

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ. II. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В. А. Архипов^{1,2}, С. С. Бондарчук², А. Г. Коротких³

¹НИИ прикладной математики и механики Томского государственного университета, 634050 Томск
leva@niipmm.tsu.ru

²Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, 659322 Бийск

³Томский политехнический университет, 634034 Томск

Представлены результаты измерения нестационарной скорости горения гомогенного и модельного смесового твердых топлив при резком сбросе давления в полузамкнутом объеме, полученные двумя независимыми методами — скоростной киносъемкой и методом, основанным на решении обратной задачи внутренней баллистики. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что рассмотренные методы являются взаимодополняющими.

Ключевые слова: твердое топливо, нестационарная скорость горения, полузамкнутый объем, сброс давления, скоростная киносъемка, обратная задача внутренней баллистики, очагово-пульсирующий режим горения.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема измерения нестационарной скорости горения твердых топлив с высоким временным и пространственным разрешением до сих пор остается актуальной, несмотря на значительное количество предлагаемых методов [1]. В настоящее время все большее внимание привлекают косвенные методы измерения нестационарной скорости, основанные на постановке и решении обратных задач внутренней баллистики (ОЗВБ-методы) [2–6]. В работе [6] рассмотрены два независимых метода, не вносящие возмущений в исследуемый процесс горения твердого топлива — скоростная киносъемка поверхности горения и ОЗВБ-метод, основанный на регистрации зависимости давления от времени в период переходного процесса. Представлена схема экспериментальной установки для измерения нестационарной скорости горения в полузамкнутом объеме при резком сбросе давления вследствие внезапного вскрытия дополнительного сопла.

В настоящей статье выполнен сравнительный анализ результатов измерения нестационарной

скорости горения при разных значениях скорости сброса давления. На установке [6] проведено две серии экспериментов: с гомогенным твердым топливом — порох Н с катализатором (1 % диоксида свинца) и с модельным смесовым твердым топливом на основе бутилкаучука и перхлората аммония, содержащим 15 % порошка алюминия АСД-4. Дисперсность промышленной партии перхлората аммония составляла $160 \div 315$ мкм. В каждой серии экспериментов измерения скорости проведены параллельно ОЗВБ-методом и методом скоростной киносъемки.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ГОРЕНИЕ ГОМОГЕННОГО ТОПЛИВА

Результаты измерений

Эксперименты проводили при постоянной площади поверхности горения $S = 69.25$ см²; начальное давление изменялось в диапазоне $p_0 = 2.5 \div 11$ МПа, максимальная скорость сброса давления — в диапазоне $|dp/dt|_{\max} = 50 \div 765$ МПа/с. Скорость сброса давления варьировали путем изменения площади критического сечения дополнительного сопла F_2 и объема камеры сгорания W и рассчитывали численным дифференцированием измеренной зависимости давления от времени $p(t)$.

Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, а также при поддержке государственного контракта П474 от 04.08.2009 «Создание и переработка высокоэнергетических наполненных полимерных композиций».

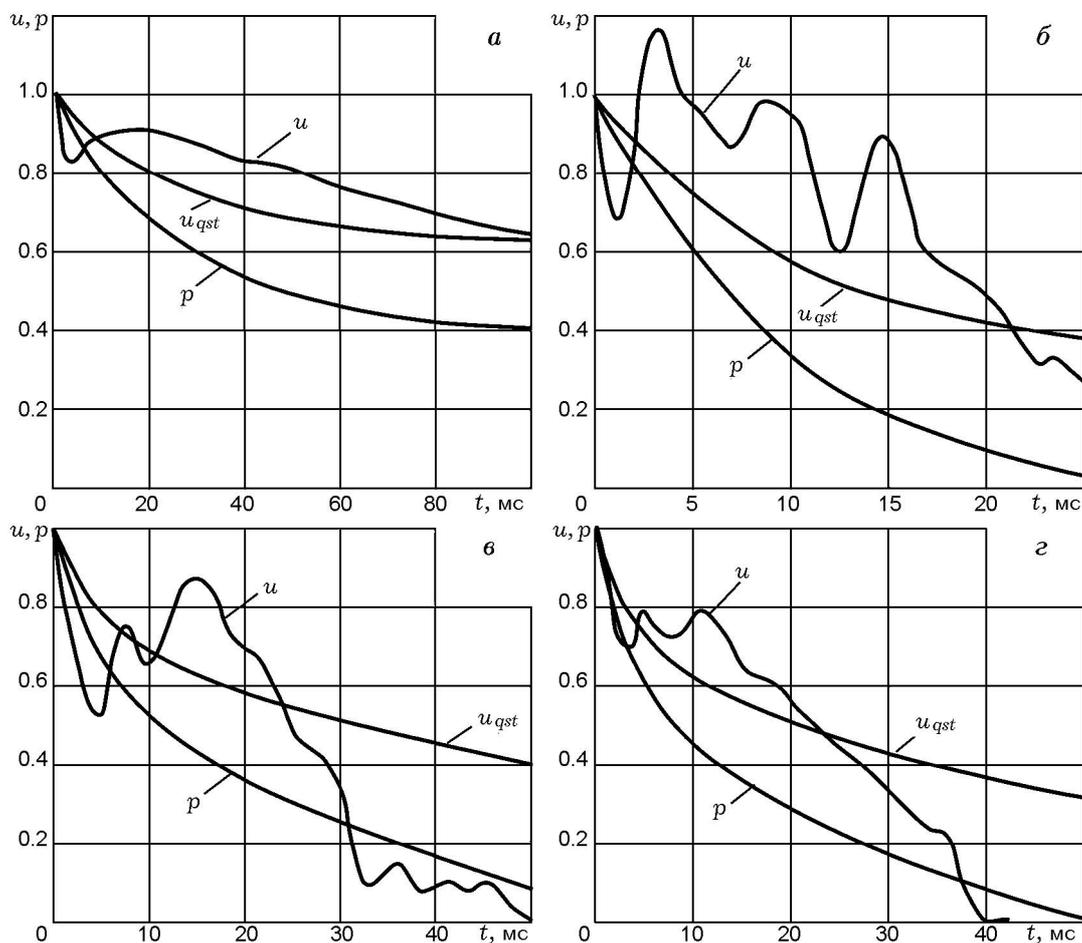


Рис. 1. Результаты измерения нестационарной скорости горения гомогенного твердого топлива ОЗВБ-методом:

a — $p_0 = 10.7$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 250$ МПа/с; *б* — $p_0 = 2.9$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 295$ МПа/с; *в* — $p_0 = 6.07$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 430$ МПа/с (гашение — повторное воспламенение); *г* — $p_0 = 7.87$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 765$ МПа/с (гашение)

С помощью ОЗВБ-метода определяли осредненную по поверхности образца массовую скорость горения (или линейную скорость горения при известной постоянной плотности топлива). Методом киносъемки измеряли линейную скорость горения в центральной части образца в пределах поля съемки 4×6 мм и проводили ее арифметическое осреднение для нескольких координат x_i (не более пяти), взятых через одинаковый интервал Δx . Для смесового твердого топлива разброс скорости горения в пределах поля съемки был больше, чем для гомогенного, что связано с неоднородностью структуры смесового топлива.

Результаты определения нестационарной скорости горения в период сброса давления ОЗВБ-методом представлены на рис. 1. Значения

скорости горения u и давления p отнесены к соответствующим начальным значениям u_0, p_0 (перед началом сброса давления). Здесь же приведены зависимости квазистационарной скорости горения $u_{qst}(t)$, рассчитанные по степенному закону скорости горения для рассматриваемого твердого топлива. В зависимости от величины $|dp/dt|_{\max}$ и параметра гашения $B = p_0^{-1}|dp/dt|_{\max}$ можно выделить пять характерных режимов изменения нестационарной скорости горения.

1. При $|dp/dt|_{\max} \approx 100$ МПа/с и $B \approx 15 \text{ с}^{-1}$ зависимость $u(t)$ практически не отличается от квазистационарной $u_{qst}(t)$ на всем протяжении переходного периода; при этом процесс сброса давления можно считать квазистационарным.

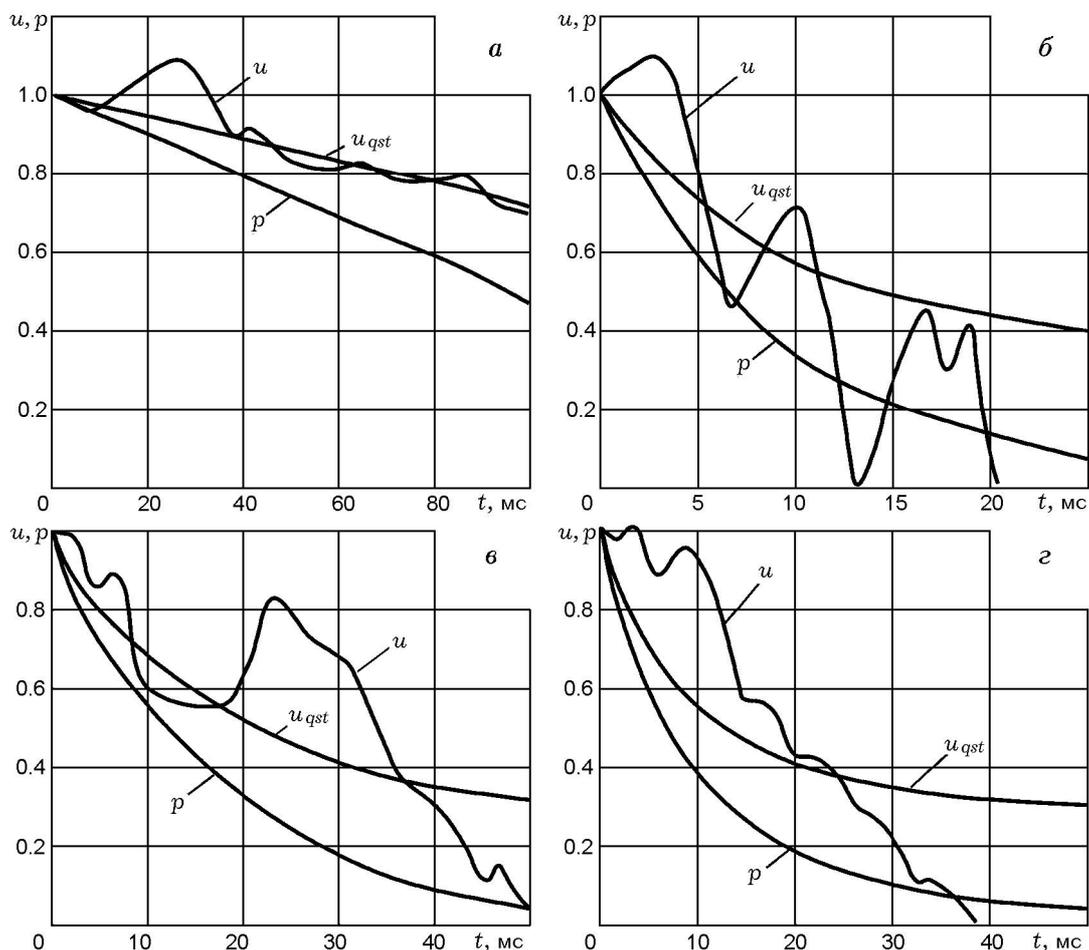


Рис. 2. Результаты измерения нестационарной скорости горения гомогенного твердого топлива методом скоростной киносъемки:

a — $p_0 = 6.3$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 40$ МПа/с; *б* — $p_0 = 2.7$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 216$ МПа/с (гашение — повторное воспламенение); *в* — $p_0 = 6.7$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 407$ МПа/с (гашение — повторное воспламенение); *г* — $p_0 = 7.5$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 798$ МПа/с (гашение)

2. При увеличении скорости сброса давления ($|dp/dt|_{\max} \approx 250$ МПа/с) и достаточно больших значениях параметра гашения ($B \approx 23.4$ с⁻¹) характер изменения скорости близок к квазистационарному; в камере сгорания устанавливается новый стационарный уровень давления $p_1 = 4.0$ МПа (рис. 1, *a*). Максимальное расхождение зависимостей $u(t)$ и $u_{qst}(t)$ (12 %) достигается примерно в середине переходного периода (при $p \approx 0.5p_0$).

3. Третий режим характеризуется тем, что примерно при же скоростях сброса давления ($|dp/dt|_{\max} = 295$ МПа/с), но более высоких значениях параметра гашения ($B \approx 100$ с⁻¹) изменение $u(t)$ приобретает колебательный характер (рис. 1, *б*). Амплитуда колебаний достигает 40 % от уровня u_{qst} , средняя

частота колебаний $150 \div 200$ Гц. Возможен переход к неустойчивому горению («чиханию»).

4. При $p_0 > 6$ МПа с увеличением $|dp/dt|_{\max}$ нестационарный характер изменения $u(t)$ проявляется более отчетливо (рис. 1, *в*). В некоторый момент времени скорость горения становится существенно больше квазистационарной, затем происходит резкое падение нестационарной скорости (режим «гашение — повторное воспламенение»). На всем протяжении переходного процесса наблюдаются колебания скорости горения.

5. При дальнейшем увеличении скорости сброса давления колебания зависимости $u(t)$ исчезают и происходит полное гашение топлива (рис. 1, *г*). При этом $|dp/dt|_{\max} > 400$ МПа/с.

Результаты измерения нестационарной

скорости горения гомогенного твердого топлива методом скоростной киносъемки представлены на рис. 2. В этой серии экспериментов варьировали значения p_0 , $|dp/dt|_{\max}$ и объем камеры W . Поведение зависимости $u(t)$ в период сброса давления в общем совпадает с результатами, полученными ОЗВБ-методом, при этом также наблюдалось пять характерных режимов. При $|dp/dt|_{\max} \approx 40$ МПа/с измеренная зависимость $u(t)$ в пределах погрешности измерения практически совпадает с квазистационарной кривой $u_{qst}(t)$ (рис. 2,а). При увеличении скорости сброса давления ($|dp/dt|_{\max} = 216$ МПа/с, $p_0 = 2.7$ МПа, $B = 80$ с⁻¹) зависимость $u(t)$ носит ярко выраженный колебательный характер (рис. 2,б). Частота колебаний (≈ 150 Гц) того же порядка, что и при измерении ОЗВБ-методом, однако их амплитуда значительно выше — достигает 100 % от квазистационарного уровня на всем промежутке переходного периода. Отметим, что подобные колебания были обнаружены ранее в работе [7] при измерении нестационарной скорости горения СВЧ-методом при $|dp/dt|_{\max} < 250$ МПа/с. При дальнейшем увеличении скорости сброса давления амплитуда колебаний зависимости $u(t)$ уменьшается и составляет $\approx 30 \div 50$ % от квазистационарного уровня (рис. 2,в). Полного погасания не происходит (режим повторного воспламенения). В режиме полного гашения резкое уменьшение нестационарной скорости горения сопровождается колебаниями с частотой $\approx 150 \div 170$ Гц. Гашение происходит в момент $t = 38$ мс, что совпадает с данными ОЗВБ-метода. При этом момент гашения соответствует значению $p \approx 0.1p_0$ (рис. 2,г).

Анализ результатов

Анализ частотных характеристик колебательных режимов нестационарной скорости горения при достаточно больших скоростях сброса давления ($|dp/dt|_{\max} > 295$ МПа/с) показал идентичность характерных частот, полученных каждым из методов. Метод скоростной киносъемки (который является, по сути, локальным) позволяет выявить ряд эффектов, которые не могут быть получены интегральным ОЗВБ-методом.

Как на стационарном, так и на квазистационарном участке зависимости $u(t)$ наблюдаются колебания с амплитудой $\approx 10 \div 15$ % от среднего уровня и с частотой $\approx 30 \div 70$ Гц, что

согласуется с результатами работы [8]. Фазы колебаний на отдельных участках поверхности горения могут отличаться на 180° как для квазистационарных, так и для нестационарных режимов горения.

Анализ кинограмм процесса нестационарного горения при $|dp/dt|_{\max} > 216$ МПа/с показал, что значительное увеличение скорости горения по сравнению с квазистационарной можно объяснить диспергированием приповерхностного слоя, т. е. отрывом слоя поверхности топлива в результате резкого падения давления в камере сгорания (см. рис. 2,б-г). Поверхность горения из первоначально плоской в начале сброса давления ($t = 0$) переходит в неровную ($t = 14$ мс) с характерными размерами вертикальных выступов и впадин $\approx 100 \div 120$ мкм. Затем поверхность горения становится бугристой ($t = 26$ мс) с характерными глубиной $\approx 150 \div 200$ мкм и расстоянием между выступами $\approx 100 \div 300$ мкм. При этом одновременно возрастает интенсивность излучения пламени, что можно объяснить догоранием диспергированного слоя в газовой фазе. Далее интенсивность излучения снижается ($t \approx 35$ мс) и происходит погасание топлива. Характерные размеры выступов непосредственно перед гашением на кинокадрах коррелируют с размерами неоднородностей на микрофотографиях погашенного образца (рис. 3,а). При этом на поверхности наблюдаются выступы-впадины размером $200 \div 250$ мкм, участки с ровной поверхностью, характерный размер которых $100 \div 150$ мкм, и образования в виде вспененной поверхности (белый налет с пузырьками размером $3 \div 10$ мкм).

Таким образом, диспергирование, вероятно, происходит из-за вспенивания и отрыва (вскипания) жидкого слоя на поверхности топлива. Толщину диспергированного слоя Δl можно оценить, исходя из того что резкое изменение скорости горения до максимального уровня происходит за характерное время $\Delta t \approx 2.5 \div 3.0$ мс. При этом значения u могут превысить u_{qst} в $1.3 \div 1.5$ раза. Величину Δl оценим по формуле

$$\Delta l \approx \Delta t(u - u_{qst}).$$

При $B \approx 60 \div 90$ с⁻¹ оценки по этой формуле дают значения $\Delta l \approx 8 \div 10$ мкм, что по порядку величины совпадает с размерами пузырьков на поверхности топлива. Эти значения намного меньше, чем величина сгоревшего свода за

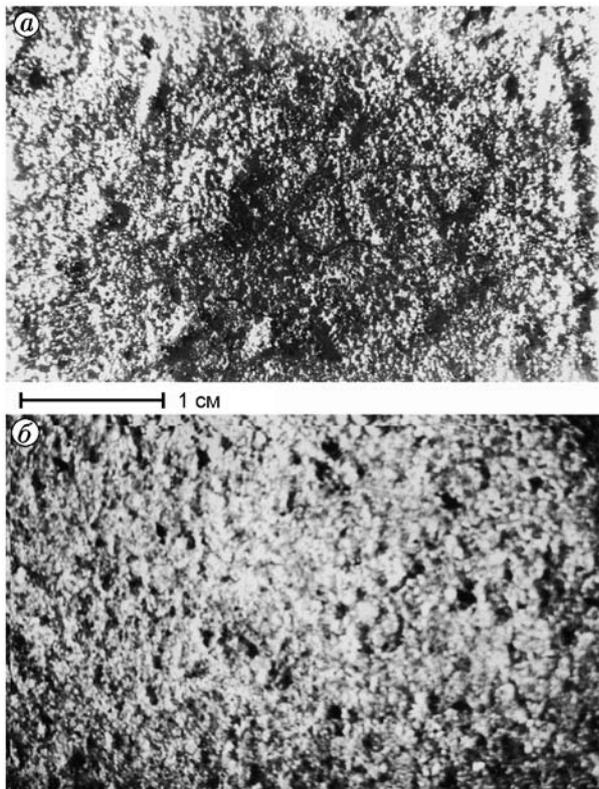


Рис. 3. Фотографии погашенных образцов гомогенного (а) и смешанного (б) твердых топлив

период пульсации [8]. Однако в данном случае речь идет об отрыве жидкого слоя в реакционной зоне конденсированной фазы за счет резкого сброса давления, а не о регулярном изменении поверхности баллиститного пороха.

Погасание гомогенного твердого топлива в режиме «гашение — повторное воспламенение» носит ярко выраженный очаговый характер. При этом размеры очагов горения, представляющих собой светящиеся пятна на кинограмме поверхности топлива, составляют $\approx 200 \div 250$ мкм (при $p_0 = 0.6$ МПа), что соответствует данным [8–11]. Для режима полного гашения топлива очаговый характер погасания на кинограмме не проявляется — фон поверхности горения сразу становится равномерно темным.

Таким образом, анализ кинограмм процесса и измеренных зависимостей $u(t)$ позволяет сделать вывод о важной роли диспергирования в процессе гашения гомогенных твердых топлив (типа пороха Н). При отрыве слоя поверхности топлива происходит ее «захолаживание», а затем при достижении критической

температуры поверхности — погасание топлива.

Сравнение измерений нестационарной скорости горения гомогенного твердого топлива при резком сбросе давления, выполненных ОЗВБ-методом и методом скоростной киносъемки, показало, что оба метода дают достаточно близкие результаты, а именно:

- колебательный характер изменения $u(t)$ с большой амплитудой при $|dp/dt|_{\max} \approx 200$ МПа/с и $p_0 \approx 2 \div 3$ МПа;
- значительное увеличение скорости горения $u(t)$ по сравнению с квазистационарной $u_{gst}(t)$ в отдельные моменты времени при $|dp/dt|_{\max} > 400$ МПа/с;
- полное гашение при $p \approx 0.1p_0$ и $|dp/dt|_{\max} > 520$ МПа/с в диапазоне $p_0 = 5.5 \div 8.0$ МПа;
- среднее значение скорости сброса давления, при котором происходит гашение, $|dp/dt| > 400$ МПа/с;
- в диапазоне давлений $p_0 = 5.5 \div 8.0$ МПа критическое значение параметра гашения $B_{cr} = p_0^{-1}|dp/dt|_{\max} = 80 \div 100$ с $^{-1}$.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ГОРЕНИЕ СМЕСЕВОГО ТОПЛИВА

Результаты измерений

Эксперименты проводили при варьировании начального давления $p_0 = 1.9 \div 6.4$ МПа, поверхности горения $S = 59.25 \div 69.25$ см 2 , объема камеры сгорания $W = 637 \div 809$ см 3 и скорости сброса давления $|dp/dt|_{\max} = 30 \div 400$ МПа/с.

Результаты измерения нестационарной скорости горения в период сброса давления методом скоростной киносъемки представлены на рис. 4. В зависимости от величины $|dp/dt|_{\max}$ обнаружено два режима — квазистационарное изменение $u(t)$ при $|dp/dt|_{\max} \approx 30 \div 40$ МПа/с и полное гашение при более высоких значениях скорости сброса давления. Для первого режима горения (рис. 4,а), так же как и в случае гомогенного топлива, характерно наличие колебаний зависимости $u(t)$. Амплитуда колебаний составляет до 10 % от квазистационарной зависимости $u_{gst}(t)$, а частота колебаний в процессе сброса давления — $45 \div 70$ Гц. С увеличением скорости сброса давления до $|dp/dt|_{\max} > 180$ МПа/с наблюдалось полное гашение (рис. 4,б–г). Характер зависимости

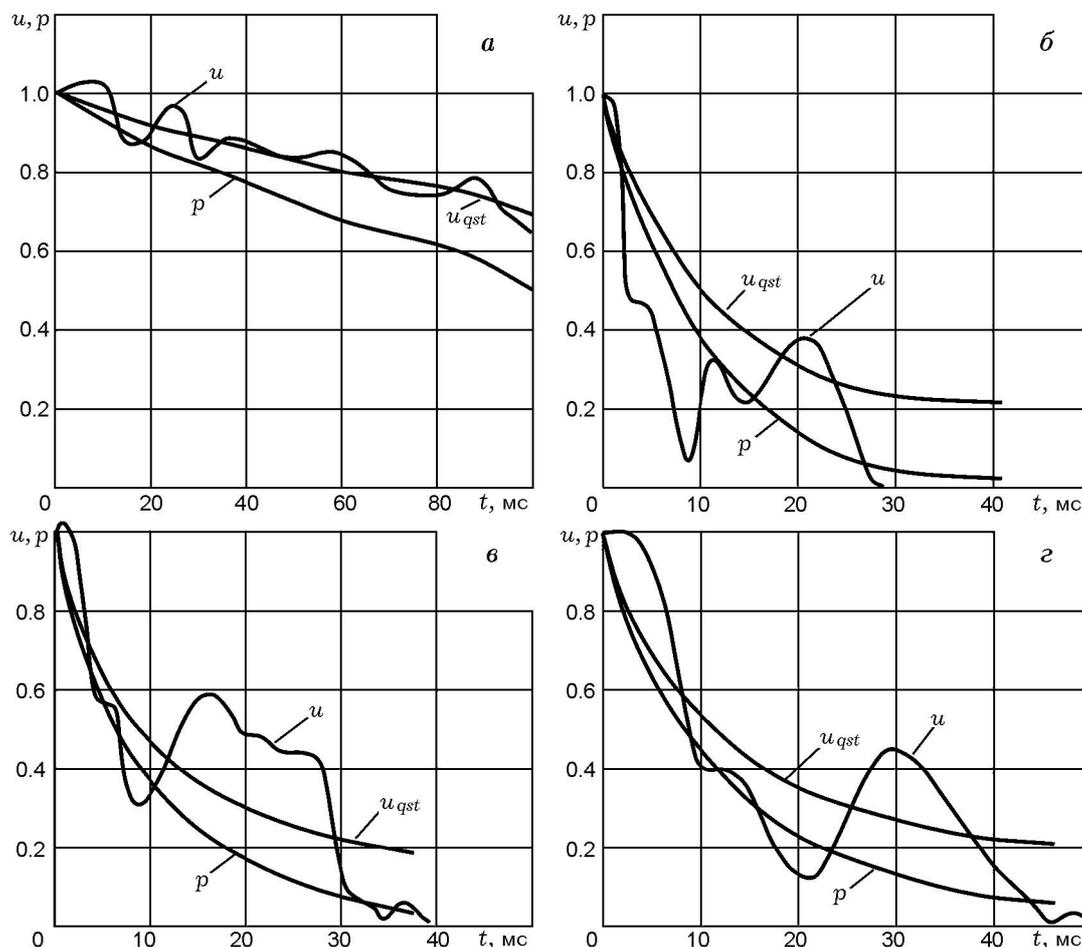


Рис. 4. Результаты измерения нестационарной скорости горения смешанного твердого топлива методом скоростной киносъемки:

a — $p_0 = 4.7$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 30$ МПа/с; *б* — $p_0 = 1.9$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 186$ МПа/с (гашение); *в* — $p_0 = 2.9$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 294$ МПа/с (гашение); *г* — $p_0 = 5.9$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 400$ МПа/с (гашение)

$u(t)$ при этом примерно идентичен. В начальный период происходит резкое снижение скорости горения, затем (в середине переходного процесса) — увеличение $u(t)$ в $2 \div 4$ раза, сопровождающееся колебаниями с частотой $25 \div 100$ Гц, и далее — полное гашение. Время гашения зависит от параметра B (см. рис. 4, б–г). Отметим, что колебательный режим нестационарной скорости горения при сбросе давления был обнаружен в работе [7] при измерении нестационарной скорости горения смешанных твердых топлив на основе перхлората аммония (ПХА) и горючего-связующего НТРВ методом СВЧ-зондирования.

Анализ результатов

Для смешанного топлива результаты измерения нестационарной скорости горения

ОЗВБ-методом отличаются от полученных методом скоростной киносъемки в большей степени, чем для гомогенного топлива. На рис. 5 приведены экспериментальные зависимости $u(t)$, полученные двумя методами при одинаковых условиях. Большое расхождение результатов может быть связано с тем, что ОЗВБ-методом измеряется массовая скорость горения (в предположении постоянства плотности топлива). В случае горения смешанного твердого топлива плотности и скорости пиролиза ПХА и горючего-связующего различны, поэтому осредненные по полю съемки значения нестационарной скорости имеют больший разброс, чем при горении гомогенного состава.

Анализ кинограмм процесса горения образцов смешанного твердого топлива показал, что в начале сброса давления ($t = 3$ мс) по-

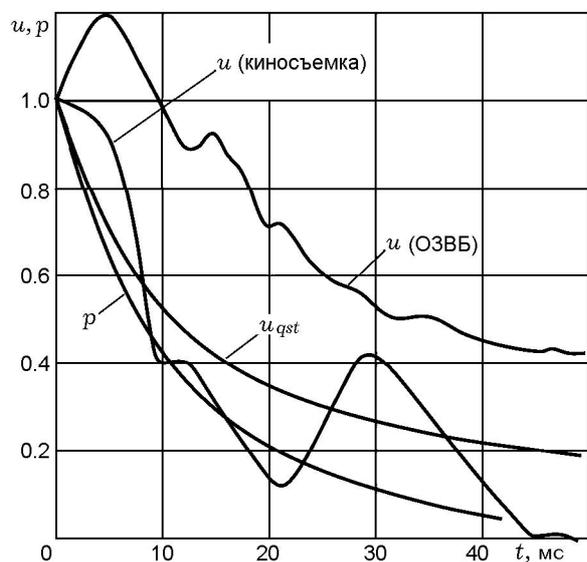


Рис. 5. Сравнение результатов измерения нестационарной скорости горения смесового твердого топлива, полученных методом скоростной киносъемки и ОЗВБ-методом в одинаковых условиях эксперимента ($p_0 = 5.9$ МПа, $|dp/dt|_{\max} = 400$ МПа/с)

верхность горения ровная. По мере спада давления частицы ПХА начинают выступать на поверхности, интенсифицируется его газификация (появляются темные струйки над поверхностью кристаллов ПХА), одновременно увеличивается скорость горения ($t = 11$ мс). Далее наступает частичный срыв пламени ($t = 15$ мс), затем второй всплеск скорости горения ($t = 18$ мс), размер кристаллов уменьшается, потемнение на кадре свидетельствует о погасании топлива ($t = 24$ мс). На фотографии поверхности погашенного образца (см. рис. 3, б) видны выступившие на поверхности на $30 \div 50$ мкм частицы ПХА. Такая характерная структура поверхности погашенного образца смесового топлива наблюдалась во всех экспериментах с гашением сбросом давления. Подобное явление обнаружено и при небольших скоростях сброса давления ($|dp/dt|_{\max} \approx 30$ МПа/с), когда при уменьшении давления также наблюдается «выступление» частиц ПХА над поверхностью смесового топлива, однако из-за малых значений $|dp/dt|_{\max}$ погасание не наступает.

Анализ результатов экспериментов, проведенных для смесового твердого топлива, позволил выявить некоторые закономерности погасания топлив. Обнаружено, что гашение проис-

ходит в диапазоне значений $B_{cr} = 67 \div 150$ с⁻¹. Причем на величину B_{cr} существенное влияние оказывает параметр W/S . Так, при $W/S = 13 \div 20$ см критическое значение параметра гашения составило $B_{cr} = 67 \div 101$ с⁻¹, а при $W/S = 7.7$ см — $B_{cr} \geq 140$ с⁻¹. То есть с увеличением параметра W/S гашение происходит при меньших скоростях сброса давления. Подобный результат получен в работе [12] (уменьшение W/S в три раза привело к увеличению $|dp/dt|_{\max}$ в $1.5 \div 2.1$ раза в диапазоне $p_0 = 2.8 \div 7.6$ МПа).

Можно предположить, что не критичное использование приведенных в литературе пороговых значений B_{cr} [13] (без учета конкретной геометрии камеры сгорания, свойств топлива и т. д.) может привести к существенным ошибкам определения момента погасания. В работах [14, 15] отмечается, что для цилиндрического заряда ($W/S = 2.1 \div 2.4$ см) гашение происходит при более высокой (на два порядка) скорости уменьшения давления в камере по сравнению с торцевым зарядом ($W/S = 11.3$ см). Это можно объяснить тем, что с увеличением отношения W/S при одном и том же значении p_0 для сохранения уровня $|dp/dt|_{\max}$ необходимо увеличение степени открытия сопла, т. е. увеличение площади критического сечения дополнительного сопла F_2 . С ростом F_2 конечный уровень давления в камере сгорания p_1 будет уменьшаться, что облегчает гашение.

Для гомогенных топлив одним из возможных факторов, влияющих на гашение, может быть очагово-пульсирующий режим горения. Понятие «очагово-пульсирующий режим горения» впервые введено, по-видимому, К. И. Синаевым [11]. Согласно этой гипотезе, детально проанализированной в работах [8–10], поверхность горения состоит из отдельных очагов горения, которые в каждый момент времени горят с существенно отличающимися скоростями, скорость горения отдельного очага меняется во времени и очаги выгорают с определенной периодичностью для заданного давления. В частности, в области параметров процесса, характерных для режима «погасание — повторное воспламенение», в зависимости от соотношения количества очагов с разными скоростями горения перед спадом давления в процессе сброса давления происходит погасание большей или меньшей части поверхности горения. Но, благодаря сохранившимся очагам горения, спустя некоторый период задержки на-

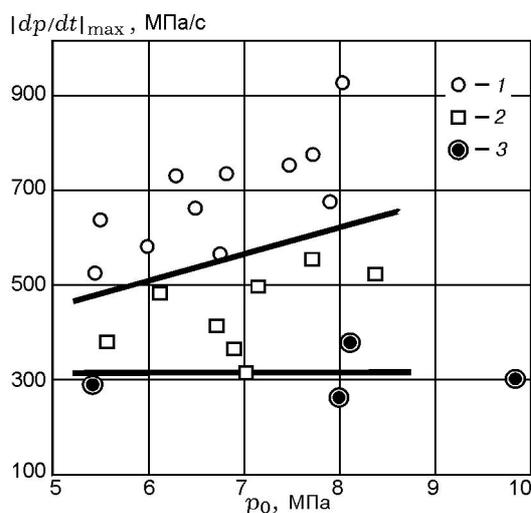


Рис. 6. Режимы погасания однородного твердого топлива при сбросе давления (эксперимент):

1 — гашение, 2 — гашение и повторное воспламенение, 3 — переход на второй стационарный режим

блюдается повторное воспламенение всей поверхности топлива [9]. Экспериментальная зависимость максимальной скорости сброса давления, необходимой для гашения однородного твердого топлива, от начального давления p_0 приведена на рис. 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Обнаружено качественно одинаковое поведение зависимости нестационарной скорости горения в переходном процессе, измеренной двумя методами. Зависимость $u(t)$ носит колебательный характер. Амплитуда и частота колебаний уменьшаются с понижением скорости сброса давления. При этом нестационарная скорость горения может отличаться от квазистационарной более чем на 50 %. Сравнение результатов измерений двумя методами показывает их количественное расхождение, особенно заметное для гетерогенных твердых топлив.

- В зависимости от начального давления p_0 , скорости сброса давления $|dp/dt|_{\max}$ и параметра гашения $B = p_0^{-1}|dp/dt|_{\max}$ обнаружены пять режимов нестационарного горения однородного твердого топлива (пороха Н, содержащего 1 % диоксида свинца) — начиная от квазистационарного и вплоть до режима полного гашения. В большинстве режимов наблюдался колебательный характер изменения

нестационарной скорости в период сброса давления. Получены критические значения параметров процесса, разделяющие указанные режимы для данного твердого топлива.

- Для модельного смешанного твердого топлива обнаружены два режима нестационарного горения при спаде давления — квазистационарное изменение $u(t)$ при $|dp/dt|_{\max} \approx 30 \div 40$ МПа/с и полное гашение при более высоких значениях скорости сброса давления. Для смешанного состава «срыв» на режим нестационарного горения происходит при существенно меньших значениях $|dp/dt|_{\max}$, чем для однородного состава топлива.

- Сравнение результатов измерений нестационарной скорости горения, проведенных двумя независимыми методами, показало их качественное соответствие. Количественные характеристики отличаются, причем в большей степени для смешанного твердого топлива, чем для однородного. С этой точки зрения рассмотренные методы измерений являются взаимодополняющими.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zarko V. E., Kuo K. K. Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // Non-intrusive Combustion Diagnostics / K. K. Kuo and T. Parr (Eds). — New York: Begel House, 1994. — P. 600–623.
2. Липанов А. М. Аналитическое решение обратной задачи внутренней баллистики регулируемого РДТТ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 44–50.
3. Архипов В. А., Зимин Д. А. Анализ условий применимости обратных методов восстановления нестационарной скорости горения // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 39–43.
4. Иванов С. М., Чуканов Н. А. Оценка динамических характеристик нестационарного горения твердого топлива в полужамкнутом объеме по измерениям регулируемого давления // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 1. — С. 80–91.
5. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Ворожцов А. Б., Де Лука Л. и др. Нестационарные эффекты при горении высокоэнергетических нанокмполитов // Изв. вузов. Физика. — 2007. — № 9/2. — С. 3–11.
6. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г. Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. I. Методы исследования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5.

7. **Strand L. D., Schultz A. L., Reedy G. K.** Microwave Doppler technique for determining solid propellant transient regression rates // *J. Spacecraft and Rockets*. — 1974. — V. 11, N 2. — P. 75–83.
8. **Маршаков В. Н.** Параметры очагово-пульсирующего режима горения нитроглицеринового пороха // *Хим. физика*. — 1987. — Т. 6, № 4. — С. 530–537.
9. **Маршаков В. Н.** Применение гипотезы об очагово-пульсирующем механизме горения к анализу режимов горения пороха при спаде давления // *Горение конденсированных систем: материалы IX Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву*. — Черногоровка, 1989. — С. 47–51.
10. **Маршаков В. Н.** Анализ повторного воспламенения пороха после спада давления с позиции очагово-пульсирующего механизма горения // *Физика горения и взрыва*. — 1991. — Т. 27, № 1. — С. 12–18.
11. **Синаев К. И.** Очагово-пульсирующее горение нитроцеллюлозных порохов // *I Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву: тез. докл.* — М.: Наука, 1968. — С. 59–63.
12. **Merkle C. L., Turk S. L., Summerfield M.** Extinguishment of solid propellants by depressurization: Effect of propellant parameters // *AIAA Paper*. — 1969. — N 176. — P. 1–19.
13. **Шишков А. А., Панин С. Д., Румянцев Б. В.** Рабочие процессы в ракетном двигателе твердого топлива. — М.: Машиностроение, 1989.
14. **Присняков В. Ф.** Динамика ракетных двигателей твердого топлива. — М.: Машиностроение, 1984.
15. **Шур М. С.** Нестационарное горение ТРТ на переходных режимах двигателя и разработка регулируемых РДТТ // *Итоги науки и техники. Авиационные и ракетные двигатели*. — М.: ВИНТИ АН СССР, 1977. — Т. 2. — С. 129–175.

*Поступила в редакцию 4/IV 2008 г.,
в окончательном варианте — 27/XII 2009 г.*