

СМЕСЕВЫЕ ТВЕРДОТОПЛИВНЫЕ СОСТАВЫ НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ С ПЛАТО НА ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ОТ ДАВЛЕНИЯ

С. Банерджи, С. Р. Чакраварти

Факультет аэрокосмической техники, Индийский институт технологий Мадраса, 600036 Ченнай, Индия
src@ae.iitm.ac.in

Представлены зависимости скорости горения от давления для нескольких топливных составов на основе перхлората аммония (ПХА) и полибутадиена с концевыми гидроксильными группами, отвержденного с помощью изофорондиизоцианата. Многие из этих составов имеют очень низкие (близкие к нулю или отрицательные) значения барического показателя в зависимости скорости горения от давления в некоторых диапазонах давлений. В таких случаях говорят, что топливо имеет плато на зависимости скорости горения от давления. Перхлорат аммония, входящий в состав топлив, состоял из двух фракций, имевших узкие распределения частиц по размерам. Одновременно использовались крупная и мелкая фракции частиц ПХА со значительно отличающимися средними размерами частиц. В данной работе исследовались две фракции мелких частиц ПХА с разными средними размерами, а именно 5 и 20 мкм. Размеры были выбраны на основе анализа экспериментально определенных пределов по давлению для горения матрицы, состоящей из смеси горючего-связующего и мелких частиц ПХА. Давление и размер мелких частиц ПХА в этих экспериментах варьировались в широких диапазонах. Смеси горючего и мелких частиц ПХА, не горящие в среднем диапазоне давлений, характеризуются наличием плато на зависимости скорости горения от давления в соответствующем диапазоне давлений. Для некоторых составов плато на зависимости скорости горения от давления наблюдалось также при повышенных давлениях, что связано с уменьшением влияния переднего фронта диффузионного пламени окислителя и горючего в газовой фазе вблизи поверхности горения. Размер крупной фракции частиц ПХА в составе топлива влияет на положение и протяженность плато на зависимости скорости горения от давления в пределах той области давлений, в которой не горит матрица.

Ключевые слова: смесевые твердые топлива, плато на зависимости скорости горения от давления, погасание в среднем диапазоне давлений, бимодальное распределение.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что [1] для улучшения расчетного запаса прочности твердотопливных ракетных двигателей желательно иметь низкое значение барического показателя в зависимости скорости горения твердых топлив от давления. Низкое (нулевое или отрицательное) значение барического показателя также снижает чувствительность давления, развиваемого в камере сгорания ракетного двигателя, к изменению начальной температуры топлива. Анализ неустойчивости горения твердых топлив

к пульсациям давления, имеющимся в камере сгорания, в рамках квазистационарного однородного одномерного подхода также указывает на то, что низкое значение барического показателя уменьшает вероятность того, что нестационарное горение топлива приведет к нестабильным пульсациям давления [2]. Низкий барический показатель топлива обычно характеризует тенденцию к «нулевой» зависимости скорости горения от давления $u(p)$.

В действительности горение топлива — это единственный значимый механизм, обуславливающий развитие пульсаций давления в твердотопливных двигателях, а демпфирование частицами, образующимися при горении частиц алюминия, — наиболее важный механизм подавления этих пульсаций. Однако в двигателях военного назначения, особенно применяемых для решения тактических задач,

С. Банерджи, текущий адрес: Группа реактивного движения, Космический центр им. Викрама Сарабхай, 695022 Тхируванантхапурам, Индия.

S. Banerjee*, S. R. Chakravarthy.

Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology Madras, 600036 Chennai, India.

*Present address: Propulsion Group, Vikram Sarabhai Space Centre, 695022 Thiruvananthapuram, India.

использование алюминия нежелательно ввиду увеличения интенсивности излучения образующихся продуктов горения; отсюда вытекает необходимость разработки «бездымных» топлив. В таких ситуациях, когда наиболее эффективный механизм подавления пульсаций исключен, важную практическую роль играет разработка топливных составов с низким барическим показателем, которые вызывали бы более слабые пульсации давления либо даже подавляли их.

В прошлом многие исследователи уже изучали топливные составы с низким барическим показателем, хотя явно и не ставили себе такую цель. Ранние работы по изучению смесевых топливных составов с низким барическим показателем были выполнены в 1960-х годах [3, 4]. Проведение работ было мотивировано необходимостью изучения границ достоверности модели гранулярного диффузионного пламени [5]. Исследованные составы по большей части были слишком обогащены горючим, что делало их малоприспособленными для практического применения. Однако в этих работах было показано, что низкие значения барического показателя получаются при использовании связующих, которые существенно плавятся до разложения в зоне горения. В настоящее время эти связующие уже устарели. С помощью вариации соотношения между крупной и мелкой фракциями частиц ПХА в составах с бимодальным распределением частиц по размерам в работе [6] для конкретного вида топлив было показано, что существует оптимальное соотношение, при котором реализуется низкий барический показатель в среднем диапазоне давлений. В другой работе этих авторов [7], цель которой состояла в определении роли соотношения между мелкодисперсным ПХА и горючим-связующим (далее называемым просто горючим) в составе топлива, изучалось отдельно горение матрицы (смеси горючего и мелких частиц ПХА) и было обнаружено, что смесь перестает самостоятельно гореть в некотором узком диапазоне давлений. Топливо, состоящее из матрицы и крупных частиц ПХА, имело плато на зависимости $u(p)$ в этом диапазоне давлений. Стоит отметить, что в цитированных работах использовались составы с достаточно высоким содержанием твердых компонентов ($\geq 80\%$), связующим служил полибутадиен с концевыми гидроксильными группами (НТРВ), отвержденный с помощью изофорон-

диизоцианата (IPDI). Объяснение результатов было дано в терминах характеристик термического разложения IPDI в сравнении с характеристиками других возможных отвердителей из класса диизоцианатов, а также с привлечением данных по задержкам воспламенения крупных частиц, содержащихся в топливах. Движение расплавленного связующего не привлекалось для объяснения наблюдаемого поведения. Работы [6, 7] проводились главным образом для проверки достоверности и обоснования рамок применимости модели небольших ансамблей (*petite ensemble model*) [8].

В работе [9] изучалась скорость горения ряда топлив на основе НТРВ, содержащих две или три разные фракции частиц ПХА. Многие из этих топлив действительно имели плато на зависимости $u(p)$. Авторы работы [9] пытались объяснить наблюдаемое поведение скорости горения, основываясь на модели Бекстеда — Дерра — Прайса [10]. В работе [11] сообщается о создании топлив на основе НТРВ с плато на зависимости $u(p)$, содержащих CaCO_3 в качестве компонента, приводящего к образованию плато. Однако при этом основное внимание было уделено модельным слоевым топливам, содержащим это связующее, которые могли бы использоваться как средство для проверки механизма горения с постоянной скоростью.

В работе [12] исследовалось влияние потока расплавленного горючего на процесс горения смесевых топлив путем изучения слоевых систем с различными связующими, отвержденными разными отвердителями. В случае использования НТРВ, отвержденного с помощью IPDI, для слоевых систем, содержащих ПХА и слой матрицы, наблюдалось плато на зависимости $u(p)$ в том же диапазоне давлений, в котором не поддерживается самостоятельное горение матрицы. Авторы работы [13] продолжили проверку описанных выше результатов, полученных на слоевых системах, на примере двух типов топлив на основе бимодального ПХА и получили плато на зависимости скорости $u(p)$ в ограниченных диапазонах давлений. Эти топлива в качестве связующего также содержали НТРВ-IPDI. В [13] также показано, что если в среднем диапазоне давлений матрица не горит, это влияет на характеристики горения содержащих ее слоевых и смесевых систем. Кроме того, они предположили, что невозможность реализации горения матрицы в среднем диапазоне давлений может быть

связана с поведением расплавленного горючего на поверхности горения. Последний аспект все еще является предметом исследований. В работе [14] изучались слоевые и смесевые системы на основе полибутадиена с акрилонитрильными концевыми группами. Это связующее не плавится при температуре, заметно меньшей температуры разложения. Основное внимание в этой работе было уделено области повышенных давлений, изучались слоевые системы как с катализатором, так и без него, а также смесевые топлива. Результаты экспериментов показали, что плато на зависимости $u(p)$ присутствует как для слоевых, так и для смесевых систем, в обоих случаях в диапазоне давлений $10 \div 14$ МПа при почти одинаковых скоростях горения.

Настоящая работа продолжает предыдущие исследования [13, 14]. Основное внимание в ней уделено созданию топливных составов, которые имеют плато на зависимости $u(p)$, поскольку в предыдущих работах было представлено только ограниченное количество данных по смесевым топливам. В рамках настоящего исследования удалось изучить десять топливных составов, более половины которых имеют низкий барический показатель. Целью работы было подтверждение подхода, заключающегося в поиске смесей горючего и мелких частиц ПХА, не поддерживающих горение в среднем диапазоне давлений, чтобы определить композиции топлив, которые могут иметь плато на зависимости $u(p)$. Показана важность выбора

размера крупной фракции ПХА для сохранения постоянной скорости при повышенных и низких давлениях, так же как это было сделано в работах [13, 14]. Раньше это было показано в основном для слоевых систем, а для смесевых составов получено лишь ограниченное количество данных.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

1.1. Ингредиенты и образцы

В данной работе использовался ПХА с чистотой $>99\%$. Порошок ПХА размалывался в стержневой мельнице, до тех пор пока размер частиц не уменьшался до необходимого значения. Частицы разделялись на фракции с помощью стандартного набора сит. Чтобы разделить частицы размером меньше 37 мкм на различные фракции, использовался разработанный в лаборатории отстойник: в нижней части колонны отстойника оседали частицы среднего размера (20 мкм), в верхней части собирались частицы размером 5 мкм (при специальных настройках). Распределения частиц по размерам для всех наборов частиц ПХА (мелкой и крупной фракций), использованных в настоящей работе, показаны на рис. 1 (здесь α — массовая доля частиц с размером меньше данного). В качестве горючего использовался НТРВ, в качестве отвердителя — IPDI или диизоцианат толуола (TDI), в качестве пластификатора —

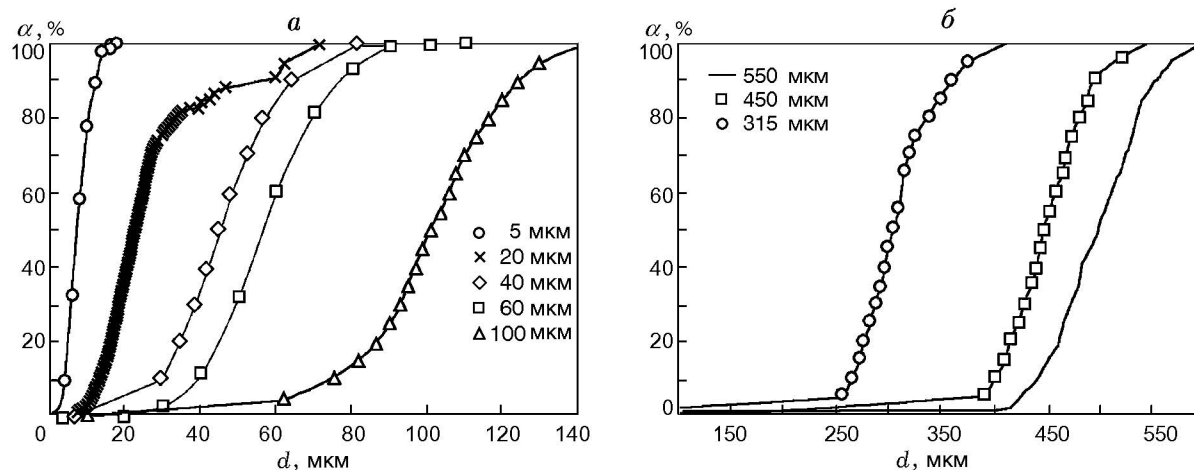


Рис. 1. Распределения частиц ПХА по размерам:
а — мелкая фракция, б — крупная фракция

диоктиладипат (DOA). Для изготовления состава горючее, отвердитель и пластификатор брали в следующих соотношениях (в процентах по массе): НТРВ:DOA:TDI = 80 : 15 : 5 и НТРВ:DOA:IPDI = 75.73 : 18.39 : 5.88.

Образцы представляли собой либо матрицу, либо топливо с бимодальным распределением частиц ПХА по размерам, т. е. крупные частицы ПХА, смешанные с матрицей. Погрешность взвешивания ингредиентов перед их смешиванием составляла 0.5 %. Как матрица, так и топливо готовились путем ручного перемешивания ингредиентов, взятых в необходимых пропорциях. Топливные смеси затем дополнительно перемешивались с помощью микросмесителя, изготовленного в лаборатории. В обоих случаях образцы дегазировались с помощью вакуумирования после перемешивания. Перемешанные и дегазированные образцы отверждались в течение 7 дней при 50 °С. Из отвержденных смесей готовились образцы размером 5 × 5 × 10 мм.

1.2. Измерения скорости горения

Видеосъемка процесса горения в данной работе осуществлялась так же, как и во многих более ранних работах [13–17]. В камере сгорания высокого давления имелось два окна. Одно окно использовалось для освещения образца, другое — для наблюдения с помощью видеокамеры. Для создания необходимого давления в камере сгорания использовался азот.

Область, в которой не горит матрица, определялась с помощью видеокамеры по результатам прямых экспериментов (горит/не горит). Скорость горения измерялась путем кадрового анализа полученных видеозаписей процесса горения. В каждом кадре отмечалось положение фронта пламени, и затем эти положения в различные моменты времени (различные кадры) аппроксимировались прямой линией с коэффициентом корреляции >99 %. Наклон этой линии после учета масштаба изображения давал скорость горения. Ошибка в измерении скорости горения не превышала ±3 %. По крайней мере 50 % данных по скорости горения проверялись на воспроизводимость с точностью 5 %, так же как это делалось ранее [15], особенно в тех случаях, когда плато наблюдалось только между двумя соседними точками по давлению и необходимо было убедиться в его наличии.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Пределы горения матрицы

Составы смесей мелких частиц ПХА со связующим, которые проверялись на способность поддерживать горение в среднем диапазоне давлений, перечислены в табл. 1. На рис. 2, а–в показано наиболее интересное поведение горения трех составов со связующим, отвержденным с помощью IPDI. Рисунки представлены в виде карты с обозначениями горит/не горит в зависимости от давления и размера частиц для различных соотношений между мелкой фракцией ПХА и связующим в составе матрицы. Для сравнения на рис. 2, г приведены результаты для смеси со связующим, отвержденным с помощью TDI. Все другие смеси, для которых данные не приведены, самостоятельно горели во всем исследуемом диапазоне давлений и размеров частиц мелкой фракции ПХА. Для матриц на основе НТРВ, отвержденных с помощью IPDI, на рис. 2, а–в заметно выделяются области в диапазоне средних давлений, в которых они не горят. Как видно из рис. 2, г матрица на основе НТРВ, отвержденная с помощью TDI, горела только в небольшой области высоких давлений и больших размеров частиц. Фактически ни одна из тестируемых матриц, отвержденных с помощью TDI, не продемонстрировала поведения, отраженного на рис. 2, а–в. Среди исследованных матриц, отвержденных с помощью IPDI, четыре были выбраны для дальнейшего исследования в составе топлив: смеси с соотноше-

Таблица 1
Составы матриц
(смесей мелких частиц ПХА и НТРВ)

Номер состава	Отвердитель	$d_{\text{ПХА}}$, мкм	Окислитель/горючее
1–5	TDI	5, 20, 40, 60, 100	65/35
6–10	TDI	5, 20, 40, 60, 100	60/40
11, 12	TDI	5, 20	55/45
13–16	IPDI	20, 40, 60, 100	75/25
17–21	IPDI	5, 20, 40, 60, 100	70/30
22–26	IPDI	5, 20, 40, 60, 100	65/35
27–31	IPDI	5, 20, 40, 60, 100	60/40
32, 33	IPDI	5, 20	55/45

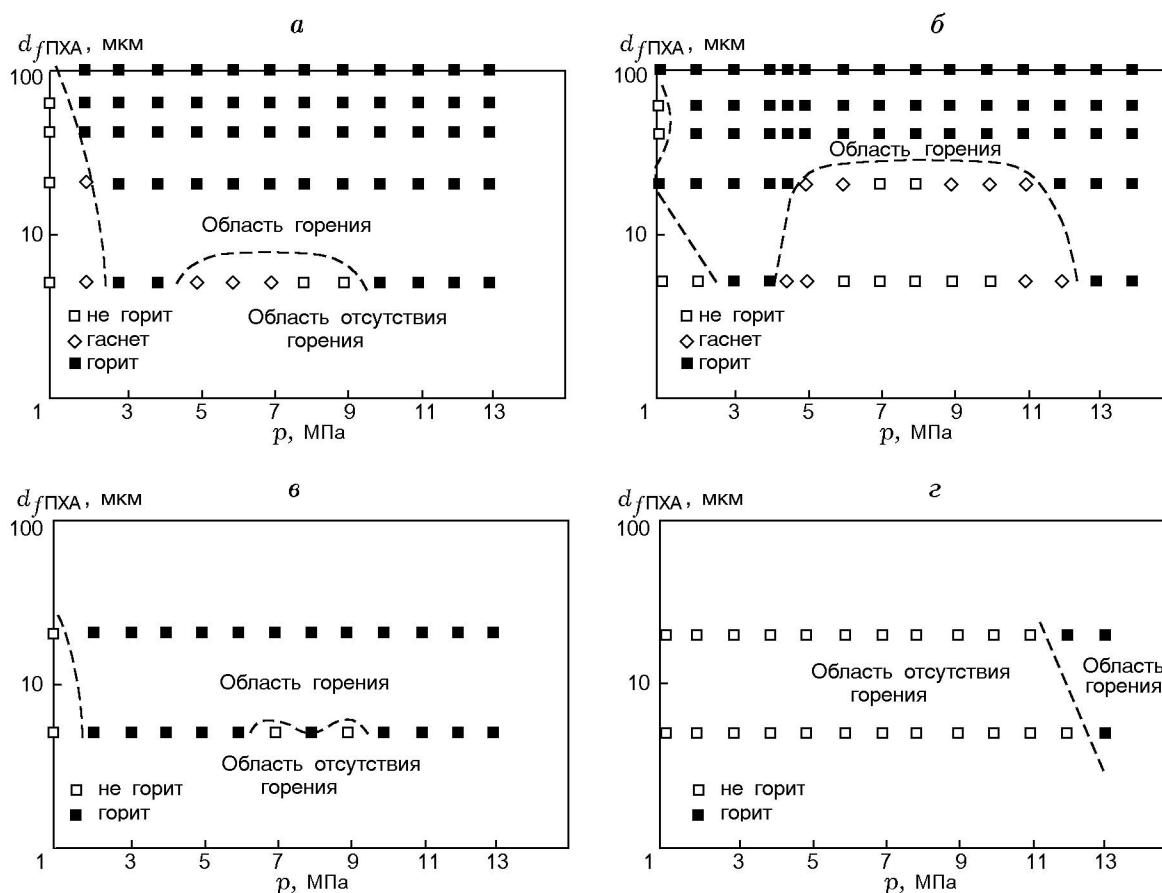


Рис. 2. Пределы горения выбранных смесей мелких частиц ПХА со связующим: соотношение ПХА/НТРВ-IPDI: *a* — 65/35, *б* — 60/40, *в* — 55/45; *г* — соотношение ПХА/НТРВ-TDI 55/45

нием ПХА/связующее, равным 55/45, 60/40, 65/35, и с размером частиц ПХА 5 мкм, а также смесь с соотношением 60/40 и размером частиц ПХА 20 мкм.

2.2. Скорости горения топлив

На основе смесей, выбранных в качестве матриц, и крупной фракции частиц ПХА размерами 100, 315, 450 и 550 мкм было изготовлено десять топливных смесей, состав которых приведен в табл. 2. Именно эти составы проверялись на наличие плато на зависимости $u(p)$. Суммарное массовое содержание твердых компонентов (в данном случае это только ПХА) во всех смесях составило 87.5 %. Зависимости скоростей горения этих составов от давления показаны на рис. 3. Видно, что несколько составов характеризуется низким барическим показателем, причем некоторые составы имеют

Таблица 2

Топливные составы

Номер смеси	$d_{f\text{ПХА}}$, мкм	ПХА _f /св	$d_{c\text{ПХА}}$, мкм
1	5	65/35	100
2	5	65/35	450
3	5	65/35	550
4	5	60/40	315
5	5	60/40	450
6	5	60/40	550
7	5	55/45	315
8	5	55/45	550
9	20	60/40	450
10	20	60/40	550

Примечание. $d_{f\text{ПХА}}$ — размер мелкой фракции ПХА, $d_{c\text{ПХА}}$ — размер крупной фракции, ПХА_f/св — соотношение между мелкой фракцией ПХА и связующим.

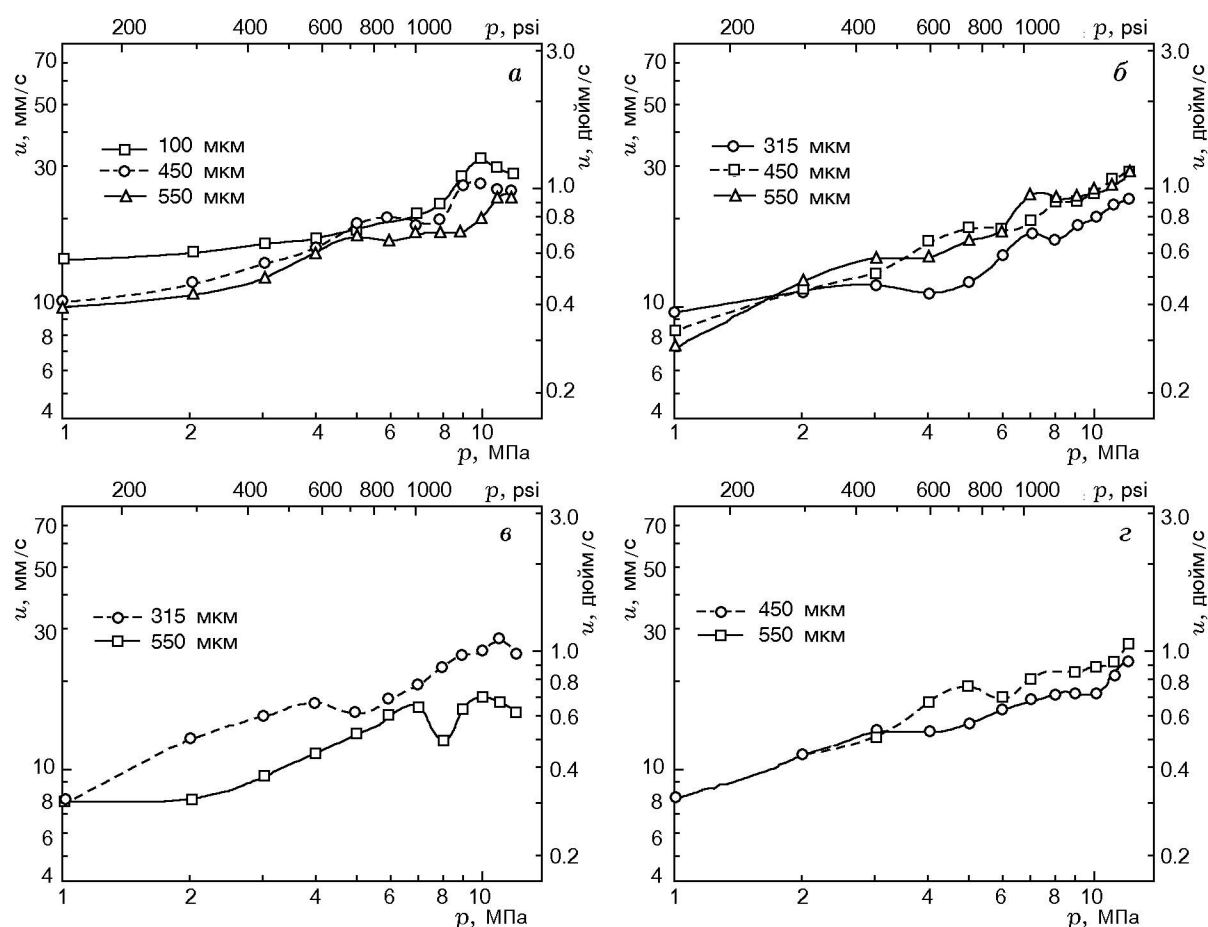


Рис. 3. Скорости горения топливных составов на основе бимодального ПХА и НТРВ-IPDI (см. табл. 2) с различными размерами крупных частиц ПХА и различными матрицами:

суммарное содержание твердых компонентов 87,5 %, размер частиц мелкой фракции ПХА 5 мкм (а-в) и 20 мкм (г); соотношение между мелкой фракцией ПХА и НТРВ-IPDI: а — 65/35, б — 60/40, в — 55/45, г — 60/40; psi — фунт/дюйм²

такой показатель в нескольких явно различающихся диапазонах давлений. Значения барического показателя ν вместе с соответствующими диапазонами давлений, а также значения скорости горения составов с наиболее выраженным плато на зависимости $u(p)$ приведены в табл. 3. Почти во всех случаях, когда низкий барический показатель находился в диапазоне низких и средних давлений (3 ÷ 8 МПа), это был диапазон средних давлений, в котором соответствующая матрица, входящая в состав топлива, не горела [13]. Описанные зависимости с низким барическим показателем обычно характеризуют как содержащие плато при низких давлениях. Для некоторых составов наблю-

далось также плато при высоких давлениях, в диапазоне $p = 7 \div 12$ МПа, что обусловлено сжатием приповерхностных участков «носиков» диффузионных пламен окислителя и горючего в газовой фазе при повышенных давлениях [14]. Это явление не связано с погасанием матрицы (смесь мелкого ПХА и связующего) в диапазоне средних давлений. Разделение типов плато на два вида, наблюдавшихся в разных диапазонах давлений, не является строгим. Оно сделано только для того, чтобы указать на различные механизмы, которые приводят к появлению плато на зависимости $u(p)$.

Роль крупных частиц в рассматриваемых случаях заключается в том, чтобы обеспечить

Таблица 3
Значения барического показателя
и скорости горения

Номер смеси	p , МПа	ν	u , мм/с
2	6 ÷ 7	-0.28	19.7 ÷ 18.9
	7 ÷ 8	0.07	18.9 ÷ 19.1
	10 ÷ 11	-0.83	26.3 ÷ 24.3
	11 ÷ 12	-0.12	24.3 ÷ 24.1
3	5 ÷ 6	-0.16	16.8 ÷ 16.3
	7 ÷ 8	-0.07	17.6 ÷ 17.5
	8 ÷ 9	-0.00	17.5 ÷ 17.5
4	2 ÷ 3	0.09	11.2 ÷ 11.6
	3 ÷ 4	-0.22	11.6 ÷ 10.9
	7 ÷ 8	-0.42	17.5 ÷ 16.6
6	3 ÷ 4	0.05	14.3 ÷ 14.5
	7 ÷ 9	-0.02	23.4 ÷ 23.3
9	3 ÷ 4	0.03	13.3 ÷ 13.44
	8 ÷ 10	0	18.2 ÷ 18.2

такое их распределение в матрице, которое влияло бы на взаимодействие между «носиками» диффузионного пламени, присоединенного к соседним крупным частицам ПХА. Взаимодействие пламен рассматривается в виде трехмерных процессов массопереноса реагентов к пламени и теплопередачи от него к горячей поверхности через границы раздела между соседними крупными частицами ПХА. Максимальное взаимодействие, обнаруживаемое по высоким локальным скоростям горения, происходит при условии расположения крупных частиц на оптимальном расстоянии друг от друга. Максимальное взаимодействие (при оптимальном расположении) может далее усиливаться за счет пламени матрицы, если только эффекты движения расплавленного слоя связующего не вызовут его погасания в диапазоне средних давлений. При увеличении давления погасание пламени матрицы уменьшает взаимодействие «носиков» диффузионного пламени (или не дает ему возрасти), обуславливая падение (или приблизительное постоянство) скорости горения при увеличении давления. Это приводит к появлению плато при низких давлениях. Заметим, что уменьшение взаимодействия «носиков» диффузионных пла-

мен (или отсутствие его усиления) благодаря погасанию пламени матрицы происходит тогда, когда расстояние между крупными частицами оптимально для максимального взаимодействия. Более того, при увеличении давления оптимальное расстояние между соседними крупными частицами, приводящее к максимальному взаимодействию диффузионных пламен, уменьшается [14]. Поскольку размер крупных частиц ПХА однозначно определяет расстояние между ними, то для таких частиц плато на зависимости $u(p)$ наблюдается при давлениях, соответствующих оптимальному расстоянию между частицами. Это происходит внутри диапазона давлений, где наблюдается погасание матрицы.

Полученные результаты показывают, что диапазон давлений, в котором наблюдается плато при низких давлениях, сдвигается в область более высоких давлений с увеличением размера крупной фракции частиц ПХА, другие параметры топлива при этом обычно сохраняются теми же самыми. Это видно, например, из рис. 3, б для случая топливных составов с тремя размерами частиц крупной фракции ПХА (315, 450 и 550 мкм), перемешанных с матрицей, содержащей частицы ПХА размером 5 мкм при соотношении 60/40 между этой фракцией ПХА и связующим. С увеличением размера крупных частиц ПХА расстояние между ними в микроструктуре топлива увеличивается. Это обусловлено тем, что при увеличении размера частицы общее количество частиц уменьшается. Следовательно, частицы располагаются на увеличенных расстояниях друг от друга на данном участке поверхности горения. С уменьшением размера частиц крупной фракции при повышенных давлениях обеспечивается оптимальное расстояние и, следовательно, максимальное взаимодействие «носиков» диффузионных пламен окислителя и горючего. При этих давлениях вероятность погасания пламени матрицы в промежутке между крупными частицами окислителя становится большой, что приводит к появлению плато на зависимости $u(p)$.

Результаты данного исследования еще раз подчеркивают решающую роль размера частиц крупной фракции ПХА в образовании обоих участков плато (при низком и высоком давлении), как было указано в более ранних исследованиях [13, 14] на основе ограниченных данных по горению топлив. Для получения

плато при низком давлении расстояние между соседними крупными частицами ПХА должно быть не меньше расстояния, необходимого для максимального взаимодействия диффузионных пламен, существующих вокруг частиц, т. е. размер крупных частиц ПХА должен быть не слишком мал, а размер и содержание мелких частиц ПХА — достаточно малыми, чтобы обеспечить погасание матрицы при средних уровнях давления [13]. С другой стороны, для существования плато при высоком давлении требуется, чтобы расстояние между частицами не превышало расстояния, необходимого для максимального взаимодействия пламен, присоединенных к этим частицам, т. е. крупные частицы ПХА должны быть не слишком большого размера [14]. В настоящей работе, например, установлено, что использование частиц размером 100 мкм в качестве крупной фракции ПХА приводит к полному исчезновению плато при низком давлении (см. рис. 3, а).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предыдущих работах [13, 14] был обрисован в общих чертах (хотя и на основе ограниченного количества данных по топливам) подход к выбору составов топлив, которые имеют плато на зависимости скорости горения от давления в различных диапазонах давлений. Этот подход включает в себя поиск входящих в состав топлив матриц (смесей горючего и мелких частиц ПХА), не поддерживающих горение в среднем диапазоне давлений, чтобы определить топливные составы, которые могут иметь плато на зависимости скорости горения от давления в соответствующих диапазонах давлений. В данной работе изучено горение десяти топливных составов. Показана возможность создания топлив, для которых путем подбора подходящего сочетания матрицы и крупных частиц ПХА можно целенаправленно выбирать диапазоны давлений, в которых реализуется плато на зависимости скорости горения от давления.

Работа поддержана Управлением военных исследований Индии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sutton G. P.** Rocket Propulsion Elements. 7th ed. NY: John Wiley, 1992.
2. **Denison M. R., Baum E.** A simplified model of unstable burning in solid propellants // Amer. Rocket Soc. J. 1961. V. 31. P. 1112–1122.
3. **Bastress E. K.** Modification of the burning rates of ammonium perchlorate solid propellants by particle size: Ph. D. Thesis / Princeton Univ. Princeton, NJ, USA, 1961.
4. **Steinz J. A., Stang P. L., Summerfield M.** Effects of oxidizer particle size on composite solid propellant burning: Normal burning, plateau burning, and intermediate pressure extinction // Aerospace and Mech. Sci. Report No 810. 1967. Guggenheim Laboratories for Aerospace Propulsion Sciences, Princeton Univ., Princeton, NJ, USA.
5. **Summerfield M., Sutherland G. S., Webb M. J., et al.** Burning mechanism of ammonium perchlorate propellants // Solid Propellant Rocket Research / M. Summerfield (Ed.). NY, USA: Academic Press, 1960. V. 1, ch. 6. P. 141–182. (ARS Progress in Astronautics and Rocketry).
6. **Miller R. R.** Anomalous ballistic behaviour of reduced smoke propellants with wide AP distributions // Proc. of the 15th JANNAF Combustion Meeting. Chemical Propulsion Information Agency, Laurel, MD, USA. 1979. Publ. 281(2). P. 265–269.
7. **Foster R. L., Miller R. R.** The influence of the fine AP/Binder matrix on composite propellant ballistic properties // Proc. of the 17th JANNAF Combustion Meeting. Chemical Propulsion Information Agency, Laurel, MD, USA. 1980. Publ. 329(3). P. 91–104.
8. **Renie J. P., Condon J. A., Osborn J. R.** Oxidizer size distribution effects on propellant combustion // AIAA Journal. 1979. V. 17, N 8. P. 877–883.
9. **Fong C. W., Smith R. F.** The relationship between plateau burning behaviour and ammonium perchlorate particle size in HTPB-AP composite propellant // Combust. Flame. 1987. V. 67. P. 235–247.
10. **Beckstead M. W., Derr R. L., Price C. F.** A model of composite solid-propellant combustion based on multiple flames // AIAA Journal. 1970. V. 8, N 12. P. 2200–2207.
11. **Yin J., Li B., Wang K., Chen B.** Combustion mechanism of a negative pressure-exponent composite solid propellant // J. Propulsion and Power. 1992. V. 8, N 1. P. 37–44.
12. **Chakravarthy S. R., Price E. W., Sigman R. K.** Binder melt flow effects in the combustion of AP-HC composite solid propellants // 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, San Diego, CA, USA. 1995. AIAA Paper. N 95-2710.
13. **Chakravarthy S. R., Seitzman J. M., Price E. W., Sigman R. K.** Intermittent burning of ammonium perchlorate-hydrocarbon binder monomodal matrixes, sandwiches, and propellants // J. Propulsion and Power. 2004. V. 20, N 1. P. 101–109.

14. **Chakravarthy S. R., Price E. W., Sigman R. K., Seitzman J. M.** Plateau burning behavior of ammonium perchlorate sandwiches and propellants at elevated pressures // J. Propulsion and Power. 2003. V. 19, N 1. P. 56–65.
15. **Chakravarthy S. R., Price E. W., Sigman R. K.** Mechanism of burning rate enhancement of composite solid propellants by ferric oxide // J. Propulsion and Power. 1997. V. 13, N 4. P. 471–480.
16. **Varney A. M., Strahle W. C.** Experimental combustion studies of two-dimensional ammonium perchlorate-binder sandwiches // Combust. Sci. Technol. 1972. V. 4. P. 197–208.
17. **Boggs T. L., Zurn D. E.** The deflagration of ammonium perchlorate-polymeric binder sandwich models // Ibid. P. 279–292.

Поступила в редакцию 20/IV 2006 г.
