

УДК 662.3: 546.171.52

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НИТРОГИДРАЗИНА КАК КОМПОНЕНТА ПОРОХОВ. I. ДВУХКОМПОНЕНТНЫЕ СОСТАВЫ

А. М. Астахов¹, Д. Б. Лемперт²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 660037 Красноярск, alexastachov@mail.ru

²Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии РАН, 142432 Черноголовка, lempert@icp.ac.ru

Проведена оценка энергетических возможностей гипотетического цвиттер-ионного нитрогидразина $\text{H}_3\text{N}^+\text{N}^-\text{NO}_2$ в качестве компонента артиллерийских порохов. Составы с углеводородным связующим по сравнению со штатными метательными зарядами позволяют увеличить дульную энергию снаряда на $\approx 33\%$ для 152-мм гаубицы и на $\approx 27\%$ для 125-мм танковой пушки без увеличения температуры пороховых газов. Для 120-мм миномета возрастание дульной энергии мины составляет $\approx 14\%$. Для сравнения рассматриваются аналогичные составы на основе динитрамида аммония, которые показали меньшую эффективность. Составы с активным связующим также достигают высоких показателей работоспособности. Однако они имеют высокую температуру продуктов сгорания, что неприемлемо для большинства ствольных систем.

Ключевые слова: нитрогидразин, динитрамид аммония, смесевой порох, сила пороха, потенциал пороха, начальная скорость снаряда, дульная энергия снаряда, баллистическая эффективность выстрела.

DOI 15372/FGV2023.9433

EDN DCYEPY

ВВЕДЕНИЕ

Создание новых, более эффективных пороховых метательных составов, являющихся одним из видов высокоэнергетических материалов, всегда будет актуальным, пока существует огнестрельное оружие. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый к настоящему времени, в совершенствовании таких высокоэнергетических материалов, как взрывчатые вещества (ВВ) и смесевые твердые ракетные топлива (СТРТ), в области разработки порохов успехи более скромные [1–3]. До сих пор основная масса порохов во всем мире представлена композициями на основе нитроцеллюлозы [3–6]. При этом рецептурный состав многих из них, несмотря на существенное расширение потенциальной компонентной базы, мало изменился за последние более чем 100 лет [3]. Это связано с особенностями физико-химических процессов, протекающих при выстреле из огнестрельного оружия. Использование новых, более энергонасыщенных соединений сравнительно легко позволяет поднять силу пороха f (традиционный критерий оценки работоспособности порохов $f = n_g RT_c$, где n_g — количество молей газообразных продуктов горения на единицу массы пороха, R — универсальная газовая постоянная, T_c — температура горения пороха). Однако увеличение силы пороха при этом связано в основном с повышением температуры горения T_c . Так, например, использование в качестве основного компонента 2,4,6,8,10,12-гексанитро-2,4,6,8,10,12-гексаазаизовюрцитана (ГНИВ) хотя и приводит к сравнительно высокому значению $f = 1328$ кДж/кг, но сопровождается совершенно неприемлемой температурой горения $T_c > 4200$ К [7]. Это ведет к резкому усилению термической эрозии

ствола (пропорциональной T_c^7 [2, 8]) — главной причины, понижающей его живучесть. Другие факторы, ограничивающие возможность использования порохов на иных, чем нитроцеллюлоза, компонентах, — более сложный закон горения, высокая стоимость компонентов [4–6]. Поэтому, невзирая на то, что пороховые составы на основе нитраминов и углеводородных связующих появились еще в 60-х годах XX в. [9], за прошедшее время они не смогли существенно потеснить классические составы на основе нитроцеллюлозы.

Необходимость повышения живучести ствола привела к появлению так называемых «холодных» порохов, имеющих пониженную температуру горения ($T_c < 3000$ К), но более высокое газообразование, позволяющее в определенной степени компенсировать температурное падение силы пороха f . Впервые такие пороха появились в 30-х годах XX в. [8]. Использование в их составе нитрогуанидина и диэтиленгликольдинитрата позволило кардинально увеличить живучесть ствола одного из германских орудий с 1700 (при использовании нитроглицеринового пороха) до $15 \div 17$ тыс. выстрелов [10]!

Наряду с хорошо зарекомендовавшим себя компонентом нитрогуанидином, в современных «холодных» порохам применяют также гуанилмочевинную соль динитрамида. Детальный обзор порохов на этих компонентах приведен в [8].

Необходимость дальнейшего увеличения производительности метательных зарядов при ограничении возможностей повышения температуры пороховых газов требует более высокого газообразования пороховых составов. Поэтому поиск новых компонентов порохов, направленный на решение этой проблемы, продолжает оставаться чрезвычайно важной задачей и ведется во многих исследовательских лабораториях разных стран мира [8, 11–16].

Энергетические возможности цвиттер-ионного нитрогидразина $H_3N^+N^-NO_2$ (НГ) как бризантного ВВ рассматривались ранее в [17], а как окислителя СТРТ — в [18]. В настоящей работе это гипотетическое соединение исследовано в качестве возможного компонента артиллерийских порохов.

КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОРОХОВ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА И ОЦЕНКИ ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТИ

Изучавшиеся в [18] простейшие двухкомпонентные системы на основе НГ и горючих связующих, углеводородного (УС) и активного (АС), вполне могут быть рассмотрены не только как ракетные топлива, но и как пороховые составы ствольной артиллерии. Здесь будет выполнено такое исследование. Сравнение будем проводить с составами, аналогичными рассмотренным в [18] на основе динитрамида аммония (АДНА), и с известными литературными данными по зарубежным и отечественным порохам различного компонентного состава [5, 8, 19–22]. Необходимые для расчета характеристики исходных компонентов представлены в табл. 1.

Сравнительная оценка работоспособности порохов является непростой задачей. Как уже говорилось выше, работоспособность порохов традиционно характеризуется его силой f [3]. Дополнительным, также применяемым на практике критерием работоспособности является потенциал пороха Π [3], который связан с силой f соотношением $\Pi = f/(k - 1)$, где k — показатель адиабаты пороховых газов.

В работе [26] показано, что использование в качестве критериев только f и Π было справедливо и оправданно, когда основу порохов составляла нитроцеллюлоза, но в случае порохов с иной компонентной базой этого уже может оказаться недостаточно. Возможна ситуация, когда у одного из порохов сила f будет выше, но при этом ниже будет потенциал Π , и тогда выбор становится затруднительным. Забегая вперед скажем, что именно такая ситуация наблюдается в нашем случае.

Таблица 1

Некоторые характеристики используемых в расчете компонентов

Компонент	Формула	КБ, %	α_k	ρ_0 , г/см ³	ΔH_f^0 , кДж/кг
НГ	$\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_2$	+10.4	1.333	1.90 [17]	−259.6 [17]
АДНА	$\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_4$	+25.8	2.000	1.81 [23]	−1 084.6 [24]
УС	$\text{C}_{72.15}\text{H}_{119.21}\text{O}_{0.68}$	−330.6	0.003	0.91 [25]	−393.3 [25]
АС	$\text{C}_{18.96}\text{H}_{34.64}\text{N}_{19.16}\text{O}_{29.32}$	−41.5	0.531	1.49 [25]	−757.3 [25]

Примечания. КБ — кислородный баланс, α_k — кислородный коэффициент, ρ_0 — плотность, ΔH_f^0 — энтальпия образования. Для $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d$ КБ = $[d - (2a + b/2)] \cdot 1600/Mw$ и $\alpha_k = d/(2a + b/2)$, где Mw — молекулярная масса, реальная для соединения или формальная для состава.

Кроме того, сами значения f и Π не являются постоянными величинами, а зависят от плотности заряжания порохового заряда (давления пороховых газов в стволе) [27]. Принятое при проектировании артиллерийских систем [28] использование постоянных значений силы f и особенно коволюма пороховых газов α неизбежно увеличивает погрешность расчета.

Безусловными критериями эффективности являются дульная энергия снаряда (E_0) или его начальная скорость (v_0). Однако их определение требует решения основного уравнения внутренней баллистики применительно к конкретной артиллерийской системе, что, в свою очередь, требует знания кинетических параметров горения пороха [28]. Эти параметры *a priori* неизвестны, тем более для пороховых составов на основе гипотетических соединений.

В [26] предлагается использовать для нахождения E_0 выражение, ранее выведенное Граве [29]:

$$E_0 = \xi \omega \Pi \{1 - [(1 - \alpha \Delta)/(W/W_0 - \alpha \Delta)]^{k-1}\}, \quad (1)$$

где ξ — коэффициент, учитывающий второстепенные работы и неидеальность процесса выстрела; ω — масса порохового заряда; W — суммарный объем ствола и зарядной камеры W_0 ; Δ — плотность заряжания, ω/W_0 .

Модель Граве подразумевает мгновенное сгорание всего порохового заряда в объеме зарядной камеры W_0 , чего в действительности не происходит. Такой упрощенный подход хотя и требует рассмотрения в рамках конкретной артиллерийской системы, что относительно несложно, но зато не требует знания кинетики горения пороха.

В настоящей работе мы также воспользовались данной моделью, позволяющей выйти из состояния неопределенности оценки пороховых композиций по критериям силы f и потенциала Π .

Для большего удобства (исключение из рассмотрения плотности заряжания Δ в явном виде) уравнение (1) было преобразовано к виду

$$E_0 = \xi \omega \Pi \{1 - [(W_0 - \alpha \omega)/(W - \alpha \omega)]^{k-1}\}. \quad (2)$$

В качестве рассматриваемых ствольных систем выбраны три типовых вида артиллерийских вооружений, заметно различающихся по назначению и, соответственно, по своим характеристикам:

120-мм миномет [30], 152-мм гаубица [31, 32], 125-мм танковая пушка [33, 34].

Таблица 2

Необходимые для расчетов характеристики систем вооружения [30–34]

Тип вооружения	К, мм	L_d , мм	W_0 , дм ³	m , кг	ω , кг	v_0 , м/с	E_0 , МДж	ξ
Миномет	120	1 298	3.4	16.0	0.75	325	0.85	0.626
Гаубица	152.4	6 384	16.0	43.56	11.0	810	14.29	0.576
Танковая пушка	125	5 200	13.1	7.05	8.2	1 700	10.19	0.579

Примечания. К — калибр, L_d — путь снаряда (мины) в стволе до дульного среза, W_0 — объем зарядной камеры, m — масса снаряда (мины), ω — масса заряда, v_0 — начальная скорость снаряда (мины), E_0 — дульная энергия снаряда (мины), ξ — коэффициент неидеальности в уравнениях (1), (2).

Необходимые для расчета характеристики этих систем вооружения представлены в табл. 2. По ним вычислялось значение коэффициента ξ в уравнениях (1), (2) с использованием параметров штатных порохов для каждой системы, взятых из справочной литературы [22, 35]. Согласно [29] коэффициент ξ принимает значения от 0.7 до 0.9, однако современные орудия высокой баллистики имеют меньшие значения ξ .

Рассмотренные артиллерийские системы вооружения существенно отличаются по давлению в канале ствола. А поскольку сила f и потенциал Π пороха являются также и функцией давления [27], то состав пороха, оптимальный при одном давлении в стволе, обязательно будет таким же оптимальным при другом значении. По этой причине мы провели термодинамические расчеты при значениях давления 100, 300 и 500 МПа. Выбранные значения примерно соответствуют типовому уровню давления в стволах в рассматриваемых артиллерийских системах: 120-мм миномет, 152-мм гаубица, 125-мм танковая пушка соответственно.

Силу, потенциал порохов, температуру и коволюм пороховых газов α вычисляли с использованием программы для расчета термохимических равновесий REAL [27, 36]. Показатель адиабаты пороховых газов вычислялся как $k = f/\Pi + 1$.

Также была рассчитана теплота сгорания (калорийность) порохов, еще один общепринятый критерий их работоспособности: $Q_v^{18^\circ\text{C}} = \Pi(1 - 291/T_c)$.

Компонентный состав рассчитывался с минимальным шагом до 0.1 %.

Для расчета параметров ствольных систем была разработана собственная пользовательская программа «Орудия и пороха». Следует подчеркнуть, что мы даем лишь термодинамическую оценку возможности использования рассматриваемых композиций в качестве порохов. Будут ли они в реальности удовлетворять множеству требований, предъявляемых к порохам, без знания кинетических параметров горения, а также их физико-механических свойств, требующих экспериментального изучения, сказать нельзя.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показана зависимость силы f и потенциала Π пороха составов НГ/УС, АДНА/УС, НГ/АС и АДНА/АС от содержания связующего при давлениях 100, 300 и 500 МПа. На рис. 2 для этих же составов показаны расчетные зависимости температуры T_c и количества молей n_g пороховых газов от содержания связующего. В табл. 3 представлены детальные характеристики некоторых модельных пороховых составов с наилучшими параметрами баллистической эффективности для конкретной пары входящих компонентов при заданном назначении: миномет, гаубица, танковая пушка.

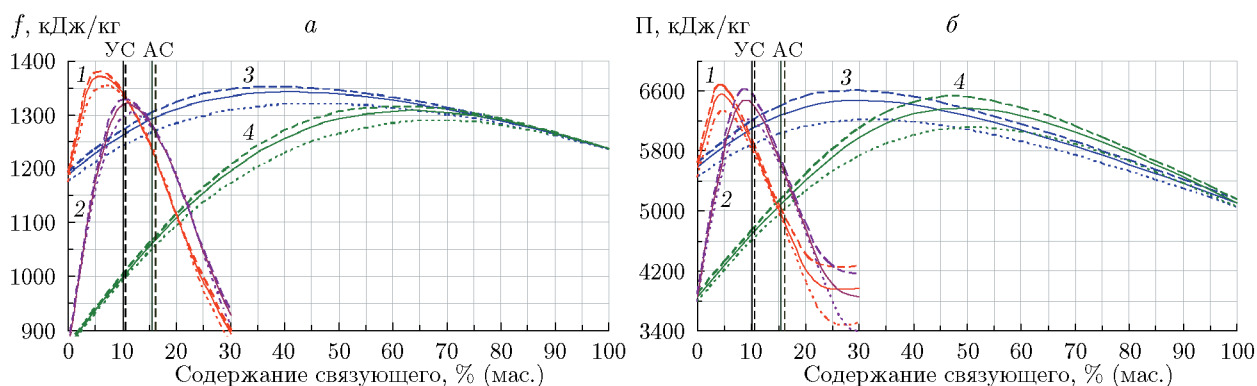


Рис. 1. Расчетная зависимость силы (а) и потенциала пороха (б) от содержания связующего в составах НГ/УС (1), АДНА/УС (2), НГ/АС (3) и АДНА/АС (4) при давлениях 100 (пунктирные линии), 300 (сплошные) и 500 МПа (штриховые): сплошная вертикальная линия ограничивает область возможного содержания связующего в составах на основе НГ, штриховая вертикальная — составов на основе АДНА

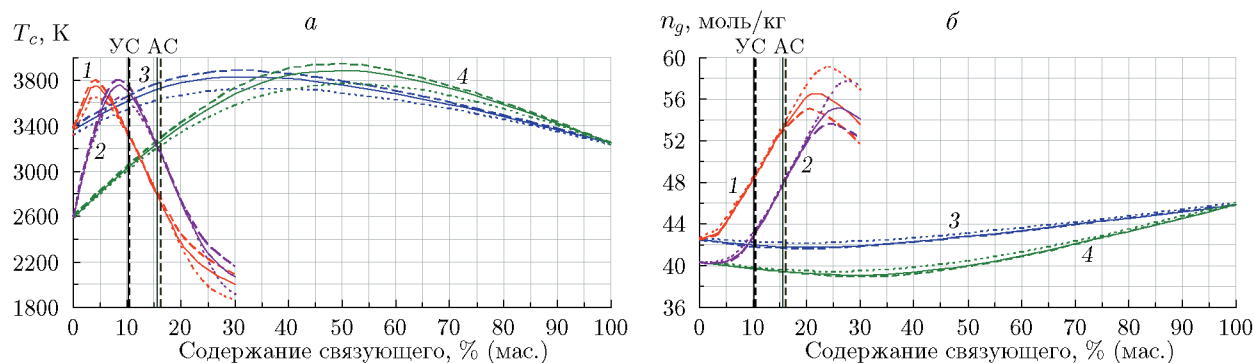


Рис. 2. Расчетная зависимость температуры (а) и количества молей (б) пороховых газов от содержания связующего в составах НГ/УС (1), АДНА/УС (2), НГ/АС (3) и АДНА/АС (4) при давлениях 100 МПа (пунктирные линии), 300 МПа (сплошные) и 500 МПа (штриховые): сплошная вертикальная линия ограничивает область возможного содержания связующего в составах на основе НГ, штриховая вертикальная — составов на основе АДНА

Как видно из рис. 1, максимумы f не совпадают с максимумами Π , зависят от давления и не соответствуют ранее рассмотренным [18] максимумам по удельному импульсу I_{sp} для ракетных топлив. Наибольшим значением f характеризуется состав НГ/УС при содержании связующего $\approx 6 \div 7$ % (мас.). По сравнению с ним оптимальный состав АДНА/УС имеет заметно меньшую силу (разница $51 \div 53$ кДж/кг или порядка 4 %). Уступают ему и составы с обоими окислителями и активным связующим. Однако изготовить пороховой состав со столь низким содержанием связующего нереально. Вертикальные линии на рис. 1 ограничивают область возможного содержания углеводородного связующего (принято, как и в случае ракетных топлив [25], минимальное технологически возможное объемное содержание связующего $\approx 18 \div 20$ %). Для состава на основе НГ минимальное массовое содержание УС составляет 10.1 %, а на основе АДНА — 10.6 %. Причем в последнем случае это содержание УС близко к составам с максимумом f . В итоге преимущество в силе состава НГ/УС (с минимальным реально возможным содержанием связующего) над АДНА/УС становится заметно меньшим ($12 \div 33$ кДж/кг или порядка $1 \div 2.5$ %).

Таблица 3
Характеристики модельных пороховых составов с наилучшими параметрами баллистической эффективности компонентного состава

Состав пороховой композиции, %	КБ, %	α_k	ρ_{max} , г/см ³	СВ	f , кДж/кг	Π , 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	v_0 , м/с	E_0 , МДж
НГ89.9/УС10.1	-23.6	0.614	1.71	М	1 333.9	5 803.9	5 292.9	1.230	1.208	3 305	48.54	20.6	349	0.97
				Г	1 339.8	5 892.6	5 377.4	1.227	1.152	3 328	48.41	20.7	982	21.01
				Т	1 340.7	5 940.3	5 422.1	1.226	1.101	3 336	48.33	20.7	1 952	13.43
АДНА89.4/УС10.6	-11.5	0.801	1.64	М	1 301.3	6 204.2	5 702.4	1.210	1.084	3 598	43.50	23.0	346	0.96
				Г	1 320.8	6 398.8	5 891.8	1.206	1.035	3 673	43.25	23.1	961	20.12
				Т	1 328.6	6 492.1	5 982.1	1.205	0.992	3 704	43.14	23.2	1 921	13.01
НГ54.3/АС45.7	-13.3	0.768	1.69	М	1 320.3	6 133.3	5 651.4	1.215	1.106	3 704	42.88	23.3	348	0.97
НГ68.0/АС32.0	-6.2	0.874	1.75	М	1 311.3	6 214.2	5 728.5	1.211	1.082	3 723	42.37	23.6	347	0.96
АДНА31.9/АС68.1	-20.0	0.707	1.58	М	1 289.5	5 930.5	5 461.9	1.217	1.109	3 683	42.11	23.7	344	0.95
АДНА48.8/АС51.2	-8.6	0.851	1.63	М	1 268.4	6 106.8	5 635.1	1.208	1.058	3 767	40.50	24.7	341	0.93
НГ81.5/УС18.5	-51.8	0.396	1.58	Г	1 154.4	4 414.5	3 901.3	1.261	1.307	2 503	55.48	18.0	934	18.99
АДНА77.7/УС22.3	-52.6	0.434	1.48	Г	1 121.0	4 351.7	3 845.4	1.258	1.269	2 501	53.91	18.5	910	18.03
НГ86.5/УС13.5	-35.0	0.507	1.66	Т	1 277.7	5 329.1	4 811.5	1.240	1.160	2 996	51.28	19.5	1 915	12.93
АДНА82.4/УС17.6	-36.1	0.542	1.54	Т	1 237.8	5 267.6	4 756.6	1.235	1.122	3 000	49.63	20.2	1 874	12.38

Примечания. ρ_{max} — предельное возможное значение плотности при отсутствии пористости; СВ — система вооружения (М — 120-мм миномет, Г — 152-мм гаубица, Т — 125-мм танковая пушка); μ_{av} — средняя молярная масса пороховых газов; v_0 и E_0 — начальная скорость и дульная энергия снаряда (мины), достигаемые при замене штатного пороха рассматриваемыми составами. Жирным шрифтом выделены максимальные значения f и Π .

в зависимости от давления в стволе).

Разница в значениях Π между составами с максимальными потенциалами НГ/УС и АДНА/УС не превышает 1.5 % в пользу первого (см. рис. 1, б). Однако в таких составах, как уже было сказано ранее, содержание связующего ниже необходимого технологического минимума. В отличие от результатов анализа по величине силы f , при минимально возможном содержании связующего состав АДНА89.4/УС10.6 заметно превосходит по значению Π состав НГ89.9/УС10.1 ($\Delta\Pi = 400 \div 552$ кДж/кг или $7 \div 9$ % в зависимости от давления в стволе). То есть здесь возникает описанная в [26] проблема неоднозначности выбора более работоспособного состава, когда один пороховой состав имеет преимущество над другим в значении силы f , но уступает ему в значении потенциала Π .

Зависимость количества газообразных продуктов от содержания связующего в составах НГ/УС и АДНА/УС имеет максимумы при содержании связующего выше 20 % (см. рис. 2, б). Это связано с тем, что по мере уменьшения содержания кислорода в системе в продуктах сгорания во все больших количествах начинают образовываться СО и H_2 , и общее газообразование возрастает. При давлении 300 МПа для составов НГ/УС максимальное газообразование наблюдается при содержании связующего ≈ 22 % (КБ = -63.6 %, $\alpha_k = 0.339$) и составляет 56.49 моль/кг или 1 267 л/кг (для газов при н. у.), что соответствует средней молекулярной массе газов $\mu_{av} = 17.7$ г/моль. А при давлении 100 МПа и содержании связующего 24 % (смещение положения максимума) оно достигает даже 59.05 моль/кг или 1 324 л/кг ($\mu_{av} = 16.9$ г/моль). Это очень высокие показатели. Обычно для традиционных бездымных порохов газовыделение находится в диапазоне $800 \div 1\,100$ л/кг ($n_g = 35 \div 49$ моль/кг, $\mu_{av} = 20 \div 28$ г/моль) [37].

При дальнейшем повышении содержания горючего-связующего происходит уменьшение газообразования (см. рис. 2, б). Интересно отметить, что связано оно не с образованием конденсированного углерода (последний отсутствует даже в составах с сильно отрицательным кислородным балансом; так, КБ = -90.5 % для НГ70/УС30, для сравнения — у тротила КБ = -74.0 %), а с образованием значительных количеств таких газов, как CH_4 и NH_3 , на которое расходуется много водорода.

Активное связующее само по себе имеет высокое значение $f = 1\,234 \div 1\,236$ кДж/кг, что выше, чем у многих штатных порохов из традиционных компонентов. Это неудивительно, поскольку АС в своем составе содержит более 50 % нитроглицерина [25] (что даже больше, чем в нитроглицериновых порохах [3]) и имеет кислородный коэффициент $\alpha_k = 0.531$.

У составов на активном связующем проблемы с его недостаточным содержанием в порохе нет, максимальные значения f и Π достигаются при содержании АС несколько десятков процентов. Сами максимумы относительно пологие (см. рис. 1). Так, одинаковые значения силы $f = 1\,320.3$ кДж/кг составов НГ/АС при 100 МПа наблюдаются при содержании окислителя $53.8 \div 54.3$ %. Поскольку при равных значениях силы большей работоспособностью будет обладать порох с большим значением потенциала, в табл. 3 из указанного диапазона помещен состав с максимальным значением Π , т. е. НГ54.3/АС45.7. Максимумы потенциала Π не совпадают с максимумами силы f и смещены в область с меньшим содержанием связующего (см. рис. 1). Максимальное значение потенциала $\Pi = 6\,214.2$ кДж/кг составов НГ/АС при 100 МПа наблюдается при содержании окислителя в диапазоне $68.0 \div 68.2$ %. Поскольку при равных значениях потенциала большей работоспособностью будет обладать порох с большим значением силы, то в табл. 3 из указанного диапазона помещен состав с максимальным значением f , т. е. НГ68.0/АС32.0.

Составы с максимальными параметрами на активном связующем НГ/АС превосходят аналогичные составы АДНА/АС как по силе f , так и по потенциалу Π (см. рис. 1, табл. 3), и здесь проблемы с выбором основного компонента для более работоспособного порохового

состава не возникает. Но и в этом случае ситуация осложняется несовпадением максимумов f и Π применительно к содержанию связующего. Уже в рамках составов НГ/АС встает вопрос, какой состав более работоспособен: с содержанием связующего 45.7 %, имеющий максимальное значение f (при 100 МПа), или с содержанием связующего 32.0 %, имеющий максимальное значение Π (при 100 МПа). Аналогичная ситуация возникает, если сравнивать между собой и составы АДНА/АС. При содержании связующего 68.1 % наблюдается максимальная сила, а при 51.2 % — максимальный потенциал (при 100 МПа). Таким образом, традиционные критерии работоспособности порохов в данном случае также не позволяют сделать однозначный выбор в пользу того или иного состава.

При больших давлениях активное связующее дает возможность достичь даже несколько более высоких значений силы $f = 1343$ кДж/кг (максимум для состава НГ59.4/АС40.6 при 300 МПа) и 1353 кДж/кг (максимум для состава НГ62.2/АС37.8 при 500 МПа), чем состав НГ89.9/УС10.1 (см. табл. 3). При этом выше, причем существенно, и потенциал Π (6 406 кДж/кг для состава НГ59.4/АС40.6 и 6 551 кДж/кг для состава НГ62.2/АС37.8). То есть работоспособность таких составов однозначно будет больше, чем состава на углеводородном связующем НГ89.9/УС10.1. Тем не менее, мы не стали включать эти составы в сводную табл. 3, так как они не представляют практического интереса, о чем будет сказано ниже.

Как видно из рис. 2, б, количество образующихся газов для составов на активном связующем изменяется в зависимости от содержания связующего в относительно небольшом интервале: $n_g = 41.61 \div 45.96$ моль/кг (или $933 \div 1030$ л/кг при н. у.) для НГ/АС и $n_g = 38.94 \div 45.96$ моль/кг (или $873 \div 1030$ л/кг н. у.) для АДНА/АС, что находится на уровне традиционных бездымных порохов. При этом максимум газовыделения наблюдается для самого активного связующего. Степень насыщенности его кислородом ($КБ = -41.5$ %, $\alpha_k = 0.531$) обеспечивает полное газообразование и наличие в продуктах сгорания значительных количеств СО и Н₂. Прибавление к активному связующему окислителей неизбежно приводит к увеличению содержания в продуктах сгорания более тяжелых газов СО₂ и Н₂О и, как следствие, к меньшему общему газообразованию.

Прежде чем переходить к критериям оценки пороховых составов по $E_0(v_0)$, остановимся еще на одной важной характеристике порохов — температуре пороховых газов T_c . На рис. 3 приведены расчетные зависимости силы f составов НГ/УС, АДНА/УС, НГ/АС и АДНА/АС от температуры пороховых газов T_c при давлениях 100, 300 и 500 МПа. При этом показаны только области с содержанием связующего не ниже минимального технологического уровня. Для сравнения на рис. 3 также представлены данные [8, 19–22] по отечественным и зарубежным порохам различного состава, как штатным, так и экспериментальным. Эти данные приведены в литературе для разных плотностей заряжения Δ (обычно 0.1 или 0.2 г/см³) либо вообще без указания таковой. Они соответствуют различным значениям давления для разных пороховых составов, поэтому на рис. 3 мы использовали относительно крупные размеры маркеров для каждого порохового состава, поскольку о его конкретном значении f можно говорить лишь с определенным приближением.

Из рис. 3 видно, что составы НГ/УС при одинаковой температуре T_c имеют большую силу f , чем все остальные пороховые композиции. Для составов НГ/УС при давлениях 300 ÷ 500 МПа минимальные температуры пороховых газов составляют 2003 ÷ 2086 К (при этом $f = 893 \div 897$ кДж/кг) и уменьшаются до 1857 К при давлении 100 МПа. Последний результат, впрочем, не особо интересен в нашем случае, поскольку для минометных систем проблемы разгара ствола не существует [3] и нет смысла использовать порох с низким значением силы. Для них вполне подходит состав НГ89.9/УС10.1 с максимальными значениями силы (1 334 кДж/кг) и температуры (3 305 К). При этом при заметно большей силе f температура пороховых газов все равно будет на сотни градусов ниже,

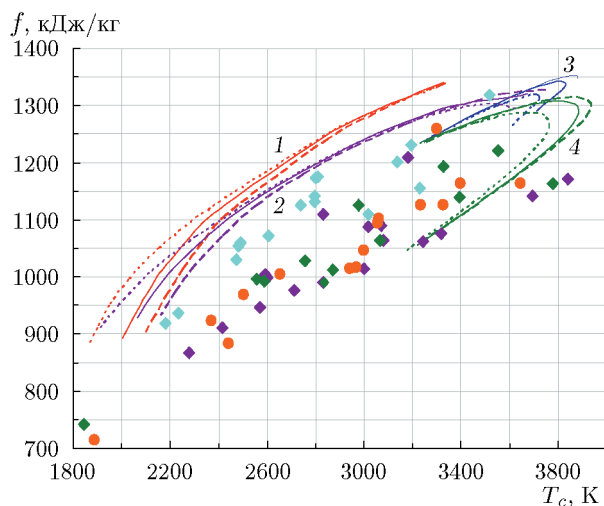


Рис. 3. Связь между силой пороха и температурой пороховых газов, рассчитанная для составов НГ/УС (1), АДНА/УС (2), НГ/АС (3) и АДНА/АС (4) при давлениях 100 (пунктирные линии), 300 (сплошные) и 500 МПа (штриховые): ромбы — данные [8, 19–21], кружки — [22]

чем у штатных минометных порохов (например, у американского М9 $f = 1142$ кДж/кг, $T_c = 3799$ К [19], у отечественного НБ $f = 1164$ кДж/кг, $T_c = 3645$ К [22]). Активное связующее в паре с НГ позволяет получить при давлении 100 МПа несколько меньшую силу (до 1320 кДж/кг), чем при использовании углеводородного связующего, но при существенно большей температуре (3704 К) пороховых газов, что, очевидно, нецелесообразно. Как уже говорилось, при больших давлениях активное связующее позволяет превзойти по работоспособности составы на углеводородном связующем. Но это сопровождается увеличением температуры пороховых газов более чем на 500 К ($T_c = 3813$ и 3866 К для составов НГ59.4/АС40.6 и НГ62.2/АС37.8 соответственно). Для гаубиц и танковых пушек это неминуемо создаст проблему с разгаром ствола. Именно по этой причине мы не стали включать подробные данные об этих составах в табл. 3.

Таким образом, варьированием состава двухкомпонентной системы НГ/УС можно добиться изменения температуры пороховых газов в диапазоне $T_c = 2000 \div 3000$ К с соответствующим изменением силы в диапазоне $f = 890 \div 1280$ кДж/кг. Это примерно на четверть выше, чем у штатных зарубежных и отечественных порохов с равной температурой пороховых газов.

Следует отметить, что составы на основе АДНА при одинаковых температурах пороховых газов хотя и проигрывают по силе составам на основе НГ, но при этом не уступают и в большинстве случаев даже превосходят известные пороха на основе других компонентов (см. рис. 3).

Согласно расчетам замена в минометном выстреле штатного нитроглицеринового пороха на состав НГ89.9/УС10.1 позволяет при той же массе заряда поднять начальную скорость мины с 325 до 349 м/с и тем самым увеличить ее дульную энергию на $\approx 14\%$. Состав АДНА89.4/УС10.6 может достичь скорости снаряда 346 м/с и увеличить дульную энергию мины на $\approx 13\%$. Таким образом, модель Граве [26, 29] позволила разрешить проблему выбора более работоспособного порохового состава в пользу состава НГ89.9/УС10.1, имеющего большую силу f , но меньший потенциал Π , чем состав АДНА89.4/УС10.6. Однако разница в начальных скоростях для этих двух составов невелика, и в данном случае, видимо, целесообразнее заниматься разработкой метательной рецептуры на уже реально имеющемся компоненте, чем искать пути синтеза гипотетического вещества, пусть и имеющего чуть лучшие характеристики.

Также модель Граве разрешила вопрос выбора между составами НГ/АС в пользу состава с максимальным значением f (НГ54.3/АС45.7). Начальная скорость мины при его использовании 348 м/с, лишь на 1 м/с ниже, чем у состава НГ89.9/УС10.1. Состав

с максимальным значением Π (НГ68.0/АС32.0) дает значение скорости 347 м/с.

В отличие от минометного выстрела, где рассматриваемые пороховые составы приводят к сравнительно небольшому увеличению начальной скорости мины, для гаубицы увеличение начальной скорости снаряда и его дульной энергии существенное (см. табл. 3). Однако и температура газов у рассматриваемых порохов с максимальными значениями работоспособности тоже существенно выше ($3300 \div 3800$ К), чем у штатного дигликолевого пороха (2505 К). Поскольку это резко сокращает срок службы ствола, то такие пороховые составы не могут быть рекомендованы для использования, несмотря на более высокие баллистические характеристики. Из рис. 2, а и 3 видно, что увеличением содержания углеводородного связующего можно добиться понижения температуры пороховых газов до приемлемого уровня, пусть и ценой уменьшения силы f и потенциала Π пороха. В то же время составы на основе активного связующего вообще не могут обеспечить температуру пороховых газов ниже 3200 К, т. е. они в принципе не подходят для использования в артиллерийских орудиях. Температуре пороховых газов 2500 К при давлении 300 МПа отвечают составы НГ81.5/УС18.5 и АДНА77.7/УС22.3. Эти пороховые составы позволяют поднять начальную скорость снаряда без увеличения термической эрозии ствола с 810 м/с до 934 и 910 м/с соответственно. Увеличение дульной энергии снаряда при этом составляет ≈ 33 и ≈ 26 %, что существенно.

Как видно из рис. 2, а и 3, составы с активным связующим не в состоянии обеспечить снижение температуры пороховых газов не только до 2500 К, но и даже до 3000 К, при любом соотношении компонентов. Таким образом, они могут претендовать лишь на роль минометных порохов, где требования к T_c не так критичны. Поэтому мы не рассматриваем их в дальнейшем как метательные ВВ в системах гаубица и танковая пушка.

Для составов с $T_c \approx 3000$ К проблемы выбора между композициями НГ/УС и АДНА/УС не существует, состав на основе НГ превосходит по всем характеристикам состав на основе АДНА (см. табл. 3). Замена штатного пороха на состав НГ86.5/УС13.5 позволяет при той же массе заряда поднять начальную скорость бронебойного подкалиберного снаряда с 1700 до 1915 м/с и тем самым увеличить ее дульную энергию на ≈ 27 % без увеличения температуры пороховых газов. Для состава АДНА82.4/УС17.6 эти показатели составляют 1874 м/с и ≈ 21 % соответственно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Согласно термодинамическим расчетам нитрогидразин представляет значительный интерес как возможный компонент артиллерийских порохов. Его использование вместо штатных порохов в составах с углеводородным связующим позволяет увеличить дульную энергию снаряда на ≈ 33 % для 152-мм гаубицы и на ≈ 27 % для 125-мм танковой пушки, без увеличения температуры пороховых газов. Для этих систем пороха на основе нитрогидразина более эффективны, чем аналогичные пороха на основе АДНА. Для последних соответствующее увеличение дульной энергии снаряда составляет 26 и 21 %, что, тем не менее, тоже представляет определенный интерес.

2. Для минометных систем выигрыш при использовании порохов на основе нитрогидразина заметно ниже. Увеличение дульной энергии 120-мм мины составляет ≈ 14 %. Для потенциального минометного пороха на основе АДНА эта величина лишь незначительно меньше (≈ 13 %).

3. Активное связующее пригодно для использования лишь в минометных порохах. При его применении как в составах на основе нитрогидразина, так и в составах с АДНА, повышение силы и потенциала пороха достигается главным образом за счет увеличения температуры пороховых газов, что неприемлемо для большинства ствольных систем.

4. Зависимость параметров пороховых композиций от давления требует учета этого фактора при внутриваллистических расчетах. Постоянное значение силы пороха f и коволюма пороховых газов α , общепринятое при проектировании ствольных систем, является дополнительным источником увеличения погрешности конечного результата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке одного из авторов (Д. Б. Лемперт) в рамках государственного задания Федеральному исследовательскому центру проблем химической физики и медицинской химии РАН (номер госрегистрации 124020100045-5).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Agrawal J. P.** High Energy Materials: Propellants, Explosives and Pyrotechnics. — Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
2. **Koch E.-C.** High Explosives, Propellants, Pyrotechnics. — Berlin, Boston: De Gruyter, 2021.
3. **Косточко А. В., Казбан Б. М.** Пороха, ракетные твердые топлива и их свойства. Физико-химические свойства порохов и ракетных твердых топлив: учеб. пособие. — М.: ИНФРА-М, 2014.
4. **Vogelsanger B., Andres H., Schädeli U., Huber A., Skriver A., Ryf K.** Tomorrow's LOVA-propellants — polymer-bonded or nitrocellulose-based? // Proc. 35th Int. Annu. Conf. ICT. Energetic Materials: Structure and Properties, Karlsruhe, 2004. — V. 7. — P. 1–15.
5. **Комов В. Н., Сысолятин С. В., Малыхин В. В., Попов В. О.** Обзор: Перспективы рецептурного развития метательных составов // Южно-Сибирский науч. вестн. — 2019. — № 4-1 (28). — С. 180–187. — EDN: IDOBSA.
6. **Szala M.** Development trends in artillery ammunition propellants // High Energy Mater. — 2020. — V. 12, N 2. — P. 5–16. — DOI: 10.22211/matwys/0196.
7. **Komov V. N., Popov V. O.** Computational and theoretical estimation of the energy potential of highly filled propellant formulations // Russ. J. Appl. Chem. — 2022. — V. 95, N 8. — P. 1174–1178. — DOI: 10.1134/S1070427222080134.
8. **Koch E.-C.** Insensitive high explosives: V. Ballistic properties and vulnerability of nitroguanidine based propellants // Propell., Explos., Pyrotech. — 2021. — V. 46, N 2. — P. 174–206. — DOI: 10.1002/prop.202000220.
9. **US Pat. 3117044.** Solid propellant containing organic oxidizers and polymeric fuel / Sauer C. W. — Appl. 18.03.1957, publ. 07.01.1964.
10. **Гальвитц У.** Артиллерийские пороха и заряды. — М.: Оборонгиз, 1950.
11. **Wingborg N., Latypov N. V.** Triaminoguanidine dinitramide, TAGDN: Synthesis and characterization // Propell., Explos., Pyrotech. — 2003. — V. 28, N 6. — P. 314–318. — DOI: 10.1002/prop.200300022.
12. **Darnse R. S., Singh A.** Advanced concepts of the propulsion system for the futuristic gun ammunition // Def. Sci. J. — 2003. — V. 53, N 4. — P. 341–350. — DOI: 10.14429/DSJ.53.2279.
13. **Сопин В. Ф., Марченко Г. А.** Перспективные компоненты высокоэнергетических порохов (ВЭП) // Энергетические конденсированные системы: матер. II Всерос. конф. — М.: Янус-К, 2004. — С. 73–74.
14. **Damse R. S., Singh A., Singh H.** High energy propellants for advanced gun ammunition based on RDX, GAP and TAGN compositions // Propell., Explos., Pyrotech. — 2007. — V. 32, N 1. — P. 52–60. — DOI: 10.1002/prop.200700007.

15. Fisher N., Izsák D., Klapötke T. M., Rappenglück S., Stierstorfer J. Nitrogen-rich 5,5'-bistetrazolates and their potential use in propellant systems: A comprehensive study // *Chem. Eur. J.* — 2012. — V. 18, N 13. — P. 4051–4062. — DOI: 10.1002/chem.201103737.
16. Lavoie J., Petre C.-F., Durand S., Dubois C. Stability and performance of gun propellants incorporating 3,6-dihydrazino-*s*-tetrazine and 5-aminotetrazolium nitrate // *J. Hazard. Mater.* — 2019. — V. 363, N 2. — P. 457–463. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.09.088.
17. Астахов А. М. Оценка энергетических и детонационных параметров нитрогидразина // *Физика горения и взрыва*. — 2023. — Т. 59, № 2. — С. 117–124. — DOI: 10.15372/FGV20230214. — EDN: RULWHP.
18. Астахов А. М., Лемперт Д. Б. Оценка энергетических возможностей цвиттер-ионного нитрогидразина как компонента смесевых твердых ракетных топлив // *Физика горения и взрыва*. — 2024. — Т. 60, № 3. — С. 45–53. — DOI: 10.15372/FGV2023.9300. — EDN: IFJXAI.
19. Fedoroff B. T., Sheffield O. E. *Encyclopedia of explosives and related items*. V. 2. — Dover, NJ: Picatinny Arsenal, 1962.
20. **Military Explosives**. Technical Manual N9-1300-214. — Washington, DC: Headquarters Department of the Army, 1984.
21. **Propellant Management Guide**. — Savanna, Illinois: U.S. Army Defense Ammunition Center, 1998.
22. **Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного, артиллерийского и ракетного оружия. Часть 1. Физические основы устройства и функционирования стрелково-пушечного и артиллерийского оружия: учеб. для вузов / под ред. А. А. Королева, В. Г. Кучерова**. — Волгоград: ВолгГТУ, 2002.
23. Bellas M. K., Matzger A. J. Achieving balanced energetics through cocrystallization // *Angew. Chem. Int. Ed.* — 2019. — V. 58, N 48. — P. 17185–17188. — DOI: 10.1002/anie.201908709.
24. Конькова Т. С., Матюшин Ю. Н., Мирошниченко Е. А., Воробьев А. Б. Термохимические свойства солей динитразовой кислоты // *Изв. АН. Сер. хим.* — 2009. — № 10. — С. 1958–1965.
25. Lempert D. B., Nechiporenko G. N., Manelis G. B. Energetic characteristics of solid composite propellants and ways for energy increasing // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2006. — V. 3, N 4. — P. 73–87.
26. Андреев А. А., Ляпин Н. М., Михайлов Ю. М. Термодинамические характеристики пороха и критерии его работоспособности // *Бутлеровские сообщ.* — 2021. — Т. 67, № 9. — С. 1–6. — DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/21-67-9-1. — EDN: EGLQOV.
27. Белов Г. В. *Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы*. — М.: Научный мир, 2002.
28. Серебряков М. Е. *Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет*. — М.: Оборонгиз, 1962.
29. Граве И. П. *Внутренняя баллистика. Пиродинамика*. Вып. I. — Л.: Артиллерийская академия РККА, 1933.
30. Кулаков В. В., Ефремов А. А., Каширина Е. И., Каширина О. Ю., Литвин Ю. И. *Артиллерийское вооружение. Часть I. Минометы*. — М.: Прометей, 2019.
31. **152-мм гаубица 2А65**. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 1. Техническое описание. — М.: Воен. изд-во, 1991.
32. Кулаков В. В., Шаманов В. А., Уткин В. Е. *Буксируемые артиллерийские орудия 2А65 и 2А18*. — М.: Прометей, 2022.
33. **125-мм танковые пушки 2А26, 2А46, 2А46-1, 2А46-М, 2А46-М1, 2А46-2**. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Часть 3. Боеприпасы. — М.: Воен. изд-во, 1988.

34. **Юрко С. В., Безлюдько А. В., Ильющенко Д. Н., Шарипов Р. И., Янковский И. Н.** 125-мм танковая пушка 2А46М. — Минск: БНТУ, 2016.
35. **Валеев Г. Г., Сопин В. Ф., Соков Б. А.** Артиллерийские метательные заряды. — Казань: ФГУП ГосНИИХП, 2004.
36. **Belov G. V.** Thermodynamic analysis of combustion products at high temperature and pressure // Propell., Explos., Pyrotech. — 1998. — V. 23, N 2. — P. 86–89. — DOI: 10.1002/(SICI)1521-4087(199804)23:2<3C86::AID-PREP86>3E3.0.CO;2-2.
37. **Баллистика** ракетного и ствольного оружия / под ред. А. А. Королева, В. А. Комочкова. — Волгоград: ВолгГТУ, 2010.

Поступила в редакцию 12.12.2023.

После доработки 07.03.2024.

Принята к публикации 15.05.2024.
