

Научная статья

УДК 536.42+536.24

doi: 10.17223/19988621/92/8

Моделирование внутрибаллистических процессов в РДТТ для зарядов с неизвлекаемой формообразующей оснасткой

**Сергей Сергеевич Бондарчук¹, Александр Степанович Жуков²,
Мансур Хузиахметович Зиятдинов³, Яна Александровна Дубкова⁴,
Леонид Леонидович Миньков⁵, Алексей Юрьевич Крайнов⁶**

^{2,3,4,5,6} *Томский государственный университет, Томск, Россия*

² *Zhuk_77@mail.ru*

³ *ziatdinovm@mail.ru*

⁴ *kimberlyo.ohi@gmail.com*

⁵ *lminkov@ftf.tsu.ru*

⁶ *akrainov@ftf.tsu.ru*

Аннотация. Приводится оценка развития внутрибаллистического процесса в ракетном двигателе на твердом топливе с канально-щелевым зарядом, щелевая область которого заполнена неизвлекаемой формообразующей оснасткой (НФО). Использована математическая модель, учитывающая первоначальную локализацию точки воспламенения заряда НФО, постепенное выгорание заряда НФО, постепенное зажигание заряда двигателя по мере оголения рабочей поверхности, а также различную теплофизическую природу продуктов сгорания состава НФО и основного заряда. Зависимости давления в камере сгорания, тяги и времени функционирования изделия, существенным образом зависящие от динамики развития поверхности горения заряда, определяются скоростью горения материала НФО.

Ключевые слова: ракетный двигатель на твердом топливе, неизвлекаемая формообразующая оснастка, внутрикамерные процессы, математическое моделирование

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Бондарчук С.С., Жуков А.С., Зиятдинов М.Х., Дубкова Я.А., Миньков Л.Л., Крайнов А.Ю. Моделирование внутрибаллистических процессов в РДТТ для зарядов с неизвлекаемой формообразующей оснасткой // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2024. № 92. С. 89–100. doi: 10.17223/19988621/92/8

Original article

Modeling of intra-ballistic processes in solid rocket motors for charges with non-removable forming rig

Sergey S. Bondarchuk¹, Alexander S. Zhukov², Mansur Kh. Ziatdinov³, Yana A. Dubkova⁴, Leonid L. Minkov⁵, Aleksey Yu. Krainov⁶

^{2,3,4,5,6} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Zhuk_77@mail.ru

³ ziatdinovm@mail.ru

⁴ kimberlyo.ohi@gmail.com

⁵ lminkov@ftf.tsu.ru

⁶ akrainov@ftf.tsu.ru

Abstract. The use of unextractable forming tool (UFT) can significantly reduce the cost of producing expensive removable rig, shortens the solid rocket motor manufacturing cycle and increases production safety. It is proposed to use porous plates made of titanium powders using additive technologies and impregnated with a fast-burning composition based on aluminum borides as UFTs. The paper provides an assessment of the development of the intra-ballistic process in a solid rocket motor with a channel-slot grain, the slot region of which is occupied by UFT. For the assessment, a mathematical model was used that takes into account the initial localization of the ignition point of the UFT-grain, the gradual burnout of the UFT-grain, the gradual ignition of the motor grain as the working surface becomes exposed, as well as the different thermophysical nature of the combustion products of the UFT composition and the main grain. The dependence of the pressure in the combustion chamber, the thrust and the operating time, which significantly depend on the dynamics of the development of the burning surface of the grain, are determined by the combustion rate of the UFT material.

Keywords: solid propellant rocket motor, non-removable forming rig, intra-chamber processes, mathematical modeling

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Bondarchuk, S.S., Zhukov, A.S., Ziatdinov, M.Kh., Dubkva, Y.A., Minkov, L.L., Krainov, A.Yu. (2024) Modeling of intra-ballistic processes in solid rocket motors for charges with non-removable forming rig. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 92. pp. 89–100. doi: 10.17223/19988621/92/8

Введение

Использование существующей технологии изготовления прочноскрепленных зарядов требует значительных материальных и временных затрат, организации специальных условий их производства, что связано с выполнением сложных и продолжительных операций: подготовки технологической оснастки, ее сборки с корпусом двигателя, распрессовки изделия и пр. Кроме того, такая технология зачастую существенно ограничивает использование новых высокоэнергетических топливных композиций на активных горючих-связующих, не обеспечивает высо-

кую длительность гарантийного срока хранения из-за деформации заряда. Сохранение исходных геометрических параметров прочноскрепленного заряда в течение всего эксплуатационного периода позволит обеспечить высокую стабильность тактико-технических характеристик изделия и его «ампулированное» состояние при хранении и эксплуатации.

Использование неизвлекаемой формообразующей оснастки (НФО) взамен традиционной извлекаемой позволит существенно сократить затраты на производство дорогостоящей оснастки, сократить цикл изготовления ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ) и повысить безопасность производства за счет исключения операции распрессовки. Кроме того, использование НФО позволяет повысить коэффициент заполнения камеры сгорания.

Исследования, выполненные в работах [1, 2], показали, что достаточно перспективная конструкция НФО может состоять из пористой матрицы, пропитанной быстрогорящим составом, или тонкого монолита, на который быстрогорящее топливо наносится с использованием каких-либо адгезионных материалов.

Оптимальным вариантом, как и в случае пористых пластин из порошков титана, является наличие открытой пористости в образцах. Это позволяет пропитать пластины быстрогорящими составами на основе боридов алюминия.

Очевидно, что разработка и создание высокоэнергетических композитных структур сложной формы при относительно низких затратах возможны при использовании аддитивных технологий, поскольку сложность геометрии, толщины элементов «конструкции» и точность их изготовления вполне достижимы для высокоточных современных 3D-принтеров [3–5]. Большое значение при реализации аддитивных технологий имеет выбор материала и геометрии НФО для формирования сложнопрофильных высокоэнергетических композитных структур.

Из существующих способов объемной печати привлекательным для создания НФО является метод селективного лазерного спекания (SLS-method), прежде всего потому, что имеется возможность использования материалов (порошков), дающих дополнительную энергетику при своем сгорании. В работе [2] представлены достаточно хорошо отработанные методы получения необходимых элементов конструкции при использовании порошков алюминия со средним размером частиц порядка 10 мкм.

Оптимальной базовой системой для создания НФО может являться система $Ti + B$. Для этой системы достигнута максимальная скорость горения до 350 мм/с. Теплота сгорания диборида титана равна $\sim 5\,700$ кал/г при теплоте его образования $\sim 1\,030$ кал/г. Полученные в экспериментах значения температуры горения смесей системы $Ti + B$ варьируют в пределах $(2\,300 \div 3\,000)^\circ C$. Плотность титана (4.5 г/см^3) и диборида титана намного меньше плотности циркония (6.5 г/см^3), гафния (13.3 г/см^3) и их боридов.

Разработанный в ходе выполнения работ [2] количественный состав компонентов (69 мас. % $Ti + 31$ мас. % B), обеспечивающий стабильность горения, характеризуется скоростью горения 80 ± 10 мм/с. Для контролируемого повышения скорости горения до заданных 100 мм/с были разработаны составы, в которые помимо основных компонентов вводили порошки алюминия.

Для получения образцов, используемых в качестве основы для НФО, были разработаны элементы, общий вид которых представлен на рис. 1.

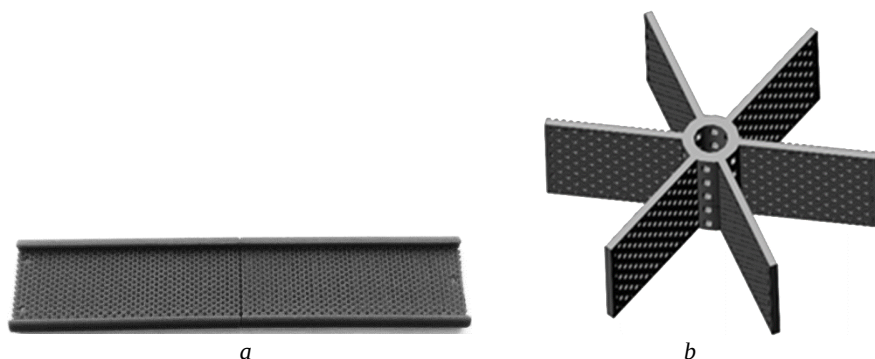


Рис. 1. Общий вид образцов матриц элементов НФО:

a – линейный элемент; *b* – звездообразный элемент

Fig. 1. General view of the samples of matrices of unextractable forming tool elements (UFT):
(*a*) linear element and (*b*) star element

Цель данной работы – исследование влияния быстрогорящей неизвлекаемой формообразующей оснастки на внутрибаллистические характеристики РДТТ с канально-щелевым зарядом, включающим НФО.

Постановка задачи

Для оценки развития внутрибаллистического процесса и, в частности, изменения поверхности горения канально-щелевого заряда вследствие его выгорания, использовалась математическая модель, учитывающая начальную локализацию места зажигания НФО-заряда, постепенное выгорание НФО-заряда, постепенное подключение к горению заряда двигателя по мере оголения рабочей поверхности, учет разной теплофизической природы продуктов сгорания состава НФО и основного заряда.

Для осредненных по камере сгорания со свободным внутрикамерным объемом W в условиях отсутствия теплообмена с конструктивными элементами камеры смесь продуктов горения можно считать идеальным газом, а его истечение из этого объема – квазистационарным изоэнтропическим. В рамках принятой модели для расчета изменений во времени t параметров газа в объеме W камеры сгорания математическая модель формулировалась следующими соотношениями.

Уравнение баланса массы газа в камере

$$\frac{d}{dt}(\rho W) = G_Z^+ + G_F^+ - G_*, \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, G^+ – газоприход, G_* – расход газа через сопло. Индекс Z относится к заряду, индекс F – к неизвлекаемому элементу.

Для определения термодинамических параметров смеси продуктов сгорания заряда и неизвлекаемого элемента решаются уравнения изменения изобарической теплоемкости C_p и газовой постоянной R [6–9].

Уравнение изменения газовой постоянной R

$$\frac{d}{dt}(R\rho W) = R_{Z0}G_Z^+ + R_{F0}G_F^+ - RG_*, \quad (2)$$

где R_{Z0} , R_{F0} – индивидуальные свойства (газовые постоянные) поступающих продуктов сгорания.

Уравнение изменения изобарической теплоемкости газовой смеси C_p

$$\frac{d}{dt}(C_p \rho W) = C_{pZ0} G_Z^+ + C_{pF0} G_F^+ - C_p G_*, \quad (3)$$

где C_{pZ0} , C_{pF0} – индивидуальные свойства (изобарические теплоемкости) поступающих продуктов сгорания.

Закон сохранения внутренней энергии газовой смеси выражается через изменение давления:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{pW}{\gamma - 1} \right) = C_{pZ0} T_{pZ0} G_Z^+ + C_{pF0} T_{pF0} G_F^+ - \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_*}{\rho_*} G_*, \quad (4)$$

где T_{pZ0} , T_{pF0} – изобарические температуры горения составов.

Уравнение изменения свободного объема камеры вследствие выгорания составов

$$\frac{d}{dt}(W) = \frac{G_Z^+}{\rho_Z} + \frac{G_F^+}{\rho_F}, \quad (5)$$

где ρ_Z , ρ_F – плотности основного и быстрогорящего составов.

Показатель адиабаты смеси газов определяется через значения теплоемкости и газовой постоянной в соответствии с законом Майера: $\gamma = C_p / (C_p - R)$. Для вычисления величина расхода $G_* = \rho_* u_* S_*$ через сопло определялась по соотношениям изэнтропического течения [2]:

$$\rho_* = \begin{cases} \rho \left(\frac{2}{\gamma - 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, & \text{если } \frac{p_e}{p} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, \\ \rho \left(\frac{p_e}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, & \text{если } \frac{p_e}{p} > \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, \end{cases}$$

$$u_* = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma + 1} \frac{p}{\rho}}, & \text{если } \frac{p_e}{p} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, \\ \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} \left[1 - \left(\frac{p_e}{p} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]}, & \text{если } \frac{p_e}{p} > \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, \end{cases}$$

$$p_* = \begin{cases} p \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, & \text{если } \frac{p_e}{p} \leq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, \\ p_e, & \text{если } \frac{p_e}{p} > \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}, \end{cases}.$$

S_* – площадь критического сечения сопла, p_e – давление снаружи сопла.

Газоприходы от заряда G_Z^+ и неизвлекаемого элемента G_F^+ определяются через соответствующие поверхности горения: $G_Z^+ = u_{Z0} \rho_Z S_Z(t)$, $G_F^+ = u_{F0} \rho_F S_F(t)$.

Линейные скорости горения составов рассчитываются посредством эмпирических степенных зависимостей от давления: $u_{Z0} = a_{Z0} p^{v_{Z0}}$, $u_{F0} = a_{F0} p^{v_{F0}}$.

Система уравнений (1)–(5) решается при следующих начальных условиях:

$$\rho(0) = \rho_{\text{возд}}; R(0) = R_{\text{возд}}; C_p(0) = C_{p, \text{возд}}; p(0) = p_0; W(0) = W_0.$$

Алгоритмически сложной задачей, которую приходится решать совместно с системой уравнений (1)–(5), является расчет геометрических характеристик заряда $S_Z(t)$ и $S_F(t)$ в процессе его выгорания для линейной скорости горения, определяемой из решения уравнений внутренней баллистики. К настоящему времени существует несколько подходов к решению данной задачи. Один из них основан на решении пространственного уравнения поверхности горения методом, построенном на вариационном принципе Ферма (принцип минимального времени выгорания заряда) [10, 11]. Другой подход основан на использовании метода уровней с привлечением разностных схем высокого порядка точности [12, 13].

В настоящей работе для программной реализации модели использовался алгоритм расчета изменения геометрии заряда, базирующийся на аналогии выгорания топлива (по геометрическому закону) с волновым принципом Гюйгенса (рис. 2).

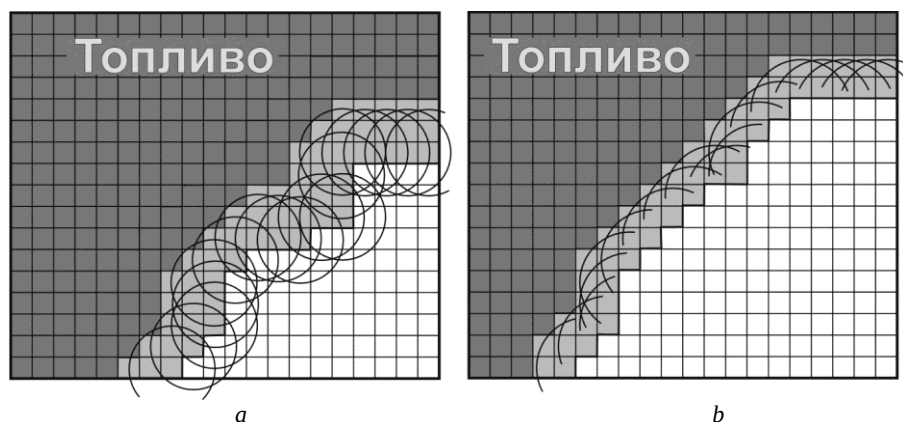


Рис. 2. Схема расчета выгорания топлива по геометрическому закону:

a – первый шаг по времени; *b* – следующий шаг по времени

Fig. 2. Scheme for calculating propellant burnout according to the geometric law:

(*a*) first time step and (*b*) next time step

Объем заряда представляется системой малых (конечных) объемов, которые либо пусты, либо заполнены топливом. В процессе вычислений от каждого объема, находящегося на фронте горения, строится «выжигающая» сфера радиуса, равного произведению линейной скорости горения в данной точке пространства на шаг по времени (см. рис. 2, *a*). Конечные и связанные с центральной точкой объемы топлива, попадающие внутрь данной сферы, считаются сгоревшими. На последующих шагах (см. рис. 2, *b*) алгоритм повторяется для новых значений скорости горения.

Результаты расчета

Система уравнений (1)–(5) решалась для модельных значений параметров, указанных в табл. 1–3. Пояснения к геометрическим параметрам приведены на рис. 3.

Таблица 1

Теплофизические и баллистические параметры

Параметр	Наполнитель	Материал НФО
Температура горения	$T_{p_{z0}} = 3\,000\text{ К}$	$T_{p_{F0}} = 4\,000\text{ К}$
Изобарическая теплоемкость продуктов сгорания	$C_{p_{z0}} = 2\,400\text{ Дж/(кг·К)}$	$C_{p_{F0}} = 2\,400\text{ Дж/(кг·К)}$
Газовая постоянная	$R_{z0} = 400\text{ Дж/(кг·К)}$	$R_{F0} = 400\text{ Дж/(кг·К)}$
Константа закона скорости горения	$a_{z0} = 2\text{ мм/с}$	$a_{F0} = 12\text{ мм/с}$
Показатель степени в законе горения	$v_{z0} = 0.3$	$v_{F0} = 0.3$
Плотность материала	$\varrho_{z0} = 1\,600\text{ кг/м}^3$	$\varrho_{F0} = 3\,000\text{ кг/м}^3$

Таблица 2

Геометрические параметры заряда

Длина заряда	100 мм
Радиус канала	10 мм
Радиус заряда	60 мм
Количество лучей	5
Полуширина щели приканальная	4 мм
Полуширина щели максимальная	6 мм
Длина прямой части щели	25 мм
Высота концевика щели	4 мм

Таблица 3

Геометрические параметры камеры сгорания

Начальный свободный объем	30 см ³
Площадь критического сечения сопла	38.5 мм ²

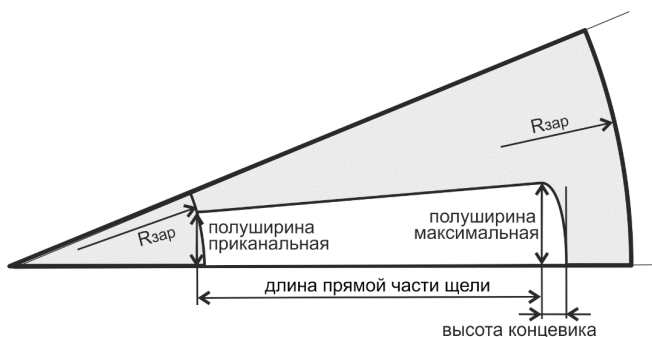


Рис. 3. Геометрические параметры щелевой области

Fig. 3. Geometrical parameters of the slit region

На рис. 4 представлена картина развития рабочей поверхности наполнителя и НФО вследствие дегрессии заряда. В рамках принципов, заложенных в алгоритм расчета поверхности, видно, что продвижение фронта горения по щелевой части достаточно быстро горящего материала НФО приводит к оголению поверхности

основного наполнителя. На рис. 5 показано развитие поверхности горения щелевой части заряда при отсутствии НФО при мгновенном подключении поверхности к горению.

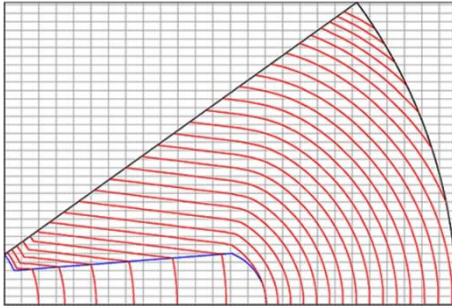


Рис. 4. Геометрия депрессии заряда с НФО
Fig. 4. Geometry of charge depressions with UFT

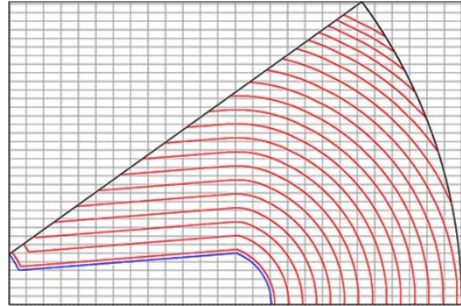


Рис. 5. Геометрия депрессии заряда без НФО
Fig. 5. Geometry of charge depressions without UFT

Сравнительный анализ динамики выгорания (см. рис. 4, 5) дает представление о качественном и количественном различии развития внутрибаллистического процесса при наличии НФО, а именно: при практически мгновенном зажигании щелевой части канала темп и уровень развитости суммарной для изделия поверхности горения существенно выше (рис. 6, кривая 2), чем при наличии НФО (рис. 6, кривая 1). Смещение по времени и наклонный характер зависимости $p(t)$ в заряде с НФО обусловлены тем, что зажигание быстрогорящего состава оснастки производилось с правого (соплового) конца заряда.

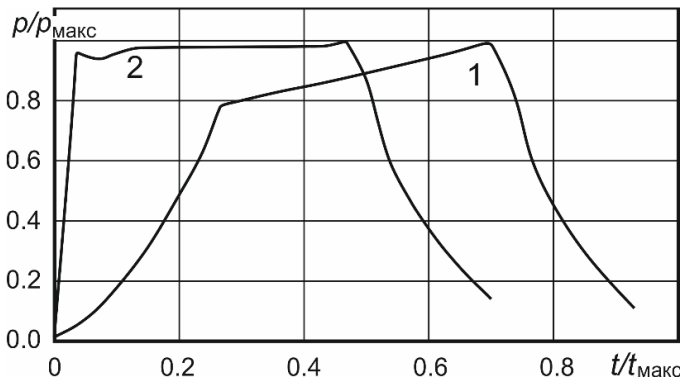


Рис. 6. Изменение давления в камере сгорания от времени:
1 – наличие НФО; 2 – отсутствие НФО
Fig. 6. Combustion chamber pressure vs. time
(1) presence of UFT; (2) absence of UFT

Из анализа приведенных на рис. 6 данных следует, что изменение поверхности горения существенным образом зависит от скорости горения НФО. Соответственно, зависимости давления в камере сгорания, тяги и времени функционирования изделия, существенным образом зависящие от динамики развития рабочей

поверхности заряда, будут определяться скоростью горения материала НФО, ее уровнем и стабильностью параметров. Указанное обстоятельство предъявляет специальные требования как к технологии и характеристикам горения НФО, так и к организации параметров стартового периода работы двигателя.

Заключение

В статье представлены результаты расчетно-теоретического исследования внутрибаллистических характеристик твердотопливного ракетного двигателя с зарядом сложной конфигурации, содержащим неизвлекаемую формообразующую оснастку (НФО).

Отмечается, что использование НФО позволяет существенно уменьшить затраты на производство дорогостоящей извлекаемой оснастки, сокращает цикл изготовления РДТТ и повышает безопасность производства. Предлагается использовать в качестве НФО пористые пластины, изготовленные из порошков титана с помощью аддитивных технологий и пропитанные быстрогорящим составом на основе боридов алюминия.

На основе выполненного численного моделирования внутрибаллистических характеристик РДТТ с НФО-зарядом канально-щелевой формы показано, что зависимость давления в камере сгорания, тяга и время функционирования изделия, существенным образом зависящие от динамики развития поверхности горения заряда, определяются скоростью горения материала НФО.

Список источников

1. Жуков И.А., Зиятдинов М.Х., Ворожцов А.Б., Жуков А.С., Ворожцов С.А., Промахов В.В. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез боридов AL и TI // Известия вузов. Физика. 2016. Т. 59, № 8. С. 177–178.
2. Жуков И.А., Промахов В.В., Зиятдинов М.Х., Жуков А.С., Дубкова Я.А. Разработка порошковых композиций ВЭМ с высокой скоростью горения // Высокоэнергетические материалы: демилитаризация, антитерроризм и гражданское применение : тез. XII Междунар. конф. НЕМs-2016., 7–9 сентября 2016, Томск, Россия. Томск : Том. гос. ун-т, 2016. С. 140–141.
3. Chen J., Meng D., Deng J., Zhang P. Synthesis of unsaturated polyurethane oligomer and its application in the 3D printing of composite solid propellants // Materials & Design. 2024. V. 238. Art. 112675. P. 1–11. doi: 10.1016/j.matdes.2024.112675
4. Tan B., Dou J., Wen Y., Duan B., Mo H., Wei Z., Zhang J., Pan Y., Ding X., Liu N. 3D Printing for Explosives and Propellants Applications // Additive Manufacturing Frontiers. 2024. V. 3 (3). Art. 200151. P. 1–17. doi: 10.1016/j.amf.2024.200151
5. Kirby L., Lawrence A., Udaykumar H.S., Sippel T., Song X. Pressure-assisted binder jet additive manufacturing of solid propellants // Additive Manufacturing. 2023. V. 77. Art. 103808. P. 1–15. doi: 10.1016/j.addma.2023.103808
6. Соломонов Ю.С., Липанов А.М., Алиев А.В., Дорофеев А.А. Твердотопливные регулируемые двигательные установки. М. : Машиностроение, 2011.
7. Архипов В.А., Бондарчук С.С., Бондарчук И.С., Золоторёв Н.Н., Козлов Е.А., Орлова М.П. Математическое моделирование утилизации головного обтекателя ракеты-носителя после его отработки // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2023. № 84. С. 52–67. doi: 10.17223/19988621/84/5
8. Bondarchuk S.S., Vorozhtsov A.V., Kozlov E.A., Feshchenko Y.V. Analysis of Multidimensional and Two-Phase Flows in Solid Rocket Motors // Journal of Propulsion and Power. 1995. V. 11 (4). P. 593–599. doi: 10.2514/3.23885

9. Бондарчук С.С., Борисов Б.В., Жуков А.С. Уравнения расчета параметров выхода РДТТ на стационарный режим для многокомпонентной смеси продуктов сгорания // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9-3. С. 24–26.
10. Милехин Ю.М., Медведев Г.Г., Воропаева И.Г. Тензорное представление скорости горения конденсированных систем. Вывод и анализ пространственного уравнения поверхности горения // Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8, № 1. С. 5–20.
11. Милехин Ю.М., Медведев Г.Г., Воропаева И.Г. Численный метод решения пространственного уравнения поверхности горения конденсированных систем // Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8, № 2. С. 209–219.
12. Кирюшкин А.Е., Миньков Л.Л. Моделирование внутрикамерных процессов в ракетном двигателе на твердом топливе с учетом движения поверхности горения // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2021. № 71. С. 90–105. doi: 10.17223/19988621/71/8
13. Кирюшкин А.Е., Миньков Л.Л. Параллельная реализация решения сопряженной задачи определения внутрибаллистических характеристик двигателей на твердом топливе // Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т. 13, № 1. С. 47–65. doi: 10.20537/2076-7633-2021-13-1-47-65

References

1. Zhukov I.A., Ziatdinov M.K., Vorozhtsov A.B., Zhukov A.S., Vorozhtsov S.A., Promakhov V.V. (2016). Self-propagating high-temperature synthesis of Al and Ti borides. *Russian Physics Journal*. 59(8). pp. 1324–1326.
2. Zhukov I.A., Promakhov V.V., Ziatdinov M.K., Zhukov A.S., Dubkova Y.A. Razrabotka porshkovykh kompozitsiy VEM s vysokoy skorost'yu goreniya [Development of powder compositions of HEMs with high combustion rate]. *High Energy Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application. Abstracts book of the XII International Workshop. HEMs-2016*. 7–9 September 2016. Tomsk, Russia. pp. 140–141.
3. Chen J., Meng D., Deng J., Zhang P. (2024) Synthesis of unsaturated polyurethane oligomer and its application in the 3D printing of composite solid propellants. *Materials & Design*. 238. 112675. pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.112675.
4. Tan B., Dou J., Wen Y., Duan B., Mo H., Wei Z., Zhang J., Pan Y., Ding X., Liu N. (2024) 3D Printing for Explosives and Propellants Applications. *Additive Manufacturing Frontiers*. 3 (3). 200151. pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.amf.2024.200151.
5. Kirby L., Lawrence A., Udaykumar H.S., Sippel T., Song X. (2023) Pressure-assisted binder jet additive manufacturing of solid propellants. *Additive Manufacturing*. 77. 103808. pp.1–15. DOI: 10.1016/j.addma.2023.103808.
6. Solomonov Yu.S., Lipanov A.M., Aliev A.V., Dorofeev A.A. (2011). *Tvyordotoplivnyye reguliruemyye dvigatel'nyye ustanovki* [Solid propellant adjustable propulsion systems]. Moscow: Mashinostroenie.
7. Arkhipov V.A., Zolotarev E.A., Orlova M.P., Kozlov N.N., Bondarchuk I.S., Bondarchuk S.S. (2023) Matematicheskoye modelirovaniye utilizatsii golovnogo obatelatelya rakety nositelya posle ego otrabotki [Mathematical modeling of disposal of the payload fairing of a launch vehicle after completion]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universi-teta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 84. pp. 52–67. DOI: 10.17223/19988621/84/5.
8. Bondarchuk S.S., Vorozhtsov A.V., Kozlov E.A., Feshchenko Y.V. (1995). Analysis of multi-dimensional and two-phase flows in solid rocket motors. *Journal of Propulsion and Power*. 11(4). pp. 593–599. DOI: 10.2514/3.23885.
9. Bondarchuk S.S., Borisov B.V., Zhukov A.S. (2012). Uravnenie raschyota parametrov vykhoda RDTT na statsionarnyy rezhim dlya mnogokomponentnoy smesi produktov sgoraniya [Equations for calculating the parameters of the SRM's exit to a steady state mode

- for a multicomponent mixture of combustion products]. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 55 (9-3). pp. 24–26.
10. Milekhin Yu.M., Medvedev G.G., Voropaeva I.G. (2006) Tenzornoye predstavleniye skorosti goreniya kondensirovannykh sistem. Vyvod i analiz prostranstvennogo uravneniya poverkhnosti goreniya [Tensor representation of combustion rate of condensed systems. Derivation and analysis of spatial equation of combustion surface]. *Khimicheskaya Fizika I Mezoskopiya*. 8(1). pp. 5–20.
 11. Milekhin Yu.M., Medvedev G.G., Voropaeva I.G. (2006) Chislennyy metod resheniya prostranstvennogo uravneniya poverkhnosti goreniya kondensirovannykh sistem [Numerical method for solving the spatial equation of the combustion surface of condensed systems]. *Khimicheskaya Fizika I Mezoskopiya*. 8(2). pp. 209–219.
 12. Kiryushkin A.E., Minkov L.L. (2021) Modelirovaniye vnutrikamernykh protsessov v raketnom dvigatele na tvyordom toplive s uchetom dvizheniya poverkhnosti goreniya [Numerical simulation of intrachamber processes in a solid rocket motor with account for burning surface motion]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. – *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 71. pp. 90–105. DOI: 10.17223/19988621/71/8.
 13. Kiryushkin A.E., Minkov L.L. (2021) Parallelnaya realizatsiya resheniya sopryazhyonnoi zadchi opredeleniya vnutriballisticheskikh kharakteristik dvigateley na tverdom toplive [Parallel implementation of numerical algorithm of solving coupled internal ballistics modelling problem for solid rocket motors]. *Komp'yuternyye issledovaniya i modelirovaniye – Computer Research and Modeling*. 13(1). pp. 47–65. DOI: 10.20537/2076-7633-2021-13-1-47-65.

Сведения об авторах:

Бондарчук Сергей Сергеевич – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник лаборатории высокоэнергетических и специальных материалов Томского государственного университета (Томск, Россия).

Жуков Александр Степанович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией высокоэнергетических систем и новых технологий Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: Zhuk_77@mail.ru

Зиятдинов Мансур Хузахметович – доктор технических наук, старший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ziatdinovm@mail.ru

Дубкова Яна Александровна – младший научный сотрудник лаборатории нанотехнологий металлургии Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kimberlyo.ohi@gmail.com

Миньков Леонид Леонидович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

Крайнов Алексей Юрьевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математической физики физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Information about the authors:

Bondarchuk Sergey S. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation).

Zhukov Alexander S. (Doctor of Physics and Mathematics, Head of Laboratory, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: Zhuk_77@mail.ru

Ziatdinov Mansur Kh. (Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: ziatdinovm@mail.ru

Dubkova Yana A. (Researcher, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kimberlyo.ohi@gmail.com

Minkov Leonid L. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: lminkov@ftf.tsu.ru

Krainov Aleksey Yu. (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: akrainov@ftf.tsu.ru

Статья поступила в редакцию 24.09.2024; принята к публикации 09.12.2024

The article was submitted 24.09.2024; accepted for publication 09.12.2024