

УДК 536.46

АНОМАЛИЯ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ШАШКИ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

Х. Хасегава¹, М. Фукунага², К. Китагава³, Т. Шимада³¹Корпорация NOF, 470-2379 Такетойо, Япония, hiroshi_hasegawa@nof.co.jp²Компания «INI Aerospace», 370-2398 Томиока, Япония³Японское агентство аэрокосмических исследований, 252-5210 Сагамихара, Япония

Исследованы характеристики аномалии скорости горения канальной шашки смесового топлива, известной под названием «аномалия середины свода горения» или «горб на кривой давления». Приведены результаты экспериментального исследования влияния рецептуры топлива, вязкости топливной суспензии, особенностей процедуры ее заливки в корпус двигателя. Согласно предшествующим исследованиям предполагается, что геометрия «изохронных поверхностей» движущейся в процессе заливки топливной суспензии оказывает влияние на локальную скорость горения. Для исследования этого эффекта проведена визуализация изохронных поверхностей. Предложена зависимость между конфигурациями изохронных поверхностей и скоростью горения, зарегистрированной в огневых испытаниях двигателя и в опытах с образцами, вырезанными из шашки. Помимо обычных статических характеристик аномалии скорости горения, таких как «горб» на зависимости давления от времени и неизотропное поведение скорости горения, установлена специфическая связь распределения локальных скоростей горения с изохронными поверхностями.

Ключевые слова: твердотопливный двигатель, смесовое топливо, горение, скорость горения, аномалия скорости горения, аномалия середины свода горения.

ВВЕДЕНИЕ

В случае шашки с центральным каналом радиальная линейная скорость горения топлива в какой-либо точке поверхности часто зависит от местоположения точки в объеме шашки. Самая высокая радиальная скорость горения обычно реализуется примерно на середине свода горения. Распределение радиальной линейной скорости горения обуславливает так называемую аномалию середины свода горения или «горб» на кривой давления. Причины и механизм этого явления обстоятельно изучали в 1990-х годах [1–6]. Недавно проведены прямые измерения пространственной вариации скорости горения с использованием ультразвукового устройства [7]. Имеются две правдоподобные гипотезы, объясняющие аномалии скорости горения. Согласно первой гипотезе, на линейную скорость горения оказывает влияние ориентация частиц окислителя — перхлората аммония (ПХА) [8]. Частицы ПХА часто стандартизируются только по размеру, однако их

форма может быть различной. Ранее установлено, что в процессе заливки вязкой топливной суспензии частицы ориентируются таким образом, чтобы их главная ось была параллельна направлению потока. Скорость горения в направлении, параллельном главной оси частиц ПХА, может быть выше, чем скорость горения в иных направлениях. Согласно другой гипотезе, в процессе заливки топливной суспензии в корпус двигателя могут образовываться тонкие слои, обогащенные связующим [4]. Эти слои формируются в результате миграции частиц при движении суспензии в трубопроводе от миксера к корпусу заливки топлива. Слои, обогащенные связующим, имеют форму струек (прожилок) и определяются конфигурацией и структурой струи потока топливной суспензии при заливке. В рамках этой гипотезы предполагается, что скорость горения выше вдоль слоев-прожилок. Учет описанных явлений практически важен для предсказания с высокой точностью зависимости давления в ракетном двигателе от времени. Авторы изучали эти явления посредством огневых испытаний и прямых наблюдений ориентации и распределения частиц ПХА в шашке методом рентгеновской компьютерной томографии [9–14]. Экспериментально установлено,

© Hasegawa Hiroshi¹, Fukunaga Mihoko², Kitagawa Koki³, Shimada Toru³, 2013.

¹NOF Corporation, Taketoyo, 470-2379, Japan. ²INI Aerospace, Co, Ltd., Tomioka 370-2398, Japan. ³Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara, 252-5210, Japan.

что на локальную скорость горения оказывает влияние ориентация частиц ПХА. Численное моделирование процесса заливки топливной суспензии в корпус двигателя [12–14] показало, что конфигурация потока зависит от реологических характеристик, которые определяются температурой, вязкостью, компонентным составом суспензии, сдвиговыми напряжениями и другими причинами. В данной работе связь между аномалией скорости горения и реологическими характеристиками заливаемой суспензии (вязкостью и структурой потока) исследована экспериментально.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Методики

Выполнено три вида экспериментов: огневые испытания двигателя, тестирование вырезанных из шашки образцов и визуализация изохронной поверхности [14]. Огневые испытания двигателя и тестирование вырезанных образцов проводили, как описано в [9]. Схемы модельного двигателя и вырезания тестовых образцов показаны на рис. 1 и 2. Цель экспериментов — проверить существование корреляции между геометрией изохронной поверхности заливаемого топлива и локальной скоростью горения. Предполагалось, что изохронная поверхность существует в любой момент времени, но для удобства мы рассматривали топливную суспензию как совокупность нескольких жидкостей, которые имеют некоторые «временные» характеристики. Каждой жидкости соответствует определенное значение «временной» характеристики, поэтому поверхность раздела «соседствующих во времени» жидкостей является изохронной. Изображение смоделированной авторами изохронной

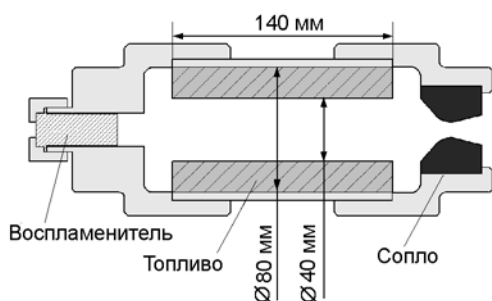


Рис. 1. Схема миниатюрного модельного двигателя

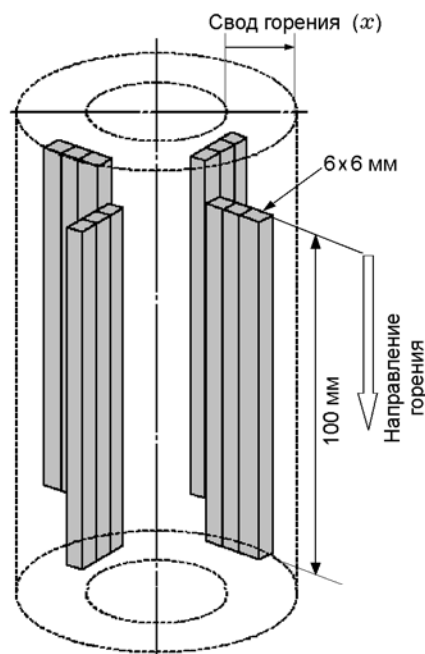


Рис. 2. Схема вырезания образцов для измерения локальной скорости горения в осевом направлении

поверхности в потоке топливной суспензии показано на рис. 3 [13, 14]. Границы пространственных областей на рис. 3 и есть изохронные поверхности. В данной работе для экспериментального наблюдения изохронных поверхностей были приготовлены три топливные суспензии, окрашенные в разные цвета.

Топливо

В табл. 1 представлены рецепты двух исследованных модельных топлив. В состав обоих топлив входят ПХА, алюминий и связующее, состоящее в основном из полибутилена с концевыми гидроксильными группами (НТРВ). Массовое соотношение компонентов связующее/ПХА/Al = 17/82/1 для топлива 1 и 14/68/18 для топлива 2. ПХА состоит из двух фракций, крупной и мелкой, представленных соответственно сферическими и размолотыми частицами. Заливка топливной суспензии в корпус двигателя проводилась двумя способами: от центра и с периферии, как показано на рис. 4. Было приготовлено три замеса топлива 1 и пять замесов топлива 2. В табл. 2 указаны основные характеристики топлива и тип

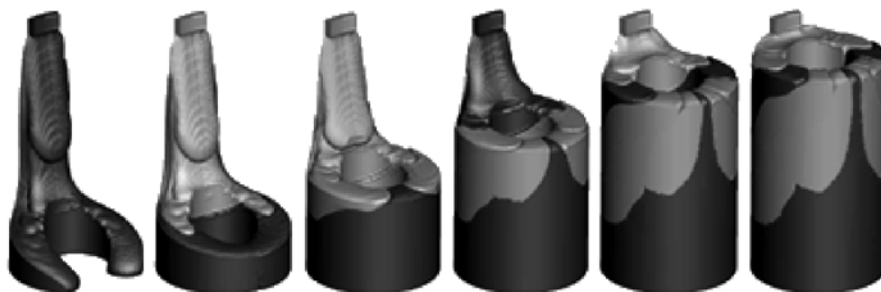


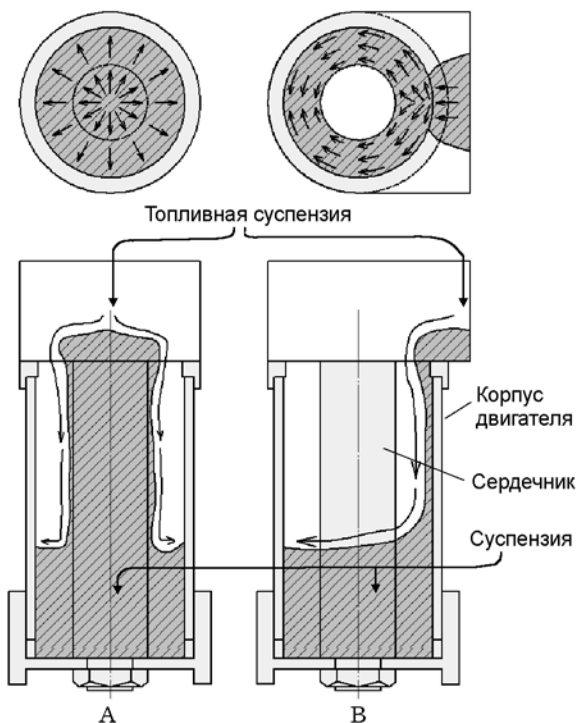
Рис. 3. Конфигурации изохронных поверхностей при боковой заливке топливной суспензии согласно прогнозам [14]

проведенных экспериментов. Данные по замесу 1 топлива 1 и замесам 4, 5 топлива 2 обсуждались в статьях [13, 14].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Таблица 1
Состав исследованных топливных композиций

Топливо	НТРВ, %	ПХА, % (крупный/мелкий)	Al, %
1	17	82 (50/50)	1
2	14	68 (75/25)	18



Огневые испытания в модельном двигателе

Огневые испытания были выполнены с топливом 1 (замесы 1 и 2) и топливом 2 (замесы 4–7). Полученные зависимости давления p от времени t показаны на рис. 5. Там же представлены результаты расчета без учета аномалии скорости горения. Вычисления проведены, как описано в [9], с использованием закона Вьеля

$$r = ap^n, \quad (1)$$

где r — скорость горения.

Согласно исследованию [12] зависимость $p(t)$, полученная расчетным путем при посто-

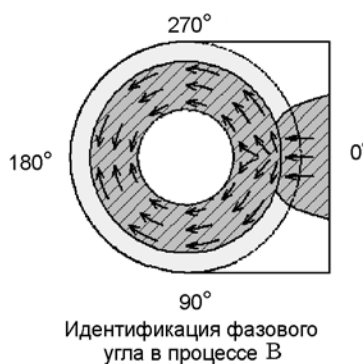


Рис. 4. Два варианта процесса заливки топливной суспензии:

А — от центра, В — с периферии

Таблица 2

Основные характеристики образцов топлив и тип проведенных экспериментов

Номер замеса ¹	Топливо	Скорость горения ² , мм/с (при 4.9 МПа)	Показатель степени в законе скорости горения	Температура топливной суспензии при заливке, °С	Финальная вязкость суспензии ³ , Па·с	Вариант процесса заливки (рис. 4)	Огневые испытания двигателя	Эксперименты с вырезанными образцами	Визуализация изохронных поверхностей
1	1	5.43	0.36	60	130	A	○	○	—
2	1	5.70	0.39	60	(130)	B	○	○	—
3	1	—	—	60	(130)	B	—	—	○
4	2	4.83	0.31	60	310	A	○	○	—
5	2	4.91	0.31	60	(310)	B	○	○	—
6	2	5.02	0.35	60	297	B	○	○	—
7	2	4.96	0.36	50	445	B	○	○	—
8	2	—	—	60	—	B	—	—	○

¹Объем используемого лабораторного смесителя позволял из одного замеса изготовить две или более шашки, в частности шашку для испытания в двигателе и для тестирования вырезанных образцов. ²Скорость горения определена на нормальном мастер-образце — большим блоке, залитом без контроля потока суспензии. ³Вязкость суспензии в конце перемешивания. Значения вязкости для замесов 1, 4, 6, 7 определены экспериментально при скорости сдвига 1.75 c^{-1} . Измерения для замесов 2, 3, 5 не проводили, в скобках указаны ожидаемые значения (те же, что и для замесов 1 и 4). Значки: кружок — эксперименты проводились, прочерк — не проводились.

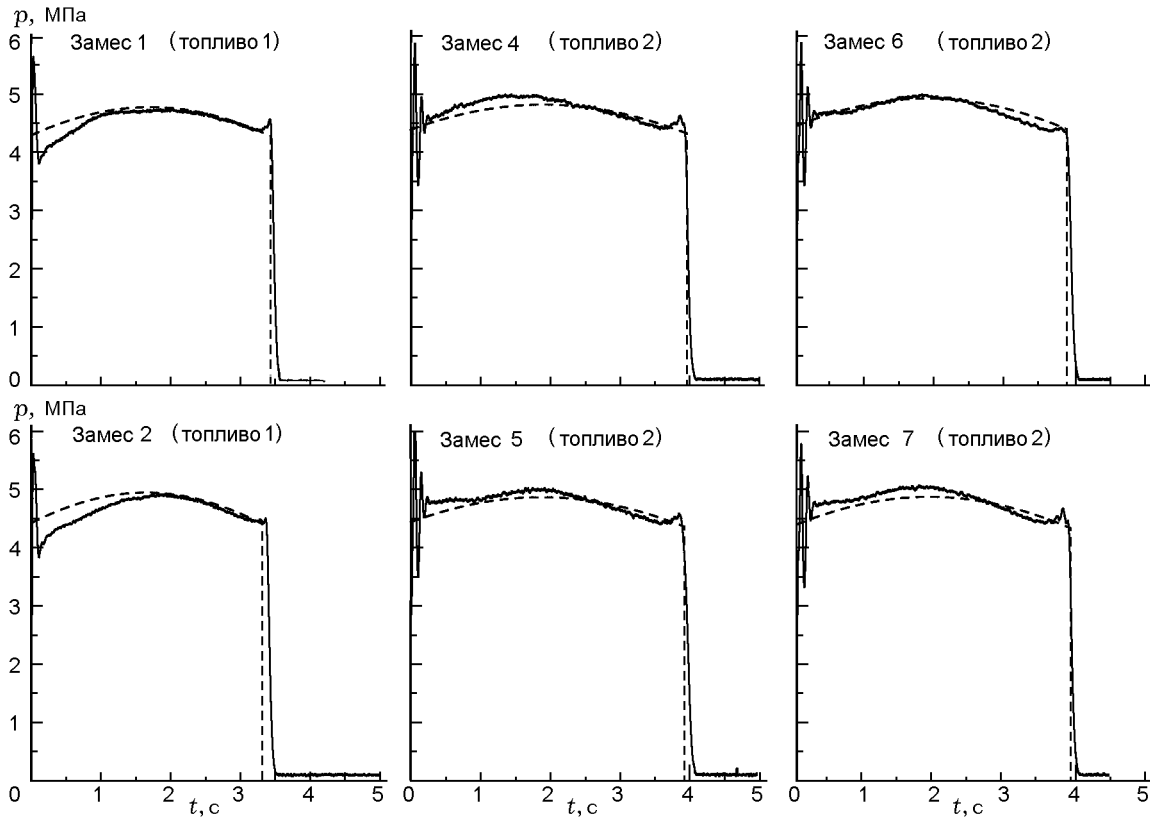


Рис. 5. Зависимости $p(t)$ при сжигании топлива в модельном двигателе: сплошные линии — эксперимент, штриховые — расчет

янных значениях a и n , определенных в экспериментах с вырезанными образцами, часто располагается ниже, чем измеренная в двигателе. В настоящей работе, чтобы оценить эффект «горба» на кривой $p(t)$, постоянный параметр a был вычислен с использованием диаграммы давления в камере, времени горения и начальной толщины горящего свода заряда. Параметр a приближенно определен по уравнению

$$a = \int_{t_i}^{t_e} r dt / \int_{t_i}^{t_e} p^n dt = w_p / \int_{t_i}^{t_e} p^n dt. \quad (2)$$

Здесь w_p — начальная толщина горящего свода, t_i — задержка зажигания, соответствующая моменту начала роста давления в камере, t_e — конец горения, соответствующий моменту начала спада давления.

В табл. 3 представлены скорости горения при характерном давлении 4.9 МПа, полученные по результатам испытаний в двигателе и на вырезанных образцах-столбиках. Кривые $p(t)$, реализованные для топлив 1 и 2, характеризуются индивидуальными особенностями. Топливо 2 демонстрирует флуктуации давления, подобные тем, что обсуждались в [1–4, 7, 9] как типичный эффект «горба» давления. Для топлива 2 в случае замеса 4 в начальный период горения имеется большой (по сравнению с расчетным уровнем давления) пик (или «горб») давления, а для замесов 5, 6 и 7 — два пика (в опыте с замесом 6 два пика четко видны также на приведенном ниже рис. 6). Кроме того, наблюдаемый небольшой пик давления в конце горения можно считать эффек-

том нестационарного горения. Хотя физическая причина возникновения этого пика до конца не ясна, можно предполагать, что он обусловлен уменьшенным теплоотводом из зоны горения, когда фронт приближается к металлическому корпусу двигателя. Записи профиля давления для топлив 1 и 2 заметно отличаются. Для топлива 1 измеренный уровень давления ниже расчетного и в начальный период горения наблюдалось постепенное повышение давления. При этом скорость роста давления в случае замеса 2 ниже, чем для замеса 1, но в обоих случаях давление быстро возрастало до 4 МПа после зажигания и резко падало в конце горения. Предположительно это соответствует однородному зажиганию. Таким образом, поведение давления на начальной стадии сжигания, по-видимому, оказывает влияние на аномалию скорости горения, обусловленную процессом заливки топливной массы.

Для оценки аномалии скорости горения при сжигании шашки в модельном двигателе в [3, 4, 9] предложен параметр φ , характеризующий эффект «горба». Параметр φ определяется по зависимостям $p(t)$ как отношение измеренного давления к расчетному (без аномалии скорости горения). На рис. 6 показаны зависимости $\varphi(\tau)$ для каждого огневого испытания двигателя. Здесь τ — нормализованное время, полученное путем деления текущего времени на полное время горения. Поскольку флуктуации давления невелики, нормализованное время приблизительно соответствует мгновенной толщине горящего свода, так что $\tau = 0$ соответствует начальной внутренней поверхности, $\tau = 0.5$ — среднему положению и $\tau = 1.0$ — наружной поверхности. В эксперименте с топливом 1 в период времени $\tau = 0.1 \div 0.5$ для замеса 1 наблюдается большой «горб» давления по сравнению с результатами для замеса 2. Для топлива 1 это можно считать проявлением обсуждаемой аномалии, хотя механизм реализации пониженного давления в начале горения не совсем ясен.

Для топлива 2 отличия в величине «горба» наблюдаются в интервале $\tau = 0.1 \div 0.5$ при разных вариантах процесса заливки. Вид зависимостей $\varphi(\tau)$ в замесах 5–7, залитых с периферии (процесс В, см. рис. 4), подобен, причем замес 6 характеризуется относительно низким уровнем φ по сравнению с замесами 5 и 7. Анализ поведения параметра φ в интервале времени $0.2 \div 0.8$ позволяет предположить, что его

Таблица 3

Сравнение скоростей горения

Номер замеса	Топливо	Скорость горения, мм/с (при 4.9 МПа)	
		нормального мастер-образца	в модельном двигателе
1	1	5.43	5.88
2	1	5.70	5.97
4	2	4.83	5.08
5	2	4.91	5.10
6	2	5.02	5.16
7	2	4.96	5.10

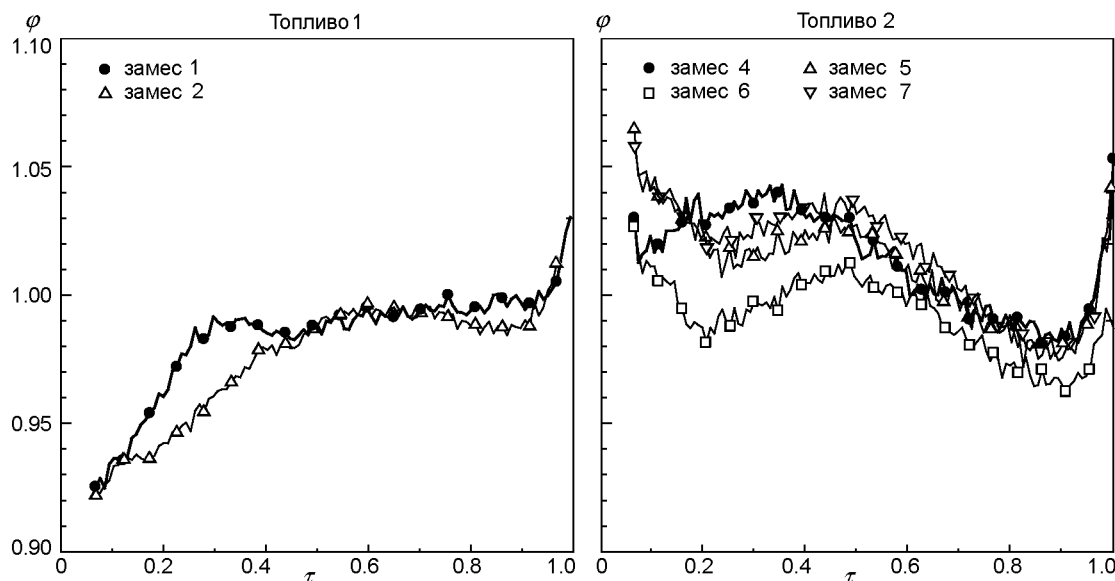


Рис. 6. Эффект «горба» на зависимостях $p(t)$:

текущее время отнесено к полному времени горения, φ — параметр, определяемый как отношение значений давления, измеренного в модельном двигателе и рассчитанного без учета аномалии скорости горения

значение увеличивается с ростом вязкости топливной суспензии, обозначенной в табл. 2 как вязкость в конце перемешивания.

Интересно отметить, что ближе к концу горения формы зависимости $\varphi(\tau)$ подобны и не зависят от вариантов процесса заливки (А, В). Вид зависимостей $\varphi(\tau)$ позволяет предположить, что на скорость горения влияет толщина горящего свода и где-то внутри шашки имеется область с повышенной скоростью горения. Как о тенденции, можно говорить о том, что область с повышенной скоростью горения располагается вблизи внутренней поверхности шашки в случае заливки по схеме А (от центра, рис. 4) и смещается к середине свода горения в случае заливки по схеме В (с периферии).

Испытания вырезанных образцов

Образцы в форме столбиков вырезали из шашки, как показано рис. 2. Осевую скорость горения измеряли в трех областях свода горения — внутренняя, средняя и внешняя стороны шашки. На рис. 7 показаны результаты измерения для каждого замеса. Положение свода горения, соответствующего вырезанному столбику, определено как расстояние от внутренней поверхности шашки до столбика (x). Как видно на рис. 7, скорость горения замесов 4–7 топлива 2 вблизи середины свода ни-

же, чем вблизи внутренней и наружной поверхностей шашки, независимо от угла между направлением распространения фронта горения и изохронной поверхностью ($0, 90$ и 270° , см. рис. 4). При испытаниях в двигателе получен обратный результат. Однако огневые испытания двигателя и тесты с вырезанными образцами отличаются направлением движения волны горения. В двигателе горение идет в радиальном направлении, а в вырезанных столбиках — в осевом, т. е. в перпендикулярном направлении. Об этой неизотропности скорости горения в исследованиях [2–4, 7–9] писали как о характерной особенности аномалии скорости горения. Неизотропность скорости горения обуславливает корреляцию локальной скорости горения и геометрической микроструктуры шашки, т. е. ориентации частиц ПХА, слоев связующего или изохронной поверхности. Результаты, полученные для замесов 5–7 (см. рис. 7), позволяют определенно сказать, что скорость горения выше при угле 180° , при этом ее зависимости от радиального расстояния от внутренней поверхности до столбика либо плоские, либо выпуклые (речь идет о форме графиков на рис. 6), чего нельзя сказать для случаев при углах $0, 90$ и 270° . Указанные особенности отсутствуют при горении замеса 4, залитого по схеме А (центрально-симметрично). Причиной

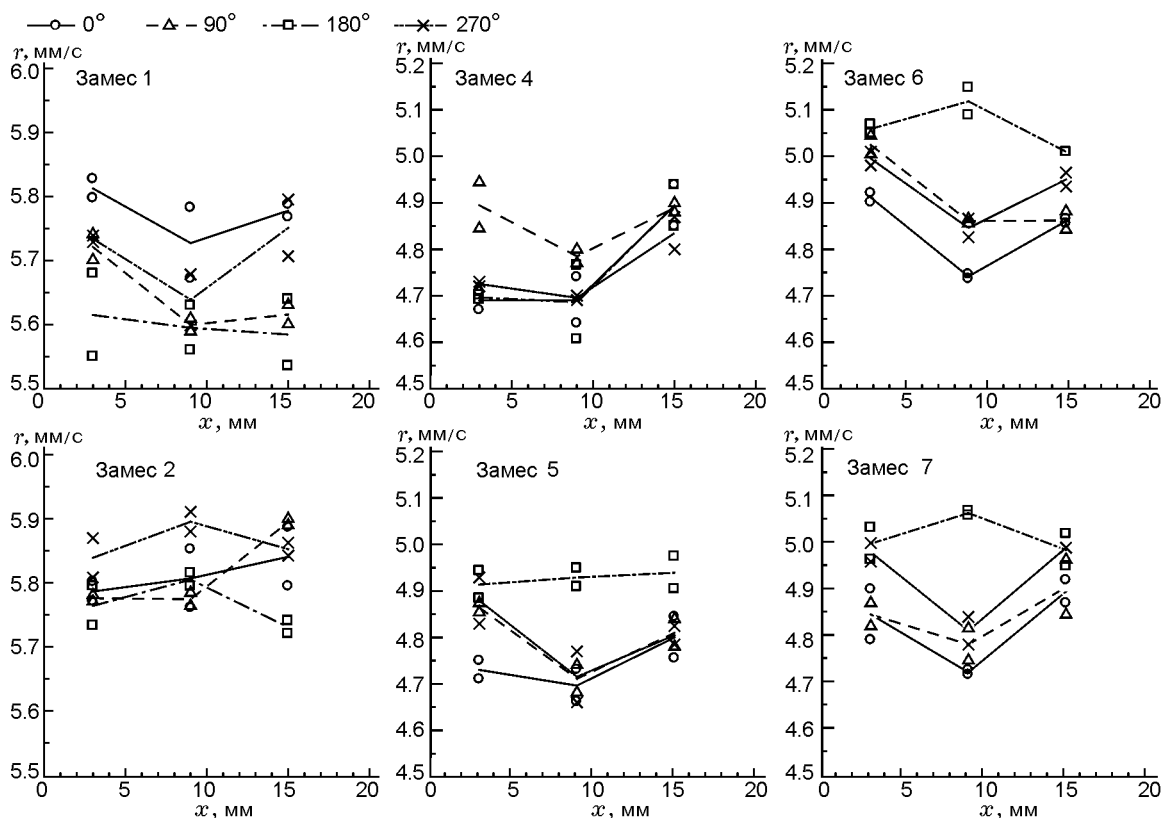


Рис. 7. Результаты измерения скорости горения образцов, вырезанных в форме столбиков (см. рис. 2) из разных участков шашки, при вариации угла наклона изохронной поверхности и расстояния x от центрального канала:

горение в осевом направлении, значения скорости взяты при фиксированном характерном давлении 4.9 МПа

повышенной скорости горения при угле 180° в заливках замесов 5–7, по-видимому, является специфическая конфигурация изохронной поверхности, которая будет обсуждаться в следующем параграфе. Для замеса 1 топлива 1 «вогнутый» график зависимости скорости горения от радиальной координаты (см. рис. 7) имеет ту же причину, что и в случае топлива 2. Для замеса 2, однако, не обнаружено закономерностей в распределении флуктуаций скорости горения по радиусу и углу. В результате для замеса 1 аномальное поведение φ в период времени $0.1 \div 0.5$, зарегистрированное в огневом испытании двигателя при заливке топлива по схеме А, обусловлено тем же механизмом аномалии середины свода горения, что описано выше для замесов 4–7. С другой стороны, общие особенности этой аномалии не обнаружены в опытах с замесом 2.

Визуализация изохронной поверхности топливной суспензии

Чтобы визуализировать изохронную поверхность в заряде модельного двигателя, топливные суспензии в замесах 3 и 8 были окрашены небольшим количеством порошков сажи и оксида железа: 1 — оригинальная смесь серого цвета, 2 — красновато-коричневая, 3 — темно-коричневая.

Заливку производили по схеме В (с периферии) в последовательности 1–2–3–1–2–3. Внешний вид шашки представлен на рис. 8. Границы между порциями разных цветов, которые соответствуют изохронным поверхностям, отчетливо видны. На рис. 9 показан вид шашки сбоку с углами 0 , 90 , 180 и 270° и в разрезе по диаметру при углах 0 и 180° . Статические особенности формы изохронной поверхности подобны предсказанным в численном моделировании (см. рис. 3). На рис. 10 приведе-

ны поперечные сечения шашки. В [14] сообщалось, что осевая скорость горения замесов 4 и 5 (см. рис. 7) зависит от локального угла между направлением скорости горения и изохронной поверхностью, полученной путем численного моделирования течения топливной суспензии. Рис. 11 демонстрирует результаты этого исследования [14]. Было предсказано, что локальная скорость горения увеличивается при уменьшении угла между изохронной поверхностью и направлением скорости горения. Аналогичные

предположения уже выдвигались в [3, 4].

Хотя в численном и натурном экспериментах число порций-сегментов различно, формы изохронной поверхности модельных шашек топлива 2 соответствуют результатам численного моделирования, приведенным на рис. 11 (здесь следует иметь в виду, что направления от внутренней стороны к внешней на рис. 10 и 11 противоположны). В случае топлива 2 пик на кривой давления при работе двигателя и распределение скорости горения вырезанных образцов можно объяснить в рамках гипотезы о корреляции скорости горения и геометрии изохронной поверхности. С другой стороны, несмотря на регистрируемое подобие форм изохронной поверхности в случае топлив 1 и 2, характеристики «горба» давления и результаты испытаний вырезанных образцов для замеса 2 топлива 1 отличаются. Таким образом, можно сделать предварительный вывод о том, что для этого замеса убедительные доказательства корреляции между скоростью горения и изохронной поверхностью отсутствуют. Тем не менее для замеса 1 топлива 1 наблюдаются «горб» на кривой давления и осевое распреде-

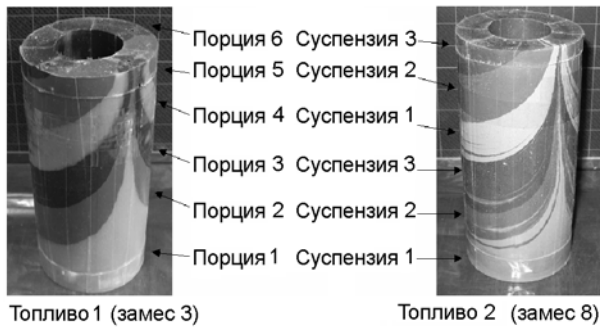


Рис. 8. Внешний вид модельных шашек топлив 1 и 2, залитых с использованием разноцветных порций топливной суспензии

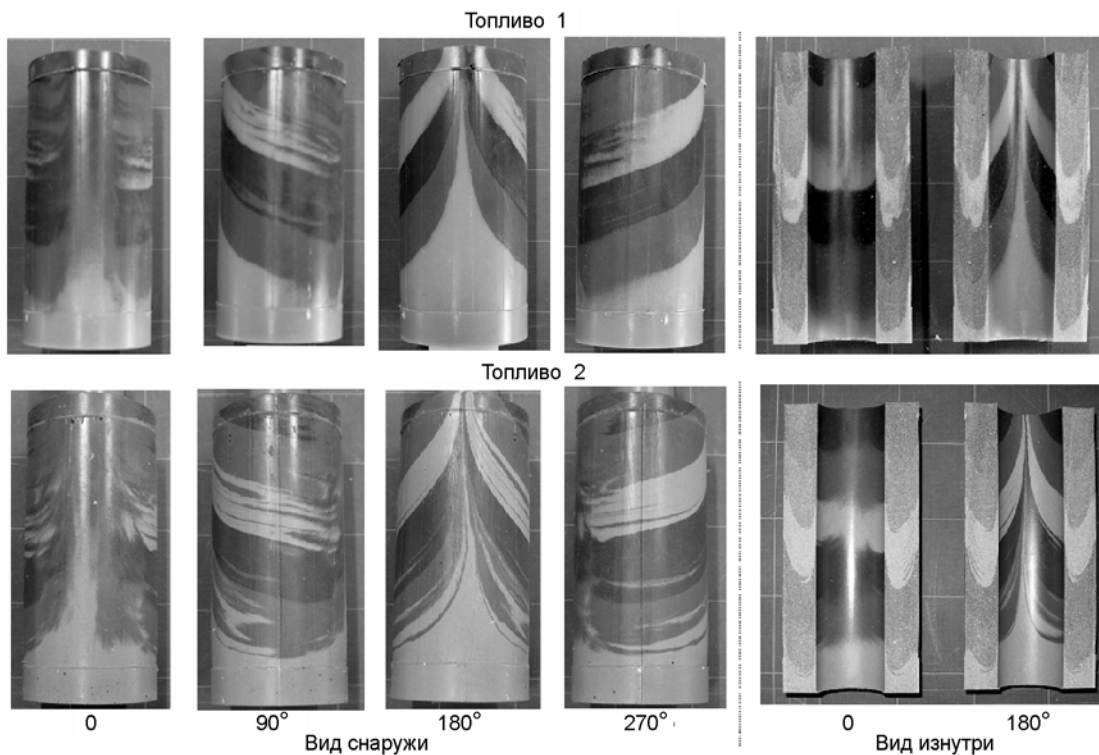


Рис. 9. Внешний и внутренний вид разноцветных модельных шашек топлив 1 и 2 с разных направлений (углов)

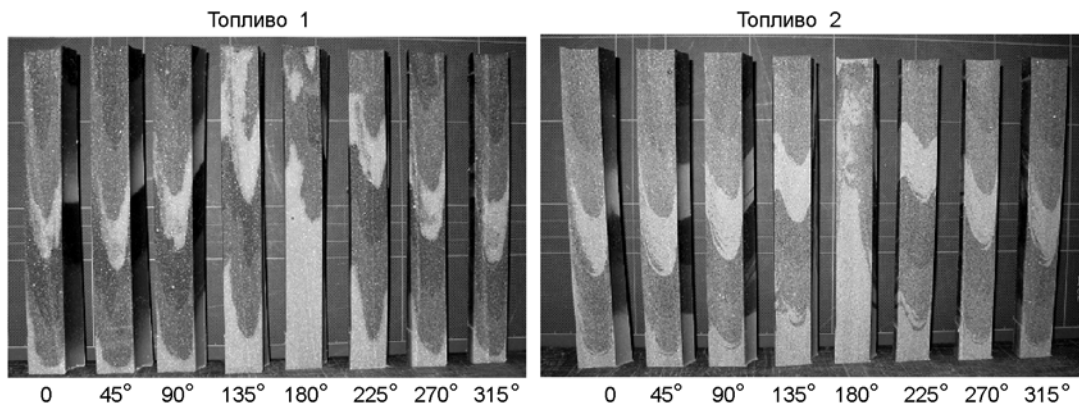


Рис. 10. Вид поперечных сечений окрашенных модельных шашек топлив 1 и 2: на каждом фрагменте левая сторона соответствует внешней поверхности шашки, правая сторона — поверхности центрального внутреннего канала

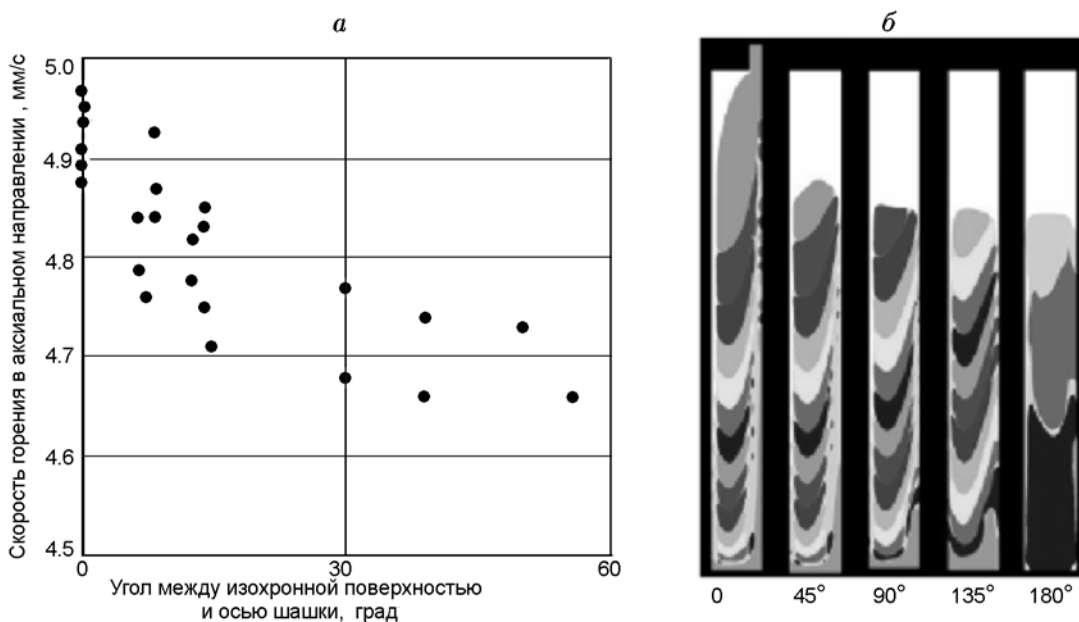


Рис. 11. Предсказанная в [14] зависимость локальной скорости горения от конфигурации изохронной поверхности:

a — точки соответствуют измеренным в экспериментах с замесами 4 и 5 скоростям горения (ось ординат) и расчетным значениям угла наклона изохронной поверхности (ось абсцисс), *б* — расчетная конфигурация изохронной поверхности (моделирование процесса заливки замесов 5 и 6)

ление скорости горения, несмотря на особенности кривой $p(t)$. Наблюдаемое различие поведения скорости горения и давления для топлив 1 и 2, вероятно, вызвано более низкой вязкостью суспензии или более низкой концентрацией частиц в случае топлива 1. Кроме того, различие теплопроводностей, температур поверхности и агломерационного поведения алюминия также может играть важную роль. Эта интересная тема для будущих исследований. В соот-

ветствии с предположением о корреляции скорости горения и изохронной поверхности повышенную скорость горения замесов 5–7 при угле 180° (см. рис. 7) можно рассматривать как результат резкого изменения наклона изохронной поверхности, а именно уменьшения угла между осевым направлением шашки и изохронной поверхностью. Несмотря на то, что имеются некоторые данные о корреляции скорости горения и изохронной поверхности, физический

механизм аномалии скорости горения не выяснен. В [15] линии тока топливной суспензии в цилиндрическом сосуде наблюдали с помощью рентгеновской съемки посредством детектирования пространственного положения введенных в суспензию мелких частиц. Поскольку формы линий тока топлива и изохронных поверхностей подобны, предполагается, что характеристики изохронной поверхности связаны с ориентацией частиц ПХА, их миграцией или со стратификацией связующего с образованием тонких слоев-полосок. Предполагается, что это основные причины аномалии скорости горения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально исследовано влияние компонентного состава топлива, вязкости топливной суспензии и способа ее заливки в корпус двигателя на появление аномалии скорости горения. Кроме того, экспериментально визуализированы изохронные поверхности в шашке топлива, отражающие особенности течения вязкой топливной суспензии при заливке. Изохронные поверхности считаются ключом для понимания аномалии скорости горения. По результатам исследования сделаны следующие выводы.

1. Топливо 2 с рецептурой, близкой к практической (14 % связующего, 68 % ПХА и 18 % Al), демонстрирует типичные характеристики аномалии середины свода горения — «горб» на зависимости $p(t)$ и пространственное распределение скорости горения в объеме шашки. Влияние вязкости топливной суспензии (которая зависит от температуры суспензии) в проведенных экспериментах незначительно.

2. Геометрические особенности изохронной поверхности в объеме шашки топлива 2, визуализированные в специальных экспериментах с окрашенными порциями топливной суспензии, соответствуют результатам численных расчетов в работе [14].

3. Характерная, повторяющаяся от опыта к опыту особенность топлива 2 — реализация в случае боковой заливки (процесс В) повышенной локальной осевой скорости горения в объеме шашки, расположенном диаметрально противоположно области ввода струи заливаемой суспензии. В соответствии с результатами исследования [14] и данными визуализации изохронной поверхности, представленными в настоящей работе, предполагаемой причиной ре-

ализации высокой скорости горения считается уменьшение угла между направлением скорости горения и изохронной поверхностью вследствие резкого изменения наклона последней.

4. В случае топлива 1 со сравнительно низкими концентрацией частиц и вязкостью топливной суспензии (17 % связующего, 82 % ПХА и 1 % Al) формы зависимости $p(t)$ нетипичны. При центрально-симметричной заливке (процесс А) зарегистрированы «горб» на кривой давления и распределение осевой скорости горения. Однако при боковой заливке (процесс В) признаки аномалии скорости горения (в отличие от топлива 2) не обнаружены, несмотря на подобие характеристик изохронной поверхности. Предполагается, что в случае топлива 1 существуют неизвестные механизмы влияния низкой вязкости суспензии и низкой концентрации частиц. Дополнительно важную роль может играть различие теплопроводностей, температур поверхности и процессов агломерации алюминия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Beckman C. W., Geisler R. L. Ballistic anomaly trend in subscale solid rocket motors // AIAA/SAE/ASME 18th Joint Propulsion Conf., Cleveland, Ohio, July 21–23, 1982. — AIAA Paper N 1982-1092.
2. Heister S. D. Ballistics of solid rocket motors with spatial burning rate variations // J. Propulsion and Power. — 1993. — V. 9, N 4. — P. 649–651.
3. Le Breton P., Ribéreau D. Casting process impact on small-scale solid rocket motor ballistic performance // J. Propulsion and Power. — 2002. — V. 18, N 6. — P. 1211–1217.
4. Ribéreau D., Le Breton P., Ballereau S. Casting process effect on composite solid propellant burning rate // AIAA/ASME/SAE/ASEE 37th Joint Propulsion Conf. and Exhibit, Salt Lake City, Utah, July 8–11, 2001. — AIAA Paper N 2001-3946.
5. Neilson A. M., Miles W. L. Space Shuttle solid rocket motor reproducibility and the apparent influence of propellant processing characteristics on trace shape // AIAA/ASME/SAE/ASEE 25th Joint Propulsion Conf., Monterey, CA, July 10–12, 1989. — AIAA Paper 89-2310.
6. Kallmeyer T. E., Sayer L. H. Differences between actual and predicted pressure-time histories of solid rocket motors // AIAA/SAE/ASME 18th Joint Propulsion Conf., Cleveland, Ohio, July 21–23, 1982. — AIAA Paper N 1982-1094.
7. Deepak D., Jeenu R., Sridharan P., Padmanabhan M. S. Direct evidence of spatial

- burning rate variation a cause of midweb anomaly // J. Propulsion and Power. — 2001. — V. 17, N 2. — P. 449–452.
8. **Heister S. D.** Influence of propellant rheology on ballistic response of solid rocket motors // AIAA/ASME/SAE/ASEE 27th Joint Propulsion Conf., Sacramento, CA, July 24–26, 1991. — AIAA Paper N 1991-3394.
 9. **Hasegawa H., Shimada T.** Experimental study on midweb anomaly of composite propellant grains // Intern. J. Energ. Mater. and Chem. Propulsion. — 2009. — V. 8, is. 2. — P. 147–158.
 10. **Hasegawa H., Seike Y., Kato K., Miyachi H., Kobayashi T., Sekino N., Fukunaga M., Asakawa H., Shimada T., Tsuboi N., Daimon Y.** Nonintrusive and microscopic diagnostics of composite propellant microstructure // 8th World Congress of Chemical Engineering, presented at 1470-NIM2, Aug. 23–27, Montreal, Quebec, Canada, 2009. — <http://www.wcce8.org/index.html>.
 11. **Hasegawa H., Kato K., Miyachi H., Fukunaga M., Tsuboi N., Yazima Y., Hiraoka K., Daimon Y., Shimada T.** Nonintrusive diagnostics of distribution of AP particles in composite propellants // Asian Joint Conf. on Propulsion and Power, 2010. — Miyazaki, Japan, 2010. — JCPP2010-115.
 12. **Kitagawa K., Shimada T., Hasegawa H., Fukunaga M., Miyachi H.** Correlation of midweb anomaly with microstructure of composite propellant // 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. and Exhibit, 25–28 July, 2010, Nashville, TN. — AIAA Paper 2010-7165.
 13. **Shimada T., Kato K., Sekino N., Tsuboi N., Seike Y., Fukunaga M., Daimon Y., Hasegawa H., Asakawa H.** Advanced computer science on internal ballistics of solid rocket motors // Trans. of the Jap. Soc. for Aeronaut. and Space Sci. — 2010. — V. 8, ISTS Spec. is.: Selected papers from the 27th Intern. Symp. on Space Technol. and Sci. — P. Pa_29–Pa_37.
 14. **Shimada T., Kitagawa K., Hasegawa H., Fukunaga M., Asakawa H.** Development of advanced computer science for solid-rocket-motor internal ballistics: ACSSIB // 61st Intern. Astronaut. Congress, Prague, CZ, 2010. — C4.2.6.
 15. **Shimada T., Habu H., Seike Y., Ooya S., Miyachi H., Ishikawa M.** X-ray visualization measurement of slurry flow in solid propellant casting // Flow Measur. and Instrum. — 2007. — V. 18, N 5–6. — P. 235–240.

Поступила в редакцию 18/VII 2012 г.
