

УДК 621.454.3: 546.171.52

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

А. М. Астахов<sup>1</sup>, Д. Б. Лемперт<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Федеральный 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 1 000 ÷ 2 000 км вызывает изменение дальности на 2 %, т. е. на 20 ÷ 50 км, что несущественно, то для МБР с дальностью полета 10 000 ÷ 12 000 км соответствующее изменение дальности составляет

4 ÷ 4.5 %, т. е. 400 ÷ 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  $\alpha$ , 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, %	$\alpha$	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$\Delta H_f^0$ , 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	$\text{AlH}_3$	-160.0	0	1.48	-380.5

Примечания. КБ — кислородный баланс,  $\alpha$  — 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 энтальпии образования  $\Delta H_f^0$  (-259.6 кДж/кг [3] против -1084.6 кДж/кг [5]) и плотности  $\rho_0$  (1.90 г/см<sup>3</sup> [3] против 1.81 г/см<sup>3</sup> [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 неравновес-

ностью 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  $I_{ef(3)}$

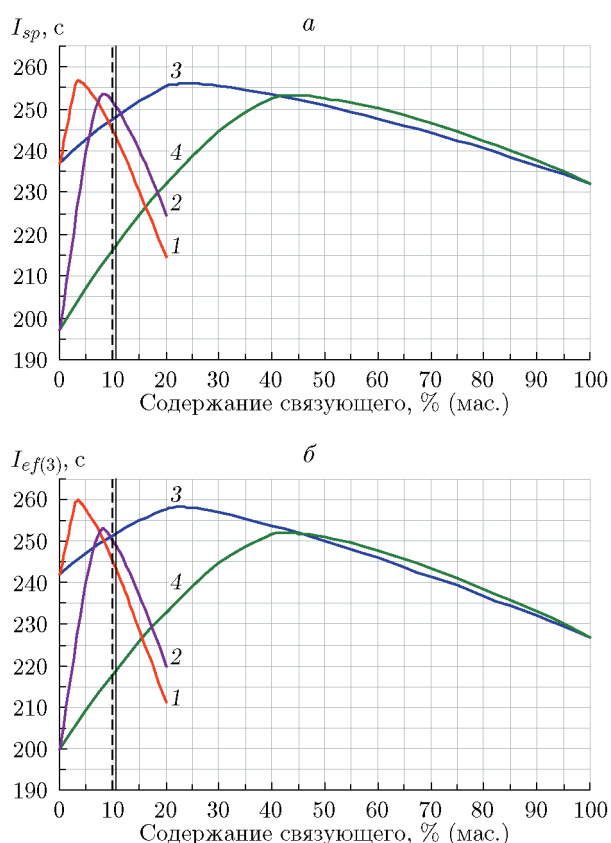


Рис. 1. Зависимости удельного  $I_{sp}$  (а) и эффективного  $I_{ef(3)}$  (б) импульсов от содержания связующего в составах НГ/УС (1), АДНА/УС (2), НГ/АС (3) и АДНА/АС (4): штриховая вертикальная линия ограничивает область возможного минимального содержания связующего для состава НГ/УС, а сплошная вертикальная 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 (КБ = -1.4 %,  $\alpha = 0.967$ ), т. е. максимум импульса не соответствует максимуму тепловыделения (при 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 ÷ 20 % [7–9]. Штриховая вертикальная линия на рис. 1 соответствует объемному содержанию УС 19 % (10.1 % (мас.)). При этом 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 (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 сгорания (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

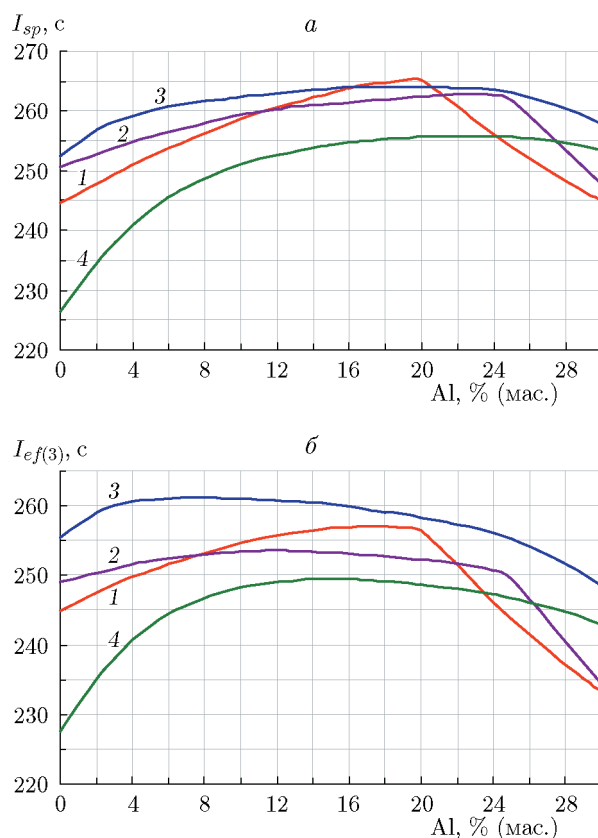


Рис. 2. Зависимости удельного  $I_{sp}$  (а) и эффективного  $I_{ef(3)}$  (б) импульсов от содержания алюминия в составах НГ/УС/Al (1), АДНА/УС/Al (2), НГ/АС/Al (3) и АДНА/АС/Al (4) при постоянном содержании связующего  $19\%$  (об.)

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  $\approx 4$  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 СО и  $\text{H}_2$ . Активное связующее существенно улучшает обеспеченность составов кислородом. Это сказывается на составе продуктов сгорания в виде образования значительных количеств  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , 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  $\approx 3700\text{ К}$  из-за отсутствия материалов, способных ее выдержать, тем более при внутреннем давлении 4 МПа или выше [14]. Температура продуктов сгорания составов НГ/УС/Ал порядка 3300 К. В составах АДНА/УС/Ал 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/Ал — до 3783 К (максимум  $I_{sp}$ ) и 3411 К (максимум  $I_{ef(3)}$ ), для составов АДНА/АС/Ал 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 гидроксида 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-

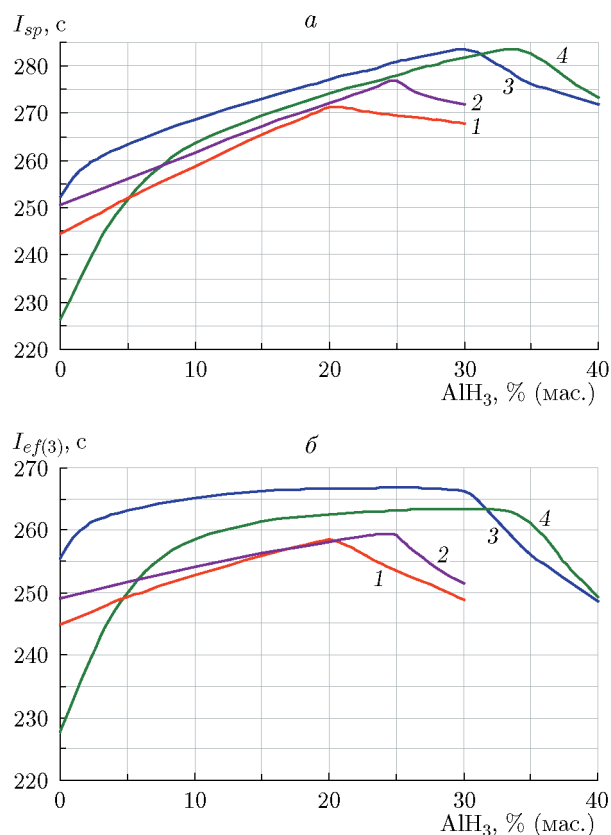


Рис. 3. Зависимости удельного  $I_{sp}$  (а) и эффективного  $I_{ef(3)}$  (б) импульсов от содержания гидроксида алюминия в составах НГ/УС/ $\text{AlH}_3$  (1), АДНА/УС/ $\text{AlH}_3$  (2), НГ/АС/ $\text{AlH}_3$  (3), АДНА/АС/ $\text{AlH}_3$  (4) при постоянном содержании связующего 19% (об.)

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 энтальпиях 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/ $\text{AlH}_3$  максимумы как по  $I_{sp}$ , так и по  $I_{ef(3)}$  наблюдаются при одном и том же составе с 20% гидроксида. Различие по содержанию гидроксида в оптимизированных составах АДНА/УС/ $\text{AlH}_3$  с максимумами по  $I_{sp}$  и  $I_{ef(3)}$  составляет лишь 1%. Оптимальный состав НГ/УС/ $\text{AlH}_3$  превосходит по  $I_{sp}$  оптимизированные составы НГ/УС/Ал и НГ/АС/Ал, но уступает составам НГ/АС/Ал 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  $\text{AlH}_3$  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/ $\text{AlH}_3$  сравнимы по величине  $I_{sp}$  (283.6 с) с составами АДНА/АС/ $\text{AlH}_3$  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  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{N}_2$ , 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 3700 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 заметное большее значение  $\Delta H_f^0$  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%  $\text{AlH}_3$  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  $\text{AlH}_3$  (рис. 4).

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

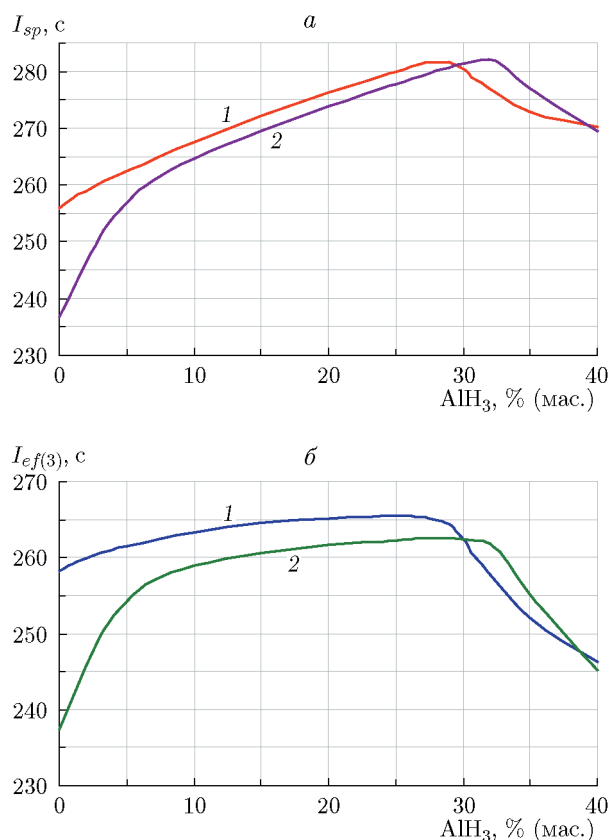


Рис. 4. Зависимости удельного  $I_{sp}$  (а) и эффективного  $I_{ef(3)}$  (б) импульсов от содержания гидрида алюминия в составах НГ/АС/ $\text{AlH}_3$  (1) и АДНА/АС/ $\text{AlH}_3$  (2) при постоянном содержании связующего 27.3% (об.)

Таблица 2

Некоторые характеристики СТРТ с максимальными параметрами баллистической эффективности

Компонентный состав СТРТ, %	$\alpha$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$I_{sp}$ , с	$I_{sp}^*$ , с	$I_{ef(3)}$ , с	$T_c$ , К	$n_g$ , моль/кг	$\mu_g$ , г/моль
НГ96.5/УС3.5*	0.967	1.83	<b>256.7</b>	256.7	<b>260.0</b>	3042	42.20	23.70
АДНА92/УС8*	0.953	1.68	<b>253.6</b>	253.6	<b>253.0</b>	3053	40.24	24.85
НГ89.9/УС 10.1	0.614	1.71	<b>244.6</b>	244.6	<b>244.9</b>	2700	48.35	20.68
АДНА89.4/УС10.6	0.801	1.64	<b>250.6</b>	250.6	<b>249.0</b>	3004	42.83	23.35
НГ77/АС23	0.965	1.79	<b>256.0</b>	256.0	<b>258.2</b>	3086	40.54	24.67
АДНА56/АС44	0.929	1.65	<b>253.1</b>	253.1	<b>251.9</b>	3140	38.25	26.14
НГ70.5/УС9.5/Al20	0.415	1.82	<b>265.1</b>	253.4	256.4	3334	40.09	15.52
НГ73.4/УС9.6/Al17	0.441	1.80	264.4	254.5	<b>257.1</b>	3307	41.29	16.44
АДНА67.2/УС9.8/Al23	0.498	1.77	<b>262.8</b>	249.5	251.3	3624	34.85	16.23
АДНА77.9/УС10.1/Al12	0.632	1.71	260.3	253.4	<b>253.6</b>	3390	38.51	20.08
НГ66.3/АС14.7/Al19	0.681	1.93	<b>264.0</b>	253.0	258.8	3783	33.07	19.39
НГ76.8/АС15.2/Al8	0.878	1.87	261.6	257.0	<b>261.2</b>	3411	37.01	22.94
АДНА62/АС15/Al23	0.785	1.89	<b>255.8</b>	242.9	247.7	3981	28.55	19.84
АДНА69.6/АС15.4/Al15	0.960	1.84	254.4	246.0	<b>249.5</b>	3679	30.89	23.20
НГ69.3/УС10.7/AlH <sub>3</sub> 20	0.326	1.62	<b>271.3</b>	260.6	<b>258.5</b>	2901	51.11	12.92
АДНА63.8/УС11.2/AlH <sub>3</sub> 25	0.355	1.55	<b>276.7</b>	263.0	259.2	3087	47.88	12.01
АДНА64.9/УС11.1/AlH <sub>3</sub> 24	0.368	1.55	276.2	263.1	<b>259.4</b>	3127	47.30	12.44
НГ53.1/АС16.9/AlH <sub>3</sub> 30	0.377	1.68	<b>283.6</b>	266.8	266.2	3413	43.62	11.24
НГ57.3/АС16.7/AlH <sub>3</sub> 26	0.426	1.70	281.5	267.0	<b>266.9</b>	3467	43.15	12.94
АДНА48.6/АС17.4/AlH <sub>3</sub> 34	0.404	1.62	<b>283.6</b>	264.5	262.6	3523	41.04	10.31
АДНА51.7/АС17.3/AlH <sub>3</sub> 31	0.445	1.63	282.5	265.2	<b>263.5</b>	3589	40.44	11.71
НГ46.3/АС24.7/AlH <sub>3</sub> 29	0.373	1.65	<b>281.7</b>	265.5	264.3	3357	44.06	11.53
НГ51.7/АС24.3/AlH <sub>3</sub> 24	0.433	1.67	279.3	266.1	<b>265.4</b>	3426	43.43	13.64
АДНА42.7/АС25.3/AlH <sub>3</sub> 32	0.401	1.61	<b>282.0</b>	264.2	261.8	3474	41.62	10.97
АДНА46.9/АС25.1/AlH <sub>3</sub> 28	0.455	1.62	280.1	264.6	<b>262.5</b>	3552	40.84	12.84

Примечания. \*Составы с недостаточным содержанием связующего для создания СТРТ;  $\alpha$  — кислородный коэффициент;  $\rho$  — 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;  $\mu_g$  — средняя молекулярная масса продуктов сгорания на выходе из сопла. Жирным шрифтом выделены максимальные значения  $I_{sp}$  и  $I_{ef(3)}$ .

НГ/УС/AlH<sub>3</sub> уступает по  $I_{ef(3)}$  оптимальному составу НГ/АС/Al, то еще большее содержание УС лишь увеличит эту разницу.

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

в область с меньшим на 1 ÷ 3 % содержанием гидроксида. Для оптимальной композиции НГ/АС/AlH<sub>3</sub> значение  $I_{ef(3)}$  уменьшается на 1.5 с, а для композиции АДНА/АС/AlH<sub>3</sub> — на 1 с. Тем не менее состав 51.7 % НГ / 24.3 % АС / 24 % AlH<sub>3</sub> 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

1. 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.
2. Мазинг Г. Ю. Ракета и орудие. — М.: ДОСА-АФ, 1987.
3. 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.
4. Котасонов Ю. И. Взрывчатые вещества и взрывчатые превращения: учеб. пособие. — М.: ИНФРА-М, 2021.
5. Конькова Т. С., Матюшин Ю. Н., Мирошниченко Е. А., Воробьев А. Б. Термохимические свойства солей динитратовой кислоты // Изв. АН. Сер. хим. — 2009. — № 10. — С. 1958–1965.
6. 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.
7. Lempert D. B., Nechiporenko G. N., Manelis G. V. Energetic characteristics of solid composite propellants and ways for energy increasing // Centr. Eur. J. Energ. Mater. — 2006. — V. 3, N 4. — P. 73–87.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Ерохин Б. Т. Теория и проектирование ракетных двигателей. — СПб.: Лань, 2015.
12. Казаков А. И., Дашко 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.
13. Павловец Г. Я., Цуцуран В. И. Физико-химические свойства порохов и ракетных топлив. — М.: Изд-во Министерства обороны РФ, 2009.
14. 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.*

---