

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ НИТРАТА ГИДРОКСИЛАММОНИЯ. МЕХАНИЗМ ГОРЕНИЯ И ПРИЛОЖЕНИЕ К РАКЕТНЫМ ДВИГАТЕЛЯМ МАЛОЙ ТЯГИ

Т. Кацуми¹, Х. Кодама¹, Т. Мацуо², Х. Огава³, Н. Цубои³, К. Хори³

¹Университет Токио, Япония, katsumi.toshiyuki@jaxa.jp

²ООО «Мицубиси», Нагасаки, Япония

³Институт космических и астронавтических наук, Канагава, Япония, hori.keiichi@jaxa.jp

В качестве альтернативы широко распространенному гидразину для двигателей с управляемой тягой разработано новое многообещающее монотопливо — композиция на основе нитрата гидроксиламмония, содержащая нитрат аммония, метанол и воду. По сравнению с гидразином композиция-раствор характеризуется на 20 % более высоким расчетным удельным импульсом, в 1.4 раза большей плотностью, более низкой температурой замерзания и меньшей токсичностью. Раствор имеет умеренную линейную скорость горения при давлениях, характерных для двигателей малой тяги. Обнаружено, что реализация линейной скорости горения (распространение волны горения) происходит вследствие специфических механизмов. Механизм горения раствора исследован с использованием видеосъемки и измерений профиля температур в волне горения термодарами диаметром 2.5 мкм. Результаты исследований показали, что нестабильность поверхности раздела жидкость — газ может приводить к внезапному значительному увеличению скорости горения, а метанол является эффективным компонентом, понижающим скорость роста пузырей в растворе. В опытах с горением в открытом сосуде оценена активность нескольких катализаторов; лучшим среди исследованных оказался катализатор S405, разработанный для гидразина. Эксперименты на модельном двигателе проведены с катализатором S405 при вариации массовой скорости подачи топлива, конфигурации слоя катализатора, соотношения длины и диаметра камеры сгорания. В результате выбраны параметры, обеспечивающее продолжительное время работы двигателя. Модельный двигатель непрерывно стабильно работал до 100 с с удельным импульсом $I_{sp} = 240$ с, что составляет 90 % от расчетного значения.

Ключевые слова: нитрат гидроксиламмония, метанол, скорость горения, термодарные измерения, слой катализатора, гидродинамическая неустойчивость, переходный процесс, монотопливо, двигатель с управляемой тягой.

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие смеси на основе нитрата гидроксиламмония ($[\text{NH}_2\text{OH}]\text{NO}_3$, hydroxyl ammonium nitrate — HAN) рассматриваются как перспективные кандидаты для использования в качестве монотоплива или жидкого окислителя для гибридного ракетного двигателя вследствие удобства хранения, экологичности, энергетической эффективности,

высокой плотности и сравнительно низкой температуры замерзания. Однако растворы на основе HAN зачастую демонстрируют экстремально высокую скорость горения, что иногда приводит к серьезным авариям [1]. Это сдерживает практическое применение растворов на основе HAN. Недавно было обнаружено, что введение метанола приводит к снижению скорости горения. При определенном соотношении компонентов состава HAN/нитрат аммония (AN)/вода/метанол имеют умеренные скорости горения и характеризуются приемлемыми значениями удельного импульса, плотности, вязкости, температуры плавления и реакционной способности в присутствии катализатора [2]. При этом такие растворы менее токсичны, чем гидразин, а по

Т. Katsumi¹, Н. Kodama¹, Т. Matsuo², Н. Ogawa³, Н. Tsuboi³, К. Hori³.

¹The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Sagamihara, Kanagawa 229-8510, Japan.

²Nagasaki Shipyard and Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Nagasaki 850-8610, Japan.

³Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), Sagamihara, Kanagawa 229-8510, Japan.

параметру ρI_{sp} (ρ — плотность, I_{sp} — удельный импульс) превосходят его [2]. Поэтому проводятся исследования возможности использования в двигателях малой тяги монотоплива на основе растворов HAN вместо гидразина.

Механизм горения растворов на основе HAN изучался на протяжении многих лет. В [3, 4] выявлена зависимость скорости разложения смесей HAN/H₂O от отношения плотностей продуктов и реагента. Оказалось, что при малых значениях этого отношения скорость разложения существенно зависит от его величины, а при больших значениях отношения такая зависимость отсутствует. Кроме того, скорость горения уменьшается с увеличением давления вплоть до $p = 26$ МПа, что обусловлено гидродинамической неустойчивостью. При $p > 26$ МПа скорость горения перестает зависеть от давления. В [5] предложена математическая модель горения растворов на основе HAN. Использован асимптотический подход, ранее успешно применявшийся для описания горения твердых топлив. Показано, что скорость горения раствора определяется разложением HAN в конденсированной фазе, однако при $p < 13$ МПа скорость горения контролируется гидродинамической неустойчивостью поверхности раздела жидкость — газ.

В [6] исследованы характеристики и механизм горения водного раствора HAN/глицин в диапазоне давлений 1.5 ÷ 14.5 МПа. Наличие точки излома на зависимости скорости горения от давления авторы [6] связывают с изменением механизма горения. В [7] показано, что характеристики процесса горения раствора HAN/AN/H₂O/метанол в диапазоне давлений 0.74 ÷ 7.3 МПа зависят от содержания воды и метанола и на зависимости скорости горения от давления также имеется точка излома, соответствующая изменению механизма горения при вариации давления.

Несмотря на предпринятые усилия, механизм горения растворов HAN полностью не выяснен, особенно в случае экстремально высоких скоростей горения. Нет также понимания эффекта снижения скорости горения при введении метанола. Цель данной работы — экспериментальное изучение механизма горения и построение модели горения таких растворов. В экспериментах основное внимание уделено измерению скорости горения и изменению структуры волны горения при добавке метанола. Проведены измерения температуры в волне горения

с применением тонких термопар (диаметром 2.5 мкм), регистрация волны горения видеокамерой с умеренно высокой частотой кадров, а также тестовые эксперименты по нагреву смесей с целью определения температуры начала экзотермической реакции. Для выявления влияния метанола использовались растворы как с метанолом, так и без него. На основе результатов экспериментов проведено обсуждение процессов испарения, химического реагирования и гидродинамической неустойчивости волны горения.

Процесс испарения необходимо включать в механизм горения растворов HAN. В предположении, что рост пузырей определяется главным образом процессом испарения, скорость роста пузырей в двухфазной зоне оценена по соотношению Ван Штралена [8]. Кроме того, из результатов термического анализа найдена связь между параметрами экзотермического пика и скоростью горения.

Еще одна цель данной работы — разработка двигателей малой тяги на монотопливе. В двигателях такого типа на гидразине успешно применяется каталитическая система воспламенения. Из-за простоты и надежности этой технологии желательно использовать ее и в двигателях малой тяги на растворах HAN, при условии, что будет найден подходящий катализатор для разложения HAN. В предшествующие годы проводились исследования в этом направлении. Так, в [9] топливные композиции и условия реагирования оценивали в огневых экспериментах с модельным двигателем малой тяги, чтобы определить характеристики его энергетической эффективности и срок службы (ресурс). В результате выбрано низкотемпературное монотопливо с глицином и катализатором S405 и достигнуто устойчивое горение в течение 600 с.

Поскольку в предшествующих исследованиях [10] катализатор S405 продемонстрировал хорошие характеристики для гидразина, испытания двигателя малой тяги проводились нами с использованием катализатора S405, при этом варьировался вид материала, применяемого в качестве носителя катализатора. Была выбрана следующая структура каталитического слоя: ткань на основе карбида кремния, уложенная на опорную перфорированную керамическую пластину из нитрида кремния. В результате испытаний двигателя определены массовая скорость подачи топлива, конфи-

гурация слоя катализатора и соотношение длины и диаметра камеры сгорания L/D , обеспечивающие стабильную работу двигателя в течение длительного времени (до 100 с). Удельный импульс составил $I_{sp} = 240$ с, что соответствует 90%-й эффективности относительно расчетного значения импульса. Конструкция и параметры двигателя обсуждаются на основе полученных авторами экспериментальных результатов.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы

Составы исследованных жидких топлив (растворов) представлены в табл. 1. Массовое соотношение HAN, AN и H_2O фиксировано и составляет 95/5/8, количество метанола в смеси варьируется. Контрольный состав не содержит метанола и первоначально был разработан как жидкий окислитель с температурой плавления ниже -10 °С. Содержание метанола в составе SHP163 соответствует стехиометрическому соотношению HAN и AN, поэтому данный состав среди исследованных имеет наибольший расчетный удельный импульс. Величина I_{sp} , рассчитанная при давлении в камере $p_c = 0.7$ МПа, соотношении площадей выходного и критического сечений сопла $A_e/A_t = 50$ и коэффициенте тяги $C_F = 1.7$, составляет 254 с, а произведение ρI_{sp} в 1.7 раза выше, чем у гидразина.

Некоторые характеристики составов были определены в работе [2]. В табл. 2 приведены температура замерзания, плотность и вязкость. Отметим, что у состава SHP163 температура замерзания намного ниже, чем у гидразина, плотность на $\approx 40\%$ выше, чем у гидразина, а вязкость даже при -10 °С приемлема для типичной системы подачи топлива.

Таблица 1
Составы топлив
(массовое соотношение компонентов)

Образец	HAN	AN	H_2O	Метанол
Контрольный	95	5	8	0
SHP069	95	5	8	8
SHP163	95	5	8	21

Таблица 2
Физические свойства топлив

Образец	Температура замерзания, °С	Плотность*, г/см ³	Вязкость*, мПа·с
Контрольный	-37	1.619/1.597	112.0/27.6
SHP069	-37	1.561/1.541	80.4/25.5
SHP163	-37	1.442/1.411	46.7/11.9

Примечание. *Через черту указаны значения при -10 °С и 20 °С.

Скорость горения

Для измерения линейной скорости горения образцы помещали в стеклянные трубки диаметром 12 мм и сжигали в сосуде в среде азота при давлении от нижнего предела распространения пламени до 7 МПа. Образцы поджигали нихромовой проволокой. Данные по скоростям горения образцов контрольного состава и состава SHP163 представлены на рис. 1. Контрольный состав характеризуется двумя режимами горения. При некотором критическом давлении скорость горения скачком изменяется от умеренной до крайне высокой. Состав SHP163 не имеет такого критического давления, и его скорость горения заметно ниже, чем у контрольного состава, не содержащего метанола, в частности, при рабочих давлениях, характерных для управляемых двигателей малой тяги ($p < 1.5$ МПа). Внезапное увеличение линейной скорости горения наблюдалось так-

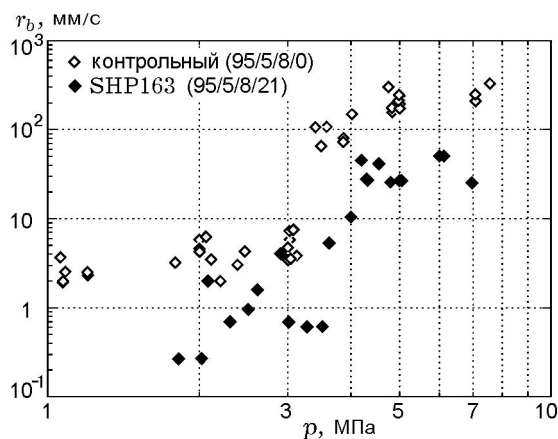


Рис. 1. Скорость горения смеси HAN/AN/вода/метанол составов SHP163 и контрольного в зависимости от давления

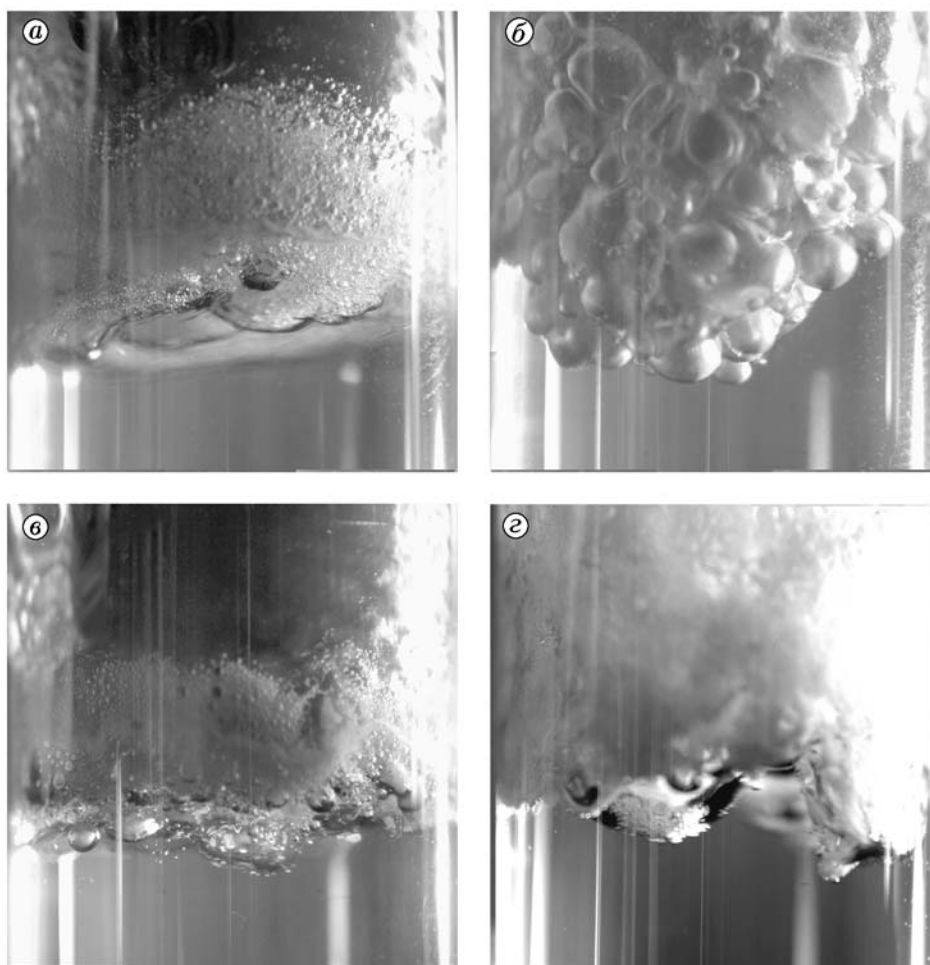


Рис. 2. Фотографии волны горения:

контрольный состав: a — $r_b = 2.0$ мм/с, $p = 2$ МПа, $б$ — $r_b = 107$ мм/с, $p = 3.4$ МПа; состав SHP163: $в$ — $r_b = 0.7$ мм/с, $p = 2.3$ МПа, $г$ — $r_b = 50.5$ мм/с, $p = 6.0$ МПа

же для других растворов на основе HAN [3, 6, 7], однако значение критического давления для каждого состава было свое.

Наблюдения волны горения

Для наблюдения волны горения жидкого топлива на основе HAN использовали образцы в стеклянных трубках, как и в установке для регистрации скорости горения. На рис. 2 показана структура волны горения, полученная камерой высокого разрешения с выдержкой $1/2000$ с. Рис. 2, $a, б$ соответствуют низкой (2.0 мм/с) и высокой (107.0 мм/с) скоростям горения контрольного состава, рис. 2, $в, г$ — низкой (0.7 мм/с) и высокой (50.5 мм/с) скоростям горения состава SHP163. Поверхность го-

рения контрольного состава при низкой скорости относительно стабильна и мелкие пузыри образуются только непосредственно над поверхностью раздела жидкости и двухфазной области (см. рис. 2, a). Пузыри размером менее 1.5 мм прозрачны, более крупные имеют коричневую окраску. При высокой скорости горения контрольного состава (см. рис. 2, $б$) крупные коричневые пузыри наблюдаются повсюду в волне горения. При низкоскоростном горении состава SHP163 (см. рис. 2, $в$) структура волны подобна структуре, наблюдаемой при низкой скорости горения контрольного состава (см. рис. 2, a). В случае высокой скорости горения состава SHP163 (см. рис. 2, $г$) форма поверхности раздела испытывает колебания

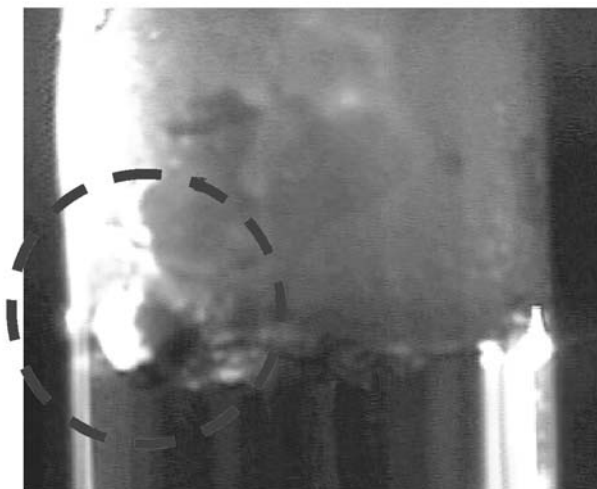


Рис. 3. Поверхность жидкости при переходном процессе:

штриховая окружность — внедрение пузыря в жидкую фазу

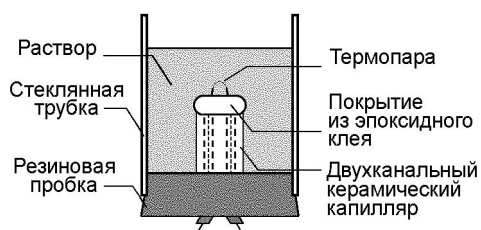


Рис. 4. Схема заделки термопары Pt-Pt/10%Rh диаметром 2.5 мкм

вследствие лопанья больших пузырей и можно наблюдать светящееся пламя.

Переход от низкой (см. рис. 2, *а*) к высокой скорости горения (см. рис. 2, *б*) исследовали с помощью видеокамеры с частотой съемки 500 кадр/с. Начиная с давления 2.3 МПа, при котором горение устойчиво, внешнее давление постепенно повышали, что приводило к развитию турбулентности в газовой фазе, и при достижении критического давления наблюдались внезапное вторжение большого пузыря в жидкую фазу (рис. 3) и, как следствие, переход на высокоскоростной режим горения.

Профиль температуры

Измерения температуры в волне горения контрольного состава и состава SHP163 были проведены при низких давлениях (при низкой скорости горения) с использованием термопары Pt-Pt/10%Rh диаметром 2.5 мкм. Термопара была помещена в двухканальный керамический капилляр, который вводили в толщу раствора со стороны нижнего торца стеклянной трубки через резиновую пробку, как показано на рис. 4.

Примеры типичных профилей температур представлены на рис. 5. Видно, что температура вначале постепенно повышается от начальной до температуры кипения растворителя (до 184 °C на рис. 5, *а* и до 180 °C на рис. 5, *б*), затем резко увеличивается до температуры пламени. В случае состава SHP163 (см.

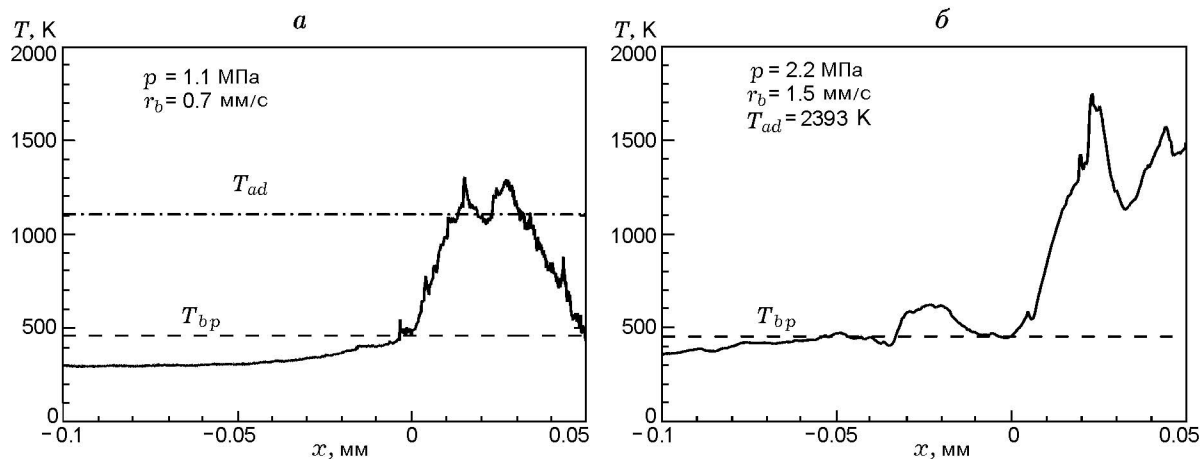


Рис. 5. Профили температуры в волне горения контрольного состава (*а*) и состава SHP163 (*б*): T_{ad} — адиабатическая температура пламени, T_{bp} — температура кипения растворителя

рис. 5, б) градиент температуры при повышении до температуры пламени примерно такой же, как в случае контрольного состава, и составляет $(6.0 \div 7.0) \cdot 10^7$ К/м.

Термический анализ

Термические характеристики каждого образца были исследованы в зависимости от давления методом дифференциального термического анализа (ДТА). Образец нагревали в алюминиевой чашке с постоянной скоростью 20 К/мин в камере, заполненной азотом.

Результаты ДТА представлены на рис. 6. Как видно, при достижении некоторого уровня температуры наблюдается ее резкое повышение. Точка излома на температурной кривой названа температурой начала экзотермической реакции. Зависимость температуры начала экзотермической реакции от давления в камере показана на рис. 7. Видно, что данные по температурам экзотермического пика можно разделить на две группы. Для обоих составов, контрольного и SHP163, критическое давление, разделяющее данные ДТА, составляет ≈ 3 МПа. Это соответствует критическому давлению перехода с низкой на высокую скорость горения для контрольного состава. Температура появления экзотермического пика в случае контрольного состава при давлении немного выше 3 МПа оказывается примерно на 45 К меньше, чем при давлении немного ниже 3 МПа. С другой стороны, для состава SHP163 температура появления экзотермического пика снижается приблизительно на 20 К в окрестности давления 3 МПа.

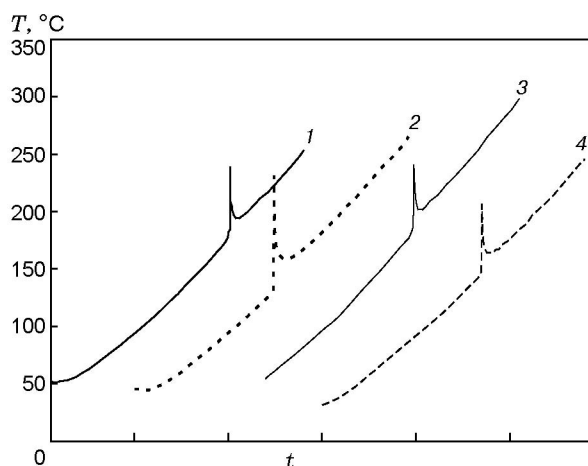


Рис. 6. Записи температуры образца в процессе ДТА (скорость нагрева 20 К/мин):

контрольный состав: 1 — $p = 2$ МПа, 2 — $p = 3$ МПа; состав SHP163: 3 — $p = 2$ МПа, 4 — $p = 3$ МПа

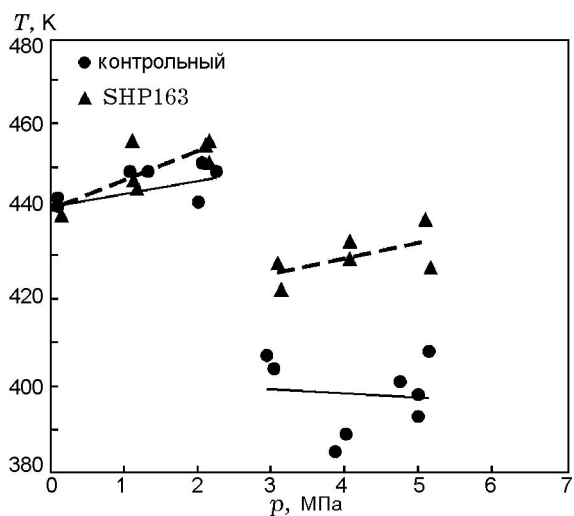


Рис. 7. Температура начала экзотермической реакции (по данным ДТА) в зависимости от давления

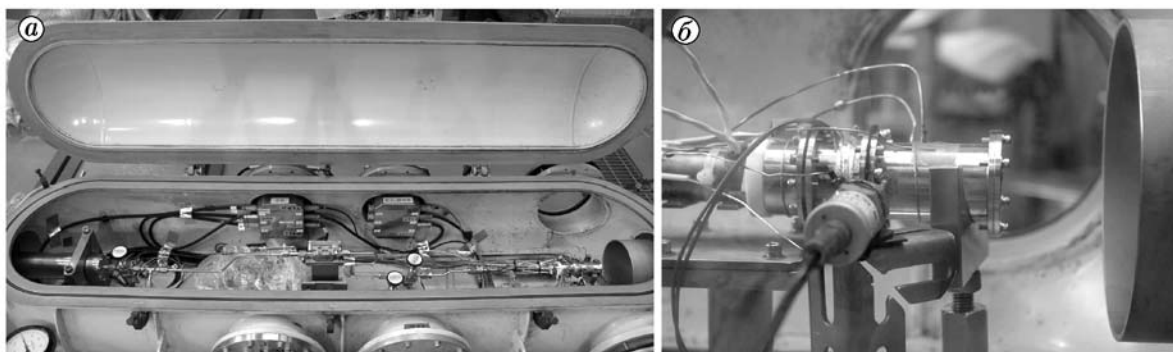


Рис. 8. Экспериментальная установка для испытаний модельного двигателя:

a — общий вид, *б* — двигатель

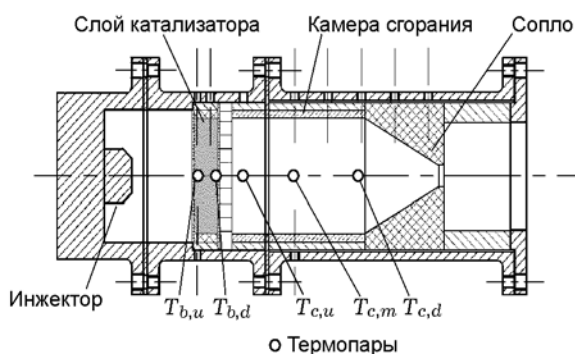


Рис. 9. Поперечное сечение двигателя и местоположение точек измерения температуры термопарами:

$T_{b,u}$, $T_{b,d}$ — температуры слоя катализатора соответственно в верхней и нижней областях по течению потока; $T_{c,u}$, $T_{c,m}$, $T_{c,d}$ — температуры в верхней, средней и нижней частях камеры сгорания

Двигатель малой тяги

Огневые испытания двигателя малой тяги проведены с составами S405 и SHP163 в непрерывном режиме его работы. Экспериментальная установка и конструкция двигателя показаны на рис. 8. Двигатель (рис. 8, б) помещен в вакуумную камеру, сопло расположено справа. На рис. 9 показан поперечный разрез двигателя.

На первом этапе для удержания слоя катализатора было опробовано несколько видов термостойких материалов — сплавы Hastelloy и Naupes, вольфрам, платина, ткань на основе волокон из карбида кремния. В итоге выбрана схема, в которой катализатор нанесен на ткань из волокон SiC, удерживаемую перфорированной опорной пластиной из нитрида кремния (рис. 10).

При длительной работе двигателя температура слоя катализатора может возрастать за счет теплового потока от пламени, что может привести к деградации катализатора. Впрыск жидкого топлива, напротив, дает охлаждающий эффект, препятствуя росту температуры слоя. С целью поиска условий, при которых температура слоя катализатора остается достаточно низкой, при работе двигателя в непрерывном режиме проведены измерения температуры слоя катализатора в зависимости от массовой скорости подачи жидкой смеси и конфигурации слоя. Местоположение точек измерения температуры показано на рис. 9. Тем-

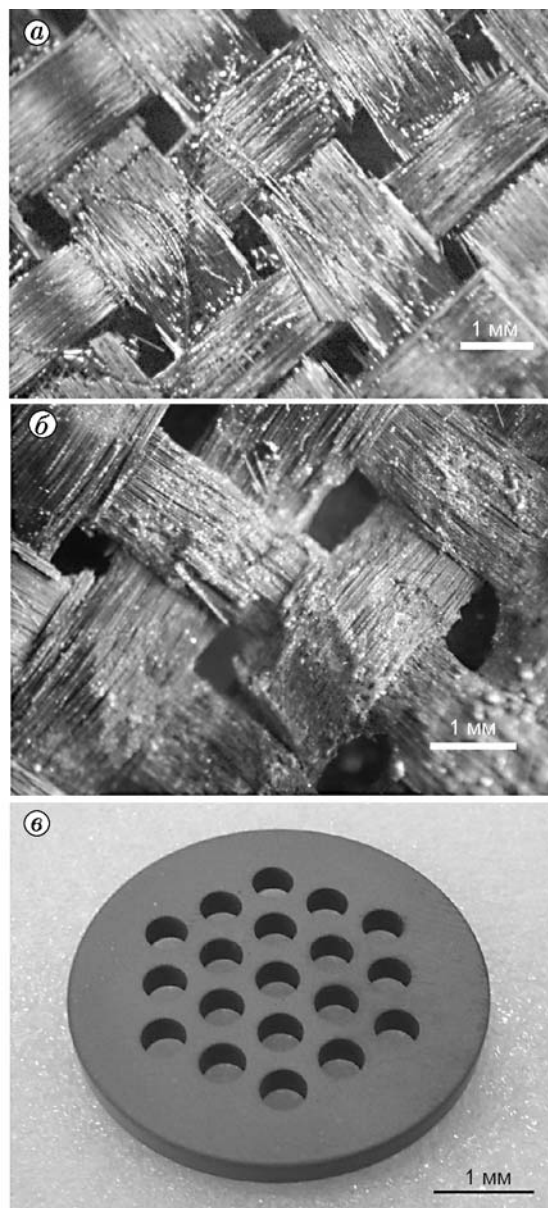


Рис. 10. Термостойкие элементы конструкции крепления слоя катализатора:

а — ткань из волокон SiC до опыта, б — то же самое после опыта; в — опорная пластина из нитрида кремния

пературу измеряли хромель-алюмелевыми термопарами. На рис. 11 приведена зависимость температуры слоя катализатора от массовой скорости потока топлива. Видно, что чем выше массовая скорость, тем ниже температура слоя катализатора. Следовательно, температуру слоя катализатора можно понизить путем увеличения скорости подачи топлива. Однако

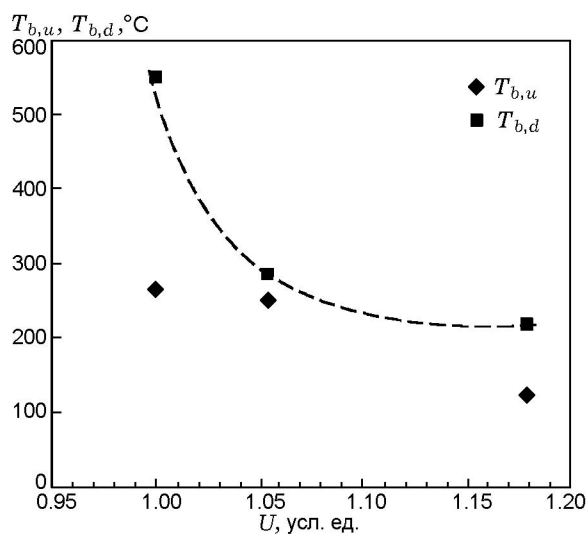


Рис. 11. Температура верхней ($T_{b,u}$) и нижней ($T_{b,d}$) частей слоя катализатора в зависимости от массовой скорости (U) подачи (сверху) топлива

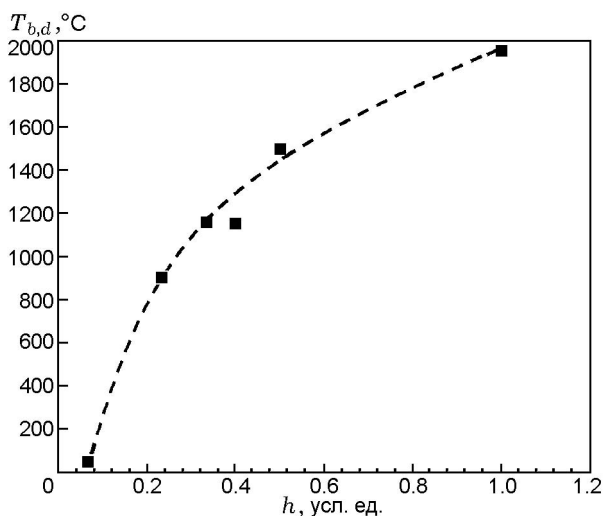


Рис. 12. Температура нижней по потоку части слоя катализатора в зависимости от толщины (h) слоя катализатора (средняя массовая скорость подачи топлива 3.0 г/с)

если топливо подается слишком быстро, оно не успевает полностью прореагировать в слое катализатора. На рис. 12 температура нижней части каталитического слоя показана в зависимости от толщины слоя катализатора. Видно, что температура возрастает при увеличении толщины слоя. Поскольку состав S405 окисляется при высоких температурах, слой катализатора должен быть определенной толщи-

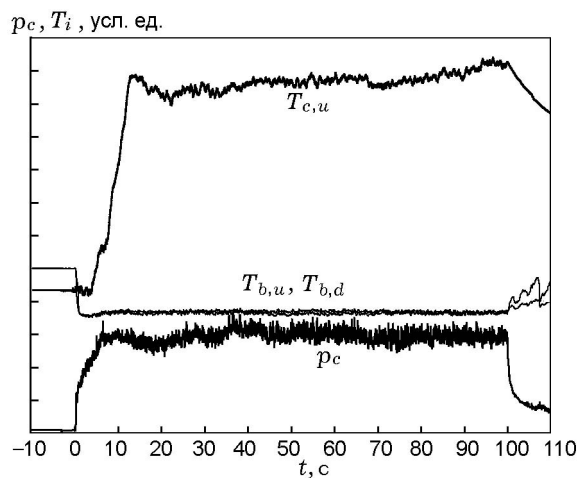


Рис. 13. Записи параметров двигателя во время работы в непрерывном режиме в течение 100 с

ны. Двигатель с параметрами, выбранными на основе полученных результатов, успешно проработал в непрерывном режиме до 100 с. На рис. 13 представлены записи температуры и давления, полученные в этом испытании. Давление в камере p_c устанавливается на постоянном уровне; температура $T_{b,d}$ также остается неизменной и составляет ≈ 370 К.

ОБСУЖДЕНИЕ

Механизм горения

Обсудим механизм горения жидкой смеси на основе HAN, используя полученные экспериментальные результаты. Типичные структуры волны горения показаны на рис. 14. Штриховые линии обозначают границу между жидкой фазой и двухфазной областью. Можно выделить три типа структуры волны горения. Для структуры первого типа (рис. 14,а) характерно следующее. При низкой скорости горения мелкие прозрачные пузырьки образуются над границей раздела жидкость — двухфазная область, затем пузырьки становятся коричневыми, газообразные продукты диффундируют в газовую фазу. Горение протекает послойно, и процесс можно рассматривать как квазиодномерный. В волне горения последовательно происходят предварительный разогрев, испарение и химические реакции горения; горячие газы не проникают в жидкую фазу, поскольку поток стабилен.

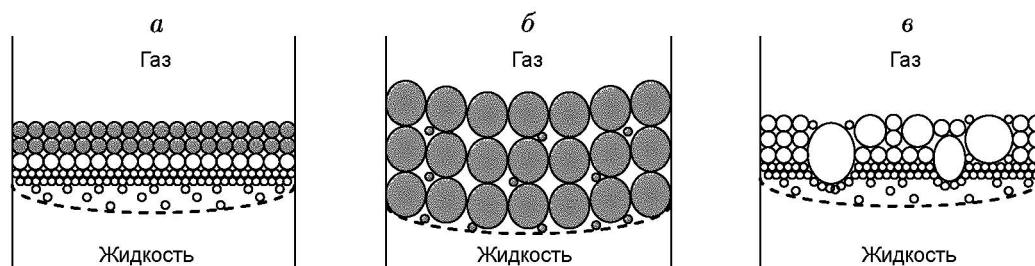


Рис. 14. Структура волны горения:

a — составы SHP163 и контрольный, низкая скорость горения; *b* — контрольный состав, высокая скорость горения; *в* — состав SHP163, высокая скорость горения

Второй тип структуры (рис. 14, *б*) реализуется в случае высокоскоростного горения контрольного состава. Крупные коричневые пузыри существуют в широком подповерхностном слое волны горения. Возможно, они имеют высокую температуру и очень быстро проходят через жидкую фазу. Горячие газы напрямую контактируют с жидкостью, и ее перегрев вызывает ускоренное рождение новых пузырей и их развитие. Крупные пузыри формируют трехмерную границу раздела между жидкой фазой и двухфазной областью (см. рис. 2, *б*). Площадь поверхности горения становится больше, чем в случае плоской поверхности раздела, и это также вносит вклад в увеличение скорости горения.

Цвет пузырей в случае высокоскоростного горения состава SHP163 (рис. 14, *в*) менее насыщенный, чем при высокоскоростном горении контрольного состава (рис. 14, *б*). Поверхность горения сильно колеблется, крупные пузыри внедряются в жидкую фазу, и образуются новые мелкие пузыри (как на рис. 14, *б*), однако вновь рожденные пузыри растут относительно медленно. Вследствие более медленного роста пузырей скорость перемещения фронта горения может понизиться по сравнению со случаем, иллюстрируемым рис. 14, *б*. Присутствие метанола, возможно, приводит к снижению темпа роста мелких пузырей.

Согласно оценке, проведенной с использованием экспериментальных профилей температур и осредненного значения коэффициента теплопроводности, при низкой скорости горения тепловой поток из газовой в конденсированную фазу в случае состава SHP163 больше, чем для контрольного состава. При этом состав SHP163 горит с меньшей скоростью, чем контрольный. Это означает, что тепловой поток из газовой фазы, по-видимому, незначительно

влияет на скорость горения. Другими словами, скорость горения слабо зависит от газофазных реакций. Этот факт показывает, что в данном случае процесс испарения в жидкой фазе может быть стадией, определяющей скорость горения.

Оценим скорость роста пузырей в результате процесса испарения. В общем случае скорость роста пузырей пропорциональна величине перегрева θ , который равен разнице между фактической температурой поверхности кипящего раствора и температурой кипения раствора. Следуя [8], выражение для радиуса пузыря R в некоторый момент времени t в случае одного растворителя (который соответствует контрольному составу) запишем в виде

$$R_1 \cong \left(\frac{12}{\pi}\right)^{1/2} \frac{(k\rho_l c)^{1/2}}{\rho_g l} \theta t^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь k — коэффициент теплопроводности жидкости, ρ_l — плотность жидкости, ρ_g — плотность газа, c — теплоемкость жидкости при постоянном давлении, l — теплота испарения.

В случае двойного раствора (при наличии второго растворителя) выражение (1) принимает следующий вид:

$$R_2 \cong \left(\frac{12}{\pi}\right)^{1/2} \times \frac{(k_m/\rho_{m,l}c_m)^{1/2}}{\frac{\rho_{m,g}}{\rho_{m,l}} \left[\frac{l_m}{c_m} + \left(\frac{k_m}{\rho_{m,l}c_m D}\right)^{1/2} \frac{\Delta T}{G} \right]} \theta t^{1/2}, \quad (2)$$

$$\frac{\Delta T}{G} = \frac{T}{\rho_{m,g} l_m} (K-1)^2 p_0 x_0, \quad G = \frac{x_0/x-1}{K-1}.$$

Здесь индексом m обозначена смесь жидкостей, D — коэффициент диффузии более летучего

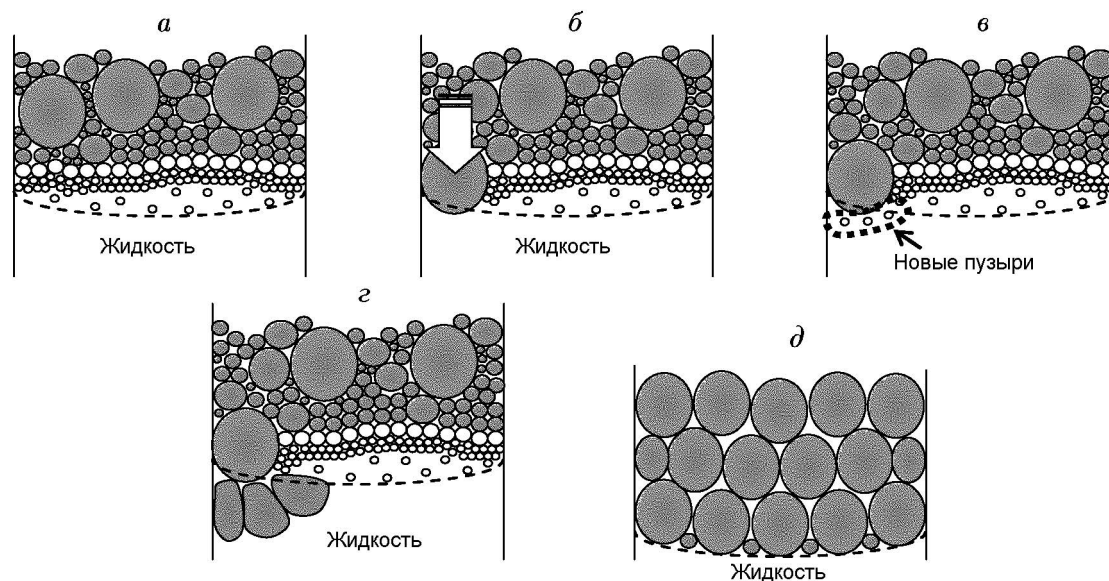


Рис. 15. Схема переходного процесса:

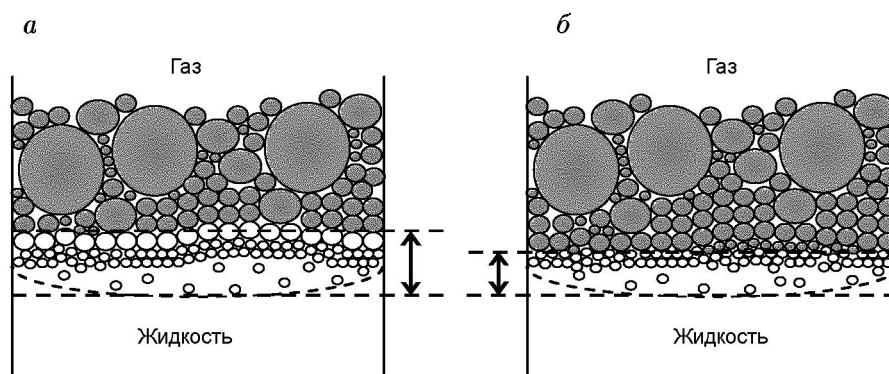
а — стабильное горение (с низкой скоростью), *б* — внедрение пузыря, *в* — образование новых мелких пузырей, *г* — рост новых пузырей, *д* — бурное горение (с высокой скоростью)

компонента, ΔT — разница между температурой конденсации пара в пузыре и температурой кипения бинарной смеси жидкостей, G — доля массы жидкости, преобразуемой в газ посредством испарения в индивидуальном пузыре, p_0 — давление окружающей среды, x — массовая доля более летучего компонента в бинарной смеси жидкостей на границе с пузырем, x_0 — массовая доля более летучего компонента в первоначально гомогенной жидкости (начальная массовая доля метанола), T — температура насыщенного пара при давлении p_0 , K — константа равновесия газ — жидкость более летучего компонента бинарной смеси. В предположении, что HAN и AN оказывают слабое влияние на скорость испарения растворителя, было установлено, что отношение радиусов пузырей $R_2(\text{H}_2\text{O} + \text{метанол})/R_1(\text{H}_2\text{O})$ при $p = 2.2$ МПа составляет ≈ 0.7 .

Переход с низкой (см. рис. 14, *а*) на высокую скорость горения (см. рис. 14, *б*) иллюстрирует рис. 15. На рис. 15, *а* показано устойчивое горение при $p = 2.3$ МПа со скоростью $r_b = 3.0$ мм/с. Начиная с $p = 2.3$ МПа давление постепенно увеличивали. Повышение давления усиливает гидродинамическую неустойчивость, проявляющуюся в том, что крупные пузыри, заключающие в себе высокотемпературный газ, начинают вторгаться в жидкую фазу (рис. 15, *б*). Вследствие прямого контак-

та жидкости с горячими газами в окрестности больших пузырей образуются новые пузыри (рис. 15, *в*). Благодаря сильному перегреву эти новые пузыри развиваются очень быстро (рис. 15, *г*), и, таким образом, устанавливается весьма высокая скорость горения (рис. 15, *д*).

В переходном режиме движение поверхности раздела жидкости и газожидкостной двухфазной области нестабильно. Механизм внедрения горячего газа в жидкую фазу обсуждается с позиций теории гидродинамической неустойчивости [11, 12]. Ландау [11], изучая гидродинамическую неустойчивость жидкого топлива, вывел условие стабильности при медленном горении. В [11] показано, что силы поверхностного натяжения и гравитации, направленные по нормали к поверхности раздела, оказывают стабилизирующее воздействие. В развитие теории Ландау в [12] представлена новая модель горения жидкого топлива, динамически связывающая скорость горения с локальными гидродинамическими и термодинамическими условиями на границе между жидкостью и газом. В рамках этой модели показано, что увеличение вязкости стабилизирует поверхность раздела. В настоящей работе колебательное горение жидкого топлива на основе раствора HAN при низком давлении рассматривается как один из примеров неустойчивости подобного типа. Согласно теории [11, 12] важ-

Рис. 16. Толщина зоны прозрачных пузырей при $p < 3$ МПа (а) и $p > 3$ МПа (б)

ным фактором гидродинамической неустойчивости является инерционное движение газообразных продуктов.

Движение газа параллельно поверхности и локальные накопления массы способствуют интенсификации движения жидкости и неустойчивости ее поверхности. Высокая вязкость газообразных продуктов сдерживает движение жидкости, что способствует стабилизации процесса. Вязкости паров воды и метанола примерно одинаковы и возрастают с температурой. Поэтому газообразные продукты при высокой температуре эффективно стабилизируют поверхность жидкости. Измерение температуры в волне горения показывает, что при горении состава SHP163 реализуется более высокая температура пламени, чем в случае горения контрольного состава. Из термодинамических расчетов состава продуктов горения следует, что средняя вязкость газообразных продуктов у состава SHP163 выше, чем у контрольного состава. Таким образом, добавка метанола как бы «затрудняет» движение газа и поэтому стабилизирует поверхность.

Дополнительно отметим, что результаты термического анализа позволяют предположить, что понижение температуры экзотермического пика влияет на скорость горения. Снижение температуры пика может обусловить смещение экзотермической реакционной зоны к жидкой фазе. Другими словами, область прозрачных пузырей, играющая роль теплоизоляции, становится тоньше при $p > 3$ МПа, и это, возможно, способствует вторжению больших горячих пузырей в жидкую фазу. Соответствующие структуры волны горения иллюстрирует рис. 16.

Двигатель малой тяги

Температура слоя катализатора зависит от массовой скорости подачи топлива и толщины слоя катализатора. Впрыск жидкого топлива в слой катализатора дает охлаждающий эффект, поскольку топливо имеет комнатную температуру, а распыленное топливо — более низкую температуру. Поэтому увеличение массовой скорости подачи топлива вызывает более сильный охлаждающий эффект. С другой стороны, увеличение толщины слоя катализатора должно способствовать более полному протеканию химической реакции, т. е. температуру катализатора можно понизить посредством уменьшения толщины слоя катализатора. Соответственно, запись температуры слоя катализатора (подобная приведенной на рис. 11) должна показать, насколько сбалансированы количества тепла, выделившегося в химической реакции и затраченного на прогрев топлива. После непрерывной работы двигателя в течение 100 с цвет катализатора изменился с черного на серый. Это свидетельствует о том, что такое длительное воздействие чрезмерно для используемого катализатора и конструкцию двигателя необходимо усовершенствовать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокую линейную скорость горения контрольного состава удастся понизить путем введения метанола. Скорость горения уменьшается при всех давлениях; зависимости скорости горения от давления становятся более гладкими (без критического давления). Из результатов измерения профиля температуры следует, что скорость горения зависит не от газофазного пламени, а от процесса испарения.

Согласно проведенной оценке скорости роста пузырей добавка метанола понижает скорость испарения. В волне горения во всех случаях над жидкой фазой находится двухфазная область, причем цвет и размеры пузырей в разных случаях существенно отличались. Наблюдения перехода с низкой скорости горения на экстремально высокую показали, что при увеличении давления пузыри становятся крупнее, а их движение энергичнее.

При критическом давлении крупные пузыри внедряются в жидкую фазу и волна горения начинает распространяться с очень высокой скоростью. Таким образом, гидродинамическая неустойчивость приводит к скачкообразному переходу на высокую скорость горения. В соответствии с результатами теории гидродинамической неустойчивости [12] метанол способствует уменьшению неустойчивости. В результате скорость горения в присутствии метанола понижается за счет уменьшения скорости испарения и стабилизации поверхности жидкости. По данным дифференциального термического анализа температура начала экзотермических реакций при увеличении давления понижается, что, вероятно, облегчает вторжение горячего газа в жидкую фазу.

Топливо S405 было испытано в модельном двигателе. Варьировали массовую скорость подачи топлива, конфигурацию слоя катализатора, соотношение длины и диаметра камеры сгорания. В результате выбраны параметры, обеспечивающие стабильную непрерывную работу двигателя в течение 100 с. Удельный импульс составил 240 с, что соответствует 90 % значения, полученного в результате термодинамического расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Harlow D. G., Felt R. E., Agnew S., Barney G. S., McKibben J. M., Garber R., Lewis M. // Techn. Rep. on Hydroxylamine Nitrate, U. S. Department of Energy. — 1998.
2. Togo S., Hori K., Shibamoto H. Improvement of HAN-based liquid monopropellant combustion characteristics // Intern. Conf. HEMS-2004, September 2004, Belokurikha, Russia.
3. Vosen S. R. Concentration and pressure effects on the decomposition rate of aqueous hydroxylammonium nitrate solution // Combust. Sci. Technol. — 1989. — V. 6. — P. 85–99.
4. Vosen S. R. Hydroxylammonium nitrate-based liquid propellant combustion // Combust. Flame. — 1990. — V. 82. — P. 376–388.
5. Shaw B. D., William F. A. A model for the deflagration of aqueous solutions of hydroxylammonium nitrate // Twenty-Fourth Symp. on Combust. — The Combustion Inst., 1992. — P. 1923–1930.
6. Chang Y. P., Kuo K. K. Assessment of combustion characteristics and mechanism of a HAN-based liquid monopropellant // 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 2001, Salt Lake City, UT. — AIAA Paper No. 2001-3272.
7. Chang Y. P., Josten J. K., Zhang B. Q., Reed B. D., Kuo K. K. Combustion characteristics of energetic HAN/methanol based monopropellants // 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 2002, Indianapolis, IN. — AIAA Paper No. 2002-4032.
8. Stralen S. V., Cole R. Boiling Phenomena. — Hemisphere Publishing Corp., 1979. — V. 1, 2.
9. Meinhardt D., Christfferson S., Wucherer E., Reed B. Performance and life testing of small HAN thrusters // 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, June 1999, Los Angeles, CA. — AIAA Paper No. 99-31535.
10. Katsumi T., Hisatsune K., Matsuo T., Shibamoto H., Hori K. Характеристики горения жидкого ракетного топлива на основе нитрата гидроксиламмония // Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение: Докл. II Междунар. конф. «HEMS-2006», 11–14 сентября 2006 г., г. Белокураиха. — М.: ЦНИИХМ, 2007. — С. 28–34. — <http://frpc.secna.ru/hems-2006/d02.rar>.
11. Ландау Л. Д. К теории медленного горения // ЖЭТФ. — 1944. — Т. 14. — С. 240.
12. Armstrong R. C., Margolis S. B. Hydrodynamic and Reactive/Diffusive Instabilities in a Dynamic Model of Liquid Propellant // Twenty-Second Symp. on Combustion. — The Combustion Inst., 1988. — P. 1807–1815.

Поступила в редакцию 25/X 2008 г.