

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АГЛОМЕРАЦИИ ПРИ ГОРЕНИИ АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ТВЕРДЫХ ТОПЛИВ В ПОЛЕ ПЕРЕГРУЗОК

В. А. Бабук, В. А. Васильев, А. Н. Потехин

Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова
190005 Санкт-Петербург, babuk@peterlink.ru

Экспериментально исследован процесс агломерации при горении твердых ракетных топлив в поле перегрузок при значении перегрузки, не превышающем 60. Эксперименты проведены в условиях варьирования направления и величины перегрузки. Определены количество, химический состав, дисперсность агломератов, а также структура поверхностного слоя в зависимости от величины и направления перегрузки. Наиболее существенной особенностью действия отрывающих перегрузок является рост массы агломератов вплоть до некоторого предельного значения, а действия прижимающих перегрузок — образование на поверхности горящего топлива слоя конденсированных продуктов. Полученные данные позволили уточнить общую физическую картину формирования агломератов и горения алюминизированных топлив, а также определить круг проблем при функционировании двигателей в летных условиях в связи с наличием конденсированных продуктов сгорания.

Ключевые слова: перегрузка, сила инерции, агломерация, скорость горения, твердое топливо, металлическое горючее.

ВВЕДЕНИЕ

В полетных условиях горение твердого ракетного топлива в камере двигателя осуществляется при воздействии перегрузок. Чаще всего их появление связано с поступательным движением летательного аппарата. Перегрузки могут оказывать влияние на процесс горения топлива, в том числе и на агломерацию металлического горючего. Последнее изучено крайне слабо. Данное обстоятельство стимулировало выполнение настоящей работы, посвященной исследованию влияния перегрузок на агломерацию при поступательном движении и величине перегрузок не выше 60.

Количество экспериментальных работ, посвященных данной проблеме, невелико. Выполнен ряд исследований скорости горения в условиях действия перегрузок [1–6], в которых эффект воздействия перегрузок в той или иной мере связывается с поведением конденсированных продуктов в поверхностном слое и у поверхности горящего топлива. Можно считать общепризнанным, что нормальные прижимающие перегрузки способствуют удержанию конденсированных продуктов на поверхности горящего топлива, что приводит в предельном случае к образованию жидкого слоя на этой поверхности. В работе В. Л. Дайкса и Д. А. Бал-

вина (цитируется по [7]) была предпринята попытка найти количественную связь между величиной перегрузки и дисперсностью агломератов. Показано, что характер этой зависимости определяется свойствами окислителя и исходного металлического порошка. Но в основном во всех процитированных работах определялись качественные характеристики влияния перегрузок на параметры процесса агломерации.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы топлива сжигались в установке постоянного объема, заполняемой инертным газом, которая устанавливалась на центрифуге. Изменение скорости вращения центрифуги и положения на ней установки позволяло варьировать величину и направление перегрузки. Длина плеча балки центрифуги составляла 0.5 м, максимальная скорость вращения обеспечивала перегрузку величиной $n_g = 57$. Поскольку влияние перегрузки на агломерацию связано с появлением дополнительных сил, действующих на частицы, была проведена оценка силы Кориолиса, возникающей в условиях эксперимента и отсутствующей при поступательном движении. Установлено, что этой силой в сравнении с другими силами можно пре-

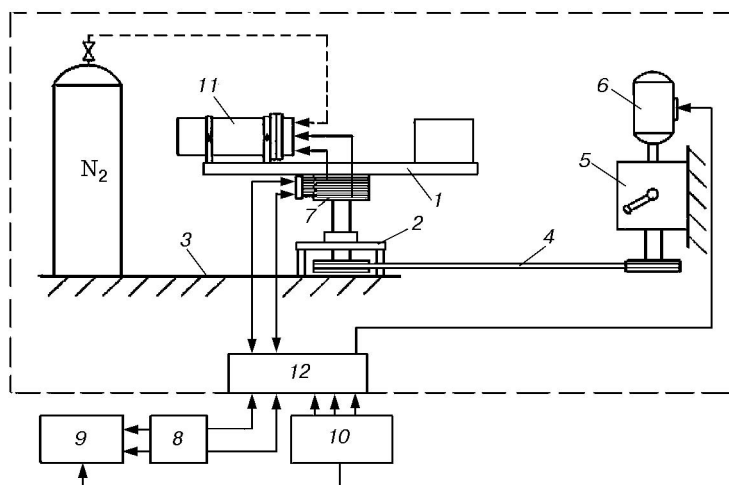


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — балка, 2 — основание с подшипниками, 3 — стапель, 4 — ременная передача, 5 — редуктор, 6 — электродвигатель, 7 — токосъемник, 8 — усилитель-преобразователь, 9 — компьютер, 10 — пульт управления, 11 — установка постоянного объема, 12 — согласующее устройство

небрежь. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

В установке осуществлялся отбор конденсированных продуктов сгорания, формирующихся в надповерхностной зоне газовой фазы, и проводилось изучение остатков горения на различных подложках. Методика исследования процесса горения на этой установке описана в работах [8–11]. Остановимся кратко на основных принципах отбора и анализа конденсированных продуктов.

После сгорания образца топлива собираются практически все конденсированные продукты горения — не менее 95 % по массе. Эти продукты состоят из агломератов и частиц высокодисперсного оксида. Указанные фракции частиц изучаются отдельно. Для агломератов определяются масса, дисперсность, параметры химического состава и внутреннего строения, для высокодисперсного оксида — те же характеристики, кроме параметров внутреннего строения. В основе разделения фракций (агломераты/высокодисперсный оксид) лежит анализ функции распределения всех частиц по размерам при использовании принципа, в соответствии с которым размер агломератов не может быть меньше размера частиц исходного металлического горючего.

Остатки горения на подложках подвергаются визуальному анализу, кроме того, определяются их масса и химический состав.

Пространственное положение зоны «замо-

раживания» частиц, т. е. зоны, при достижении которой частицы переходят в твердое состояние, зависит от размера образца. Расстояние «замораживания» увеличивается с ростом размера образца. При исследовании свойств конденсированных продуктов у поверхности горящего топлива, как правило, использовались образцы торцевого горения размером $5 \times 5 \times 15$ мм. Воспламенение осуществлялось пластинкой из того же топлива толщиной $\approx 0.8 \div 1$ мм, на которую наматывалась проволока из нихрома.

В настоящей работе из всей совокупности конденсированных продуктов сгорания изучались только агломераты. Кроме того, по характеру изменения во времени давления в установке определялась скорость горения топлива. Исследованный диапазон давлений составлял $p = 1.0 \div 8.0$ МПа.

Методика была несколько изменена для случая действия прижимающих перегрузок, когда существует принципиальная возможность накопления конденсированных продуктов на поверхности горящего топлива. В этих условиях применялись цилиндрические образцы торцевого горения диаметром 15 мм со сводом горения $2 \div 14$ мм, которые вклеивались в плексигласовые стаканчики.

В экспериментах, помимо скорости горения, определялись также следующие характеристики процесса:

- δ_{43} — среднемассовый размер агломератов;
- $f_m(\delta)$ — массовая функция плотности распре-

деления агломератов по размерам;

- Z_m — массовая доля исходного металлического горючего в составе металла агломератов;
- Z_m^a — массовая доля исходного металлического горючего в составе металла и оксида агломератов;
- Z_m^{ox} — массовая доля исходного металлического горючего в составе оксида агломератов;
- Z_m^{sl} — массовая доля исходного металлического горючего в составе остатков горения.

При обработке экспериментальных данных использовалось достаточно высокое значение доверительной вероятности — 0.997.

Информацию качественного характера получали из анализа фотографий отобранных частиц, их шлифов, а также остатков продуктов горения на подложках.

В экспериментах использовались модельные составы на основе неактивного и малоактивного связующего с содержанием алюминия 20 ÷ 24 %. В качестве дисперсного окислителя использовались перхлорат аммония и октоген (низкоокислородный окислитель). Как показал анализ, одну часть этих составов можно отнести к топливам класса А, другую — к топливам класса В (по терминологии работы [9]). Первые отличаются тем, что температура воспламенения металлического горючего в них ниже температуры разложения углеродистых элементов топлива, во вторых наблюдается обратная ситуация.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

При анализе экспериментальных данных по влиянию перегрузок на процесс агломерации целесообразно выделить две ситуации: действие отрывающих и касательных перегрузок и действие прижимающих перегрузок.

Очевидно, что влияние перегрузки на формирование агломератов в поверхностном слое горящего топлива связано с появлением дополнительной силы, действующей на элементы этого слоя, — массовой силы. Ее величина зависит от значения перегрузки и размера данных элементов, поэтому в дальнейшем целесообразно акцентировать внимание на размере агломератов, образующихся при горении неподвижного топлива (δ^*), т. е. на свойствах топлива и уровне перегрузки.

Отметим особенности внутреннего строения агломератов, которые являются общи-

ми при различных направлениях перегрузки. Практически все образующиеся агломераты представляют собой совокупность двух капель: металла и оксида, формирующих систему, свойства которой близки к свойствам равновесной системы [8–10].

2.1. Отрывающие и касательные перегрузки

Для топлив класса А при среднемассовом размере агломератов при горении неподвижного образца топлива $\delta_{43}^* \leq 500$ мкм и перегрузке $n_g < 35$ влияние перегрузок на дисперсность агломератов практически отсутствует. При $\delta_{43}^* > 500$ мкм действие касательных перегрузок приводит к некоторой интенсификации слияния частиц, принадлежащих различным «карманам» [9], и, как следствие, к увеличению размера агломератов. (Среднемассовый размер агломератов увеличивается на 10 ÷ 15 %.)

При горении топлив класса В [9] в случае, когда $\delta_{43}^* < 500$ мкм и $n_g < 35$, перегрузка также практически не оказывает влияния на дисперсность агломератов. Установлено, что действие перегрузок препятствует образованию агломератов по «межкарманному» механизму [9].

Применительно ко всем топливам действие перегрузок приводит к увеличению массы агломератов (рис. 2). Абсолютное количество оксида в агломератах остается практически неизменным, т. е. параметр Z_m^{ox} не изменяется. Характер полученных данных свидетельствует, что при увеличении перегрузки масса

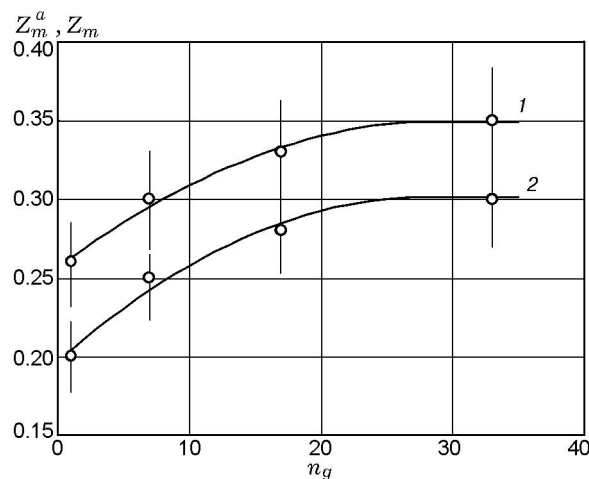


Рис. 2. Зависимости $Z_m^a(n_g)$ (1) и $Z_m(n_g)$ (2) ($p = 6.0$ МПа) при действии отрывающих перегрузок

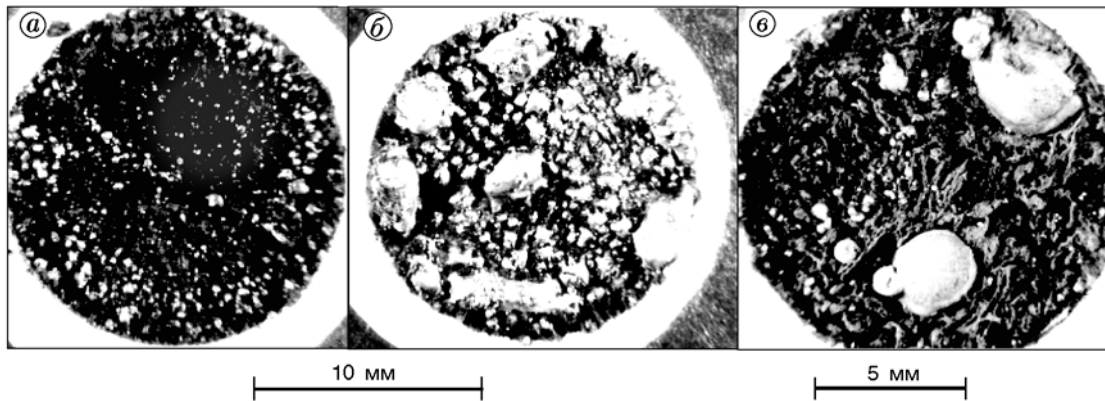


Рис. 3. Верхняя часть каркасного слоя для одного из исследованных составов ($p = 6.0$ МПа):
 а — $n_g = 17$, $e = 2.2$ мм; б — $n_g = 17$, $e = 9$ мм; в — $n_g = 55$, $e = 2.7$ мм

металла агломератов стремится к некоторому постоянному значению.

Приведенные результаты свидетельствуют о влиянии перегрузок на степень сгорания металла агломератов в газофазном режиме с образованием высокодисперсного оксида. (Происходит перераспределение металла между металлом агломератов и металлом, идущим на образование высокодисперсного оксида.) В общем случае указанное явление может быть связано с горением либо в газовой фазе до зоны «замораживания», либо в поверхностном слое. Вопрос о месте сгорания представляется очень важным. Для ответа на него были выполнены следующие работы. Во-первых, по модели эволюции агломератов в газовой фазе [12] были проведены расчеты параметров агломератов в надповерхностной зоне газовой фазы в условиях наличия и отсутствия перегрузок. Во-вторых, были проведены эксперименты при различных поперечных размерах образца топлива (3×3 , 5×5 , 10×10 мм), т. е. при различном расстоянии от поверхности образца до зоны «замораживания». Полученные результаты позволили сделать вывод, что рассматриваемое явление не может быть связано с движением агломератов в газовой фазе. Таким образом, перегрузки оказывают влияние на сгорание агломерирующего металла в пределах поверхностного слоя.

2.2. Прижимающие перегрузки

Наиболее существенной особенностью горения топлив в условиях действия данного вида перегрузок является возможность накопле-

ния конденсированных продуктов сгорания на поверхности горящего топлива, в результате чего образуется слой накопления. Очевидно, что интенсивность указанного процесса для данного топлива зависит от величины перегрузки и величины свода горения e . Фотографии, приведенные на рис. 3, иллюстрируют это утверждение. При реализации процесса накопления существуют две стадии.

На первой стадии накопления частицы, задерживаемые действием массовых сил на поверхности топлива, сохраняют свою индивидуальность. На данной стадии горения происхо-

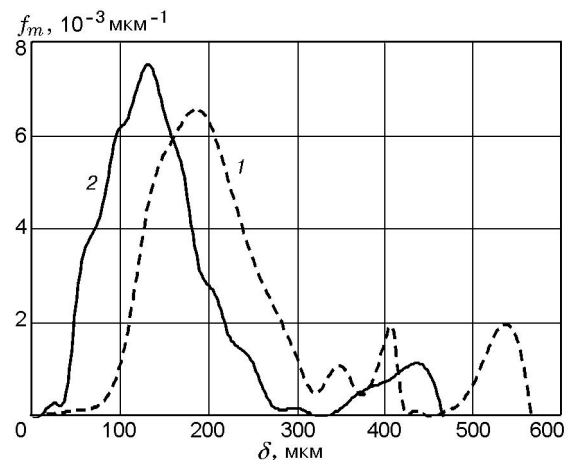


Рис. 4. Трансформация массовой функции плотности распределения агломератов по размерам под действием прижимающих перегрузок при $p = 6.0$ МПа:

1 — $n_g = 1$, $\delta_{43} = 236$ мкм; 2 — $n_g = 57$, $e = 2.4$ мм, $\delta_{43} = 159$ мкм

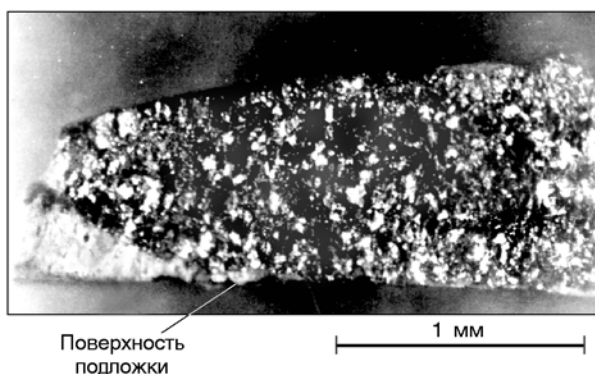
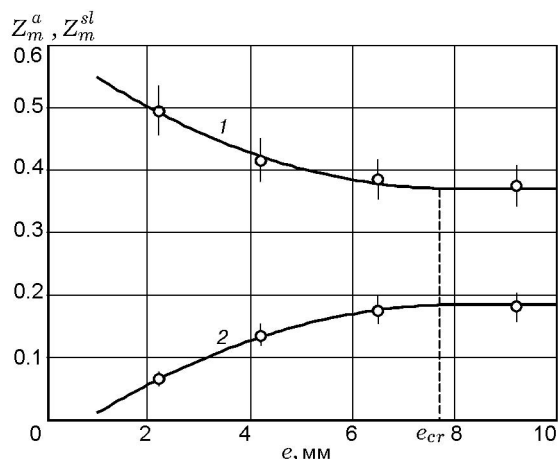


Рис. 5. Сечение слоя накопления

Рис. 6. Зависимости $Z_m^a(e)$ (1), $Z_m^{sl}(e)$ (2) при $p = 6.0$ МПа, $n_g = 17$:

при $e > e_{cr}$ начинается вторая стадия накопления

дит своеобразная сепарация наиболее крупных частиц, что приводит к некоторому уменьшению размера агломератов (рис. 4). Кроме того, для данной стадии характерно уменьшение во времени доли металла, формирующего агломераты (параметра Z_m^a), т. е. можно говорить, что потенциальные агломераты задерживаются в поверхностном слое топлива. Первая стадия завершается образованием сплошного слоя конденсированных продуктов — слоя накопления на поверхности горящего топлива (рис. 5). После этого начинается вторая стадия накопления, для которой характерны увеличение абсолютного количества веществ в слое накопления и постоянство значений долей металла, формирующего агломераты и конденсированные продукты поверхностного слоя (параметров Z_m^a и Z_m^{sl}) (рис. 6). Абсолютное количество вещества

в слое накопления (конденсированных продуктов) в момент перехода от первой стадии накопления ко второй приблизительно одинаково для различных топлив.

После начала второй стадии накопления размер агломератов возрастает и его можно считать близким к тому, который имеет место при горении в случае неподвижного топлива.

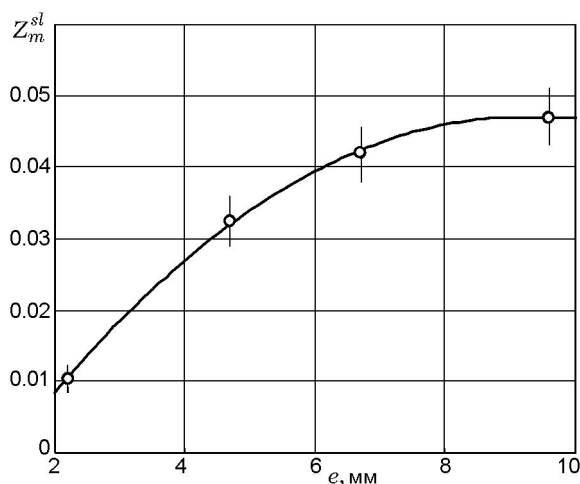
При наличии накопления скорость горения топлива возрастает по мере увеличения свода горения. Этот рост более существен на первой стадии в сравнении со второй и достигает $30 \div 40$ %.

Время перехода ко второй стадии накопления (величина свода горения, начиная с которого реализуется вторая стадия накопления (e_{cr})) зависит от значения перегрузки и свойств топлива. При увеличении перегрузки и предрасположенности топлива к агломерации, а также при увеличении содержания металлического горючего в топливе значение e_{cr} уменьшается, и наоборот.

На рис. 7 приведена зависимость $Z_m^{sl}(e)$ при горении одного из составов, характеризующегося сравнительно низким значением Z_m^a в отсутствие перегрузок. Данная зависимость служит иллюстрацией растянутого характера первой стадии накопления при достаточно высоких перегрузках.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты позволяют лучше

Рис. 7. Зависимость $Z_m^{sl}(e)$ для состава с низким уровнем агломерации ($p = 6.0$ МПа, $n_g = 55$)

понять физическую природу агломерационного процесса и практические следствия влияния полетных условий для формирования конденсированных продуктов сгорания в камере сгорания двигателя.

Непременным условием формирования агломератов является образование в поверхностном слое топлива каркасного слоя — газопроницаемой объемной структуры, преимущественно состоящей из металла и его оксида, а также термостойких углеродистых элементов [8, 9 и др.]. Свойства каркасного слоя определяют количество, химический состав, внутреннее строение и дисперсность агломератов. Считается, что информацию о свойствах каркасного слоя можно получить при изучении остатков горения на подложках [8–10]. Образование агломератов происходит на верхней поверхности каркасного слоя. Их характеристики зависят от свойств «первичных» агломерирующих частиц (частиц, появляющихся на данной поверхности) и превращений на поверхности горящего топлива.

Установлено, что агломерирующие частицы участвуют в эволюционном процессе [10]. Под этим процессом понимается совокупность физико-химических превращений частиц за время их пребывания на верхней поверхности каркасного слоя. Данные превращения включают слияние частиц; горение металла агломерирующих частиц; химическое взаимодействие конденсированных Al и Al_2O_3 с образованием газообразных продуктов; изменение внутреннего строения.

Процесс эволюции агломерирующих частиц является аналогом эволюции агломератов в газовой фазе в составе потока продуктов сгорания [12].

Степень превращения агломерирующих частиц зависит от времени их пребывания на верхней поверхности каркасного слоя. На конечных стадиях эволюционного процесса происходит образование «полых» агломератов [10]. Если для топлив на основе нитрата аммония подобные агломераты могут быть основным типом, то для других топлив они фиксируются эпизодически.

При действии перегрузок появляется дополнительная сила, которая способна оказать влияние на эволюцию частиц, а следовательно, и на свойства агломератов.

При анализе характера этого влияния уместно остановиться на общих закономерностях

отрыва агломерирующих частиц от поверхности каркасного слоя. Данные частицы являются жидкими [8–9], и рассматриваемое явление эквивалентно отрыву капель под действием некоторой силы от поверхности, которую жидкость смачивает в той или иной мере. Возможны два равновесных положения капель [13]. В первом случае эти состояния определяются минимумом поверхностной энергии жидкости, взаимодействующей с газовой фазой и веществом поверхности, а во втором случае — суммой аналогичной поверхностной энергии и потенциальной энергии частицы в поле внешних сил [13, рис. 2]. (Анализ равновесных состояний является непременным условием изучения всех реальных процессов, в том числе и процесса формирования агломератов.)

Первое равновесное положение характерно для «первичных» частиц и для основного времени пребывания агломерирующих частиц на поверхности каркасного слоя. Второе положение или близкое к нему наступает непосредственно перед отрывом частиц от поверхности каркасного слоя.

Экспериментальные данные, в соответствии с которыми отрывающие и касательные перегрузки в большинстве случаев практически не влияют на дисперсность агломератов, дают основания утверждать следующее. Сила инерции, соизмеримая с аэродинамической силой, действующей на частицы, не играет определяющей роли при реализации отрыва, т. е. явления, наступающего в том случае, когда отрывающая сила превышает удерживающую силу. Таким образом, можно утверждать, что отрывающая сила неспособна совершить работу против сил адгезии или когезии и осуществить отрыв от поверхности каркасного слоя частицы, находящейся на этой поверхности в первом (или близком к нему) равновесном положении.

Учитывая полученные результаты, уместно обратиться к концепции, в соответствии с которой определяющее влияние на реализацию отрыва оказывают неоднородности каркасного слоя и динамика их возникновения в процессе горения [9, 13]. Именно появление неоднородностей способно привести к неравновесному состоянию, следствием которого в конечном итоге и является отрыв частицы.

В то же время сила инерции способна уменьшить подвижность частиц на поверхности каркасного слоя. Это обстоятельство мо-

жет оказывать влияние на возможность установления контактов между укрупняющимися частицами. Применительно к топливам класса В имеет место раскачивание этих частиц, что способствует в определенных условиях осуществлению «межкарманного» слияния [8]. Вследствие этого действие отрывающих и касательных перегрузок при горении топлив этого класса приводит к снижению интенсивности образования агломератов по «межкарманному» механизму.

С другой стороны, для топлив класса А при интенсивном протекании «межкарманного» слияния действие касательных перегрузок приводит к тому, что для частиц, находящихся во втором положении, возрастает вероятность того, что частицы становятся «принадлежностью» другого «кармана» и, как следствие, возрастает доля агломератов, образующихся по «межкарманному» механизму.

После воспламенения агломератов горение проходит в гетерогенном режиме, затем переходит в газофазный режим. Горение в первом режиме «ответственно» за образование оксида в составе агломератов. Если для топлив класса А горение в этом режиме осуществляется внутри каркасного слоя, то для топлив класса В — на верхней его поверхности. Переход горения в газофазный режим, как правило, совпадает с переходом частиц во второе положение, которое предшествует отрыву частиц от поверхности каркасного слоя [13]. Экспериментальные данные дают основание говорить о том, что действие отрывающих и касательных перегрузок способствует меньшему сгоранию агломерирующего металла в пределах каркасного слоя в газофазном режиме. По-видимому, речь идет о горении частиц, находящихся на стадии, непосредственно предшествующей отрыву. Следовательно, сила инерции способна уменьшить время пребывания на этой стадии, вследствие чего увеличивается количество активного металла в составе агломератов. При достаточно большой величине этой силы отрыв происходит настолько быстро, что горением металла на стадии отрыва можно пренебречь. Тем самым получено еще одно (косвенное) подтверждение того, что агломерирующий металл в пределах каркасного слоя горит в газофазном режиме, и в этом режиме может сгорать существенная его доля.

Таким образом, перегрузки рассматриваемого направления оказывают влияние на от-

рыв только частиц, находящихся во втором или близком к нему положении. В этой ситуации их влияние сводится в основном к влиянию на сгорание металла этих частиц в газофазном режиме.

Изменение размера агломератов на первой стадии накопления при действии прижимающих перегрузок является естественным следствием того, что само накопление связано с задержкой на поверхности каркасного слоя наиболее крупных частиц. После начала второй стадии накопления, когда образуется сплошной жидкий слой конденсированных продуктов, доля металлического горючего, идущего на формирование слоя накопления и агломератов, остается неизменной во времени.

Естественно, что слой накопления должен обеспечивать «транспорт» газообразных продуктов. Можно предположить следующий механизм удаления продуктов сгорания. Размер газовых пузырей, образующихся в процессе горения, растет, и по мере достижения поверхности пузыря внешней поверхности слоя накопления происходят их схлопывание и удаление газообразных продуктов. По-видимому, в пределах газовых пузырей условия для формирования агломератов близки к соответствующим условиям при отсутствии слоя накопления. Некоторое количество сравнительно крупных агломератов может формироваться и из вещества слоя накопления в момент прорыва пузыря. Описанная картина соответствует экспериментально наблюдаемым явлениям.

По мере увеличения толщины слоя накопления (свода горения заряда) можно предположить изменение механизма формирования как самого слоя, так и конденсированных продуктов, поставляемых в газовую фазу. При достижении достаточно большого размера пузыри могут всплывать и прорывать поверхность слоя накопления. (Как показали оценки, это наблюдается при диаметре пузыря свыше ≈ 50 мм, т. е. при весьма значительной толщине слоя накопления.) В результате становится возможным поглощение слоем накопления образующихся в пределах пузырей агломератов, обусловленное их инерционностью, и в газовую фазу горящего топлива будет поставляться только часть конденсированных продуктов сгорания — частицы высокодисперсного оксида. Таким образом, при значительных размерах заряда возможно существенное накопление конденсированных продуктов на по-

Характер влияния перегрузок на функционирование двигателя

Направление перегрузки	Основные следствия	Возможные проблемы
Отрывающие и касательные перегрузки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограниченный рост массы металла агломератов 2. Слабое влияние на дисперсность агломератов 	Рост шлакообразования в камере
Прижимающие перегрузки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Накопление конденсированных продуктов в поверхностном слое топлива 2. Рост скорости горения 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Рост шлакообразования в камере 2. Изменение во времени баллистических характеристик

верхности горящего топлива и изменение состава продуктов в газовой фазе.

Скорость горения топлива в общем случае определяется конкуренцией процессов тепловыделения и теплопоглощения в пределах области горения. Рост скорости горения при действии прижимающих перегрузок свидетельствует о необходимости учета тепловыделения, обусловленного горением агломерирующих частиц на верхней поверхности каркасного слоя.

Полученные результаты позволяют говорить и о возможных проблемах при функционировании двигателя, обусловленных агломерацией при исследованном уровне перегрузок (таблица).

Действие отрывающих и касательных перегрузок приводит к увеличению массы металла агломератов при несущественном изменении их дисперсности. Величина ΔZ_m^a (ΔZ_m), характеризующая прирост этой массы, имеет предельное значение. Оно зависит от свойств топлива и для исследованных составов может достигать 10 ÷ 15 %. В общем случае подобное увеличение количества и изменение химического состава агломератов способны приводить к интенсификации шлакообразования в камере — явления, посредством которого наиболее значимо проявляется влияние агломерации на функционирование двигателя.

Проблемы при действии прижимающих перегрузок связаны прежде всего с возможностью образования слоя накопления. Если действию данного вида перегрузки подвержена значительная доля поверхности топлива, к концу работы двигателя возможен рост шлаковых остатков. Кроме того, необходимо учитывать изменение во времени баллистических характеристик двигателя, вызванных изменением скорости горения топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненной работы позволили определить закономерности процесса агломерации в условиях действия перегрузок и последствия их реализации для функционирования двигателей в летных условиях. Они в основном сводятся к следующему.

- Отрывающие и касательные перегрузки несущественно влияют на дисперсность агломератов и приводят к росту количества металла в составе агломератов. Этот рост имеет предельное значение и может приводить к интенсификации процесса шлакообразования в камере двигателя.

- Наиболее существенными следствиями действия прижимающих перегрузок являются накопление конденсированных продуктов на поверхности горящего топлива, возможность образования сплошного слоя накопления и рост скорости горения топлива, что может приводить к росту шлакообразования в камере и к изменению во времени баллистических характеристик двигателя.

Кроме того, результаты работы дали возможность более полно понять общую физическую картину процессов в поверхностном слое топлива. К числу наиболее существенных из зафиксированных положений, на наш взгляд, следует отнести:

- наличие эволюции агломерирующих частиц на поверхности каркасного слоя, одним из проявлений которой является сгорание металла этих частиц в газофазном режиме с образованием высокодисперсного оксида;

- существенная роль неоднородностей каркасного слоя, возникающих в процессе горения, в реализации отрыва агломерирующих частиц от поверхности данного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марголин А. Д., Крупкин В. Г.** Влияние перегрузок на скорость горения составов, содержащих до 80 % алюминия // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14, № 3. С. 42–49.
2. **Орджоникидзе С. К., Марголин А. Д., Похил П. Ф., Уралов А. С.** Горение алюминизированных конденсированных систем при перегрузках // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7, № 4. С. 536–544.
3. **Crowe С. Т.** A unified model for acceleration produced burning rate augmentation of metalized solid propellants // Combust. Sci. Technol. 1972. V. 4, N 5. P. 55–60.
4. **Штурм, Райхенбах.** Скорость горения алюминизированных смесевых твердых топлив в поле ускорений // Ракетная техника и космонавтика. 1969. № 11. С. 50–58.
5. **Willoughly P., Baker K. L., Hermsen R. W.** Photographic study of solid propellants burning in acceleration environment // Proc. of the Intern. Symp. on Combustion, Washington, 1970. P. 1033–1045.
6. **Брандидж В. Н., Кавени Л.** Медленногорящие алюминизированные топлива в поле перегрузок // Аэрокосмическая техника. 1985. № 1. С. 47–58.
7. **Агломерация** дисперсной фазы при горении гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, Б. С. Шахиджанов, Б. Я. Кашпоров и др. М.: Машиностроение, 1981.
8. **Babuk V. A., Vasilyev V. A., Malakhov M. S.** Condensed combustion products at the burning surface of aluminized solid propellant // J. Propulsion and Power. 1999. V. 15, N 6. P. 783–793.
9. **Babuk V. A., Vassiliev V. A., Sviridov, V. V.** Formation of condensed combustion products at the burning surface of solid rocket propellant // Solid Propellant Chemistry, Combustion, and Motor Interior Ballistics / V. Yang, T. B. Brill, W. Z. Ren (Eds). (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 185). Reston, VA: AIAA, 2000. Ch. 2.21. P. 749–776.
10. **Babuk V. A., Vasilyev V. A., Glebov A. A., et al.** Combustion mechanisms of AN-based aluminized solid rocket propellants // Novel Energetic Materials and Applications / L. T. DeLuca, L. Galfetti, R. A. Pesce-Rodriguez (Eds). Grafiche GSS, Bergamo, Italy, Dec. 2004. P. 44-1–44-20.
11. **Бабук В. А.** Проблемы исследования образования высокодисперсного оксида при горении алюминизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 1. С. 45–53.
12. **Babuk V. A., Vasilyev V. A.** Model of aluminum agglomerate evolution in combustion products of solid rocket propellant // J. of Propulsion and Power. 2002. V. 18, N 4. P. 814–824.
13. **Бабук В. А., Долотказин И. Н., Свиридов В. В.** Моделирование дисперсности агломератов при горении алюминизированных твердых топлив // Физика горения и взрыва. 2003. Т. 39, № 2. С. 86–96.

*Поступила в редакцию 28/XII 2007 г.,
в окончательном варианте — 12/VIII 2008 г.*