

УДК 621.454.3: 546.171.52

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЦВИТТЕР-ИОННОГО НИТРОГИДРАЗИНА КАК КОМПОНЕНТА СМЕСЕВЫХ ТВЕРДЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

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 смесевых твердых ракетных топлив. Рассмотрены двухкомпонентные составы с углеводородным или активным связующим, а также трехкомпонентные составы с добавкой алюминия или гидрида алюминия. Наибольшую расчетную баллистическую эффективность показывают составы с активным связующим и гидридом алюминия. Их удельный импульс превышает 280 с и с учетом двухфазных потерь максимальный эффективный импульс 3-й ступени ракетного комплекса достигает 265.4 с, тогда как для оптимизированного подобного состава на основе динитрамида аммония это значение значительно ниже (262.5 с).

Ключевые слова: нитрогидразин, динитрамид аммония, смесевые твердые ракетные топлива, удельный импульс, эффективный импульс, температура горения, двухфазные потери импульса.

DOI 10.15372/FGV2023.9300
EDN IFJXAI

ВВЕДЕНИЕ

К началу 80-х годов XX в. был достигнут значительный прогресс в совершенствовании составов смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ), после чего увеличение их энергетики резко замедлилось или даже остановилось. Дальнейшее повышение энергетических возможностей СТРТ представляет собой достаточно сложную научно-техническую проблему из-за приближения к физическим пределам роста [1]. Тем не менее поиск новых компонентов СТРТ с целью получения более высоких значений удельного импульса I_{sp} продолжает оставаться чрезвычайно важной задачей. Даже сравнительно небольшое увеличение удельного импульса I_{sp} позволяет заметно улучшить характеристики баллистических ракет. Особенно это актуально для межконтинентальных баллистических ракет (МБР). Если, например, увеличение удельного импульса на 1 % для ракет с дальностью полета $1000 \div 2000$ км вызывает изменение дальности на 2 %, т. е. на $20 \div 50$ км, что несущественно, то для МБР с дальностью полета $10000 \div 12000$ км соответствующее изменение дальности составляет

$4 \div 4.5$ %, т. е. $400 \div 500$ км, что уже существенно [2].

Энергетические возможности цвиттер-ионного нитрогидразина $\text{H}_3\text{N}^+\text{N}^-\text{NO}_2$ в качестве бризантного взрывчатого вещества рассматривались ранее в [3], там же обсуждались некоторые его ожидаемые характеристики. В настоящей работе это гипотетическое соединение исследовано как возможный компонент СТРТ.

1. КОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ СТРТ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Окислитель является основным компонентом СТРТ, его содержание в составе обычно превышает 50 %. Поэтому наиболее эффективным путем совершенствования энергетического потенциала СТРТ является применение новых окислителей. Обеспеченность соединения или состава кислородом характеризуют кислородным балансом (КБ) или кислородным коэффициентом α , которые в относительных величинах выражают избыток или недостаток кислорода для полного окисления горючих элементов до их высших оксидов [4].

Нитрогидразин (НГ) имеет положитель-

Таблица 1

Некоторые характеристики используемых в расчете компонентов модельных составов

| Компонент | Формула | КБ, % | α | 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 [3] | -259.6 [3] |
| АДНА | $\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_4$ | +25.8 | 2.000 | 1.81 [6] | -1084.6 [5] |
| УС | $\text{C}_{72.15}\text{H}_{119.21}\text{O}_{0.68}$ | -330.6 | 0.003 | 0.91 [7] | -393.3 [7] |
| АС | $\text{C}_{18.96}\text{H}_{34.64}\text{N}_{19.16}\text{O}_{29.32}$ | -41.5 | 0.531 | 1.49 [7] | -757.3 [7] |
| Алюминий | Al | -89.0 | 0 | 2.70 | 0 |
| Гидрид алюминия | AlH_3 | -160.0 | 0 | 1.48 | -380.5 |

При мечания. КБ — кислородный баланс, α — кислородный коэффициент. Для состава $\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d\text{Al}_e$ КБ = $[d - (2a + b/2 + 1.5e)] \cdot 1600/M$ и $\alpha = d/(2a + b/2 + 1.5e)$, где M — молекулярная масса, реальная для соединения или формальная для состава.

ный кислородный баланс +10.4 %, т. е. в смесевых составах может выступать в качестве окислителя. По сравнению с таким окислителем, как динитрамид аммония (АДНА), у этого соединения выше содержание водорода в молекуле (3.93 % против 3.25 %) и больше расчетные значения энталпии образования ΔH_f^0 (-259.6 кДж/кг [3] против -1084.6 кДж/кг [5]) и плотности ρ_0 (1.90 г/см³ [3] против 1.81 г/см³ [6]), но при этом заметно меньше содержание избыточного кислорода ($\alpha = 1.33$ против 2.00).

В настоящей работе рассмотрены простейшие двухкомпонентные модельные составы НГ с углеводородным (УС) или активным (АС) связующим [7–9], а также трехкомпонентные составы с добавкой алюминия или гидрида алюминия в качестве энергетического компонента. Сравнение с расчетными данными для подобных составов на основе известного высокоэффективного окислителя АДНА позволяет оценить перспективность использования НГ. Необходимые для расчета характеристики исходных компонентов СТРТ представлены в табл. 1.

Удельный импульс I_{sp} (при отношении давлений в камере сгорания и на срезе сопла $p_c : p_a = 40 : 1$) и температуру в камере сгорания T_c вычисляли с использованием программы для расчета термохимических равновесий TERRA [10]. Для составов, содержащих алюминий или его гидрид, учитывалась поправка на так называемые двухфазные потери удельного импульса. Эти потери вызываются отставанием конденсированных частиц от несущего их потока газа и температурной неравновесии

нностью между газом и конденсированными частицами [11]. Двухфазные потери учитывались по эмпирическому соотношению [8, 12]

$$I_{sp}^* = I_{sp}(1 - 0.0022[\text{Al}]), \quad (1)$$

где $[\text{Al}]$ — содержание алюминия в составе топлива, %. Из уравнения (1) следует, что величина I_{sp} уменьшается на 0.22 % на каждый 1 % алюминия в составе топлива.

Поскольку плотность топлива оказывает влияние на баллистическую эффективность, причем вклад плотности разный на различных ступенях ракетной системы, то для сравнения использовали величину эффективного удельного импульса [13]:

$$I_{ef(n)} = I_{sp}^* + \frac{\partial I_{ef(n)}}{\partial \rho} \Delta \rho, \quad (2)$$

где n — номер ступени, $\Delta \rho = \rho - \rho_{st(n)}$ — разность плотностей исследуемого и эталонного топлива для n -й ступени. Значения $\frac{\partial I_{ef(n)}}{\partial \rho}$ и $\rho_{st(n)}$ задаются или принимаются средними по опыту проектных проработок.

В настоящей работе сравнение проведено только по величине $I_{ef(3)}$ для третьей ступени, так как составы с высоким импульсом и относительно невысокой плотностью наиболее эффективны именно на верхних ступенях ракет. Значения $\frac{\partial I_{ef(3)}}{\partial \rho} = 25 \text{ с}/(\text{г}/\text{см}^3)$ и $\rho_{st(3)} = 1.70 \text{ г}/\text{см}^3$, обычно рекомендуемые в качестве типовых для крупных МБР [13], ранее были использованы во многих работах, например [8, 12, 14].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Двухкомпонентные составы

Для индивидуального НГ расчетные значения I_{sp} и $I_{ef(3)}$ составляют 237.1 и 242.1 с соответственно. Как было показано в [15], оценивать эффективность окислителя в составе СТРТ по его индивидуальному удельному импульсу некорректно, поскольку в составе топлива всегда должно быть необходимое количество связующего, сильно влияющего на конечные значения удельного импульса.

Зависимости I_{sp} и $I_{ef(3)}$ от содержания связующего в двухкомпонентных составах с НГ или АДНА показаны на рис. 1. С увеличением содержания связующего значения I_{sp} и $I_{ef(3)}$

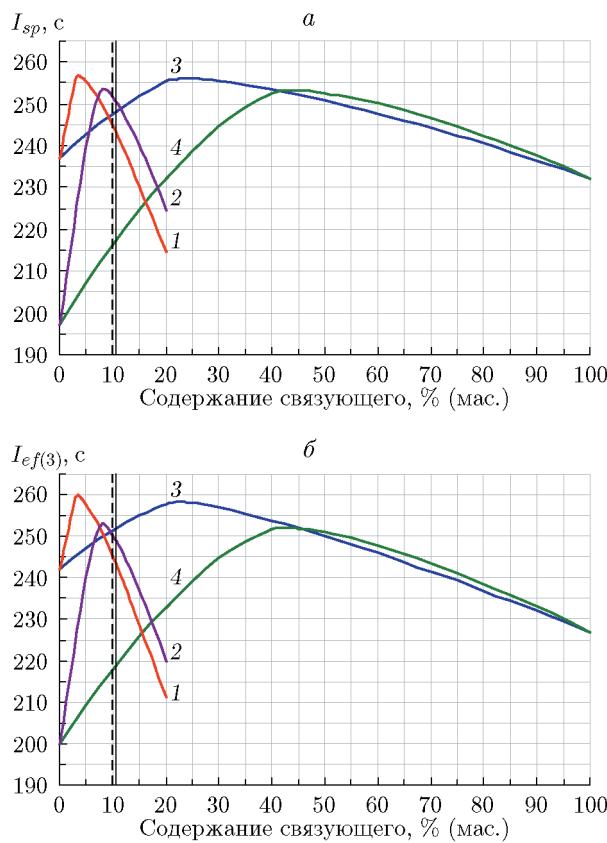


Рис. 1. Зависимости удельного I_{sp} (а) и эффективного $I_{ef(3)}$ (б) импульсов от содержания связующего в составах НГ/УС (1), АДНА/УС (2), НГ/АС (3) и АДНА/АС (4): штриховая вертикальная линия ограничивает область возможного минимального содержания связующего для состава НГ/УС, а сплошная вертикальная линия — для состава АДНА/УС

начинают ожидаемо возрастать и достигают максимума при 3.5 % УС — соответственно 256.7 и 260.0 с. Такой состав имеет небольшой недостаток кислорода для полного окисления всех горючих элементов до высших оксидов ($\text{КБ} = -1.4\%$, $\alpha = 0.967$), т. е. максимум импульса не соответствует максимуму тепловыделения (при $\text{КБ} = 0$, $\alpha = 1$). При дальнейшем увеличении содержания УС расчетные значения I_{sp} и $I_{ef(3)}$ уменьшаются. Относительно невысокий избыток кислорода в НГ в реальности не позволяет создать топливную композицию на основе УС с максимальными значениями $I_{sp} = 256.7$ с и $I_{ef(3)} = 260.0$ с, поскольку при столь низком содержании связующего невозможно добиться необходимых физико-механических свойств состава. Минимальное технологически возможное для создания СТРТ объемное содержание УС составляет 18 \div 20 % [7–9]. Штриховая вертикальная линия на рис. 1 соответствует объемному содержанию УС 19 % (10.1 % (мас.)). При этом $\text{КБ} = -24.2\%$ ($\alpha = 0.614$), а $I_{sp} = 244.6$ с и $I_{ef(3)} = 244.9$ с. Это существенно ниже, чем для состава с максимальным значением импульсов.

АДНА хотя и имеет заметно более высокий кислородный баланс, но и в этом случае не удастся создать оптимизированное по импульсу СТРТ, которое должно содержать лишь 14.7 % (об.) УС (8 % (мас.)). Сплошная вертикальная линия на рис. 1 соответствует объемному содержанию УС 19 % (10.6 % (мас.)). КБ состава с технологически минимально возможным содержанием связующего составляет -12.2% ($\alpha = 0.801$). Расчетные значения $I_{sp} = 250.6$ с и $I_{ef(3)} = 249.0$ с, тогда как максимальные значения для двухкомпонентной смеси — 253.6 и 253.0 с соответственно.

В простейших составах с минимальным технологически необходимым содержанием УС окислитель НГ заметно уступает АДНА, что является следствием его меньшего кислородного баланса.

В случае АС, содержащего в своем составе значительное количество собственного кислорода, при минимальном объемном содержании связующего 19 % (15.5 % (мас.)) состав с НГ уже будет иметь небольшой избыток кислорода ($\text{КБ} = +2.3\%$, $\alpha = 1.059$). Сбалансированному по кислороду составу соответствует содержание связующего 20 % (мас.), а максимум по импульсам ($I_{sp} = 256.0$ с, $I_{ef(3)} = 258.2$ с) наблюдается при его содержании 23 % (мас.) и

КБ = -1.5% ($\alpha = 0.965$).

Для состава с АДНА максимуму по импульсам ($I_{sp} = 253.1$ с, $I_{ef(3)} = 251.9$ с) соответствует содержание АС 44 % (мас.) и КБ = -3.8% ($\alpha = 0.929$), а состав с минимальным технологически возможным содержанием связующего будет иметь значительное избыточное содержание кислорода (содержание АС 16.2 % (мас.), КБ = $+14.9\%$, $\alpha = 1.415$), поэтому в таком составе значения I_{sp} и $I_{ef(3)}$ чрезвычайно малы (226.4 и 227.6 с соответственно).

Таким образом, при использовании АС оптимизированный (по максимальному значению удельных импульсов I_{sp} и $I_{ef(3)}$) состав с НГ существенно превосходит по эффективности подобный состав с АДНА.

Максимальные значения удельных импульсов у составов с АС меньше, чем у составов с УС. Но в отличие от последних, область максимума (см. рис. 1) находится в технологических границах, позволяющих создать реальные составы, которые будут превосходить составы с минимально допустимым содержанием УС.

Все рассмотренные топлива имеют относительно невысокую ($2700 \div 3140$ К) температуру T_c в камере горения (а стало быть, в критическом сечении и на срезе сопла) и, таким образом, не создают проблем с выбором конструкционных материалов ракетного двигателя.

2.2. Трехкомпонентные составы с алюминием

Введение алюминия в составы как с УС, так и с АС позволяет заметно поднять удельный импульс I_{sp} (рис. 2) вплоть до 265 с, но двухфазные потери его понижают и эффективный импульс $I_{ef(3)}$ возрастает только до 261.2 с. Составы на основе НГ превосходят по максимальной величине импульсов составы на основе АДНА. При этом максимумы I_{sp} и $I_{ef(3)}$ имеют место при разных содержаниях Al. В системах с УС максимумы I_{sp} наблюдаются при 20 % алюминия (265.1 с) с окислителем НГ и при 23 % (262.8 с) с окислителем АДНА. В то же время максимумы $I_{ef(3)}$ достигаются при меньшем содержании алюминия — при 17 % (257.1 с) в составах с НГ и 12 % (253.6 с) в составах с АДНА.

Аналогичная ситуация наблюдается и при использовании АС. Максимум I_{sp} соответствует содержанию алюминия 19 % (264.0 с) для

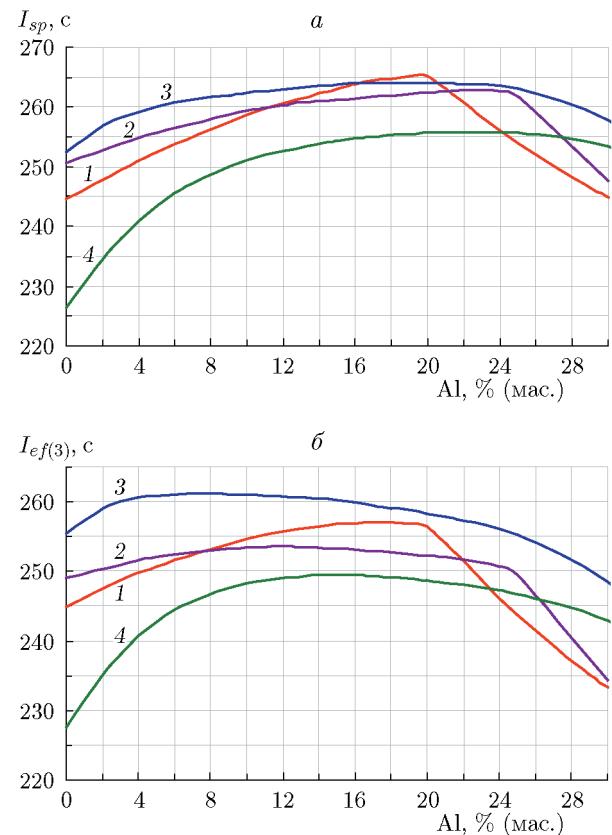


Рис. 2. Зависимости удельного I_{sp} (а) и эффективного $I_{ef(3)}$ (б) импульсов от содержания алюминия в составах НГ/УС/Al (1), АДНА/УС/Al (2), НГ/АС/Al (3) и АДНА/АС/Al (4) при постоянном содержании связующего 19 % (об.)

окислителя НГ и 23 % (255.8 с) для АДНА. В то же время максимум $I_{ef(3)}$ наблюдается при содержании алюминия 8 % (261.2 с) для окислителя НГ и 15 % (249.5 с) для АДНА. В последнем случае трехкомпонентная система даже уступает по эффективности простейшей двухкомпонентной системе 56 % АДНА / 44 % АС (251.9 с). Как уже отмечалось в работах [7, 9], топливу с алюминием на основе АДНА не требуется дополнительный кислород из АС, простейшие УС позволяют создать более эффективные топлива за счет более высокого содержания в них водорода. В случае НГ это не так, использование АС позволяет добиться в системах с алюминием повышения значения $I_{ef(3)}$ на ≈ 4 с по сравнению использованием УС. Это объясняется меньшим кислородным балансом НГ и большим содержанием водорода в самом окислителе.

Кислородный баланс в составах с НГ с максимальными удельными импульсами изменяется от -41.4% ($\alpha = 0.415$) для состава с УС и до -5.4% ($\alpha = 0.878$) для состава с АС. В случае состава с АДНА, имеющего повышенный кислородный баланс, аналогичные изменения составляют от -35.1% ($\alpha = 0.498$) для состава с УС до -1.8% ($\alpha = 0.960$) для состава с АС. Чем ниже значение КБ состава, тем больше в его газообразных продуктах сгорания содержится CO и H₂. Активное связующее существенно улучшает обеспеченность составов кислородом. Это сказывается на составе продуктов сгорания в виде образования значительных количеств CO₂ и H₂O, при этом уменьшается относительное газообразование (в силу увеличения средней молярной массы продуктов сгорания), но, с другой стороны, возрастает тепловой эффект реакции сгорания.

Введение алюминия в топливный состав значительно повышает температуру продуктов сгорания, и с этим фактором уже приходится считаться при рассмотрении тех или иных рецептур СТРТ. Эта температура не должна превышать ≈ 3700 К из-за отсутствия материалов, способных ее выдержать, тем более при внутреннем давлении 4 МПа или выше [14]. Температура продуктов сгорания составов НГ/УС/Al порядка 3300 К. В составах АДНА/УС/Al при переходе от состава с максимумом I_{sp} к составу с максимумом $I_{ef(3)}$ и с почти вдвое меньшим содержанием алюминия, эта температура понижается с 3624 до 3390 К. Применение АС повышает температуру продуктов сгорания составов с обоими окислителями: для составов НГ/АС/Al — до 3783 К (максимум I_{sp}) и 3411 К (максимум $I_{ef(3)}$), для составов АДНА/АС/Al повышение еще больше — соответственно 3981 и 3679 К.

Таким образом, составы с алюминием на основе НГ имеют большие значения как удельного, так и эффективного импульса, но меньшую температуру продуктов сгорания, чем составы на основе АДНА.

2.3. Трехкомпонентные составы с гидридом алюминия

Использование вместо алюминия его гидрида позволяет добиться еще больших значений удельного импульса для топлив с АДНА [9]. Топлива на основе АДНА при использовании в них УС превосходят составы на осно-

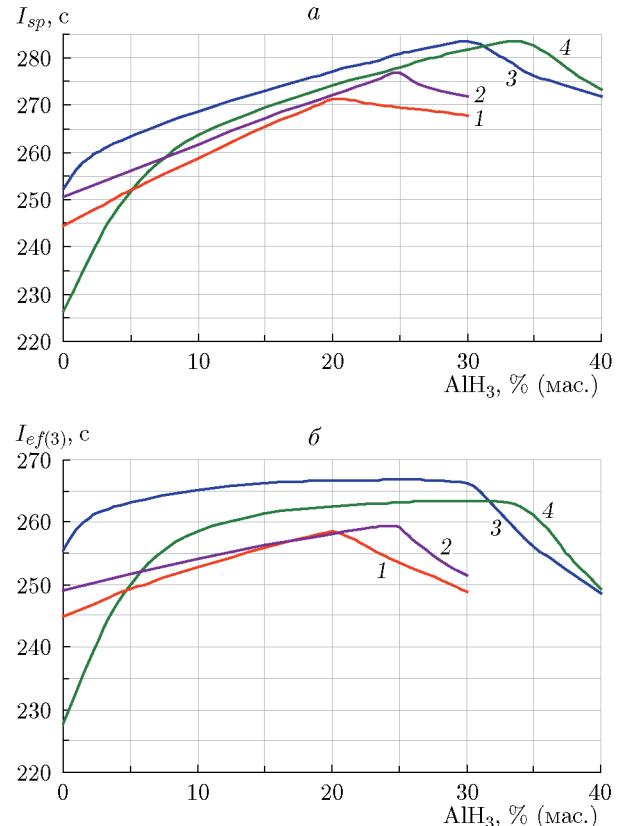


Рис. 3. Зависимости удельного I_{sp} (а) и эффективного $I_{ef(3)}$ (б) импульсов от содержания гидрида алюминия в составах НГ/УС/AlH₃ (1), АДНА/УС/AlH₃ (2), НГ/АС/AlH₃ (3), АДНА/АС/AlH₃ (4) при постоянном содержании связующего 19 % (об.)

ве НГ более чем на 5 с по I_{sp} и незначительно, менее 1 с, по $I_{ef(3)}$ (рис. 3). В этом случае в полной мере проявляется повышенный кислородный баланс АДНА, позволяющий компенсировать как разницу в энталпиях образования, так и несколько более высокое содержание водорода в НГ (последнее нивелируется его значительным содержанием как в гидриде, так и в горючем-связующем). Для системы НГ/УС/AlH₃ максимумы как по I_{sp} , так и по $I_{ef(3)}$ наблюдаются при одном и том же составе с 20 % гидрида. Различие по содержанию гидрида в оптимизированных составах АДНА/УС/AlH₃ с максимумами по I_{sp} и $I_{ef(3)}$ составляет лишь 1 %. Оптимальный состав НГ/УС/AlH₃ превосходит по I_{sp} оптимизированные составы НГ/УС/Al и НГ/АС/Al, но уступает составам НГ/АС/Al по величине $I_{ef(3)}$. Таким образом, при использовании УС

в составах на основе НГ (в отличие от АДНА) нет смысла переходить с алюминия на его гидрид.

Как отмечалось ранее [9], в составах на основе АДНА и AlH_3 лучше использовать не простейшее углеводородное, а содержащее дополнительный кислород активное связующее, что позволяет дополнительно увеличить как I_{sp} , так и $I_{ef(3)}$.

Составы НГ/АС/ AlH_3 сравнимы по величине I_{sp} (283.6 с) с составами АДНА/АС/ AlH_3 и превосходят их по величине $I_{ef(3)}$ (см. рис. 3). Максимальное значение $I_{ef(3)}$ составляет 266.9 с для состава с НГ и 263.5 с для состава с АДНА.

Диапазон изменения содержания кислорода в оптимальных топливах с гидридом алюминия заметно ниже по сравнению с алюминийсодержащими топливами, как ниже и сами значения КБ. В составах с НГ с максимальными значениями импульсов кислородный баланс изменяется от -59.7% ($\alpha = 0.326$) для состава с УС и до -43.1% ($\alpha = 0.433$) для состава с АС. Для составов с АДНА аналогичные изменения составляют от -60.0% ($\alpha = 0.355$) для состава с УС до -43.1% ($\alpha = 0.455$) для состава с АС. При низких значениях КБ состав газообразных продуктов сгорания состоит в основном из CO , H_2 и N_2 , но кислорода все же еще достаточно, чтобы не было образования конденсированного углерода.

Температура продуктов сгорания составов с гидридом алюминия, как обычно (это является прямым следствием повышенного содержания водорода в составе СТРТ), ниже, чем у составов с металлическим алюминием, и проблем с превышением допустимого предела в 3 700 К [14] не возникает. При этом температура продуктов сгорания составов на основе НГ более чем на 100 К ниже, чем составов с АДНА. Анализ термодинамических параметров позволяет обнаружить причину этого — более высокое газообразование у составов на основе НГ и одновременно меньшее тепловыделение. Несмотря на заметно большее значение ΔH_f^0 у НГ, оптимизированные составы на его основе содержат меньше гидрида алюминия (следствие меньшего КБ), и поэтому теплота сгорания составов на основе АДНА получается выше.

Следует более подробно остановиться еще на одном моменте. Выше при анализе составов с гидридом алюминия мы рассматривали, как и для составов с алюминием, одинаковое объем-

ное содержание связующего — 19 %. Это было сделано с целью определить, как влияет замена одного энергетического компонента на другой в сходных условиях сравнения. В действительности, при сохранении той же технологии смешения компонентов СТРТ большая удельная поверхность высокодисперсных частиц гидрида алюминия требует существенно большего объемного количества связующего [9].

Для АДНА одна из таких композиций, содержащая 25 % AlH_3 и 25 % (мас.) АС, уже рассматривалась ранее в [9]. Объемное содержание связующего в ней составляет 27.3 %. Исходя из такого же постоянного объемного содержания АС, были вычислены параметры составов с различным содержанием AlH_3 (рис. 4).

Что же касается УС, то очевидно, что рассматривать составы с повышенным его содержанием нет смысла. Если даже при минимальном содержании связующего состав

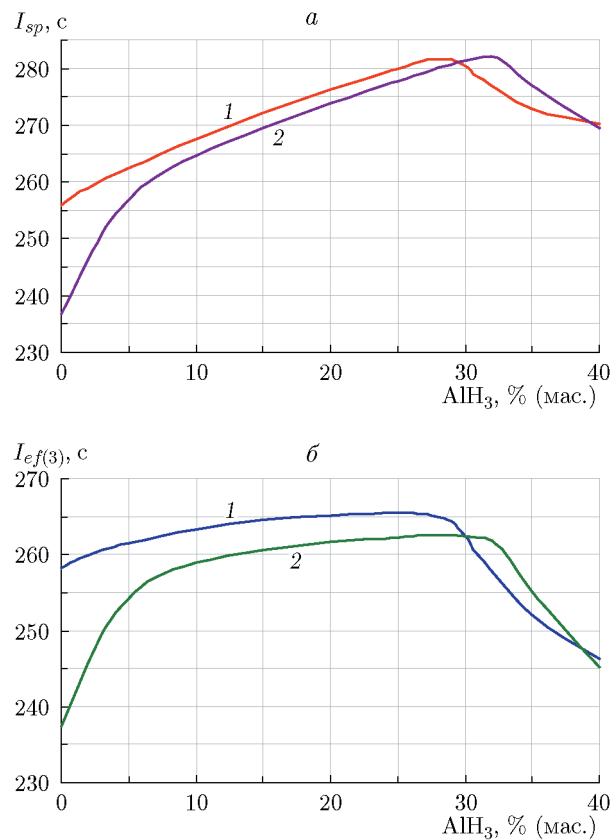


Рис. 4. Зависимости удельного I_{sp} (а) и эффективного $I_{ef(3)}$ (б) импульсов от содержания гидрида алюминия в составах НГ/АС/ AlH_3 (1) и АДНА/АС/ AlH_3 (2) при постоянном содержании связующего 27.3 % (об.)

Таблица 2
Некоторые характеристики СТРТ с максимальными параметрами баллистической эффективности

| Компонентный состав СТРТ, % | α | ρ , г/см ³ | I_{sp} , с | I_{sp}^* , с | $I_{ef(3)}$, с | T_c , К | n_g , моль/кг | μ_g , г/моль |
|-------------------------------------|----------|----------------------------|--------------|----------------|-----------------|-----------|-----------------|------------------|
| НГ96.5/УС3.5* | 0.967 | 1.83 | 256.7 | 256.7 | 260.0 | 3 042 | 42.20 | 23.70 |
| АДНА92/УС8* | 0.953 | 1.68 | 253.6 | 253.6 | 253.0 | 3 053 | 40.24 | 24.85 |
| НГ89.9/УС 10.1 | 0.614 | 1.71 | 244.6 | 244.6 | 244.9 | 2 700 | 48.35 | 20.68 |
| АДНА89.4/УС10.6 | 0.801 | 1.64 | 250.6 | 250.6 | 249.0 | 3 004 | 42.83 | 23.35 |
| НГ77/АС23 | 0.965 | 1.79 | 256.0 | 256.0 | 258.2 | 3 086 | 40.54 | 24.67 |
| АДНА56/АС44 | 0.929 | 1.65 | 253.1 | 253.1 | 251.9 | 3 140 | 38.25 | 26.14 |
| НГ70.5/УС9.5/А120 | 0.415 | 1.82 | 265.1 | 253.4 | 256.4 | 3 334 | 40.09 | 15.52 |
| НГ73.4/УС9.6/А117 | 0.441 | 1.80 | 264.4 | 254.5 | 257.1 | 3 307 | 41.29 | 16.44 |
| АДНА67.2/УС9.8/А123 | 0.498 | 1.77 | 262.8 | 249.5 | 251.3 | 3 624 | 34.85 | 16.23 |
| АДНА77.9/УС10.1/А112 | 0.632 | 1.71 | 260.3 | 253.4 | 253.6 | 3 390 | 38.51 | 20.08 |
| НГ66.3/АС14.7/А119 | 0.681 | 1.93 | 264.0 | 253.0 | 258.8 | 3 783 | 33.07 | 19.39 |
| НГ76.8/АС15.2/А18 | 0.878 | 1.87 | 261.6 | 257.0 | 261.2 | 3 411 | 37.01 | 22.94 |
| АДНА62/АС15/А123 | 0.785 | 1.89 | 255.8 | 242.9 | 247.7 | 3 981 | 28.55 | 19.84 |
| АДНА69.6/АС15.4/А115 | 0.960 | 1.84 | 254.4 | 246.0 | 249.5 | 3 679 | 30.89 | 23.20 |
| НГ69.3/УС10.7/А1Н ₃ 20 | 0.326 | 1.62 | 271.3 | 260.6 | 258.5 | 2 901 | 51.11 | 12.92 |
| АДНА63.8/УС11.2/А1Н ₃ 25 | 0.355 | 1.55 | 276.7 | 263.0 | 259.2 | 3 087 | 47.88 | 12.01 |
| АДНА64.9/УС11.1/А1Н ₃ 24 | 0.368 | 1.55 | 276.2 | 263.1 | 259.4 | 3 127 | 47.30 | 12.44 |
| НГ53.1/АС16.9/А1Н ₃ 30 | 0.377 | 1.68 | 283.6 | 266.8 | 266.2 | 3 413 | 43.62 | 11.24 |
| НГ57.3/АС16.7/А1Н ₃ 26 | 0.426 | 1.70 | 281.5 | 267.0 | 266.9 | 3 467 | 43.15 | 12.94 |
| АДНА48.6/АС17.4/А1Н ₃ 34 | 0.404 | 1.62 | 283.6 | 264.5 | 262.6 | 3 523 | 41.04 | 10.31 |
| АДНА51.7/АС17.3/А1Н ₃ 31 | 0.445 | 1.63 | 282.5 | 265.2 | 263.5 | 3 589 | 40.44 | 11.71 |
| НГ46.3/АС24.7/А1Н ₃ 29 | 0.373 | 1.65 | 281.7 | 265.5 | 264.3 | 3 357 | 44.06 | 11.53 |
| НГ51.7/АС24.3/А1Н ₃ 24 | 0.433 | 1.67 | 279.3 | 266.1 | 265.4 | 3 426 | 43.43 | 13.64 |
| АДНА42.7/АС25.3/А1Н ₃ 32 | 0.401 | 1.61 | 282.0 | 264.2 | 261.8 | 3 474 | 41.62 | 10.97 |
| АДНА46.9/АС25.1/А1Н ₃ 28 | 0.455 | 1.62 | 280.1 | 264.6 | 262.5 | 3 552 | 40.84 | 12.84 |

П р и м е ч а н и я. *Составы с недостаточным содержанием связующего для создания СТРТ; α — кислородный коэффициент; ρ — плотность состава; I_{sp} — удельный импульс; I_{sp}^* — удельный импульс с учетом двухфазных потерь; $I_{ef(3)}$ — эффективный импульс для третьей ступени ракеты; n_g — газообразование на выходе из сопла; μ_g — средняя молекулярная масса продуктов горения на выходе из сопла. Жирным шрифтом выделены максимальные значения I_{sp} и $I_{ef(3)}$.

НГ/УС/А1Н₃ уступает по $I_{ef(3)}$ оптимальному составу НГ/АС/А1, то еще большее содержание УС лишь увеличит эту разницу.

При повышенном содержании АС общий характер зависимостей I_{sp} и $I_{ef(3)}$ от содержания А1Н₃ сохраняется (ср. рис. 3 и 4), а значения максимумов I_{sp} и $I_{ef(3)}$ смещаются

в область с меньшим на 1 ÷ 3 % содержанием гидрида. Для оптимальной композиции НГ/АС/А1Н₃ значение $I_{ef(3)}$ уменьшается на 1.5 с, а для композиции АДНА/АС/А1Н₃ — на 1 с. Тем не менее состав 51.7 % НГ / 24.3 % АС / 24 % А1Н₃ дает значение $I_{ef(3)} = 265.4$ с, что выше на 2.9 с, чем у оптимального состава на основе АДНА.

Характеристики рассмотренных выше СТРТ с максимальными параметрами баллистической эффективности сведены в табл. 2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В двухкомпонентном СТРТ с углеводородным связующим НГ уступает АДНА по эффективности, но превосходит последний при использовании активного связующего. Максимальное значение $I_{ef(3)}$ для не содержащего металлов состава равно 258.2 с.

2. В составах СТРТ с углеводородным связующим и алюминием использование НГ более эффективно, чем АДНА, удельный импульс $I_{ef(3)}$ выше на 3.5 с. Но в системах с углеводородным связующим и гидридом алюминия более эффективными становятся составы с АДНА: $I_{ef(3)}$ больше на 0.9 с. Для состава с гидридом алюминия $I_{ef(3)} = 259.4$ с.

3. Составы на основе НГ превосходят по эффективному импульсу составы на основе АДНА в системах с активным связующим и алюминием (на 11.7 с) или гидридом алюминия (на 2.9 с). Максимальное значение $I_{ef(3)}$ наблюдается для состава с гидридом алюминия (265.4 с).

Полученные расчетные значения баллистической эффективности НГ позволяют рассматривать его как перспективный окислитель СТРТ.

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 АААА-А19-119101690058-9).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Лемперт Д. Б. Состояние энергетики смесевых твердых ракетных топлив, пути повышения энергетики и связанные с этим проблемы // Динамика систем, механизмов и машин. — 2012. — № 2. — С. 155–158.
- Мазинг Г. Ю. Ракета и орудие. — М.: ДОСА-АФ, 1987.
- 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.
- Котасонов Ю. И. Взрывчатые вещества и взрывчатые превращения: учеб. пособие. — М.: ИНФРА-М, 2021.
- 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.
- 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.
- 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.
- Нечипоренко Г. Н., Лемперт Д. Б. Исследование энергетических возможностей ракетных топлив, содержащих бериллий и его гидрид // Хим. физика. — 1998. — Т. 17, № 10. — С. 93–106.
- Лемперт Д. Б., Согласнова С. И., Нечипоренко Г. Н. Энергетика смесевых твердых ракетных топлив, содержащих гидрид алюминия // Хим. физика. — 1999. — Т. 18, № 9. — С. 88–96.
- Трусов Б. Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и термических химических равновесий // Тез. докл. XIV Междунар. конф. по химической термодинамике. — СПб.: НИИХ СПбГУ, 2002. — С. 483–484.
- Ерохин Б. Т. Теория и проектирование ракетных двигателей. — СПб.: Лань, 2015.
- Казаков А. И., Дацко Д. В., Набатова А. В., Степанов А. И., Лемперт Д. Б. Термохимические и энергетические характеристики DNTF и DNFF // Физика горения и взрыва. — 2018. — Т. 54, № 2. — С. 27–38. — DOI: 10.15372/FGV20180203. — EDN: YWJNET.
- Павловец Г. Я., Цуцурян В. И. Физикохимические свойства порохов и ракетных топлив. — М.: Изд-во Министерства обороны РФ, 2009.
- Лемперт Д. Б., Дорофеенко Е. М., Согласнова С. И. Энергетический потенциал некоторых компонентов на базе высокоэнтальпийных N-оксидов в качестве окислителей ракетных топлив // Омск. науч. вестн. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. — 2018. — Т. 2, № 3. — С. 58–62. — DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-3-58-62.

15. **Lempert D. B.** Dependence of specific impulse of metal-free formulations on CHNO-oxidizer's element content and enthalpy of formation // Chin. J. Explos. Propell. — 2015. — V. 38, N 4. — P. 1–4. — DOI: 10.14077/j. issn. 1007-7812.2015.04.001.

Поступила в редакцию 20.01.2023.

После доработки 28.02.2023.

Принята к публикации 05.04.2023.