

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ.

## I. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В. А. Архипов<sup>1,2</sup>, С. С. Бондарчук<sup>2</sup>, А. Г. Коротких<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, 659322 Бийск

<sup>3</sup>Томский политехнический университет, 634034 Томск

Рассмотрены два независимых метода измерения нестационарной скорости горения твердых топлив — скоростная киносъемка и метод, основанный на решении обратной задачи внутренней баллистики. Проведенный сравнительный анализ показал, что рассмотренные методы являются взаимодополняющими. Оценка границ применимости обратных методов идентификации нестационарной скорости горения показала перспективность их использования не только в лабораторных условиях, но и при измерениях в крупногабаритных твердотопливных газогенераторах.

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

## ВВЕДЕНИЕ

Создание надежных методов измерения нестационарной скорости горения твердых топлив представляет интерес не только в плане дальнейшего развития теории нестационарного горения [1, 2], но и при конструировании твердотопливных энергоустановок и газогенераторов с глубоким регулированием тяги и расхода [3]. В настоящее время для расчета нестационарной скорости горения используются различные подходы — применение квазистационарной зависимости [4], различных аппроксимаций [5], феноменологической теории Зельдовича — Новожилова (ZN-модель) [1, 2] или одной из моделей пламени (FM-модели) [6]. Разнообразие подходов свидетельствует о том, что теория нестационарного горения конденсированных систем далека от своего завершения и не может обеспечить получение адекватных результатов, в частности, для гетерогенных топливных композиций.

Проблема измерения нестационарной скорости горения твердых топлив с высоким вре-

менным и пространственным разрешением до сих пор остается актуальной, несмотря на значительное количество предлагаемых методов [7]. Известные прямые методы измерения (емкостный, ультразвуковой, СВЧ-зондирование, метод, основанный на регистрации реактивной силы продуктов сгорания, и др. [8–12]) сложны в реализации и требуют детального методического обоснования. Они применимы, как правило, только в условиях лабораторных испытаний небольших образцов твердого топлива.

В настоящее время всё большее внимание привлекают косвенные методы измерения нестационарной скорости горения, основанные на постановке и решении соответствующих обратных задач внутренней баллистики (ОЗВБ-методы) [13–16]. В этих методах используются экспериментальные данные (зависимость давления и температуры в камере сгорания от времени, скорость реакций термического разложения компонентов топлива, зависимость скорости стационарного горения от давления и начальной температуры топлива) для идентификации нестационарной скорости горения.

В статье рассмотрены два независимых метода измерения нестационарной скорости горения, не вносящие возмущений в исследуемый процесс горения твердого топлива: ско-

Работа выполнена в рамках 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».

ростная киносъемка поверхности горения и ОЗВБ-метод, основанный на регистрации зависимости давления от времени в период переходного процесса — резкого сброса давления в полузамкнутом объеме.

Процесс горения твердого топлива при резком сбросе давления в полузамкнутом объеме, выбранный для анализа рассмотренных методов измерения нестационарной скорости, представляет несомненный практический интерес (отсечка тяги двигательной установки, гашение топлива и т. д.), а также играет важную роль в тестировании физико-математических моделей нестационарного горения конденсированных систем [1, 2, 17, 18]. В известных вариантах этого метода используется гипотеза квазистационарности истечения при вскрытии дополнительного сопла для сброса давления и последующего гашения топлива [13]. В настоящей работе предложен метод измерения нестационарной скорости горения с учетом нестационарности истечения в переходном процессе [19].

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальное исследование нестационарной скорости горения твердых топлив при резком сбросе давления в полузамкнутом объеме проводилось параллельно двумя методами — скоростной киносъемки поверхности горения топлива и ОЗВБ-методом с использованием измеренной зависимости давления от времени в переходном процессе.

### Схема установки

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Установка представляет собой стальную камеру сгорания 1 с исследуемым образцом твердого топлива 2, снабженную основным 3 и дополнительным 4 соплами. Дополнительное сопло вскрывается при сгорании и вылете профилированной пробки 5, изготовленной из пороха Н. Диаметры основного и дополнительного сопел варьировались с целью выбора уровня давления стационарного режима горения ( $p_0 = 3 \div 10$  МПа) и скорости сброса давления ( $dp/dt = 50 \div 800$  МПа/с). На торцевой поверхности камеры сгорания установлено прозрачное окно 6 из кварцевого стекла толщиной 20 мм, через которое проводилась киносъемка процесса с помощью скоростной кинокамеры 7

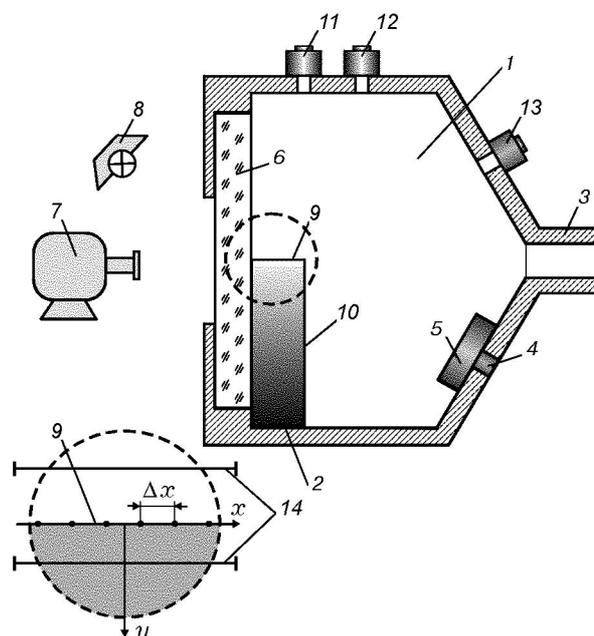


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — камера сгорания; 2 — образец твердого топлива; 3, 4 — основное и дополнительное сопла; 5 — сгорающая пробка; 6 — кварцевое окно; 7 — кинокамера; 8 — система подсветки; 9, 10 — горящие грани образца; 11, 12 — датчики давления и температуры; 13 — воспламенитель; 14 — реперы

и системы подсветки 8. Образец твердого топлива приклеивали специальным горящим составом на внутреннюю поверхность кварцевого окна. Такая технология позволяет предотвратить появление мениска на границе стекло — образец, а также жестко зафиксировать образец, чтобы свести к минимуму его деформацию при резком сбросе давления. Исследуемый образец в форме полукруга диаметром 100 мм и толщиной  $20 \div 30$  мм забронирован по периметру линолеумом, растворенным в ацетоне, таким образом, чтобы горели две его грани — верхняя 9 и торцевая 10. Начальная площадь поверхности горения образца твердого топлива составляла  $59.25 \div 69.25$  см<sup>2</sup>. Площадь горячей поверхности в стационарном режиме (до сброса давления) определялась по известным геометрическим характеристикам образца непосредственно перед сбросом давления. Для уменьшения тепловых потоков в стенки стальной камеры сгорания внутри камеры плотно установлены текстолитовые вкладыши толщиной 5 мм.

В камере сгорания установлены датчики давления 11 и температуры 12. Измерение динамических давлений проводилось тензометрическим датчиком Р-3МА/200 класса 0.1 с пределом измерений 20 МПа и собственной частотой 67 кГц. Сигнал с датчика подавался на специально сконструированный дифференциальный потенциометрический усилитель постоянного тока и далее на вход цифрового осциллографа GDS-806С с частотным диапазоном 0 ÷ 60 МГц. При калибровке всего измерительного комплекса использовались грузопоршневые манометры МТУ-60 и МП-600, а также образцовые манометры класса 0.4, что обеспечивало измерение давления с относительной погрешностью  $\pm 0.8\%$ . Для измерения температуры продуктов сгорания применялся датчик типа ИС-470 (вольфрам-рениевая термopара), который служил для контроля температуры в стационарных режимах горения.

Порядок проведения экспериментов следующий. После срабатывания электрокапсюльного воспламенителя 13 происходит зажигание и горение одновременно основного образца топлива и профилированной пробки. Уровень давления первого стационарного режима определяется соотношением площади горящих поверхностей и площади критического сечения основного сопла. После сгорания и вылета пробки вскрывается дополнительное сопло и начинается переходный процесс установления второго стационарного режима либо происходит гашение топлива (при больших скоростях сброса давления). Уровень давления второго стационарного режима определяется суммой площадей критических сечений основного и дополнительного сопел.

Время вскрытия дополнительного сопла  $\Delta t$  оценивалось по формуле, полученной интегрированием уравнения движения пробки (без учета силы трения):

$$\Delta t = \sqrt{\frac{2\rho_s l}{p_0}} \left( \sqrt{l + \frac{d}{4}} - \sqrt{l} \right), \quad (1)$$

где  $\rho_s$  — плотность твердого топлива,  $l$ ,  $d$  — длина и диаметр пробки.

Расчеты по формуле (1) показали, что для условий проведенных экспериментов  $\Delta t \approx 0.45 \cdot 10^{-4}$  с. Это на порядок меньше времени установления квазистационарного режима истечения (т. е. процесс вскрытия сопла можно считать мгновенным).

### Скоростная киносъемка

Киносъемка горячей поверхности проводилась кинокамерой СКС-1м со скоростью до 2000 кадр/с. Использовалась как естественная подсветка от продуктов сгорания, так и подсветка от внешнего источника (ртутная лампа типа ПРК-12). С помощью комбинации объективов с фокусным расстоянием 105 ÷ 110 мм выделялось поле съемки размером 4 × 6 мм. Для съемки переходного процесса кинокамера синхронизирована с датчиком давления. Время работы установки на первом стационарном режиме, определяемое толщиной сгорающей пробки, выбиралось из условия сохранения прозрачности кварцевого стекла ( $\approx 1$  с).

Покадровую обработку кинограмм процесса (рис. 2) проводили с помощью инструментального микроскопа ИМИ-100 с электронно-цифровой индикацией координат  $x$  и  $y$  горячей поверхности. При этом выбирали несколько координат  $x_i$  через одинаковый интервал  $\Delta x$  (см. рис. 1) с целью определения в них мгновенного значения линейной скорости горения. Для измерения координаты  $y$  использовались два репера 14 (см. рис. 1), а промежуток времени между соседними кадрами фиксировался на кинолентке с помощью отметчика времени.

При анализе погрешностей измерения наряду с известными факторами (погрешности определения времени, границы фронта горения на кадре, смещение реперных линий) оценивали также возможные деформации образца твердого топлива при больших скоростях сброса давления. Для этого были выполнены специальные опыты с полностью забронированным образцом, размеры которого идентичны исследуемому. Эксперименты показали, что

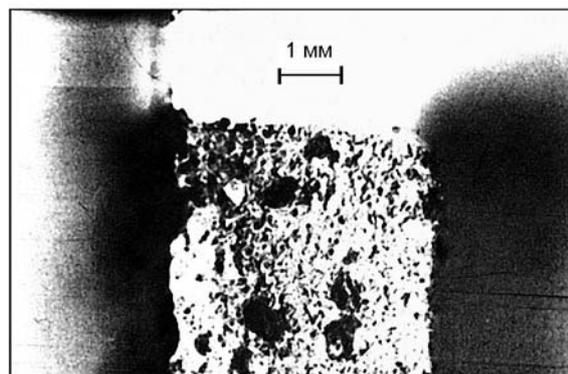


Рис. 2. Кадр кинограммы горящего образца

при сбросе давления смещение поверхности образца за счет упругих деформаций на порядки меньше, чем за счет его горения. Общая методическая погрешность измерения скорости горения составляла  $5 \div 8 \%$  при временном разрешении 3 мс. Контроль погрешности метода проводился также для условий стационарного горения сравнением с результатами измерения стационарной скорости другими независимыми методами.

### ОЗВБ-метод

При реализации метода, основанного на постановке и решении обратной задачи внутренней баллистики, нестационарная скорость горения  $u(t)$  в период переходного процесса определялась по измеренной кривой давления  $p(t)$  в камере сгорания. Как показано в [15], для условий проведенных экспериментов достаточно адекватной является термодинамическая постановка задачи.

Рассматривалась система уравнений, выражающая законы сохранения для осредненных по объему камеры сгорания параметров [4, 13]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho W) &= S\rho_s u - G, \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{pW}{k-1}\right) &= c_p T_p S\rho_s u - \frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} G, \quad (2) \\ p &= \rho RT. \end{aligned}$$

Массовый расход продуктов сгорания (для сверхкритического режима истечения) рассчитывали по формуле

$$G = (\varphi_1 F_1 + \varphi_2 F_2) \sqrt{k p \rho \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}.$$

Здесь  $p$ ,  $\rho$ ,  $k$ ,  $c_p$ ,  $R$ ,  $T$  — давление, плотность, показатель адиабаты, удельная изобарическая теплоемкость, газовая постоянная и температура продуктов сгорания;  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $F_1$ ,  $F_2$  — коэффициенты расхода и площади критических сечений основного и дополнительного сопел;  $S$ ,  $W$ ,  $T_p$  — площадь поверхности горения, свободный объем камеры сгорания и температура горения твердого топлива.

При расчете переходных процессов площадь  $S$  предполагалась постоянной, поскольку

ее изменением можно пренебречь ввиду малой длительности процесса.

Характеристики переходного процесса  $p$ ,  $\rho$ ,  $T$  и нестационарную скорость горения  $u$  определяли из решения трех уравнений (2) и измеренной экспериментальной зависимости  $p(t)$ . Таким образом, приведенная система уравнений совместно с начальными условиями является замкнутой и позволяет определить единственное решение по переменной  $u(t)$  — зависимости скорости горения от времени.

При реализации представленного подхода, основанного на решении обратной задачи внутренней баллистики, необходимо учитывать процесс вскрытия дополнительного сопла, обеспечивающего сброс давления. Если для основного сопла, определяющего первый режим истечения, предположение о постоянстве коэффициента расхода  $\varphi_1$  является обоснованным (в процессе сброса давления происходит квазистационарное изменение расхода через основное сопло), то для дополнительного сопла необходимо учитывать зависимость  $\varphi_2(t)$ .

В работе [19] приведены оценки, показывающие, что при условии

$$\begin{aligned} t_* \ll t_{rel} &= \\ &= W / (\varphi_1 F_1 + \varphi_2 F_2) \sqrt{kRT \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \end{aligned}$$

зависимость коэффициента расхода от времени при запуске сопла в течение характерного времени  $t_*$  можно представить в виде

$$\varphi(t) = \varphi_2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{t_*}\right) \right]. \quad (3)$$

Здесь  $t_{rel}$  — время релаксации свободного объема камеры.

Предполагается, что в момент открытия дополнительного сопла расход газа через него равен нулю ( $\varphi(0) = 0$ ). В дальнейшем расход монотонно возрастает до стационарного значения в течение характерного времени  $t_*$ ; в конце этого периода  $\varphi(t) = \varphi_2$ . Проверка адекватности формулы (3) проведена как экспериментально, так и путем решения задачи об ударном запуске сопла в нестационарной осесимметричной постановке. На рис. 3 представлены результаты численного счета изменения расхода в процессе установления квазистационарного режима истечения. Разброс результатов расчетов  $\varphi(t)$  связан с использованием разных сеток по пространственным координатам.

Начальное давление в камере сгорания  $p_0 = 4.8$  МПа, средняя скорость сброса давления  $dp/dt = 200$  МПа/с. На рис. 3 представлена также зависимость  $\varphi(t)$ , полученная обработкой экспериментальной кривой  $p(t)$  в соответствии с формулой (3).

Решение обратной задачи внутренней баллистики предполагало идентификацию функции скорости горения по заданной экспериментальной кривой  $p_{exp}(t)$  методом прямого поиска [20]. При этом зависимость  $p_{exp}(t)$  разбивается на  $n$  временных интервалов  $\Delta t_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). На каждом интервале  $\Delta t_i$  последовательно решается система уравнений (2) при варьировании скорости горения и находится расчетное значение  $p(t)$ . Для известных на данном интервале времени  $\Delta t_i$  экспериментальных и расчетных значений давления (рис. 4) вычисляется минимум функционала

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

Решение проводится методом прямого поиска для варьируемого параметра  $u_{i+1}$  по определенному на предыдущем шаге значению скорости  $u_i$ . При этом используемая в (2) зависимость для скорости горения определяется для данного интервала времени линейной интерполяцией:

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

Погрешность измерения ОЗВБ-методом и границы его применимости оценивали путем сравнения результатов, полученных этим методом и методом скоростной киносъемки. При этом измерения проводились в идентичных условиях, при различных скоростях сброса давления, как для гомогенных твердых топлив (порох Н с катализатором), так и для модельных смесевых алюминизированных твердотопливных композиций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Обсуждены два независимых метода измерения скорости горения твердых топлив в период сброса давления в камере сгорания.

- Рассмотренные методы измерения нестационарной скорости горения являются взаимодополняющими. Метод скоростной киносъемки регистрирует локальные значения линейной скорости горения, которые могут отличаться для соседних участков поверхности горения согласно гипотезе очагово-пульсирующего горения [21]. ОЗВБ-метод регистрирует осредненную по всей поверхности образца скорость горения твердого топлива.

- Одним из преимуществ ОЗВБ-метода является возможность измерения скорости горения образцов в переходных режимах не только в лабораторных условиях, но и при измерениях в крупногабаритных твердотопливных установках и газогенераторах. Данное обстоятельство позволяет предполагать высокую эффективность применения ОЗВБ-метода для решения широкого круга идентификационных задач (процессы в регулируемых газогенераторах, горение образцов сложной формы, армированных и неоднородных образцов и т. д.).

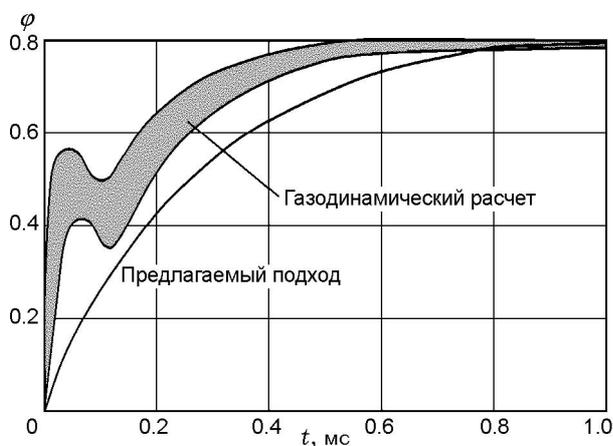


Рис. 3. Результаты численного расчета зависимости  $\varphi(t)$

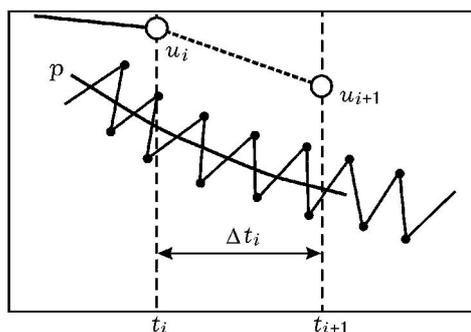


Рис. 4. Схема вычисления функционала  $J$  на промежутке  $\Delta t_i$

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Новожилов Б. В.** Нестационарное горение твердых ракетных топлив. — М.: Наука, 1973.
2. **Зельдович Я. Б., Лейпунский О. И., Либрович В. Б.** Теория нестационарного горения пороха. — М.: Наука, 1975.
3. **Присняков В. Ф.** Динамика ракетных двигателей твердого топлива. — М.: Машиностроение, 1984.
4. **Райзберг Б. А., Ерохин Б. Т., Самсонов К. П.** Основы теории рабочих процессов в ракетных системах на твердом топливе. — М.: Машиностроение, 1972.
5. **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.
6. **De Luca L. T.** Theory of burning and combustion stability of solid propellants by flame models // Fundamentals of Solid-Propellant Combustion / К. К. Kuo, М. Summerfield (Eds). — AIAA, 1992. — P. 519–600. — (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 143).
7. **Zarko V. E., Kuo K. K.** Critical review of methods for regression rate measurements of condensed phase systems // Nonintrusive Combustion Diagnostics / К. К. Kuo, Т. Parr (Eds). — New York: Begel House, 1994. — P. 600–623.
8. **Gin C. F., Hermance C. E.** Continuous measurement of transient burning rates of a composite propellant, undergoing rapid depressurization // AIAA Paper. — 1971. — N 173.
9. **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.
10. **Романов О. Я., Тархов В. С.** Динамические параметры массовой скорости горения конденсированного вещества // Физика горения и взрыва. — 1986. — Т. 22, № 4. — С. 3–11.
11. **Зарко В. Е., Вдовин Д. В., Перов В. В.** Методические проблемы измерения скорости горения твердых топлив с использованием СВЧ-излучения // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 1. — С. 68–78.
12. **Кискин А. Б., Симоненко В. Н.** Особенности применения метода регистрации реактивной силы для измерения нестационарной скорости горения // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 1. — С. 52–58.
13. **Соркин Р. Е.** Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе: внутренняя баллистика. — М.: Наука, 1983.
14. **Липанов А. М.** Аналитическое решение обратной задачи внутренней баллистики регулируемого РДТТ // Физика горения и взрыва. — 2000. — Т. 36, № 3. — С. 44–50.
15. **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.
16. **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.
17. **Маршаков В. Н., Лейпунский О. И.** Горение и потухание пороха при быстром спаде давления // Физика горения и взрыва. — 1967. — Т. 3, № 2. — С. 231–235.
18. **De Luca L. T.** Extinction theories and experiments // Fundamentals of Solid-Propellant Combustion / К. К. Kuo, М. Summerfield (Eds). — AIAA, 1984. — P. 661–732. — (Progress in Astronautics and Aeronautics; V. 90).
19. **Архипов В. А., Березиков А. П., Трофимов В. Ф.** К гипотезе квазистационарности при истечении газа из ресивера // ПМТФ. — 2004. — Т. 45, № 4. — С. 50–57.
20. **Arkhipov V. A., Zimin D. A., Bondarchuk S. S.** Inverse methods in combustion diagnostics // Proc. Twenty-Seventh Intern. Symp. on Combustion. — Boulder, Colorado USA, 1998.
21. **Маршаков В. Н.** Применение гипотезы об очагово-пульсирующем механизме горения к анализу режимов горения пороха при спаде давления // Горение конденсированных систем: материалы IX Всесоюзн. симпоз. по горению и взрыву. — Черногоровка, 1989. — С. 47–51.

*Поступила в редакцию 4/IV 2008 г.,  
в окончательном варианте — 12/III 2010 г.*