УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СБРОСЕ ДАВЛЕНИЯ

В. А. Архипов¹, С. А. Басалаев¹, С. С. Бондарчук², О. Г. Глотов³, В. А. Порязов¹, Я. А. Дубкова¹

¹Томский государственный университет, 634050 Томск, leva@niipmm.tsu.ru

²Томский государственный педагогический университет, 634061 Томск

³Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены методика и результаты экспериментального исследования нестационарной скорости горения высокоэнергетических материалов, содержащих добавки порошков металлов, при сбросе давления со скоростью 140 ÷ 160 МПа/с. Для определения нестационарной скорости горения использовался метод, основанный на постановке и решении обратной задачи внутренней баллистики. Исследования проведены для высокоэнергетических материалов, включающих в себя энергетические добавки в виде порошков металлов — алюминия марок АСД-4, АСД-6, Alex, а также диборида и додекаборида алюминия. Анализ результатов исследования показал, что нестационарная скорость горения высокоэнергетических материалов при резком сбросе давления носит колебательный характер и зависит от типа энергетической добавки.

Ключевые слова: высокоэнергетический материал, порошки металлов, сброс давления, нестационарная скорость горения, экспериментальное исследование.

DOI 10.15372/FGV20230216

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании двигательных установок на твердом топливе неизбежно возникают вопросы, связанные с расчетом нестационарных характеристик горения. В частности, это относится к определению нестационарной скорости горения высокоэнергетических материалов (ВЭМ) при быстром изменении давления [1]. Проблема измерения нестационарной скорости горения ВЭМ с высоким временным и пространственным разрешением до сих пор остается актуальной, несмотря на значительное количество предлагаемых методов [2]. Одной из важнейших задач теории нестационарного горения при сбросе давления является описание динамики переходных процессов в регулируемых двигательных установках на твердом топливе. При этом необходимо обеспечить смену режимов горения (переход на более низкий уровень тяги двигателя) и избежать погасания заряда. В настоящее время всё большее внимание привлекают косвенные методы измерения нестационарной скорости горения, основанные на постановке и решении обратных задач внутренней баллистики (ОЗВБ-методы) [3–14]. Известны результаты исследования влияния быстрого изменения давления на нестационарную скорость горения ВЭМ, содержащих порошки алюминия разной дисперсности (АСД-4, Alex) [10]. Представляет значительный интерес изучение нестационарной скорости горения составов ВЭМ, содержащих диборид и додекаборид алюминия, а также бидисперсные порошки алюминия. Предварительные исследования, проведенные в последние годы в разных исследовательских группах, продемонстрировали перспективность таких составов.

В настоящей работе представлены методика и результаты экспериментального исследования нестационарной скорости горения высокоэнергетических материалов, включающих в себя энергетические добавки порошков алюминия марок АСД-4, АСД-6, Alex, а также диборида и додекаборида алюминия, при сбросе давления со скоростью ≈ 140 ÷ 160 МПа/с. Для определения нестационарной скорости горения использовался ОЗВБ-метод.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-10054).

[©] Архипов В. А., Басалаев С. А., Бондарчук С. С., Глотов О. Г., Порязов В. А., Дубкова Я. А., 2023.



Рис. 1. Схема установки:

1 — камера сгорания, 2 — заряд исследуемого ВЭМ, 3 — перфорированный контейнер, 4 — фиксаторы, 5 — диафрагма, 6 — основное сопло, 7 — дополнительное сопло, 8 — сгорающая пробка, 9 — воспламенитель, 10 — электрокапсюльный инициатор, 11 — датчик давления, L — расстояние между образцом ВЭМ и основным соплом



Рис. 2. Фотография трубчато-канального заряда, закрепленного в перфорированном контейнере

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1.1. Описание экспериментальной установки

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис. 1.

В камеру сгорания 1 помещался заряд 2 исследуемого ВЭМ с постоянной поверхностью горения. Использовались заряд торцевого горения и трубчато-канальный заряд с забронированными (негорящими) торцами. Заряд 2 помещался в перфорированном контейнере 3 и закреплялся в камере с помощью фиксаторов 4. Контейнер (рис. 2) образован двумя перфорированными фланцами, между которыми зажат образец с помощью резьбовых шпилек. Перфорация обеспечивает свободное распространение продуктов сгорания в камере 1. Перед основным соплом 6 устанавливалась перфорированная диафрагма 5, предназначенная для уменьшения шлакования сопла конденсированными продуктами сгорания ВЭМ.

В зависимости от выбранного стационарного давления подбиралось основное сопло 6. Дополнительное сопло 7 перекрывалось сгорающей пробкой 8 из баллиститного топлива (порох Н с катализатором). Время выхода на стационарный режим и время сброса давления регулировались длиной пробки 8, начальное давление в камере сгорания 1 определялось массой воспламенителя 9. В качестве воспламенителя использовался дымный ружейный порох ДРП массой 0.4 г и стружка баллиститного топлива, масса которой варьировалась. Воспламенение заряда ВЭМ осуществлялось электрокапсюльным инициатором 10. Давление в камере в период горения заряда ВЭМ и переходного процесса сброса давления измерялось с помощью тензометрического датчика 11 типа ЛХ-412. Уровень стационарного давления в диапазоне 4 ÷ 6 МПа варьировался выбором диаметра основного сопла 6. Подбором поверхности горения и диаметра основного сопла обеспечивалась скорость сброса давления в диапазоне $140 \div 160 \text{ MIIa/c.}$ При этом обеспечивался переход на второй режим горения. В экспериментах со смесевыми ВЭМ [10] при скоростях сброса |dp|

 $\left|\frac{dp}{dt}\right|_{\text{max}} > 186 \text{ МПа/с}$ наблюдалось их полное гашение.

1.2. ОЗВБ-метод

В настоящей работе для определения нестационарной скорости горения использовался метод, основанный на постановке и решении обратной задачи внутренней баллистики (O3BБ). При реализации метода нестационарная скорость горения u(t) в период переходного процесса определялась по изменению давления в камере сгорания. Для условий проведенных экспериментов достаточно адекватной является термодинамическая постановка задачи [8, 9, 15]. Таблица 1

| Дисперсные характеристики порошков | | | | | |
|------------------------------------|---------------------|--|--|--|--|
| Марка порошка | $D_{43}, { m MKM}$ | | | | |
| АСД-4 | 7.3 | | | | |
| АСД-6 | 4.7 | | | | |
| Alex | 0.18 | | | | |
| AlB ₂ | 5.6 | | | | |
| AlB ₁₂ | 4.4 | | | | |

Решение ОЗВБ предполагает идентификацию функции скорости горения по измеренной экспериментальной кривой $p_{exp}(t)$. При этом зависимость $p_{exp}(t)$ разбивалась на n временных интервалов Δt_i (i = 1, 2, ..., n). На каждом интервале Δt_i последовательно решалась система уравнений [15, 16], выражающая законы сохранения для осредненных по объему камеры параметров при варьировании скорости горения, и находилось расчетное значение p(t).

Для известных на данном интервале Δt_i экспериментальных и расчетных значений давления вычислялся минимум функционала:

$$J = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t_i} |p(t) - p_{exp}(t)| dt.$$
(1)

Решение проводилось методом прямого поиска для варьируемого параметра u_{i+1} по определенному на предыдущем шаге значению скорости горения u_i . Значение скорости внутри интервала определялось линейной интерполяцией

$$u(t) = u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta t_i} (t - t_i), t_i \le t \le t_{i+1}.$$
(2)

1.3. Исследуемые ВЭМ

Экспериментальное исследование нестационарной скорости горения проводилось для ВЭМ на основе инертного углеводородного горючего-связующего СКДМ-80 (раствор дивинильного каучука в трансформаторном масле в соотношении 20/80) и окислителя — бидисперсного перхлората аммония (ПХА). В качестве энергетических добавок использовались порошки алюминия промышленных марок АСД-4, АСД-6, Alex; порошки диборида (AlB₂) и додекаборида (AlB₁₂) алюминия, полученные методом СВС. Среднемассовые диаметры D₄₃



Рис. 3. Схема образцов ВЭМ с постоянной поверхностью горения:

1 — ВЭМ, 2 — бронировка; *а* — заряд торцевого горения, *б* — трубчато-канальный заряд

частиц порошков высокоэнергетических добавок приведены в табл. 1 [17, 18].

Отверждение составов ВЭМ проводилось с использованием отвердителя ТОН-2 (0.5 % сверх 100 %) при комнатной температуре в течение двух суток. Рецептуры исследуемых ВЭМ приведены в табл. 2.

Для точности идентификации нестационарной скорости горения и соответствующей формы диаграммы давление — время геометрия образца ВЭМ должна обеспечивать постоянство поверхности горения $S_m = \text{const.}$ Для этого чаще всего используется заряд торцевого горения (рис. 3, *a*) либо трубчато-канальный заряд с бронированными торцами (рис. 3, *b*) [16]. Геометрия зарядов определяется их длиной *l*, внешним радиусом *R* и внутренним *r*.

В первом случае величина поверхности горения

$$S_m(t) = S_m|_{(t=0)} = \pi R^2 = \text{const.}$$

Во втором случае начальная поверхность горения

$$S_m|_{(t=0)} = 2\pi Rl + 2\pi rl = 2\pi l(R+r).$$

Через некоторый момент времени δt заряд выгорает на величину сгоревшего свода δe . При этом

$$S_m(t + \delta t) = 2\pi (R - \delta e)l +$$
$$+ 2\pi (r + \delta e)l = 2\pi l(R + r) = \text{const.}$$

Таблица 2

| Состав | Содержание компонентов, % (мас.) | | | | | | |
|--------|----------------------------------|------|------|-------|-------|---------|-------------------|
| | СКДМ-80 | ПХА | Alex | АСД-4 | АСД-6 | AlB_2 | AlB ₁₂ |
| A1 | 19.7 | 80.3 | | | | | |
| A2 | 19.7 | 64.6 | | 15.7 | | | |
| A3 | 19.7 | 64.6 | | | 15.7 | | |
| A4 | 19.7 | 64.6 | 15.7 | | | | _ |
| A5 | 19.7 | 64.6 | | | | 15.7 | |
| A6 | 19.7 | 64.6 | _ | | | | 15.7 |
| A7 | 19.7 | 64.6 | 10.7 | 5 | | | _ |

Компонентный состав композиций ВЭМ

При проведении экспериментальных исследований радиус R зарядов ВЭМ торцевого горения варьировался в диапазоне $15 \div 20$ мм в зависимости от компонентного состава ВЭМ. Для трубчато-канальных зарядов внешний и внутренний радиусы были неизменными и составляли R = 30 мм и r = 10 мм. Длина l варьировалась от 22 до 26 мм в зависимости от компонентного состава ВЭМ.

1.4. Закон стационарного горения исследуемых ВЭМ

Измерение стационарной скорости горения исследуемых составов ВЭМ проводилось в бомбе постоянного давления, использовались бронированные по боковой поверхности образцы ВЭМ торцевого горения цилиндрической формы диаметром 10 мм и высотой 30 ÷ 45 мм. Стационарная скорость горения определялась как частное от деления начальной длины образца на время его горения. Эксперименты проведены для трех уровней среднего давления в камере сгорания (2, 4 и 8 МПа).

По результатам измерений стационарной скорости горения, осредненных по 3–5 дублирующим опытам, была получена методом наименьших квадратов аппроксимационная зависимость для закона стационарного горения в диапазоне $p = 2 \div 8$ МПа:

$$u_0(p) = u_1 \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\nu}.$$
 (3)

В табл. З приведены измеренные значения плотности образцов ВЭМ, а также значения параметров u_1 , ν в уравнении (3) и соответствующие значения коэффициента детерминации R^2 .

Таблица3 Характеристики исследованных составов ВЭМ

| Состав | $ ho_m, \Gamma/cm^3$ | $u_1, { m MM/c}$ | ν | R^2 |
|--------|-----------------------|-------------------|-----|-------|
| A1 | 1.59 | 1.8 | 0.3 | 0.91 |
| A2 | 1.60 | 0.6 | 0.8 | 0.99 |
| A3 | 1.66 | 0.4 | 0.9 | 0.99 |
| A4 | 1.60 | 1.4 | 0.5 | 0.97 |
| A5 | 1.65 | 0.6 | 0.7 | 0.99 |
| A6 | 1.68 | 0.9 | 0.6 | 0.98 |
| A7 | 1.65 | 0.6 | 0.9 | 0.99 |

1.5. Отработка методики исследования

Отработка метода проводилась на баллиститном топливе (порох H с катализатором). Заданный уровень давления определялся выбором площади критического сечения сопла S_{cr} и площади поверхности горения S_m и оценивался по формуле Бори [15]:

$$p_{c} = p_{1} \left[\frac{u_{1} \rho_{m} S_{m} \sqrt{R_{g} T_{p}}}{S_{cr} \Gamma(k) p_{1}} \right]^{\frac{1}{1-\nu}},$$

$$\Gamma(k) = \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}},$$
(4)

где k — показатель адиабаты продуктов сгорания ВЭМ, ρ_m — плотность ВЭМ, R_g — газовая постоянная продуктов сгорания, T_p — адиабатическая температура горения ВЭМ при постоянном давлении, u_1 — стационарная скорость



Рис. 4. Фотография погашенного образца смесевого ВЭМ (композиция A1) после сгорания при высоком давлении

горения ВЭМ при атмосферном давлении p_1 . Значения T_p , R_g и k рассчитывались с помощью программы TERRA.

В экспериментах свободный объем камеры сгорания составлял 300 см³, диаметр критического сечения основного сопла варьировался в диапазоне 2 ÷ 4 мм в зависимости от исследуемого состава и выбранного стационарного давления; диаметр критического сечения дополнительного сопла равнялся 6 мм; длина сгорающей пробки диаметром 6 мм варьировалась в диапазоне 6 ÷ 10 мм. При отработке методики использовались заряды торцевого горения из баллиститного топлива. Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе использовалась навеска воспламенителя малой массы для оценки уровня стационарного давления в камере сгорания при выбранной площади поверхности ВЭМ. На втором этапе навеска воспламенителя увеличивалась с целью более быстрого и стабильного выхода на стационарный режим. Результаты по определению нестационарной скорости горения, полученные при отработке методики и установки на баллиститном составе, хорошо согласуются с полученными ранее данными [10, 16].

При определении нестационарной скорости горения исследуемых смесевых композиций ВЭМ (A1–A7) был выявлен и решен ряд проблем, перечисленных ниже. 1. Если горение смесевых ВЭМ при атмосферном давлении происходило с постоянной и близкой к расчетной поверхностью горения S_m , то при высоком давлении в камере сгорания ($p_c \approx 4$ МПа) реальная рабочая поверхность имела вид, отличный от плоского (рис. 4).

Для решения этой проблемы в дальнейшем была изменена технология изготовления образцов. В частности, перемешивание компонентов смеси и их дальнейшая полимеризация проводились в условиях вакуума. Вакуумирование смеси при изготовлении образцов ВЭМ обеспечило «плоскую» поверхность горения S_m при высоких уровнях квазистационарного давления.

2. При определении нестационарной скорости горения смесевых композиций ВЭМ (A1–A7) по сравнению с баллиститным составом наблюдалось регулярное прогорание бронировки из линолеума, растворенного в ацетоне.

Очевидно, что необходимо применение более термостойких и прочных материалов для бронирования зарядов, поскольку температура горения смесевых топлив существенно выше по сравнению с баллиститными и реализующийся уровень давления более высокий. Поэтому бронирование исследуемых композиций ВЭМ (A1–A7) проводилось с использованием клея на основе эпоксидной смолы.

3. При проведении экспериментальных исследований нестационарной скорости горения смесевых составов с содержанием боридов AlB₂ и AlB₁₂ возникла проблема с частичным зашлаковыванием основного сопла конденсированными продуктами сгорания. При этом уровень давления в камере сгорания не достигал рассчитанного по формуле Бори (4) значения.

Можно предположить, что проблема связана с неполным сгоранием энергетических добавок AlB_2 и AlB_{12} в составах A5 и A6 вследствие недостаточного времени пребывания частиц в камере сгорания (при малом времени нахождения частиц в камере возможно завершение химических реакций после вылета во внешнюю среду за основным соплом). Проблемы с уровнем стационарного давления в камере сгорания и с зашлаковыванием сопла удалось решить путем увеличения расстояния L между образцом ВЭМ и основным соплом (см. рис. 1). Это позволило обеспечить достаточное для сгорания время пребывания даже медленно горяцим (по сравнению с алюминием) частицам бо-



Рис. 5. Типичная осциллограмма зависимости давления от времени в камере сгорания для образца A2

ридов. В ходе отработки было выбрано значение L = 5 см.

Типичный вид осциллограммы $p_{exp}(t)$ при сбросе давления представлен на рис. 5. Данную осциллограмму можно разделить на шесть основных участков:

I — зажигание навески воспламенителя и подъем давления в установке за счет его горения;

II — зажигание ВЭМ и выход установки на первый стационарный режим работы (режим высокого давления p_{max});

III — стационарный режим работы при давлении p_{\max} ;

IV — сброс давления в камере сгорания в результате вскрытия дополнительного сопла при вылете сгорающей пробки (поз. 7 и 8 на рис. 1);

V — второй стационарный режим работы (режим низкого давления p_{\min});

VI — свободное истечение продуктов сгорания после полного сгорания заряда ВЭМ.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам отработки методики проведения экспериментов со сбросом давления была выбрана схема образцов ВЭМ в виде трубчато-канального заряда (см. рис. $3, \delta$). Полученные в экспериментах зависимости нестационарной скорости горения от времени представлены на рис. 6-8. Нестационарная скорость горения ВЭМ при сбросе давления определялась на участке IV (см. рис. 5) ОЗБВметодом. На рис. 6 приведены зависимость



Рис. 6. Зависимость $p_{exp}(t)$, нестационарная и квазистационарная скорость горения состава A1 при сбросе давления



Рис. 7. Относительная скорость горения смесевых ВЭМ с добавками порошков алюминия разной дисперсности при сбросе давления

 $p_{exp}(t)$, нестационарная (u) и квазистационарная (u_0) скорости горения состава А1. Далее результаты представлены в безразмерном виде для относительной скорости горения

$$\bar{u}(t) = u(t)/u_0(t),$$
 (5)

где u(t) — нестационарная скорость горения в момент времени t, $u_0(t)$ — соответствующая квазистационарная скорость, рассчитанная по формуле (3).

На рис. 7 представлены результаты по безразмерной скорости горения составов с порошками алюминия разной дисперсности; штриховой линией показана зависимость $\bar{u}(t)$ для базового безметалльного состава A1. Из приведенных графиков следует, что для всех композиций изменение нестационарной скорости го-



Рис. 8. Относительная скорость горения смесевых ВЭМ с добавками порошков боридов алюминия при сбросе давления

рения при быстром сбросе давления носит колебательный характер с частотой $\approx 8 \div 12$ Гц. Зависимости $\bar{u}(t)$ для составов А2 и А3 (содержащих порошки алюминия микронных размеров АСД-4 и АСД-6) практически совпадают. Зависимость $\bar{u}(t)$ для состава А4 (содержащего нанопорошок алюминия Alex) несколько сдвинута по оси времени. Максимальное отличие (≈ 45 %) нестационарной скорости горения от квазистационарной получено для базового состава А1; для составов А2 и А3 (с микропорошками алюминия) отличие составляет ≈ 32 %, а для состава А4 (с нанопорошком алюминия) отличие около 28 %.

Для состава A7, содержащего бидисперсную смесь порошков алюминия (АСД-4 и Alex), переход на второй режим горения получить не удалось. В большинстве опытов наблюдалось полное гашение зарядов из данного состава даже при скоростях сброса $\left|\frac{dp}{dt}\right|_{\max} \leq 160 \text{ МПа/с.}$ Отсюда следует, что на прекращение горения влияет не только скорость спада давления, но и компонентный состав ВЭМ, что согласуется с результатами работ [15, 16].

На рис. 8 представлены результаты измерения относительной скорости горения составов с порошками боридов алюминия (составы A5 и A6); штриховой линией показана зависимость $\bar{u}(t)$ для базового состава A1. Полученные зависимости $\bar{u}(t)$ также носят колебательный характер с той же частотой $\approx 8 \div 12$ Гц. Максимальное отличие (≈ 43 %) нестационарной скорости горения от квазистационарной получено для состава A6 (содержащего доде-

каборид алюминия); для состава A5 (содержащего диборид алюминия) отличие составляет ≈ 38 %.

Анализ результатов измерения нестационарной скорости горения рассмотренных композиций смесевых ВЭМ показал, что изменение нестационарной скорости горения при быстром спаде давления носит колебательный характер. Частота колебаний для всех рассмотренных составов составляла ≈8 ÷ 12 Гц. Отметим, что в работах [10, 16] для близкой по составу композиции, содержащей порошок алюминия АСД-4, наблюдались более высокие значения частоты колебаний нестационарной скорости горения, что, возможно, связано с разной геометрией камеры сгорания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для всех рассмотренных композиций смесевых ВЭМ, содержащих разные энергетические добавки, при сбросе давления получен устойчивый переход на второй режим стационарного горения (с более низким значением давления) при сбросе давления со скоростью ≈140 ÷ 160 МПа/с. Исключение составляет состав А7, содержащий бидисперсный порошок алюминия (АСД-4 и Alex), для которого в большинстве опытов наблюдалось погасание заряда. Этот результат требует дальнейшего исследования и объяснения.

2. Для всех исследованных составов смесевых ВЭМ зависимость нестационарной скорости горения от времени в период сброса давления носит колебательный характер. Частота колебаний для всех рассмотренных составов составляла ≈8 ÷ 12 Гц. Возможной причиной колебательных режимов при сбросе давления может быть очагово-пульсирующий характер горения, исследованный в работе [19].

3. Показано, что максимальное отличие нестационарной скорости горения от квазистационарной (\approx 45 %) в период сброса давления наблюдалось для базового состава A1 (не содержащего энергетических добавок). Добавление порошков алюминия в состав ВЭМ приближает нестационарную скорость горения к квазистационарной. Наименьшее отличие между нестационарной скоростью горения и квазистационарной (\approx 28 %) получено для состава A4, содержащего порошок алюминия Alex.

3. При проведении экспериментов со смесевыми составами А5 и А6, содержащими AlB₂ и AlB₁₂, возникла проблема с зашлаковыванием основного сопла конденсированными продуктами сгорания. Вероятно, это связано с тем, что для полного сгорания энергетических добавок AlB₂ и AlB₁₂ в составах A5 и A6 требуется большее время нахождения частиц в камере сгорания (по сравнению с алюминием). Проблема увеличения времени пребывания частиц в камере сгорания была решена путем увеличения расстояния от поверхности горения ВЭМ до сопла.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. De Luca L. T. Extinction theories and experiments // Fundamentals of Solid-Propellant Combustion / K. K. Kuo, M. Summerfield (Eds). — 1984. — P. 661–732. — (Prog. Astronaut. Aeronaut.; V. 90). — DOI: 10.2514/5.9781600865671.0661.0732.
- Zarko V. E., Kuo K. K. Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // Int. J. Energ. Mater. Chem. Propul. — 1994. — V. 3, N 1-6. — P. 600–623. — DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp.v3.i1-6.590.
- Липанов А. М. Аналитическое решение обратной задачи внутренней баллистики регулируемого РДТТ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 44–50.
- Маршаков В. Н. Анализ повторного воспламенения пороха после спада давления с позиций очагово-пульсирующего механизма горения // Физика горения и взрыва. — 1991. — Т. 27, № 1. — С. 12–18.
- 5. Маршаков В. Н., Пучков В. М. Расчет нестационарной скорости горения по известному закону изменения давления при переходных процессах в двигателе на твердом топливе // Хим. физика. — 2014. — Т. 33, № 5. — С. 62–68. — DOI: 10.7868/S0207401X14050094.
- 6. Маршаков В. Н. Эксперимент и расчет спада давления в камере сгорания ракетного двигателя при вскрытии дополнительного сопла // Горение и взрыв. — 2017. — Т. 10, № 4. — С. 63–70.
- Иванов С. М., Цуканов Н. А. Оценка динамических характеристик нестационарного горения твердого топлива в полузамкнутом объеме по измерениям регулируемого давления // Физика горения и взрыва. — 2002. — Т. 38, № 1. — С. 80–91.
- 8. Архипов В. А., Зимин Д. А. Анализ условий применимости обратных методов восстановления нестационарной скорости горения // Физи-

ка горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 39–43.

- Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Γ. Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. І. Методы исследования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 82–87.
- Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Γ. Сравнительный анализ методов измерения нестационарной скорости горения. II. Результаты исследования // Физика горения и взрыва. — 2010. — Т. 46, № 5. — С. 88–96.
- 11. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Ворожцов А. Б. и др. Нестационарные эффекты при горении высокоэнергетических нанокомпозитов // Изв. вузов. Физика. — 2007. — Т. 50, № 9-2. — С. 3–11.
- 12. Маршаков В. Н., Новожилов Б. В. Переходные режимы горения баллиститного пороха в полузамкнутом объеме // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 1. — С. 25–37.
- 13. Маршаков В. Н., Новожилов Б. В. Горение пороха и его потухание при быстром спаде давления. Сопоставление теории и опыта // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 6. — С. 32–39.
- 14. Новожилов Б. В., Маршаков В. Н. Обратная задача теории нестационарного горения пороха // Хим. физика. — 2011. — Т. 30, № 12. — С. 26–31.
- 15. Райзберг Б. А., Ерохин Б. Т., Самсонов К. П. Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. — М.: Машиностроение, 1972.
- 16. Архипов В. А., Бондарчук С. С., Жуков А. С. Нестационарные режимы горения конденсированных систем. — Томск: Изд. дом Томск. гос. ун-та, 2017.
- Жуков И. А., Зиатдинов М. Х., Ворожцов А. Б., Жуков А. С., Ворожцов С. А., Промахов В. В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез боридов Аl и Ti // Изв. вузов. Физика. — 2016. — Т. 59, № 8. — С. 177–178.
- Архипов В. А., Бондарчук С. С., Коротких А. Г., Лернер М. И. Технология получения и дисперсные характеристики нанопорошков алюминия // Цв. металлы. — 2006. — № 4. — С. 58–64.
- 19. Маршаков В. Н., Финяков С. В. Локальные скорости неодномерного фронта горения нитроглицериновых порохов // Хим. физика. — 2017. — Т. 36, № 6. — С. 24–33. — DOI: 10.7868/S0207401X17060103.

Поступила в редакцию 04.05.2022. Принята к публикации 11.07.2022.