

УДК 621.453/457

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ ТЕТРИЛОВЫХ ДЕТОНАЦИОННЫХ НАНОАЛМАЗОВ НА ГОРЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ПАСТООБРАЗНЫХ РАКЕТНЫХ ТОПЛИВ

С. Ю. Нарыжный, А. С. Козлов, В. Ю. Долматов, В. В. Фоменко,
Г. В. Семашкин, В. А. Марчуков, С. В. Десятов

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», 192076 Санкт-Петербург
diamondcentre@mail.ru

Детонационные наноалмазы (ДНА) являются уникальным материалом, сочетающим в себе свойства достаточно пассивного алмазного ядра с активной углеродной оболочкой. Исследовалось воздействие на скорость горения пастообразного ракетного топлива дезагрегированных ДНА (Т-ДНА) и детонационного углерода (алмазной шихты (Т-АШ)), полученных взрывом тетрила (2,4,6-тринитро-N-метил-N-нитроанилин) и предварительно осажденных на гранулы перхлората аммония в процессе его кристаллизации. Т-ДНА предварительно выдерживали при 430 °С в течение 2 ч. В работе использовался метод химического высаживания (принудительной кристаллизации) перхлората аммония из насыщенного водного раствора, содержащего также Т-ДНА или Т-АШ, изопропанолом в соотношении 1 : 2. Определены зависимости скорости горения составов от давления в диапазоне до 1 200 атм. Показано, что использование детонационных алмазов и алмазной шихты приводит к увеличению скорости горения топлива на ≈ 26 и ≈ 15 % соответственно, при этом температура продуктов сгорания падает на ≈ 240 °С при 100 атм.

Ключевые слова: ракетное топливо, смесевое ракетное топливо, пастообразное ракетное топливо, детонационные наноалмазы, модификация окислителя, тетрил, скорость горения, удельный импульс.

DOI 10.15372/FGV20210606

ВВЕДЕНИЕ

Кристалл алмаза, в том числе детонационного наноалмаза (ДНА), является примером наиболее плотной упаковки углерода — его плотность ≈ 3.5 г/см³. В работах [1–3] расчетным и экспериментальным способами была показана возможность применения классических тротил-гексогеновых ДНА для увеличения скорости горения модельных ракетных топлив. Введение ДНА в состав твердых ракетных топлив (ТРТ) дает ощутимый прирост скорости горения композиции [1–3], но эффект от их применения зависит от компонентной базы состава и рабочего давления в камере сгорания. Отличительной особенностью составов с ДНА является высокая скорость горения (экспериментально подтверждено в данной работе) при низкой температуре продуктов сгорания смесевое ракетное топливо (подтверждено расчетами, см. далее табл. 3).

В работе [1] представлены только расчетные характеристики горения ТРТ с добавкой ДНА 3 ÷ 12 % (мас.) (термодинамический удельный импульс топлива $J_s = 230 \div 250$ (кгс·с)/кг и $J_v = 450 \div 470$ (кгс·с)/дм³). В работе [2] небольшой раздел посвящен влиянию ДНА на скорость горения ТРТ, а основное внимание было направлено на определение чувствительности к удару, трению и параметров термораспада бинарной смеси перхлората аммония (ПХА) с ДНА до 2 % последнего. В работе [3] исследовалось влияние ДНА на скорость горения бинарной смеси ПХА—ДНА с массовым содержанием ДНА до 6 %. Горение ТРТ полного состава в вышеупомянутой работе не исследовалось, поэтому данная задача является актуальной. Кроме того, утверждение о сокристаллизации ПХА с ДНА вряд ли корректно, так как наноалмазы не растворяются ни в каких растворителях. Кристаллиты ДНА, имеющие первичные размеры в пределах 4 ÷ 6 нм, образуют неразрушаемые агрегаты за счет разнозарядности своих граней [4]. Такие агрегаты не разрушаются в условиях распыли-

тельной сушки, т. е. «сокристаллизация» ПХА с ДНА невозможна.

Для получения реального эффекта от использования ДНА необходимо первоначально решить вопрос об их частичной дезагрегации и только после этого вносить их в раствор ПХА. Учитывая, что для дезагрегации ДНА необходимо ввести много энергии, их одновременное диспергирование и смешение с раствором ПХА потенциально опасно.

Работы [1–7] в основном посвящены исследованию свойств собственно ДНА и его предшественника — алмазной шихты (АШ). За 35 лет интенсивного изучения в мире все те свойства наноалмазов, которые представлены в работах [1–7], были хорошо изучены и описаны [8–12].

Цель данной работы заключается в исследовании воздействия на горение модельного состава пастообразного ракетного топлива дезагрегированных ДНА и АШ в нативном состоянии, полученных при детонации тетрила (далее Т-ДНА и Т-АШ) [13–15] и осажденных на гранулы ПХА в процессе кристаллизации.

ЭКСПЕРИМЕНТ

ДНА и АШ получали при взрыве заряда тетрила (N-метил-2,4,6-тринитрофенилнитрамин) в водной оболочке во взрывной камере «Альфа-2М» емкостью 2.14 м³. Очистку Т-ДНА осуществляли раствором 10 % HNO₃ с 10 % NH₄NO₃ при температуре 230 °С и давлении порядка 100 атм. Отмытые наноалмазы сушили при температуре 105 °С.

Дезагрегацию Т-ДНА проводили термической обработкой при 430 °С в течение 2 ч при контакте с воздухом. Выход частично дезагрегированного Т-ДНА составляет 75 ÷ 80 % от массы исходной загрузки (20 ÷ 25 % газифицируется). Размеры агрегатов ДНА до обработки и после нее определяли с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver P47 Pro с кремниевыми кантилеверами марки NSG01 (радиус кривизны зонда 6 ÷ 10 нм) в полуконтактном и контактном режимах атомно-силовой микроскопии. До термической обработки размеры агрегатов ДНА составляли ≈127 нм, после термирования — около 58 нм.

Полученные кристаллы ДНА вносили в 40%-й водный раствор ПХА при 80 °С и добавляли двукратное по объему количество изопропилового спирта. Смесь охлаждали до 15 ÷ 20 °С при интенсивном перемешивании.

Гранулы ПХА с термически обработанным Т-ДНА, имеющие средний диаметр 21 мкм, отфильтровывали и сушили при температуре 120 °С в вакууме.

Аналогично проводили соосаждение АШ на гранулы ПХА.

В качестве базовой рецептуры (рецептура 1) был выбран модельный состав на основе хлорнокислого связующего и окислителя ПХА с добавлением высокоэнергетической нитраминной добавки и катализатора горения. Этот модельный состав представляет собой классическую рецептуру пастообразного ракетного топлива и содержит компоненты из экономически целесообразной и доступной сырьевой базы. Критерием выбора соотношения компонентной базы состава являлось оптимальное значение удельного импульса.

В базовую рецептуру входили ПХА двух фракций — со средним диаметром частиц 21 и 50 мкм в соотношении 65/35.

В рецептурах 2 и 3 использовались модифицированные окислители. В рецептуре 2 фракция ПХА с диаметром частиц 21 мкм покрыта наноалмазами, в рецептуре 3 — алмазной шихтой.

Массовое соотношение компонентов в рецептурах 1–3 представлено в табл. 1.

Для рецептуры 2 фракция ПХА 21 мкм была покрыта 7.92 % наноалмазов от массы ПХА, что соответствует 2.57 % от массы состава. Данное соотношение является средним для составов, исследованных в работах [1–3].

Для рецептуры 3 процесс введения алмазной шихты и соотношение компонентов аналогичны рецептуре 2, массовое содержание ДНА в тетриловой алмазной шихте составляет 62 %.

Дополнительное введение горючего — ДНА или АШ, как показали расчеты, понижает коэффициент избытка окислителя с 0.631 (ре-

Таблица 1
Соотношение компонентов в рабочих рецептурах
(в процентах)

| Рецептура | Горючее | ПХА | Катализатор | Добавка* | ДНА | АШ |
|-----------|---------|-------|-------------|----------|------|------|
| 1 | 39 | 50 | 1 | 10 | — | — |
| 2 | 39 | 47.43 | 1 | 10 | 2.57 | — |
| 3 | 39 | 47.43 | 1 | 10 | — | 2.57 |

*Высокоэнергетический нитрамин.

цептура 1) до 0.568 (рецептуры 2 и 3), т. е. на 10 % от исходного значения, и уменьшает кислородный баланс (КБ) с -29.31 % (рецептура 1) до -36.97 % (рецептуры 2 и 3), т. е. на 7.66 %. Детонационные наноалмазы, в отличие от других известных алмазов (природных, статического синтеза, ударно-волнового синтеза (из графита), метеоритных), имеют сложное трехуровневое строение: в центре кристаллита — классический алмаз кубической сингонии, далее — переходная структура углерода от sp^3 -гибридизации к sp^2 -гибридизации (т. е. от алмазной до графитоподобной), а на поверхности — бахрома кислородсодержащих функциональных групп, гидроксильных, карбонильных и карбоксильных. Эти группы определяют значительную химическую активность поверхности ДНА. Процесс взаимодействия с кислородом воздуха начинается уже после 400 °С — идет газификация поверхности наноалмазов. И если выдерживать ДНА при прямом контакте с воздухом при 430 °С в течение 2 ч, то потери ДНА могут составить $50 \div 60$ %, как минимум. В нашем случае доступ воздуха к термируемому ДНА сознательно очень ограничен.

Испытания по определению скорости горения различных составов при высоких давлениях ($100 \div 1\,000$ атм) проводили в манометрической установке высокого давления (УВД), а при низких и средних давлениях — в макетном ракетном двигателе (МРД).

В УВД применялся метод множественных точек, который заключается в сжигании в замкнутом объеме цилиндрического образца исследуемого состава, помещенного в капсулу с двух- или трехкратным ступенчатым изменением поверхности горения образца (диаметра капсулы), причем каждая из «ступеней» имеет свою конкретную длину H_i вдоль оси. Скорость горения топлива находили делением высоты участка H_i на время горения столба топлива t_i :

$$u_i = H_i/t_i, \quad (1)$$

где i — номер участка.

Давление продуктов сгорания топлива p_i на участке H_i определялось как среднее арифметическое значение давлений на границах участка:

$$p_i = (p_n + p_{n+1})/2, \quad (2)$$

где n — порядковый номер точки перегиба от 0 до 3.

Испытания проводились при температуре 20 °С. Инициирование составов в УВД осуществлялось навеской дымного ружейного пороха, в МРД — низкоскоростным малогазовым огнестойким шнуром ОШМ-20, поджигаемым нитью накаливания. Рабочее давление измерялось индуктивными датчиками давления ДД-10, время протекания процесса — кварцевым счетчиком времени с частотой $f = 10$ кГц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ключевой проблемой являлась возможность дезагрегации частиц Т-ДНА, полученных из тетрила (конверсионное сырье), и равномерного распределения наноалмаза по поверхности ПХА при его кристаллизации из растворителя.

Известна возможность окислительного воздействия кислорода воздуха для карбоксилирования поверхности ДНА при температуре $400 \div 450$ °С [16]. Такое воздействие приводит к увеличению содержания кислородсодержащих поверхностных групп и усилению гидрофильности наноалмазов. Однако нами установлено, что одновременно с этим происходит частичная дезагрегация ДНА, связанная с окислением в первую очередь поверхностного углерода в местах контакта частиц наноалмаза друг с другом. Кроме того, кислород является не только окисляющим агентом, но и катализатором перехода углерода из sp^3 -гибридизации (алмазной) в sp^2 -гибридизацию (графитографеновую). Эти преобразования ослабляют связи между частицами ДНА, вызывая их частичную дезагрегацию.

Первоначально была исследована термостойкость рецептур на Q-дериватографе системы Паулик — Паулик — Эрдей (модификации «Кардиопротект»).

Из представленных в табл. 2 данных видно, что добавка Т-ДНА к ПХА практически не влияет на температуру его плавления. Температура начала разложения ПХА с Т-ДНА ниже по сравнению с более крупными кристаллами (опыты 1, 2), но существенно выше, чем в случае ПХА размером 7 мкм (опыт 3). Рецепт 2 (опыт 6) с Т-ДНА имеет более высокую термостойкость, чем стандартная рецептура (опыт 5). Замена Т-ДНА таким же количеством существенно более дешевой АШ приводит к значительному повышению температуры начала разложения соосажденной смеси Т-АШ + ПХА (опыт 7).

Таблица 2
Температуры разложения топливных составов и ПХА

| Номер опыта | Состав | Температура, °С |
|-------------|----------------------------------|--|
| 1 | ПХА, 95 мкм | $T_{пл} = 240$ °С, $T_{нр} = 436$ °С |
| 2 | ПХА, 21 мкм | $T_{пл} = 226$ °С, $T_{нр} = 411$ °С |
| 3 | ПХА, 7 мкм | $T_{фп+разл} = 236$ °С |
| 4 | ПХА, 21 мкм + Т-ДНА | $T_{пл} = 230$ °С, $T_{нр} = 295$ °С |
| 5 | Рецептура 1 | $T_{нр} = 186$ °С, $T_{нир} = 190$ °С |
| 6 | Рецептура 2 (ПХА 21 мкм + Т-ДНА) | $T_{нр} = 193$ °С, $T_{нир} = 195$ °С |
| 7 | ПХА 21 мкм + Т-АШ | $T_{фп+разл} = 242$ °С, $T_{нр2} = 379$ °С |
| 8 | Рецептура 3 (ПХА 21 мкм + Т-АШ) | $T_{нр} = 190$ °С, $T_{нир} = 193$ °С |

Примечания. $T_{нр}$ — температура начала разложения, $T_{нир}$ — температура начала интенсивного разложения, $T_{пл}$ — температура плавления, $T_{фп}$ — температура фазового перехода, $T_{фп+разл}$ — температура фазового перехода с разложением.

Таблица 3
Химическая стойкость продуктов сгорания ракетного топлива

| Вариант | Состав | 110 °С, 14 ч нагревания, мм рт. ст. |
|---------|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Рецептура 1 | 10 |
| 2 | Рецептура 2 (ПХА 21 мкм + Т-ДНА) | 4 |
| 3 | Рецептура 3 (ПХА 21 мкм + Т-АШ) | 9 |

Таблица 4
Результаты расчетов термодинамических характеристик рецептур ($p = \text{const}$)

| Состав | ρ , кг/дм ³ | p , МПа | $T_{пр}$, К | $RT_{пр}$, МДж/кг | k | I , с |
|----------------------------|-----------------------------|-----------|--------------|--------------------|--------|---------|
| Рецептура 1 | 1.666 | 4 | 2 317 | 0.872 | 1.2299 | 218.7 |
| | | 10 | 2 317 | 0.872 | 1.2324 | 235.1 |
| | | 15 | 2 316 | 0.872 | 1.2335 | 241.4 |
| | | 20 | 2 314 | 0.871 | 1.2342 | 245.6 |
| | | 25 | 2 312 | 0.870 | 1.2348 | 248.8 |
| | | 30 | 2 310 | 0.869 | 1.2354 | 251.3 |
| | | 40 | 2 306 | 0.868 | 1.2364 | 255.3 |
| Рецептура 2 Рецептура 3 | 1.567 | 4 | 2 076 | 0.807 | 1.2483 | 208.9 |
| | | 10 | 2 074 | 0.806 | 1.2496 | 225.1 |
| | | 15 | 2 072 | 0.805 | 1.2502 | 231.6 |
| | | 20 | 2 070 | 0.804 | 1.2509 | 236.1 |
| | | 25 | 2 068 | 0.803 | 1.2514 | 239.4 |
| | | 30 | 2 065 | 0.802 | 1.2517 | 242.2 |
| | | 40 | 2 061 | 0.800 | 1.2527 | 246.4 |

Примечания. ρ — плотность, p — рабочее давление, $T_{пр}$ — температура продуктов сгорания, $RT_{пр}$ — работоспособность продуктов сгорания, k — показатель адиабаты, I — удельный импульс.

Таблица 5

Результаты исследования составов на установке УВД

| Рецептура | m , г | p_{\max} , атм | t_r , с | p_1 , атм | u_1 , мм/с | p_2 , атм | u_2 , мм/с | p_3 , атм | u_3 , мм/с |
|-----------|---------|------------------|-----------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| 1 | 20.0 | 453 | 0.453 | 146 | 28 | 357 | 50 | — | — |
| | 40.0 | 1 128 | 0.480 | 280 | 42 | 734 | 86 | 1 041 | 107 |
| 2 | 20.0 | 437 | 0.289 | 132 | 59 | 335 | 69 | — | — |
| | 30.0 | 1 038 | 0.399 | 252 | 57 | 662 | 101 | 945 | 108 |

Примечания. m — масса заряда, p_{\max} — максимальное давление, p_1, p_2, p_3 — среднее давление соответственно первой, второй, третьей ступеней, u_1, u_2, u_3 — скорость горения соответственно первой, второй, третьей ступеней, t_r — время горения.

Таблица 6

Результаты исследования составов на установке МРД

| Номер опыта | Рецептура | m , г | H , мм | p_{\max} , атм | $p_{\text{ср}}$, атм | t_r , с | $u_{\text{расч}}$, мм/с |
|-------------|-----------|---------|----------|------------------|-----------------------|-----------|--------------------------|
| 1 | 1 | 51.7 | 54.0 | 90.0 | 83.8 | 1.738 | 31 |
| 2 | 1 | 50.4 | 52.4 | 64.5 | 62.6 | 1.982 | 26 |
| 3 | 1 | 50.8 | 53.9 | 46.2 | 41.7 | 2.236 | 24 |
| 4 | 2 | 51.8 | 53.9 | 149.1 | 135.8 | 1.056 | 51 |
| 5 | 2 | 53.3 | 54.5 | 113.6 | 92.4 | 1.226 | 45 |
| 6 | 2 | 49.5 | 52.4 | 61.8 | 49.8 | 1.592 | 33 |
| 7 | 2 | 53.0 | 55.5 | 151.6 | 138.5 | 1.104 | 50 |
| 8 | 2 | 73.7 | 80.5 | 61.0 | 52.7 | 2.252 | 36 |
| 9 | 2 | 74.3 | 76.7 | 98.6 | 86.0 | 1.905 | 40 |
| 10 | 2 | 72.1 | 77.1 | 178.4 | 137.9 | 1.523 | 51 |
| 11 | 3 | 51.7 | 54.3 | 133.0 | 121.5 | 1.292 | 42 |
| 12 | 3 | 59.4 | 62.9 | 87.8 | 74.0 | 1.765 | 36 |
| 13 | 3 | 53.2 | 55.8 | 53.8 | 41.5 | 2.001 | 28 |

Примечание. $u_{\text{расч}}$ — скорость горения при среднем давлении $p_{\text{ср}}$.

Результаты испытания топливных композиций на химическую стойкость (ИВК «Вулкан», суммарное газовыделение при длительном нагреве) показаны в табл. 3. Предлагаемые рецептуры с Т-ДНА и с Т-АШ имеют удовлетворительную химическую стойкость, причем их стойкость выше, чем у рецептуры 1.

Испытания на чувствительность к удару показали одни и те же значения для всех рецептов: падение груза в 10 кг с высоты 25 см — 100 % взрывов, а 2 кг с 25 см — полное отсутствие взрывов.

В табл. 4 представлены результаты расчетов термодинамических характеристик рецептов

1–3. Рецептуры 2 и 3 с точки зрения термодинамического расчета одинаковы по составу, так как ДНА и АШ — углерод. Из таблицы следует, что использование модифицированного окислителя с ДНА и АШ приводит к незначительному уменьшению удельного импульса, но при этом ощутимо снижается температура продуктов сгорания, что позволяет уменьшить тепловую нагрузку на элементы конструкции ракетного двигателя.

На рис. 1,а приведена характерная осциллограмма опытов в установке УВД. Видны характерные перегибы кривой давления при переходе от одной ступени горения стаканчика с

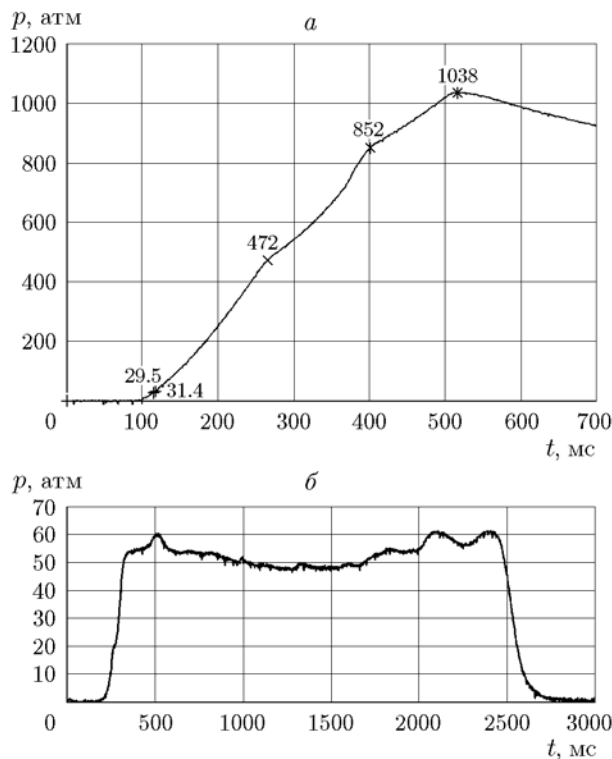


Рис. 1. Характерная зависимость давления от времени при проведении опыта в УВД (а) и в МРД (б)

топливом к другой.

Результаты исследования скорости горения данных рецептов представлены в табл. 5 и 6.

На рис. 1, б приведен пример осциллограммы опыта в установке МРД. Во всех опытах наблюдалось устойчивое горение составов в исследованном диапазоне давлений (до 1 100 атм). Признаков перехода горения в режимы разгонного конвективного или преддетонационного горения не обнаружено.

По результатам экспериментов, приведенным в табл. 5, 6, установлены следующие законы горения составов:

рецептура 1:

$$u = 1.43 + 3.681(p - 1)^{0.480}, \quad 0 < p < 1100 \text{ атм,}$$

рецептура 2:

$$u = 1.95 + 6.002(p - 1)^{0.424}, \quad 0 < p < 1100 \text{ атм,}$$

рецептура 3:

$$u = 2.81 + 6.192(p - 1)^{0.392}, \quad 0 < p < 150 \text{ атм}$$

(u — [мм/с], p — [атм]). Графические изображения зависимости скорости горения этих составов от давления представлены на рис. 2: на рис. 2, а — в интервале давлений до 150 атм при проведении испытаний в МРД, на рис. 2, б — в

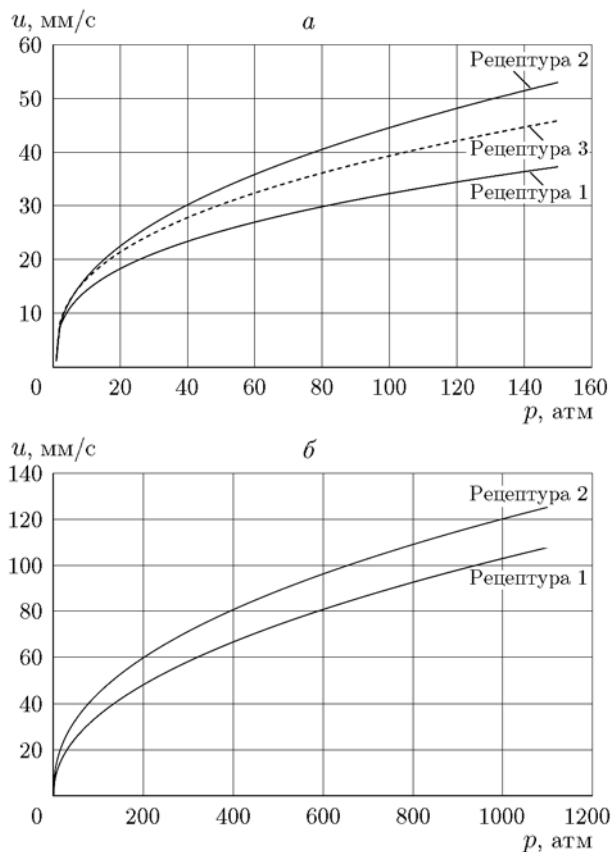


Рис. 2. Зависимость скорости горения составов от давления в интервале давлений до 150 атм в МРД (а) и до 1 200 атм в УВД (б)

интервале давлений до 1 200 атм при проведении испытаний в УВД. Экспериментальные результаты на рис. 2, б относятся к рецептурам 1 и 2. Для рецептуры 3 испытания в УВД не проводились, так как требуется время для наработки АШ. В дальнейшем планируются более глубокие исследования для каждого модифицированного окислителя.

По результатам проведенных исследований в интервале давлений 1 ÷ 150 атм рецептура 2 обеспечивает прирост скорости горения топлива в среднем на 27 ± 0.8 % от базовой рецептуры 1, а рецептура 3 — в среднем на 16 ± 0.5 %.

Как следует из данных опытов и уравнений скорости горения, все испытанные составы устойчиво горят в расширенном интервале давлений по закону $u = u_0 + ap^\nu$, где $\nu < 0.5$. Наибольший интерес для использования в ракетной технике вызывает рецептура 2 на основе ПХА, соосажденного с тетриловыми ДНА и покрытого ими.

Таблица 7
Сравнение скоростей горения
для базовой и опытных рецептур

| Рецептура | u (100 атм), мм/с | Δu , % |
|-----------|---------------------|----------------|
| 1 | 35 | — |
| 2 | 44 | 27 ± 0.8 |
| 3 | 40 | 16 ± 0.5 |

В табл. 7 приведены данные по приросту скорости при использовании модифицированных окислителей в составе смесового ракетного топлива.

Детонационные наноалмазы имеют две существенные особенности, отличающие их от других добавок в топливо: высокую удельную газификацию и высокую теплопроводность.

Для ДНА характерны максимально плотная упаковка углерода из всех углеродсодержащих горючих и, как результат, максимально большое количество выделяющихся вследствие окисления углерода газов (CO и CO_2), что благотворно сказывается на газообразующих свойствах топлива.

В итоге увеличиваются скорость горения топлива, скорость выделения и удельный объем газов. При этом достигается нетривиальный эффект: температура продуктов горения падает на ≈ 200 °С и уменьшается вероятность прогара сопла двигателя.

ВЫВОДЫ

Проведенные испытания составов с модифицированными окислителями свидетельствуют о высокой практической значимости использования наноалмазов в смесовых ракетных топливах.

Использование гранул ПХА, покрытых ДНА или АШ, приводит к увеличению скорости горения топливного состава и понижению температуры продуктов сгорания смесового ракетного топлива. Оба фактора благотворно сказываются на работе двигательной установки и повышают ее эффективность.

Преимуществом введения ДНА в состав окислителя являются высокий прирост скорости горения топлива (на 27 ± 0.8 %) и уменьшение температуры продуктов сгорания на 242 °С при 100 атм.

Введение АШ в состав окислителя дает прирост скорости 16 ± 0.5 % при 100 атм. Это

значение меньше, чем у окислителя с ДНА, но использование АШ более предпочтительно с экономической точки зрения.

Выбор ДНА или АШ для модификации окислителя зависит от конкретных задач, поставленных согласно техническому заданию, но оба варианта эффективны в плане энергетических и механических возможностей.

В данной работе доказана практическая значимость использования ДНА в смесовых ракетных топливах. Более глубокие исследования позволят найти оптимальные решения для увеличения положительного влияния наноалмазов и поиска новых возможностей для их применения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горбачев В. А., Убей-Волк Е. Ю., Шевченко Н. В., Голубев А. А. Детонационный наноалмаз — как перспективный компонент смесовых твердых ракетных топлив // Хим. технология неорган. и орган. веществ, теорет. основы. — 2016. — Т. 59, № 8. — С. 96–100. — DOI: 10.6060/tcct.20165908.37y.
2. Gorbachev V., Shevchenko N. Influence of nanodiamond on combustion of anazite // Collection of Abstr. of XII Int. Symp. of Explosive Production of New Materials, Cracow, May 25-30, 2014. — 2014. — P. 191–192.
3. Шевченко Н. В., Горбачев В. А., Убей-Волк Е. Ю., Даниленко В. В., Бланк В. Д., Голубев А. А., Дерibas А. А. Влияние детонационных наноалмазов на процессы горения энергоемких составов ракетных топлив // Конструкции из композ. материалов. — 2014. — № 3 (135). — С. 33–39.
4. Barnard A. S., Sternberg M. Crystallinity and surface electrostatics of diamond nanocrystals // J. Mater. Chem. — 2007. — V. 17. — P. 4811–4819. — DOI: 10.1039/B710189A.
5. Chang L.-Y., Ōsawa E., Barnard A. S. Confirmation of the electrostatic self-assembly of nanodiamonds // Nanoscale. — 2011. — N 3. — P. 958–962. — DOI: 10.1039/C0NR00883D.
6. Бланк В. Д., Голубев А. А., Горбачев В. А., Дерibas А. А., Дубицкий Г. А., Серебряная Н. Р., Шевченко Н. В. Микроалмазы детонационного синтеза // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2012. — Т. 55, № 6. — С. 37–41.
7. Шевченко Н. В., Горбачев В. А., Чобанян В. А., Сигалаев С. К., Ризаханов Р. Н., Голубев А. А., Кириченко А. Н., Ефремов В. П. Свойства и фазовый состав поверхности детонационных наноалмазов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. — 2016. — Т. 59, № 8. — С. 40–44. — DOI: 10.6060/tcct.20165908.36y.

8. **Долматов В. Ю.** Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза: свойства и применение // *Успехи химии*. — 2001. — Т. 70, № 7. — С. 687–708. — DOI: 10.1070/RC2001v070n07ABEH000665.
9. **Dolmatov V. Yu.** Chapter 11. Synthesis and Post-Synthesis Treatment of Detonation Nanodiamond // *Ultrananocrystalline Diamond. Synthesis, Properties, and Applications* / O. A. Shenderova, D. M. Gruen (Eds). — New York, USA: William Andrew Inc., 2006. — P. 347–377. — DOI: 10.1016/B978-081551524-1.50013-5.
10. **Долматов В. Ю.** Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства, применение // *Успехи химии*. — 2007. — Т. 76, № 4. — С. 375–397. — DOI: 10.1070/RC2007v076n04ABEH003643.
11. **Детонационные** наноалмазы. Технология, структура, свойства и применения / под ред. А. Я. Вуля, О. А. Шендеровой. — М.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2016.
12. **Долматов В. Ю.** Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение. — СПб.: НПО «Профессионал», 2011.
13. **Dolmatov V. Yu., Malygin A. A., Dorokhov A. O., Kozlov A. S., Marchukov V. A., Sushev V. G., Myllymäki V., Vehanen A.** Development of a process for producing detonation nanodiamonds from tetryl and binary compositions based on it // *J. Superhard Mater.* — 2020. — V. 42, N 3. — P. 145–156. — DOI: 10.3103/S1063457620030053.
14. **Пат. РФ № 22712551** от 11.03.2019. Способ получения детонационных наноалмазов / Долматов В. Ю., Руденко Д. В., Лисицин О. Н., Киселев М. Н., Дорохов А. О., Денисов И. В.
15. **Panich A. M., Shames A. I., Mogilyansky D., Goren S. D., Dolmatov V. Yu.** Detonation nanodiamonds fabricated from tetryl: Synthesis, NMR, EPR and XRD study // *Diamond Relat. Mater.* — 2020. — V. 108. — 107918. — DOI: 10.1016/j.diamond.2020.107918.
16. **Пат. РФ № 2446097** от 27.03.2012. Способ получения водной суспензии детонационных наноалмазов / Алексенский А. Е., Вуль А. Я., Дидейкин А. Т.

Поступила в редакцию 29.01.2021.

После доработки 02.04.2021.

Принята к публикации 09.06.2021.
