

УДК 544.452

ПАСТООБРАЗНЫЕ ТОПЛИВА И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИХ ГОРЕНИЯ

В. А. Бабук, Д. И. Куклин, С. Ю. Нарыжный, А. А. Низяев

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова
190005 Санкт-Петербург, babuk_va@mail.ru

Проведено исследование процесса горения высокоэнергетического пастообразного топлива, предназначенного для создания двигателей с торцевой поверхностью горения топлива. Установлены закономерности, определяющие скорость горения, характеристики процесса агломерации, свойства поверхностного слоя. Показано, что эти закономерности близки к соответствующим закономерностям для твердых топлив на базе активного связующего с линейным полимером. Определены направления совершенствования данного типа топлив.

Ключевые слова: твердое топливо, пастообразное топливо, каркасный слой, агломерат, скорость горения, закон скорости горения.

DOI 10.15372/FGV20230215

ВВЕДЕНИЕ

Основным видом двигателей для изделий ракетно-космической техники являются химические двигатели [1]. В настоящее время в качестве подобных двигателей, как правило, используются жидкостные (ЖРД) и твердотопливные (РДТТ) двигатели. Возможной альтернативой ЖРД и РДТТ является двигатель на пастообразном топливе (ДПТ). Пастообразное топливо (ПТ) является аналогом смесового твердого топлива с неотвержденным связующим, обладающим реологическими свойствами, которые обеспечивают седиментационную устойчивость топлива. Для данных топлив отсутствуют требования по физико-механическим свойствам, предъявляемым к твердым топливам. Это обстоятельство приводит к возможности использования состава топлива и условий эксплуатации, обеспечивающих более высокое значение удельного импульса тяги (J_{sp}). Некоторым аналогом пастообразных топлив можно рассматривать гелеобразные топлива [2, 3].

Возможной областью использования ДПТ являются малогабаритные двигатели космического назначения (двигатели разгонных блоков малых космических аппаратов, тормозные двигатели, двигатели увода и т. д.) [4]. Использование подобных двигателей в составе космических систем делает весьма актуальной задачу

обеспечения высокого массового совершенства, т. е. минимизации массы двигателя. Применительно к малогабаритным двигателям наиболее целесообразным видом является двигатель с торцевой поверхностью горения.

В условиях использования ПТ в подобных двигателях к ним предъявляются следующие требования:

- доступность компонентов;
- обеспечение необходимых реологических свойств;
- высокие значения удельного импульса тяги и скорости горения;
- низкая зависимость скорости горения от давления;
- умеренный уровень агломерации.

Несмотря на то, что работы по созданию ПТ и двигателей на их основе начались достаточно давно, информация о процессе горения унитарных пастообразных топлив является крайне ограниченной. Авторы обзора [5], в котором рассматривается концепция использования ПТ в различных энергетических установках, указывают на недостаточную изученность процесса горения подобных топлив.

К настоящему времени достигнуты существенные успехи в создании ракетно-прямоточных двигателей на базе ПТ, и они отражены в монографии [6]. При этом ее авторы отмечают, что вопросы, связанные с описанием закона скорости горения и процесса агломерации (шлакообразования), остаются открытыми. Это обстоятельство требует проведения широкого круга экспериментальных работ по определению закона скорости

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-19-00044).

© Бабук В. А., Куклин Д. И., Нарыжный С. Ю., Низяев А. А., 2023.

горения и поиску решений минимизации шлакообразования в камере двигателя.

В общем случае вопросы изучения горения ПТ остаются открытыми, а как следствие, и вопросы прогнозирования закона скорости горения и характеристик процесса агломерации. Общепринятым считается значимость процесса шлакообразования в камере двигателя, который во многом определяется свойствами процесса агломерации металла. Указанные проблемы не решены до настоящего времени.

Предлагаемая работа посвящена изучению закономерностей горения унитарных пастообразных топлив, предназначенных для указанных выше двигателей космического назначения. Эти закономерности определяют скорость горения и характеристики процесса агломерации.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование включало в себя определение закона скорости горения и характеристик процесса агломерации применительно к высокоэнергетическому пастообразному топливу, а также свойств поверхностного слоя.

1.1. Состав топливной композиции

Для исследования выбрана топливная композиция, которая потенциально может быть использована при создании ДПТ указанного выше типа. Это топливо на базе активного связующего со следующими компонентами: связующее — перхлорат полиэтиленполиамин, пластифицированный этиленгликолем, (ХПЕПА-22Э); дисперсные компоненты — перхлорат аммония (ПХА), октоген (НМХ) и алюминий.

Для определения содержания компонентов и свойств продуктов сгорания была разработана оптимизационная процедура, базирующаяся на использовании термодинамического метода. В рамках этой процедуры отыскивается содержание компонентов, которое обеспечивает оптимальное значение одной из характеристик продуктов сгорания при выполнении некоторых функциональных и параметрических ограничений. В проведенных расчетах в качестве целевой функции рассматривалась величина J_{sp} при степени расширения сопла 100/0.5. Использовались два параметрических ограничения. Первое из них связано с содержанием металлического горючего, второе — с содержанием связующего.

Первое ограничение обусловлено негативными последствиями увеличения содержания Al (ростом потерь J_{sp}), второе — необходимостью обеспечения необходимых реологических свойств топлива.

Результаты расчета позволили получить следующие значения массовых концентраций компонентов: ХПЕПА-22Э — 21 %, ПХА — 30 %, НМХ — 28.27 %, Al — 20.73 %. Этому составу соответствует значение $J_{sp} = 2859$ м/с.

Отметим технологические приемы изготовления подобного состава. Первоначально осуществляется загущение ХПЕПА-22Э гидроксипропилцеллюлозой, после достижения требуемой вязкости добавляется металлическое горючее, а также ПХА и НМХ. На заключительной стадии все компоненты смешиваются. Смешение выполняется в условиях вакуума.

1.2. Определение закона скорости горения и характеристик процесса агломерации

Для проведения экспериментов изготавливались специальные образцы. Каждый образец представляет собой пластиковый стаканчик диаметром 8 мм, длиной 12 мм, заполненный исследуемым составом. Образцы сжигались в установке постоянного объема в среде азота. Воспламенение осуществлялось пластинкой твердого топлива и нихромовой проволокой, на которую подается электрический ток. Эксперименты проводились в диапазоне давлений 0.4 ÷ 6.5 МПа. В экспериментах осуществлялся отбор конденсированных продуктов с их последующим анализом и измерялось давление как функция времени — $p(t)$. Получаемые данные использовались для определения скорости горения r_b , а также характеристик процесса агломерации:

Z_m^a — массовая доля исходного металла топлива, участвующая в формировании агломератов,

η — массовая доля оксида в составе агломератов,

$f_m(D)$ — массовая функция плотности распределения агломератов по размерам,

D_{43} — среднемассовый размер агломератов, мкм.

Методика получения этих данных аналогична описанной в работах [7, 8]. Приведем ее краткое описание.

Скорость горения находили при использовании зависимости давления от времени. Информация о времени сгорания образца и геометрических размерах стаканчика обеспечи-

вала определение величины r_b в данном эксперименте.

Для отбора конденсированных продуктов в установке постоянного объема имеется футляр-коллектор, с помощью которого после сжигания собираются эти продукты. Гашение и «замораживание» частиц осуществлялось посредством взаимодействия струи продуктов сгорания с неподвижным инертным газом. Результаты проведенного анализа [7] позволили установить, что положение зоны «замораживания» относительно сечения невозмущенного потока (L_*) пропорционально характерному размеру потока: $L_* = kd_e$. Коэффициент пропорциональности зависит от вида инертного газа. В проводимых экспериментах характерным размером является диаметр стаканчика, а зона отбора располагается на расстоянии L_* относительно выходного сечения стаканчика.

После отбора конденсированных продуктов выделяли с помощью сит агломераты. Считается, что частицы размером больше максимального размера исходного металлического горючего являются агломератами. Далее определяли массу и параметры химического состава агломератов. Перед проведением каждого эксперимента находили массу образца топлива и массу металлического горючего в составе образца. Эта информация, а также данные о массе агломератов и содержании оксида в агломератах позволяют определить параметр Z_m^a . Отметим, что этот параметр является одной из важнейших характеристик процесса агломерации.

В настоящем исследовании для определения дисперсности агломератов использовался анализатор размеров частиц Bettersizer (версия BeVision S1) [9].

Учитывая, что в процессе горения имеет место перемещение поверхности горящего топлива и ее удаление от зоны отбора, характеристики агломератов могут меняться вследствие эволюции потока конденсированных продуктов. Для оценки влияния этого фактора использовались ранее разработанные математические и программные средства [10]. Было показано, что процесс эволюции оказывает незначительное влияние на свойства агломератов у поверхности горящего топлива. Например, величина Z_m^a уменьшается не более чем на 10 %.

Количество экспериментов при фиксированных условиях составляло 5–6. Доверитель-

ная вероятность при определении границ доверительных интервалов принималась равной 0.95.

1.3. Изучение свойств поверхностного слоя

Для качественного анализа свойств поверхностного слоя осуществлялось изучение остатков горения на подложках [8]. Эти подложки помещались в пластиковые стаканчики, и эксперименты проводились по ранее описанной схеме. Для изучения остатков, полученных при различных давлениях, использовался оптический микроскоп. Обращаем внимание на то, что речь идет об остатках горения, а не о продуктах гашения топлива.

2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

При реализации горения существенное значение имеет дисперсность компонентов. Параметры дисперсности исследуемого состава:

ПХА — соотношение мелкой и крупной фракций 35/65, мелкая фракция — менее 50 мкм, крупная — 110 ÷ 180 мкм;

НМХ — 160 ÷ 315 мкм;

А1 — АСД-4 (среднемассовый размер равен 10.1 мкм [11]).

2.1. Закон скорости горения

На рис. 1 приведена зависимость скорости горения разработанного состава от давления ($r_b(p)$). Измеренная скорость горения оказалась сравнительно небольшой, что обусловлено использованием топлива, горящего с торцевой поверхности, когда необходимый приход продуктов сгорания определяет диаметр двигателя. Этот уровень скорости горения не обеспечивает создания двигателей с массово-габаритными характеристиками, соответствующими двигательной установке высокого качества. Обычно задача создания подобного двигателя формулируется следующим образом: изготовление двигателя с минимальными массово-габаритными характеристиками при выполнении ряда ограничений, в частности по величине полного импульса тяги. Для увеличения скорости горения было принято решение о модификации ХПЭПА путем введения металл-органического ферроценсодержащего соединения — метилферроценилкетона (10 % от массы связующего), которое взаимодействует с аминными группами ХПЭПА. Это позволило существенно увеличить скорость горения (см.

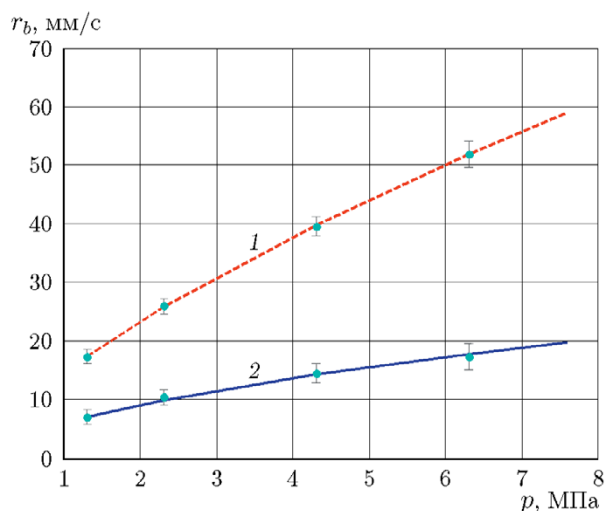


Рис. 1. Зависимость скорости горения топлива от давления:

1 — с каталитической добавкой, 2 — без каталитической добавки

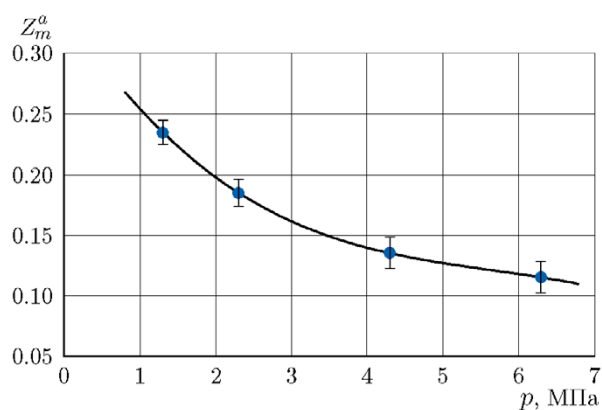


Рис. 2. Зависимость массовой доли металла, формирующего агломераты, от давления

рис. 1). Можно предположить, что модификация связующего как «инструмента» управления скоростью горения позволяет говорить о существенном влиянии горения связующего (монотоплива) на горение топлива в целом. Это предположение находится в соответствии с выводами работы [12]. В дальнейшем все эксперименты проводились для состава с каталитической добавкой, и полученные экспериментальные данные относятся к этому составу.

2.2. Характеристики процесса агломерации

На рис. 2–4 приведены зависимости $Z_m^a(p)$, $\eta(p)$, $D_{43}(p)$. Параметр Z_m^a монотонно убывает при увеличении давления. Содержание оксида в агломератах η , напротив, с ростом дав-

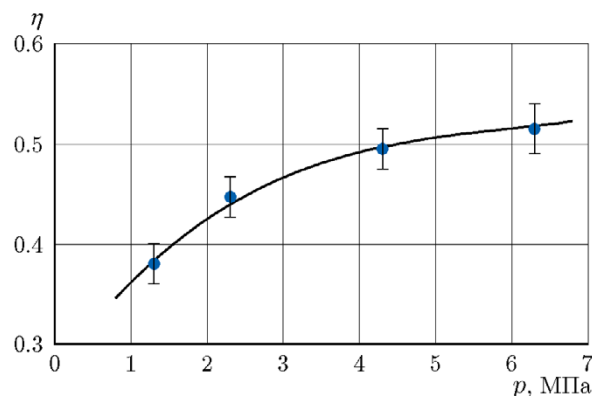


Рис. 3. Зависимость массовой доли оксида в агломератах от давления

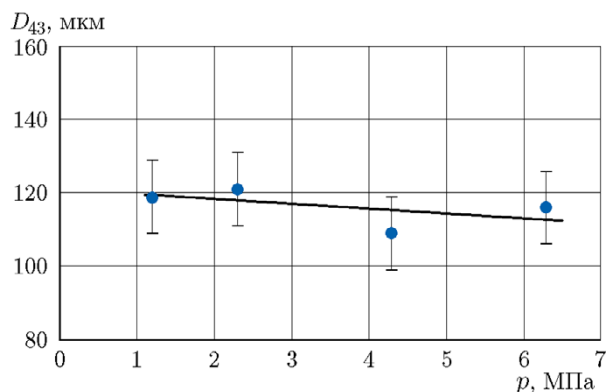


Рис. 4. Зависимость среднемассового размера агломератов от давления

ления возрастает. Среднемассовый размер D_{43} меняется незначительно и имеет тенденцию к уменьшению при увеличении давления. Функции $f_m(D)$, которые соответствуют единичным экспериментам, приведены на рис. 5. Обращает на себя внимание тот факт, что эти функции имеют одномодальный характер.

Общий вид агломератов показан на рис. 6. Ранее были выделены четыре основных типа агломератов: агломераты с «шапочкой» оксида («нашлепкой» оксида, «cap oxide»), «матричные» агломераты, «полые» агломераты и агломераты со сплошной пленкой оксида [13]. Для исследованного состава основным является первый тип агломератов, эпизодически фиксируются «полые» агломераты. Отличительная особенность агломератов исследованного состава заключается в наличии агломератов, которые представляют собой продукты неполного слияния частиц. Они состоят, как правило, из крупной частицы и сравнительно неболь-

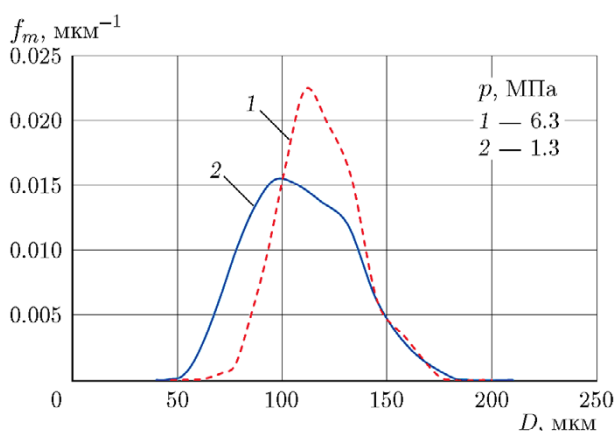


Рис. 5. Массовые функции плотности распределения агломератов по размеру в единичных экспериментах

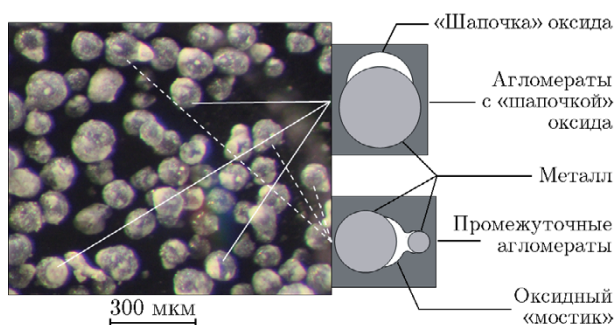


Рис. 6. Морфологические свойства агломератов при $p = 6.3$ МПа

шой частицы, соединенных оксидным «мостиком». Назовем данный тип агломератов промежуточным. Существуют основания полагать, что при движении в составе потока продуктов горения эти частицы перейдут в конечное равновесное состояние и образуют первый тип агломератов.

2.3. Структура поверхностного слоя

Структуру поверхностного слоя исследовали путем анализа остатков горения на инертных подложках. Считается, что эти остатки соответствуют специфической структуре поверхностного слоя, которая играет чрезвычайно важную роль в процессе горения топлива и получила название каркасного слоя (КС) [7, 8]. Проведенный анализ позволил установить следующее.

Каркасный слой занимает сравнительно малую часть поверхности топлива, свободную от частиц дисперсного окислителя. На верхней поверхности КС располагаются аг-

ломерирующие частицы. Наличие углеродистых элементов позволяет предположить близость свойств КС соответствующим структурам топлив класса А, т. е. топлив, при горении которых температура воспламенения металлического горючего меньше температуры разложения углеродистых элементов [8].

3. ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

В ранее выполненном исследовании [14] сделан важный вывод: при наличии линейного полимера закономерности горения твердых топлив на базе инертного связующего близки к соответствующим закономерностям пастообразных топлив на базе инертного связующего. В то же время при сетчатой структуре отвержденного полимера имеются существенные отличия [14]. В этой связи уместно сравнить полученные результаты и результаты работы [15], в которой исследовалось горение твердого топлива на базе активного связующего. Отличие исследованных в [15] составов и настоящей работы заключается в типе активного связующего, а также в содержании и дисперсности компонентов. Отметим, что коэффициент избытка окислительных элементов [16] в связующем исследованного состава составляет 0.291, что ниже, чем в работе [15].

Следует отметить, что ряд закономерностей для двух типов топлив имеют общий характер. Для твердых топлив на базе активного связующего выделены три характерные области давления, в пределах которых отличаются закономерности процесса агломерации: область низкого давления, область высокого давления, а также переходная область. Для пастообразного топлива на базе активного связующего фиксируются закономерности, характерные для твердых топлив в переходной области: с ростом давления падают значения параметра Z_m^a и увеличиваются значения параметра η . При этом отсутствует резкое увеличение дисперсности агломератов, диаметр D_{43} при повышении давления меняется незначительно. Зависимость скорости горения от давления является сравнительно высокой, что соответствует ситуации горения твердых топлив на базе активного связующего [15]. Таким образом, существуют основания считать закономерности горения исследуемого состава близкими к соответствующим закономерностям горения твер-

дых топлив на базе активного связующего. Отметим, что для составов, исследованных в работе [15], характерно наличие линейных полимеров.

Рассмотрим физические аспекты горения пастообразных топлив. Одним из важных проявлений процесса горения конденсированных систем, в том числе топлив данного класса, является образование каркасного слоя [14]. КС представляет собой газопроницаемую объемную структуру, которая состоит из углеродистых элементов, металла и его оксида и находится в поверхностном слое горящего топлива. Наличие или отсутствие КС и его свойства оказывают влияние как на скорость горения, так и на формирование конденсированных продуктов у поверхности горящего топлива.

Показано, что необходимым условием формирования КС является образование углеродистого каркаса [14, 15, 17]. На образование промежуточной структуры — углеродистого каркаса — оказывает влияние доля окислительных газов в смеси газов в области разложения системы связующее — металлическое горючее. При увеличении этой доли полнота превращения связующего в газообразные продукты возрастает и наоборот. Отметим, что данное положение позволяет прогнозировать долю металлического горючего, участвующего в агломерации, для твердых топлив на базе инертного связующего посредством определения относительного количества «межкарманных мостиков» [17, 18]. В этих структурных образованиях, представляющих собой узкие прослойки между частицами окислителя, в процессе горения имеет место повышенная концентрация окисляющих газов вследствие диффузии продуктов разложения (горения) частиц окислителя.

При использовании активного связующего возникают предпосылки для подавления образования углеродистого каркаса, а следовательно, и КС. Базируясь на современном экспериментальном материале [17], можно предположить, что с ростом давления увеличивается скорость образования кислородсодержащих газов при разложении связующего. Естественно, что особенности реализации этого явления зависят от свойств связующего (собственно полимера и пластификатора). Увеличение содержания окислительных газов в области разложения связующего приводит к росту полноты превращения конденсированной фазы в газовую.

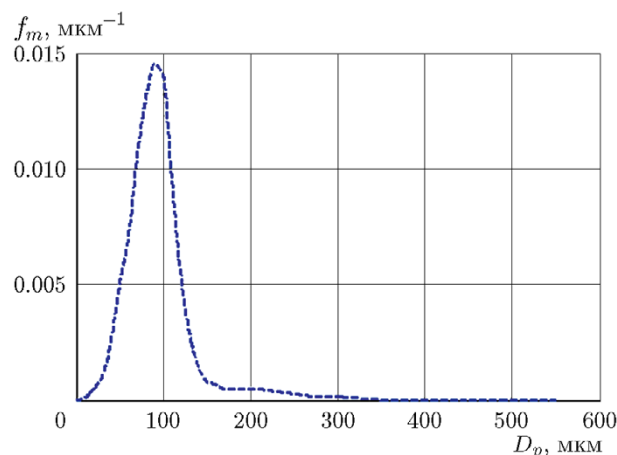


Рис. 7. Массовая функция плотности распределения «карманов» по размеру

Кроме того, полученные экспериментальные данные дают основания предположить, что на образование углеродистого каркаса (и КС) оказывает влияние и размер таких структурных образований, как «карман». На рис. 7 приведена массовая функция плотности распределения «карманов» по размерам для исследованного состава, полученная при использовании ранее разработанных математических и программных средств [19]. (Считается, что в формировании «карманов» участвуют частицы как ПХА, так и НМХ.) Размер «карманов» для исследованного состава сравнительно небольшой, среднемассовый размер равен 104 мкм, массовая доля «карманов» в системе связующее — металлическое горючее составляет 0.7. По-видимому, можно говорить, что основную массу «карманов» не затрагивает образование КС, следовательно, формирование агломератов происходит только в крупной фракции «карманов». Таким образом, процесс агломерации связан только с крупной фракцией «карманов». В пределах таких «карманов» идет формирование КС, при этом с ростом давления этот процесс частично подавляется, что приводит к уменьшению параметра Z_m^a .

Можно полагать, что при увеличении давления возрастает доля агломерирующего металла, реагирующего в гетерогенном режиме, при котором взаимодействие металла с окислительными газами происходит на поверхности частиц, где и формируется оксид. Действительно, продолжительность этой стадии горения определяется промежутком времени от момента воспламенения частиц до момента до-

стижения температуры перехода к газофазному горению. Последняя температура соответствует температуре вскипания вещества агломерирующих частиц, которая растет при увеличении давления. Это обстоятельство приводит к росту содержания оксида в агломератах.

Сравнительно малое изменение дисперсности агломератов с ростом давления и вид функции распределения агломератов по размеру дают основания предположить, что механизм агломерации близок к «карманному». Особенно реализации этого механизма заключаются в следующем.

При выработке каждого «кармана» происходит формирование одного агломерата. Таким образом, конденсированные компоненты «кармана» (металл и оксид) являются исходным «материалом» для образования агломерата. Увеличение давления приводит к некоторому подавлению образования КС и, следовательно, к уменьшению этого количества. Наличие КС является непрямым условием образования агломератов [16, 17]. Можно предположить, что в пределах «карманов» имеет место фрагментация КС и возможно образование агломерирующих частиц, соответствующих этим фрагментам. Эти частицы могут контактировать между собой на последней стадии формирования агломератов, вследствие чего образуются агломераты, которые не являются продуктом полного слияния жидких частиц, «промежуточных» агломератов.

Увеличение содержания оксида в составе агломератов с ростом давления делает достаточно вероятным образование газовых полостей в составе агломератов. Данное явление описано в работе [18]. Это обстоятельство приводит к тому, что размер агломератов, несмотря на уменьшение параметра Z_m^a , который определяет массу агломератов, при увеличении давления не меняется заметно в зависимости от давления.

Для скорости горения исследованного состава характерна существенная зависимость от давления. Показатель ν в законе скорости горения ($r_b = u_1 p^\nu$, где u_1 — константа скорости горения) составляет ≈ 0.7 . Это значение ν близко к соответствующим значениям, полученным при исследовании горения твердых топлив на базе активного связующего в переходной области и области высоких давлений ($\nu = 0.7 \div 0.8$) [15]. Есть основания полагать, что в значительной мере подобный характер за-

висимости $r_b = u_1 p^\nu$ связан с особенностями формирования КС для рассматриваемого состава. Образование КС снижает зависимость скорости горения от давления [14].

Высокая зависимость скорости горения от давления является негативным фактором для рассматриваемых топлив. Одно из направлений совершенствования качества пастообразных топлив — это поиск добавок, которые, воздействуя на формирование КС, несущественно увеличивают интенсивность агломерации и приводят к падению показателя ν . Результаты исследования горения твердых топлив на базе активного связующего [20] позволяют надеяться на решение этой задачи. Использование добавок, не снижающих энергетическую эффективность топлива, позволило уменьшить показатель ν с 0.7 до 0.4 (!). Учитывая сходство процессов горения твердых и пастообразных топлив, можно предположить, что найдутся рецептурные решения, которые позволят снизить показатель ν при обеспечении приемлемого уровня агломерации, который определяется степенью вовлеченности металлического горючего в агломерационный процесс и дисперсностью агломератов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного исследования предложен состав пастообразного топлива, для которого характерны высокие значения скорости горения и удельного импульса тяги, что обеспечивает возможность создания высокоэффективных двигателей.

В процессе исследования горения установлено, что закономерности горения предложенного состава, определяющие скорость горения и характеристики процесса агломерации, близки к соответствующим закономерностям для твердых топлив на базе активного связующего при наличии линейного полимера. Это обстоятельство позволяет использовать опыт исследования процесса горения твердых топлив для создания высокоэффективных пастообразных топлив. Отличительной особенностью горения пастообразного топлива является реализация механизма агломерации, близкого к «карманному», который затрагивает крупную фракцию «карманов».

Установлен характер влияния структуры топлива и характеристик компонентов на процесс агломерации. Определено, что для рассматриваемых топлив существенное влияние

на скорость горения оказывает горение связующего. Можно полагать, что рецептурные решения, обеспечивающие регулирование закона горения связующего, позволят управлять законом горения топлива в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. DeLuca L. T., Shimada T., Sinditskii V. P., Calabro M., Manzara A. P. An introduction to energetic materials for propulsion // Chem. Rocket Propul. — 2017. — P. 3–59. — DOI: 10.1007/978-3-319-27748-6_1.
2. Padwal M. B., Natan B., Mishra D. P. Gel propellants // Prog. Energy Combust. Sci. — 2021. — V. 83. — 100885. — DOI: 10.1016/j.pecs.2020.100885.
3. Kunin A., Natan B., Greenberg J. B. Theoretical model of the transient combustion of organic-gellant-based gel fuel droplets // J. Propul. Power. — 2010. — V. 26, N 4. — P. 765–771. — DOI: 10.2514/1.41705.
4. Беляев Н. М., Белик Н. П., Уваров Е. И. Реактивные системы управления космическими летательными аппаратами. — М.: Машиностроение, 1979.
5. Мелешко В. Ю., Павловец Г. Я., Гладышев А. И., Булавский А. С. Состояние и направления разработки пастообразных топливных композиций для прямоточных воздушно-реактивных двигателей ракетных и артиллерийских систем // Изв. РАН. — 2022. — Вып. 121. — С. 121–127.
6. Сорокин В. А., Яновский Л. С., Козлов В. А., Суриков Е. В., Шаров М. С., Фельдман В. Д., Франкевич В. П., Животов Н. П., Абашеев В. М., Червяков В. В. Ракетно-прямоточные двигатели на твердых и пастообразных топливах. Основы проектирования и экспериментальной отработки. — М.: Физматлит, 2010.
7. Babuk V. A., Vasilyev V. A., Malakhov M. S. Condensed combustion products at the burning surface of aluminized solid propellant // J. Propul. Power. — 1999. — V. 15, N 6. — P. 783–794. — DOI: 10.2514/2.5497.
8. Babuk V. A., Vassilyev V. A., Sviridov V. V. Formation of condensed combustion products at the burning surface of solid rocket propellant // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 2000. — V. 185. — P. 749–776. — DOI: 10.2514/5.9781600866562.0749.0776.
9. Анализатор размеров частиц Bettersize. — <https://www.bettersizeinstruments.com/>.
10. Babuk V. A., Nizyaev A. A. Modeling of evolution of the coarse fraction of condensed combustion products on a surface of burning aluminized propellant and within a combustion products flow // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 2017. — V. 16, N 1. — P. 23–38. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.2017021173.
11. Ягодников Д. А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
12. Павловец Г. Я., Мелешко В. Ю., Булавский А. С., Бурдикова Т. В. Возможности регулирования баллистических характеристик пастообразных энергоемких композитов // Сб. тр. X Всерос. конф. «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твердом топливе и ствольных системах (ICOC'2020)». — 2020. — С. 235–239.
13. Бабук В. А., Низяев А. А. К вопросу о формировании «полых» агломератов при горении смесевых твердых топлив // Хим. физика и мезоскопия. — 2016. — Т. 18, № 1. — С. 5–16.
14. Бабук В. А., Будный Н. Л., Кушлин Д. И., Нарыжный С. Ю., Низяев А. А. Промежуточные структуры в процессе горения высокоэнергетических конденсированных систем // Физика горения и взрыва. — 2022. — Т. 58, № 4. — С. 16–23. — DOI: 10.15372/FGV20220402.
15. Babuk V. A., Dolotkazin I. N., Glebov A. A. Burning mechanism of aluminized solid rocket propellants based on energetic binders // Propel., Explos., Pyrotech. — 2005. — V. 30, N 4. — P. 281–290. — DOI: 10.1002/prop.200500012.
16. Алемасов В. Е., Дрегаллин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. — М.: Машиностроение, 1980.
17. Babuk V. A. Formulation factors and properties of condensed combustion products // Chem. Rocket Propul. — 2017. — P. 319–339. — DOI: 10.1007/978-3-319-27748-6_13.
18. Бабук В. А. Свойства поверхностного слоя и закономерности горения металлизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. — 2009. — Т. 45, № 4. — С. 156–165.
19. Бабук В. А., Низяев А. А. Моделирование структуры смесевых твердых топлив и проблема описания процесса агломерации // Хим. физика и мезоскопия. — 2014. — Т. 16, № 1. — С. 31–42.
20. Lengelle G., Duterque J., Trubert J. Physico-chemical mechanisms of solid propellant combustion // Prog. Astronaut. Aeronaut. — 2000. — V. 185. — P. 287–334. — DOI: 10.2514/5.9781600866562.0287.0334.

Поступила в редакцию 22.04.2022.

После доработки 31.08.2022.

Принята к публикации 07.09.2022.