyuzin, V.M. Volokhov, D.B. Lempert. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **15** (5), 810 (2021).
<https://doi.org/10.1134/S1990793121050109>
23. I.Yu. Gudkova, I.N. Zyuzin, D.B. Lempert. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **16** (1), 58 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122010067>
24. I.N. Zyuzin, I.Yu. Gudkova, D.B. Lempert. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **16** (5), 902 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122050141>
25. I.N. Zyuzin, I.Yu. Gudkova, D.B. Lempert. *Russ. J. Phys. Chem. B*, **16** (6), 1117 (2022).
<https://doi.org/10.1134/S1990793122060240>
26. T. Jarocz, A. Stolarczyk, A. Wawrzekiewicz-Jalowiecka, K. Pawlus, K. Miszczyszyn. *Molecules*, **24** (24), 4475 (2019).
<https://doi.org/10.3390/molecules24244475>
27. E. Diaz, P. Brousseau, G. Ampleman, R.E. Prud'homme. *Prop., Expl., Pyrotech.*, **28** (3), 101 (2003).
<https://doi.org/10.1002/prop.200390015>
28. F. Schedlbauer. *Prop., Expl., Pyrotech.*, **17** (4), 164 (1992).
<https://doi.org/10.1002/prop.19920170404>
29. G.V. Belov. *Prop., Expl., Pyrotech.*, **23** (2), 86 (1998).
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-4087\(199804\)23:2<86::AID-PREP86>3.0.CO;2-2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-4087(199804)23:2<86::AID-PREP86>3.0.CO;2-2)
30. G.V. Belov. *Termodinamicheskoe modelirovanie: metody, algoritmy, programmy (Thermodynamic modeling: methods, algorithms, software)* (Nauchnyi Mir, Moscow, 2002) [in Russian].
31. V.V. Kulakov, A.A. Efremov, E.I. Kashirina, O.Yu. Kashirina, Yu.I. Litvin. *Artilleriiskoe vooruzhenie. Chast' I. Minomety (Artillery armament. Part I. Mortars)* (Prometei, Moscow, 2019) [in Russian].
32. V.V. Kulakov, V.A. Shamanov, V.E. Utkin. *Buksiruemye artilleriiskie orudiya 2A65 i 2A18 (Towed artillery systems 2A65 and 2A18)* (Prometei, Moscow, 2022) [in Russian].
33. S.V. Yurko, A.V. Bezlyud'ko, D.N. Il'yuschenko, R.I. Sharipov, I.N. Yankovskii. *125-mm tankovaya pushka 2A46M (125-mm tank gun 2A46M)* (BNTU, Minsk, 2016) [in Russian].
34. A.A. Korolev, V.G. Kucherov (editors). *Fizicheskie osnovy ustroystva i funktsionirovaniya strelkovo-pushechnogo, artilleriiskogo i raketnogo oruzhiya. Chast' I. Fizicheskie osnovy ustroystva i funktsionirovaniya strelkovo-pushechnogo i artilleriiskogo oruzhiya (Physical foundations of the design and functioning of small arms, cannon, artillery and missile weapons. Part I. Physical basis of the design and functioning of small arms, cannon and artillery weapons)* (VSTU, Volgograd, 2002) [in Russian].
35. *Military explosives. Technical manual N9-1300-214* (Headquarters department of the army, Washington, DC, 1984).
36. *Propellant management guide* (U.S. Army Defense Ammunition Center, Savanna, Illinois, 1998).
37. E.-C. Koch. *Prop., Expl., Pyrotech.*, **46** (2), 174 (2021).
<https://doi.org/10.1002/prop.202000220>