



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский  
Томский государственный университет  
НИИ прикладной математики и механики ТГУ



**IX Всероссийская молодежная научная конференция  
«Актуальные проблемы современной механики  
сплошных сред и небесной механики – 2019»  
г. Томск, 18–20 ноября 2019 г.**

**IX All-Russian Youth Scientific Conference  
«Current issues of  
continuum mechanics and celestial mechanics – 2019»  
November, 18–20, 2019**

Томск-2020

УДК 539.3.004  
ББК 22.25; 22.251.22.62  
М43

**Всероссийская** молодежная научная конференция «Актуальные проблемы М43 современной механики сплошных сред и небесной механики» 18–20 ноября 2019 г.: Материалы конференции / под ред. М.Ю. Орлова. – Томск: Изд-во «Красное знамя». 2020. – 340 с.

ISBN 978-5-6045081-1-4

Представлены пленарные и секционные доклады молодых ученых, изложенные на конференции «Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики», прошедшей в г. Томске 18–20 ноября 2019 г.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов.

**УДК 539.3.004**  
**ББК 22.25; 22.251.22.62**

ISBN 978-5-6045081-1-4

© Томский государственный университет, 2020  
© Издательство «Красное знамя», 2020

2. *Knyazeva A.G., Burkina R.S., Vilyunov V.N.* (1988) Characteristics of local thermal ignition with various initial temperature distributions // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 24(3). Pp. 303–305. DOI: 10.1007/BF00750611

3. *Knyazeva A.G.* (1996) Approximate estimates of the characteristics of propellant ignition using radiant flux through shields with various properties // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 32(1). Pp. 22–35. DOI: 10.1134/S0010508212050115

4. *Poryazov V.A., Krainov A.Yu.* Calculation of the ignition stages and steady-state combustion of a metallized solid propellant under laser radiation // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika*. 2019. No. 59. Pp. 94–104. DOI: 10.17223/19988621/59/10

5. *Krainov, A.Y., Poryazov, V.A.* (2015). Numerical simulation of the extinction of N powder by a pressure drop based on a coupled combustion model. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 51(6), 664–669. doi:10.1134/S0010508215060076

## РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ЗАДЕРЖКИ ЗАЖИГАНИЯ МЕТАЛЛИЗИРОВАННОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ЗАЖИГАНИИ КОНВЕКТИВНЫМ ПОТОКОМ

**В.Л. Гойко, В.А. Порязов**

Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия  
goiko@data.tsu.ru

**Ключевые слова:** зажигание, горение, высокотемпературный поток, конвективный поток, конденсированное высокоэнергетическое вещество.

**Аннотация.** Представлены математическая модель и методика расчета задержки зажигания металлизированного твердого топлива конвективным высокотемпературным потоком. В постановке рассматривается зажигание полубесконечной пластины металлизированного твердого топлива неограниченным обдувающим высокотемпературным потоком. Модель учитывает влияние эффекта обдува высокотемпературным потоком через турбулентный теплоперенос.

## IGNITION DELAY TIME OF METALLIZED SOLID PROPELLANT IGNITED BY A CONVECTIVE FLOW

**V.L. Goiko, V.A. Poryazov**

National research Tomsk State University, Russian Federation  
goiko@data.tsu.ru

**Keywords:** the ignition, high-temperature flow, condensed high-energy substance, convective flow.

**Abstract.** This paper presents a mathematical model and methodology to calculate the time of ignited by a convective high-temperature flow of a metallized solid propellant with aluminum additives. The study investigates the ignition of a semi-infinite slab of the metal-

lized solid propellant blown by an unlimited high-temperature flow. We have used the boundary-layer approximation to construct the ignition model and the effect of the high-temperature blowing is taken into account by the turbulent heat and mass transfer.

Целью работы является разработка методики численного расчета задержки зажигания металлизированного твердого топлива под действием высокотемпературного конвективного потока.

На основе нестационарной модели горения металлизированного твердого топлива в сопряженной постановке [1] и модели эрозионного горения металлизированного твердого топлива [2] построена модель зажигания и выхода на стационарный режим горения металлизированного твердого топлива под действием высокотемпературного конвективного потока.

В твердом топливе при нагреве идут химические реакции, полупродуктами которых является газ. Газообразные продукты разложения высвобождаются на последней стадии реакции. Теплофизические характеристики твердой фазы не зависят от температуры и определяются компонентным составом твердого топлива, путем осреднения. Над поверхностью топлива записываются уравнения течения двухфазной реагирующей среды, учитывающие межфазный обмен импульсом и энергией, конвективный и кондуктивный теплоперенос, зависимость коэффициентов переноса от температуры и интенсивности турбулентности.

Для описания характеристик динамической турбулентности в пограничном слое использовалась модель турбулентности Ван-Дрифта [3], являющаяся обобщением результатов экспериментов и широко распространенной в инженерных расчетах, так как справедлива во всей внутренней части пограничного слоя [4, 5]. Расчеты проводились для формально-кинетических параметров, характерных для пороха Н,  $P = 6$  МПа,  $\alpha_{Al} = 0.09$ ,  $r_{Al,0} = 5$  мкм. Результаты расчетов задержки времени зажигания для различных значений скорости и температуры обдувающего потока представлены на *рис. 1*.

В твердом топливе при нагреве идут химические реакции, полупродуктами которых является газ. Газообразные продукты разложения высвобождаются на последней стадии реакции. Теплофизические характеристики твердой фазы не зависят от температуры и определяются компонентным составом твердого топлива, путем осреднения. Над поверхностью топлива записываются уравнения течения двухфазной реагирующей среды, учитывающие межфазный обмен импульсом и энергией, конвективный и кондуктивный теплоперенос, зависимость коэффициентов переноса от температуры и интенсивности турбулентности. Для описания характеристик динамической турбулентности в пограничном слое использовалась модель турбулентности Ван-Дрифта [3], являющаяся обобщением результатов экспериментов и широко распространенной в инженерных расчетах, так как справедлива во всей внутренней части пограничного слоя [4, 5].

Расчеты проводились для формально-кинетических параметров, характерных для пороха Н,  $P = 6$  МПа,  $\alpha_{Al} = 0.09$ ,  $r_{Al,0} = 5$  мкм.

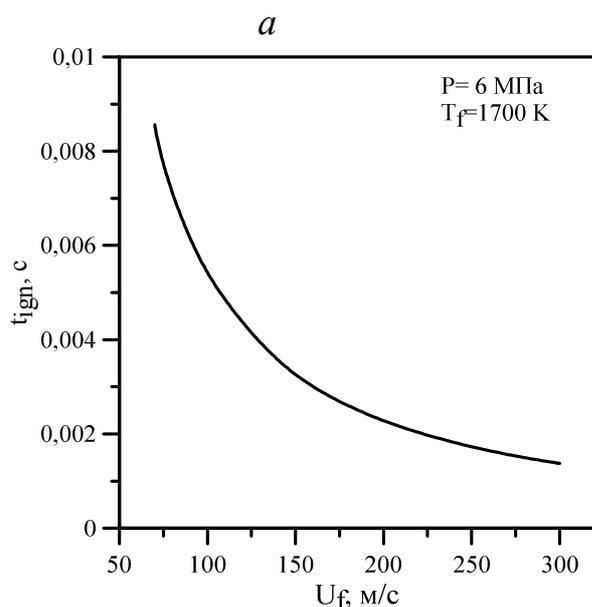


Рис. 1, а. Зависимость времени задержки зажигания пороха Н с добавлением порошка алюминия от температуры обдувающего высокотемпературного потока.

$$T_f = 1700 \text{ К}, r_{Al,0} = 5 \text{ мкм}, \alpha_{Al} = 0.09, \\ P = 6 \text{ МПа}$$

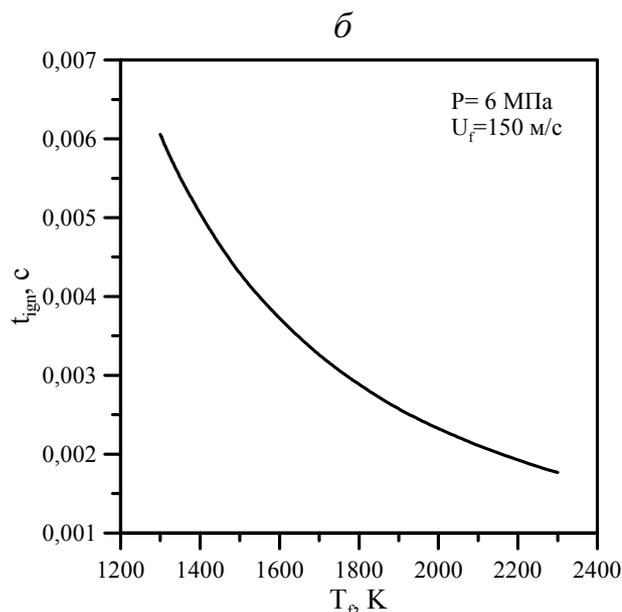


Рис. 1, б. Зависимость времени задержки зажигания пороха Н с добавлением порошка алюминия от температуры обдувающего высокотемпературного потока.  $U_f = 150$  м/с,

$$r_{Al,0} = 5 \text{ мкм}, \alpha_{Al} = 0.09, P = 6 \text{ МПа}$$

В рамках представленной модели и методики решения системы уравнений математической модели проведен расчетно-теоретический анализ влияния скорости и температуры обдувающего потока на время задержки зажигания металлизированного твердого топлива.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ мол\_а 18-38-00533.

## Литература

1. Порязов В.А., Крайнов А.Ю. Математическая модель и расчет нестационарной скорости горения металлизированных твердых ракетных топлив // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2017. № 50. С. 99–111.
2. Порязов В.А., Крайнов Д.А. Математическое моделирование эрозионного горения металлизированных твердых топлив // Вестн Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2019. № 58. С. 119–127.
3. Driest E.R. van On turbulent flow near a wall // AIAA Journal Special Supplement: Centennial of Power Flight. Vol. 23, No. 11, 1956. Pp. 1007–1011. <https://doi.org/10.2514/8.3713>
4. Булгаков В.К., Липанов А.М. Теория эрозионного горения твердых ракетных топлив. М.: Наука, 2001. 138 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 714 с.

## References

1. Poryazov V.A., Krainov A.Yu. (2017) Matematicheskaya model' i raschet nestatsionarnoy skorosti goreniya metallizirovannykh tverdykh raketnykh topliv [Mathematical model and calculation of the unsteady combustion rate of the metallized solid rocket propellants]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika – Tomsk State University // Journal of Mathematics and Mechanics. 50. pp. 99–111. DOI: 10.17223/19988621/50/9.
2. Poryazov V.A., Krainov D.A. (2019) Matematicheskaya model' erosiionnogo goreniya metallizirovannykh tverdykh topliv [Mathematical modeling of the erosive burning of metallized solid propellants]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. 58. Pp. 119–127. DOI: 10.17223/19988621/58/10.
3. Driest E.R. van. On turbulent flow near a wall (1956) // AIAA Journal Special Supplement: Centennial of Power Flight. 23(11). Pp. 1007-1011. <https://doi.org/10.2514/8.3713>.
4. Bulgakov V.K. and Lipanov A.M. (2001) Theory of Erosive Combustion of Solid Rocket Propellants. Moscow: Nauka.
5. Schlichting H., Gersten K. (2004) Boundary Layer Theory, 8th ed. Springer-Verlag. ISBN 81-8128-121-7.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ

**Е.М. Гриф, А.В. Гуськов, К.Е. Милевский**

Новосибирский государственный технический университет; Россия  
grifkatia@gmail.com

**Ключевые слова:** кумуляция, размер зерна, кумулятивная струя, кумулятивная облицовка.

**Аннотация.** Анализируются возможности и проблемы применения численного моделирования в современных исследованиях процесса кумуляции. Предлагается выделение оцениваемых параметров в момент формирования кумулятивной струи как способа сокращения ресурсоемкости расчетов. Проводится исследование влияния микроструктуры материала кумулятивной облицовки (среднего размера зерна меди) на эффективность струеобразования за счет выделяемых параметров: угла между приведенным вектором скорости головной части струи и осью заряда  $\gamma$  и угла схлопывания кумулятивной облицовки  $\gamma'$ . Получаемые результаты коррелируют с известными данными, полученными другими способами, что подтверждает перспективность выделяемого направления.