

УДК: 536.46+536.24
DOI 10.17223/19988621/75/10

В.А. Порязов, Д.А. Крайнов, А.А. Блохина

ГОРЕНИЕ ЗАРЯДА МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО СМЕСЕВОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА С ПЛОСКИМ КАНАЛОМ В ПОЛЕ МАССОВЫХ СИЛ¹

Представлены результаты математического моделирования горения канального заряда смесового металлизированного твердого топлива в поле массовых сил. Рассматривается горение двух параллельных пластин металлизированного твердого топлива. Проведен расчетно-теоретический анализ влияния величины поля массовых сил и состава топлива на суммарный приход массы с поверхности горения.

Ключевые слова: *моделирование, горение, металлизированное смесовое твердое топливо, канальный заряд, скорость горения, перегрузка, поле массовых сил.*

Перегрузка (массовые силы), направленная по нормали к поверхности, влияет на скорость горения смесовых металлизированных топлив. Для исследования горения конденсированных систем в поле тяжести было проведено множество экспериментов по изучению топлив в центрифугах, которые показали заметное влияние центробежных массовых сил на процесс горения [1–5]. При горении в условиях больших перегрузок вещества с различным механизмом горения ведут себя различным образом [6, 7]. В основе влияния массовых сил на горение конденсированных систем лежит действие перегрузок на конденсированные частицы в зоне химической реакции [1]. В ряде случаев, благодаря приложению инерционных сил к горящему веществу, происходит увеличение скорости горения. В работе [3] это объясняется тем, что инерционные силы прижимают частицы, образующиеся в процессе горения, к горячей поверхности. Характер и степень влияния перегрузок зависят как от их величины и направления, так и от типа самой системы [4, 5]. Большинство работ направлены на изучение горения смесовых твердых топлив с добавлением порошка алюминия [8–15]. Перегрузки являются одним из важных факторов, влияющих на агломерацию частиц алюминия [12, 13]. В основном, под действием перегрузок, направленных по нормали к поверхности топлива, происходит увеличение скорости горения. Это явление вызывается удержанием вблизи поверхности горения частиц, образующихся в процессе горения [7]. Под действием перегрузок, направленных по нормали от поверхности топлива, происходит уменьшение скорости горения. Механизм влияния перегрузки на скорость горения металлизированного твердого топлива исследован в работе [10].

В реальных двигательных установках на твердом топливе практически не встречаются заряды торцевого горения [17–19]. Часто встречающиеся формы зарядов не предполагают воздействие перегрузок, ориентированных по нормали к поверхности горения при их поступательном движении. При этом распространенным элементом конструкции заряда твердого топлива является «зонтик», кото-

¹ Исследование выполнено при поддержке Гранта Президента РФ (МК-96.2020.8).

рый, с поправкой на угол раствора, испытывает перегрузки, ориентированные по нормали к поверхности горения. Представляет интерес исследовать влияние перегрузки на суммарный массоприход с поверхности горения элемента типа «зонтик», который может влиять на основные тяговые характеристики РДТТ на этапах разгона и торможения [20].

В работе исследовано горение смесового металлизированного твердого топлива (МСТТ) с плоским каналом в поле массовых сил. Проведен расчетно-теоретический анализ влияния величины поля массовых сил и состава топлива на суммарный приход массы с единичной поверхности горения канального заряда смесового металлизированного твердого топлива.

Постановка задачи

Для построения физико-математической модели рассматривается горение двух параллельных плоских поверхностей металлизированного смесового твердого топлива единичной площади в поле массовых сил. Схема процесса представлена на рис. 1.

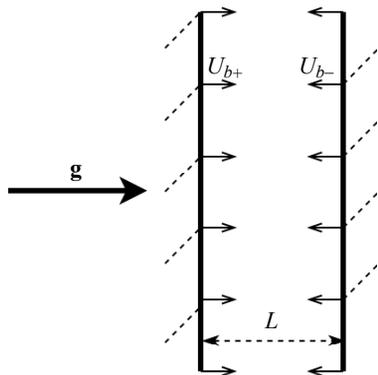


Рис. 1. Схема расположения двух поверхностей металлизированного смесового твердого топлива в поле массовых сил

Fig. 1. Scheme of the chunk fuel with a flat channel under the mass forces

Модель горения заряда металлизированного смесового твердого топлива с плоским каналом в поле массовых сил строилась на основе нестационарной модели горения металлизированного твердого топлива [16]. Учет влияния массовых сил основан на постановке, представленной в работе [10], в которой влияние массовых сил учитывается через слагаемое в правой части уравнения движения частиц алюминия. Используемая сопряженная модель горения [16] учитывает процессы в конденсированной и газовой фазе. Для описания процессов в металлизированном твердом топливе под поверхностью горения записываются уравнения переноса тепла и разложения топлива.

Для описания процессов в газовой фазе над поверхностью горения записываются уравнения течения двухфазной реагирующей среды, учитывающие межфазный обмен массой и энергией, конвективный и кондуктивный теплоперенос. В расчетах использовались теплофизические и формально-кинетические параметры из [16].

Как показано в [10], влияние перегрузок не симметрично – одинаковые по модулю, но разные по знаку перегрузки приводят к разному отклику скорости горения. Однако эти результаты получены на упрощенной модели, не учитывающей процессы в конденсированной фазе. Представляет интерес исследовать процесс горения двух параллельных плоских поверхностей металлизированного смесового твердого топлива единичной площади в поле массовых сил для определения суммарного массового потока с поверхностей горения на основе сопряженной модели горения. Предполагается, что поверхности горения находятся на достаточном удалении друг от друга и не оказывают взаимного влияния.

Результаты расчетов

Значения перегрузки менялись в диапазоне от -650 м/с^2 до 650 м/с^2 . Предполагалось, что перегрузка направлена по нормали к поверхности горения или рассматривается проекция перегрузки на нормаль к поверхности горения. Принималось, что при значении перегрузки больше 0 она направлена от поверхности горения (уносящие перегрузки), если меньше 0 – к поверхности (прижимающие перегрузки).

На рис. 2 представлена зависимость скорости горения МСТТ от размера частиц алюминия, вылетающих с поверхности при $P = 4.5 \text{ МПа}$.

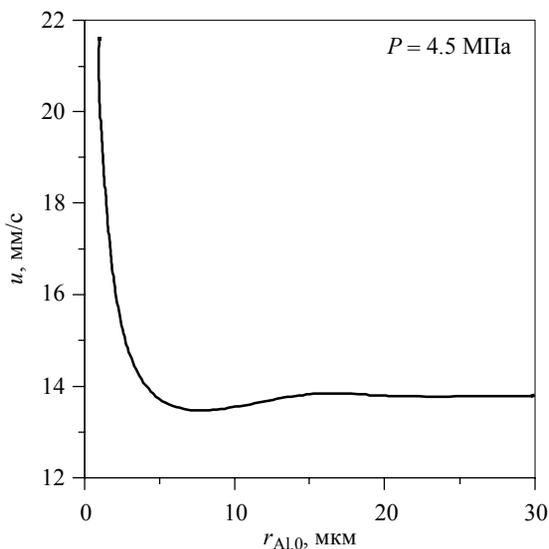


Рис. 2. Зависимость скорости горения МСТТ от $r_{Al,0}$, $P = 4.5 \text{ МПа}$

Fig. 2. Fuel combustion rate as a function of the particle radius $r_{Al,0}$, $P = 45 \text{ atm}$

На рис. 3 – 5 скорость горения приводится в виде безразмерной переменной U_b от величины перегрузки g , где $U_b = u/u_0$, u – скорость горения при заданной величине перегрузки, а u_0 – скорость горения без перегрузки, рассчитанные для каждого значения дисперсности частиц алюминия, аналогично [10]. Под безразмерной величиной массоприхода подразумевается величина $U_{b-p_p} S_p + U_{b+p_p} S_p$, что, в силу одинаковых плотностей и площадей поверхности горения параллельных поверхностей МСТТ, зависит только от скорости горения. На рис. 3 представлена зависимость безразмерной скорости горения от времени при разных перегрузках.

Влияние перегрузок не симметрично и для задачи в сопряженной постановке – одинаковые по модулю, но разные по знаку перегрузки приводят к разному отклику скорости горения, рис. 3, что качественно соответствует зависимостям, полученным в [10].

На рис. 4 представлена скорость горения МСТТ в поле массовых сил в зависимости от дисперсности порошка алюминия, вылетающего с поверхности.

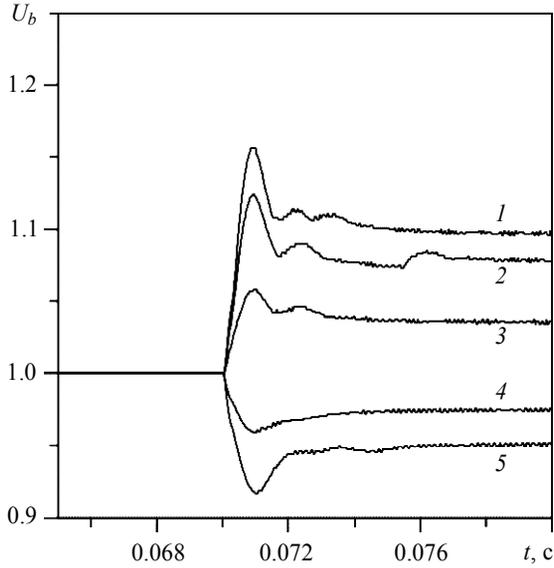


Рис. 3. Зависимость безразмерной скорости горения от времени при мгновенном изменении величины перегрузки в момент времени $t = 0.07$ с; $r_{Al,0} = 10$ мкм; $P = 4.5$ МПа: 1 – $a = -600$ м/с², 2 – $a = -500$ м/с², 3 – $a = -250$ м/с², 4 – $a = 400$ м/с², 5 – $a = 500$ м/с²

Fig. 3. Dimensionless combustion rate as a function of time under instantaneous change in the overcharge at the instant $t = 0.07$ s; $r_{Al,0} = 10$ μ m, $P = 4.5$ МПа: $a = (1) -600$, (2) -500 , (3) -250 , (4) 400 , and (5) 500 м/s²

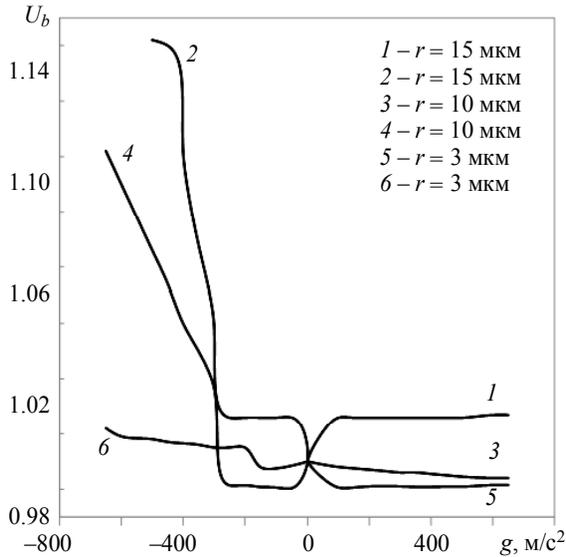


Рис. 4. Зависимость скорости горения МСТТ от перегрузки при различных значениях размера частиц алюминия $r_{Al,0}$, $P = 4.5$ МПа

Fig. 4. Dimensionless combustion rate as a function of the g -force value for different particle radii $r_{Al,0}$, $P = 4.5$ МПа

Видно, что влияние перегрузок не симметрично – одинаковые по модулю, но разные по знаку перегрузки приводят к разному отклику скорости горения, что аналогично результатам, полученным в [10]. При больших перегрузках, направленных от поверхности горения, относительная скорость стремится к некоторому постоянному значению, по всей видимости, к скорости горения безметалльного топлива соответствующего состава. Это хорошо видно для частиц радиусом 10 и 15 мкм. Очевидно, для более мелких частиц выполняется эта же закономерность, но при больших значениях перегрузки.

На рис. 5 представлен суммарный массовый поток двух параллельных поверхностей МСТГ единичной площади в поле массовых сил. Видно, что чем больше размер частиц алюминия, вылетающих с поверхности горения, тем выше суммарный массовый поток с поверхности горения канального заряда МСТГ.

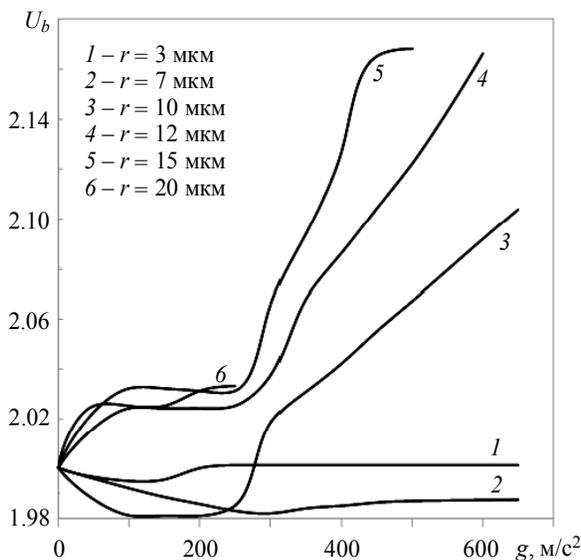


Рис. 5. Суммарный массоприход с поверхности горения канального заряда МСТГ единичной площади при различных значениях размера частиц алюминия $r_{Al,0}$, $P = 4.5$ МПа

Fig. 5. Total mass influx per unit area from the combustion surface of the chunk fuel for different aluminum particle radii $r_{Al,0}$, $P = 4.5$ MPa

На рис. 5 видно, что кривые зависимости массоприхода от перегрузки прерываются до достижения заданного диапазона. Это вызвано тем, что с определенного значения перегрузки сила трения между газом и частицей, уносящая частицы от поверхности горения, становится меньше либо равна массовым силам, на поверхности возрастает концентрация частиц, которые горят на поверхности топлива, температура поверхности горения начинает неконтролируемо возрастать и получается нерасчетный, в рамках данной физико-математической постановки, режим, который требует отдельного изучения. Так, при давлении 4.5 МПа, для частиц радиусом 3, 7 и 10 мкм критическое значение перегрузки находится за

пределами рассмотренных значений. Для частиц размером 12, 15 и 20 мкм режим «налипания» на поверхность реализуется при значениях перегрузок, равных 600, 500 и 260 м/с² соответственно. Для частиц радиусом 50 мкм налипание на поверхность происходит при 50 м/с².

Для значений перегрузки меньше 200 м/с² отклик скорости горения пренебрежимо мал и не превышает 4%. Сам характер зависимости скорости горения от перегрузки для крупных частиц (радиусом более 7.5 мкм) носит немонотонный характер. Для перегрузки меньше 250 м/с² скорость горения практически не отличается от горения МСТТ при нулевой перегрузке, при превышении этого значения начинается быстрый рост суммарного массоприхода. Это объясняется влиянием перегрузки на расстояние от поверхности топлива, на котором происходит воспламенение частиц за счет изменения скорости их движения. Реакция горения частицы алюминия в газовой фазе начинается на удалении от поверхности. Сразу после входа в газовую фазу частицы алюминия имеют температуру поверхности топлива и не горят, выступая в роли стока тепла от экзотермической реакции продуктов газификации топлива. Затем, прогреваясь в реагирующем потоке газа до температуры начала горения, воспламеняются и выступают в роли источника тепла. Крупные частицы, радиус которых больше 7.5 мкм, воспламеняются на значительном удалении от поверхности горения и не увеличивают тепловой поток к поверхности горения. Более подробно этот механизм рассмотрен в работе [21]. Соответственно, для перегрузки, направленной от поверхности горения, ее рост никак не влияет на скорость горения. А перегрузки, направленные к поверхности горения, при небольших значениях понижают скорость горения. Эффект снижения скорости горения при небольших значениях прижимающей перегрузки объясняется увеличением времени пребывания частиц в качестве стока тепла вблизи поверхности горения. При дальнейшем увеличении перегрузки точка воспламенения смещается достаточно близко к поверхности горения, чтобы увеличить тепловой поток к поверхности горения, тем самым приводя к увеличению скорости горения.

При этом, для МСТТ с радиусом вылетающих частиц алюминия больше 12 мкм при перегрузках больше 450 м/с² массоприход увеличивается более чем на 10%, что показывает важность учета эффекта изменения скорости горения под действием перегрузки при моделировании нестационарных процессов в РДТТ на этапах старта, маневрирования и торможения.

Заключение

Проведен расчетно-теоретический анализ влияния перегрузки на величину прихода массы с горящей поверхности заряда смесового металлизированного твердого топлива с плоским каналом. Величина скорости горения рассчитывалась на основе нестационарной модели горения металлизированного твердого топлива, которая позволяет вычислять не только стационарные зависимости скорости горения от перегрузки, но и мгновенный отклик скорости горения на перегрузки с учетом инерционности конденсированной фазы. Полученные результаты наглядно демонстрируют важность учета влияния перегрузки на скорость горения при моделировании нестационарных процессов в РДТТ на этапах старта, маневрирования и торможения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимов Э.И., Максимов Ю.М., Мержанов А.Г. Исследование горения конденсированных веществ в поле массовых сил // Физика горения и взрыва. 1967. Т. 3. № 3. С. 323–327.
2. Юхвид В.И., Максимов Э.И., Козлов В.С. Горение гетерогенных систем в поле массовых сил // Физика горения и взрыва. 1973. № 2. С. 162–168.
3. Юхвид В.И., Максимов Э.И., Мержанов А.Г., Хайкин Б.И., Козлов В.С. О механизме горения конденсированных систем с твердыми добавками в поле массовых сил // Физика горения и взрыва. 1972. № 2. С. 235–240.
4. Серков Б.Б., Максимов Э.И., Мержанов А.Г. Горение конденсированных систем в поле массовых сил // Физика горения и взрыва. 1968. № 4. С. 600–606.
5. Максимов Ю.М., Максимов Э.И. Закономерности горения конденсированных систем в поле массовых сил при средних давлениях // Физика горения и взрыва. 1972. № 4. С. 517–523.
6. Архипов В.А., Коротких А.Г., Третьяков Н.С. Горение баллистических порохов с катализаторами в условиях перегрузок // Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8. № 1. С. 600–606.
7. Марголин А.Д., Крупкин В.Г., Хубаев В.Г. и др. Закономерности горения баллистических составов при перегрузках // Физика горения и взрыва. 1978. Т. 14. № 6. С. 29–36.
8. Максимов Ю.М., Максимов Э.И., Вилюнов В.Н. Влияние перегрузок на горение модельных смесевых металлizedированных составов // Физика горения и взрыва. 1974. Т. 10. № 2. С. 169–177.
9. Марголин А.Д., Крупкин В.Г. Влияние конденсированных добавок на скорость горения пороха в поле ускорений // Физика горения и взрыва. 1975. № 5. С. 42–49.
10. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Горение твердого топлива с добавлением порошка алюминия при перегрузках // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 45. С. 95–103.
11. Орджоникидзе С.К., Марголин Д.А., Похил П.Ф., Уралов А.С. Горение алюминизированных конденсированных систем при перегрузках // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 7. № 4. С. 536–544.
12. Бабук В.А., Васильев В.А., Потехин А.Н. Экспериментальное исследование процесса агломерации при горении алюминизированных твердых топлив в поле // Физика горения и взрыва. 2009. Т. 45. № 1. С. 38–46.
13. Рашковский С.А. Влияние перегрузок на агломерацию частиц алюминия при горении смесевых твердых топлив // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43. № 6. С. 40–50.
14. Марголин А.Д., Крупкин В.Г. Влияние конденсированных добавок на скорость горения пороха в поле ускорения // Физика горения и взрыва. 1974. № 5. С. 702–709.
15. Кирдяшкин А.И., Максимов Ю.М., Некрасов Е.А. Влияние массовых сил на горение гетерогенных систем с конденсированными продуктами реакции // Физика горения и взрыва. 1986. № 1. С. 23–26.
16. Krainov A.Yu., Poryazov V.A., Krainov D.A. Mathematical modelling on extinction of metalized composite solid propellant under a sudden drop in pressure // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 2021. DOI:10.1002/prep.202100123.
17. Соломонов Ю.С., Липанов А.М., Алиев А.В., Дорофеев А.А., Черепов В.И. Твeрдотопливные регулируемые двигательные установки. М.: Машиностроение, 2011. 416 с.
18. Алиев А.В., Амарантов Г.И., Вахрушев А.В. Внутренняя баллистика РДТТ / под ред. А.М. Липанова, Ю.М. Милехина. М.: Машиностроение, 2007. 504 с.
19. Ерохин Б.Т. Теория внутрикамерных процессов и проектирование РДТТ: Учебник для высших технических учебных заведений. М.: Машиностроение, 1991. 560 с.
20. Костюшин К.В. Численное исследование нестационарных газодинамических процессов при старте твeрдотопливных ракет // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2020. № 67. С. 127–143.
21. Poryazov V.A., Krainov A.Yu., Krainov D.A. Simulating the combustion of n powder with added finely divided aluminum // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. V. 88. № 1. P. 94–103. DOI: 10.1007/s10891-015-1171-0.

Poryazov V.A., Krainov D.A., Blokhina A.A. (2022) COMBUSTION OF THE METALLIZED COMPOSITE SOLID CHUNK FUEL CHARGE WITH A FLAT CHANNEL IN A MASS FORCE FIELD. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 75. pp. 113–121

DOI 10.17223/19988621/75/10

Keywords: modeling, combustion, metallized composite solid fuel, channel chunk fuel, combustion rate, g-force, mass forces.

In this paper, combustion of a channel charge of a metallized composite solid chunk fuel in the field of mass forces is modeled. We have investigated the influence of the g -force on the total mass influx from the combustion surface of two parallel plates of the metallized solid fuel. The combustion rate of the fuel is calculated based on the nonstationary model of the metallized solid fuel combustion. The conducted computational and theoretical analysis has provided the data on the influence of the mass forces and the composition of the fuel on the total mass influx from the combustion surface. The g -force values are ranged from -650 to 650 m/s². It is assumed that the g -force is directed along the normal to the combustion surface; otherwise, the projection of the g -force onto the normal to the combustion surface is considered. The obtained results have shown that the effect of the g -force is not symmetric – the g -forces, which are identical in magnitude but different in sign, lead to a different response of the combustion rate. The character of the dependence between the combustion rate and g -force for the particles with the radius greater than 7.5 μ m is nonmonotonic. The obtained results demonstrate the importance of taking into account the effect of the g -force on the combustion rate when simulating nonstationary processes in solid propellant engines at the stages of start, maneuvering, and deceleration.

Financial support. This work was supported by the Grant of the President of the Russian Federation (MK-96.2020.8).

Vasily A. PORYAZOV (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: poryazov@ftf.tsu.ru

Dmitry A. KRAINOV (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: kraynov@tpu.ru

Anna A. BLOKHINA (Ph.D student, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation) E-mail: nyura.blokhina.97@mail.ru

REFERENCES

1. Maksimov E.I., Maksimov Yu.M., Merganov A.G. (1967) Combustion of condensed substances in a mass force field. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 3(3). pp. 201–203. DOI: 10.1007/BF00791860.
2. Yukhvid V.I., Maksimov E.I., Kozlov V.S. (1974). Combustion of heterogeneous systems in a field of mass forces. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 10(2). pp. 140–145. DOI: 10.1007/BF01464167.
3. Yukhvid V.I., Maksimov E.I., Merzhanov A.G., Khaikin B.I., Kozlov V.S. (1973) Mechanism of the combustion of condensed systems with solid admixtures in a field of body forces. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 9(2). pp. 199–203.
4. Serkov B.B., Maksimov E.I., Merzhanov A.G. (1974). Combustion of condensed systems in a mass-force field. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 4(4). pp. 349–352. DOI: 10.1007/BF01464168.
5. Maksimov Yu.M., Maksimov E.I. (1972). Laws of combustion of condensed systems in a field of mass forces at average pressures. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 8(4). pp. 424–428. DOI: 10.1007/BF00741197.
6. Arkhipov V.A., Barsukov V.D., Berezikov A.P., Tretyakov N.S. (2006) *Osobennosti goreniya kondensirovannykh sistem s katalizatorami v usloviyakh peregruzki* [Features of the

- condensed system combustion with catalysts under overload conditions]. *Khimicheskaya Fizika i Mezoskopiya – Chemical Physics and Mesoscopics*. 8(1). pp. 43–51.
7. Margolin A.D., Krupkin V.G., Khubaev V.G., Baikov V.I., Tokarev N.P., Denisjuk A.P. (1978). Laws governing the combustion of ballistic compositions with overloads. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 14(6). pp. 716–722. DOI: 10.1007/BF00786099.
 8. Maksimov Yu.M., Maksimov E.I., Vilyunov V.N. (1974). Effect of overcharges on the combustion of model mixed metallized compositions. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 10(2). pp. 146–153. DOI: 10.1007/BF01464168.
 9. Margolin A.D., Krupkin V. G. (1975). Influence of condensed admixtures on the powder combustion rate in an acceleration field. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 11(5). pp. 600–605. DOI: 10.1007/BF00751082.
 10. Poryazov V.A., Krainov A.Yu. (2017) *Gorenie tverdogo topliva s dobavleniem poroshka alyuminiya pri peregruzkah* [Combustion of a solid propellant with addition of aluminum powder under an acceleration load]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 45. pp. 95–103. DOI: 10.17223/19988621/45/9.
 11. Ordzhonikidze S.K., Margolin A.D., Pokhil P.F., Uralov A.S. (1971). Combustion of aluminized condensed systems under acceleration loading. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 7(4). pp. 458–464. DOI: 10.1007/BF00740676.
 12. Babuk V.A., Vasil'ev V.A., Potekhin A.N. (2009). Experimental investigation of agglomeration during combustion of aluminized solid propellants in an acceleration field. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 45(1). pp. 32–39. DOI: 10.1007/s10573-009-0005-9.
 13. Rashkovskii S.A. (2007). Effect of acceleration on agglomeration of aluminum particles during combustion of composite solid propellants. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 43(6). pp. 654–663. DOI: 10.1007/s10573-007-0088-0.
 14. Margolin A.D., Krupkin V.G. (1975). Influence of condensed admixtures on the powder combustion rate in an acceleration field. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 11(5). pp. 600–605. DOI: 10.1007/BF00751082.
 15. Kiryashkin A.I., Maksimov Yu.M., Nekrasov E.A. (1986). Effect of mass forces on combustion of heterogeneous systems with condensed combustion products. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 22(1). pp. 20–23. DOI: 10.1007/BF00750700.
 16. Krainov A.Yu., Poryazov V.A., Krainov D.A. (2021) Mathematical modelling on extinction of metallized composite solid propellant under a sudden drop in pressure. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 47. DOI: 10.1002/prop.202100123.
 17. Solomonov Yu.S., Lipanov A.M., Aliev A.V., Dorofeev A.A., Cherepov V.I. (2011) *Tverdotoplivnye reguliruemye dvigatel'nye ustanovki* [Solid propellant governed propulsion systems]. Moscow: Mashinostroenie.
 18. Aliev A.V., Amarantov G.N. Vakhrushev A.V. (2007) *Vnutrennyaya ballistika RDTT* [Internal ballistics of solid-propellant rocket motors]. Ed. by Lipanov A.M., Milekhin Yu.M. Moscow: Mashinostroenie.
 19. Erokhin B.T. (1991) *Teoriya vnutrikamernykh protsessov i proektirovaniya RDTT* [Theory of intrachamber processes and design of solid-propellant rocket motors]. Moscow: Mashinostroenie.
 20. Kostyushin K.V. (2020) Chislennoye issledovaniye nestatsionarnykh gazodinamicheskikh protsessov pri starte tverdotoplivnykh raket [Numerical investigation of unsteady gasdynamic processes at the launch of solid-propellant rockets]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 67. pp. 127–143. DOI: 10.17223/19988621/50/9.
 21. Poryazov V.A., Krainov A.Yu., Krainov D.A. (2015) Simulating the combustion of N powder with added finely divided aluminum. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 88(1). pp. 94–103. DOI: 10.1007/s10891-015-1171-0.