

---

# **NONEQUILIBRIUM PROCESSES: RECENT ACCOMPLISHMENTS**

---

**Edited by**

**S. Frolov**

**A. Lanshin**

**TORUS**  **MOSCOW**  
**PRESS** **2020**

**Prof. Dr. Sc. Sergey M. Frolov**

N. N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics  
of the Russian Academy of Sciences  
4 Kosigin Str., Moscow 119991, Russian Federation

**Prof. Dr. Sc. Alexander I. Lanshin**

P. I. Baranov Central Institute of Aviation Motors  
2 Aviamotornaya Str., Moscow 111116, Russian Federation

**БКБ 24.54+26.23**

**H 57**

**УДК 662.61+628.395**

**Nonequilibrium processes: Recent accomplishments** / [Edited by  
S. M. Frolov and A. I. Lanshin]. — Moscow: TORUS PRESS, 2020. —  
232 p.

ISBN 978-5-94588-280-5

The book includes the abstracts of presentations at the 9th International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena held in Sochi, Russia, October 5–9, 2020. The Symposium was dedicated to the 90-th anniversary of the Central Institute of Aviation Motors, the head organisation of aerospace science and technology in the Soviet Union and Russian Federation. The contributions are arranged in 6 Chapters: Kinetics; Clusters and Nanostructures; Ignition and Combustion; Engines and Power Plants; Shocks and Detonations; and Technologies.

The book addresses to practicing engineers and researchers and can serve as a reference book for graduate studies in physics of clusters and aerosol particles, laser and low temperature plasma physics, combustion and atmospheric chemistry.

**БКБ 24.54+26.23**

ISBN 978-5-94588-280-5

© TORUS PRESS, 2020

All rights reserved. No part of this book may be reproduced in any form by photostat, microfilm, or any other means without permission from the publishers.

Technical Editor	<i>L. Kokushkina</i>
Art Editors	<i>M. Seclakova</i>
Cover Design	<i>V. Budanova</i>

Printed in Russian Federation

## *Preface*

The 9th International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion, and Atmospheric Phenomena was dedicated to the 90th anniversary of the Central Institute of Aviation Motors, the head organization of aerospace science and technology in the Soviet Union and Russian Federation. The Symposium was held in Sochi, Russia, on October 5 to 9, 2020.

The traditional scope of the Symposium topics was:

- kinetics of elementary processes in plasma, combustion, and atmosphere;
- fundamentals of ignition and combustion of organic, metalized, and synthetic materials;
- physical and chemical processes in low-temperature plasma;
- physics of shock and detonation waves;
- ignition, combustion, and detonation in application to jet and internal combustion engines and power plants;
- novel combustion concepts including plasma-assisted and laser-induced combustion;
- physics and chemistry of high-speed gas flows;
- ignition and combustion of gaseous, liquid, and solid fuels in high-speed flows;
- novel physical and chemical propulsion concepts;
- physics of clusters and nanostructures;
- combustion, laser, and plasma generated aerosols and nanoparticles;
- plasma, laser, and combustion assisted technologies;

Suppression of high frequency modes of unstable combustion in low-emission combustors of industrial gas turbines <i>A. N. Dubovitsky, E. D. Sverdlov, K. S. Pyankov, H. F. Valiev, and S. A. Cheprasov</i> .....	136
Influence of flow swirling on combustion of aluminum powder aerosuspension in a chamber with extension <i>A. Yu. Krainov, K. M. Moiseeva, and V. A. Poryazov</i> .....	139
Pulse thermal control of moisture in aircraft liquid fuels <i>A. A. Starostin, D. V. Volosnikov, and P. V. Skripov</i> .....	142
Simulation of compressible and incompressible flows by meshless methods of smoothed particle hydrodynamics <i>S. M. Frolov, V. S. Ivanov, Vas. S. Ivanov, R. R. Tukhwatullina, and B. Basara</i> .....	146
Thermal and caloric equations of state for nitrogen: Application to cryogenic injection conditions <i>N. M. Kuznetsov, S. N. Medvedev, S. M. Frolov, F. S. Frolov, B. Basara, and K. Pachler</i> .....	152
Outdoor tests of a towed boat model with fuel combustion in a bottom cavity <i>S. M. Frolov, S. V. Platonov, K. A. Avdeev, V. S. Aksenov, V. S. Ivanov, A. E. Zangiev, I. A. Sadykov, F. S. Frolov, and I. O. Shamshin</i> .....	155
<b>Chapter 5 SHOCKS AND DETONATIONS</b>	<b>159</b>
Relaxation processes behind the shock wave in air <i>A. I. Bryzgalov</i> .....	161
Parallel solver for the simulations of detonation waves on unstructured grids <i>A. I. Lopato and A. G. Eremenko</i> .....	165

Investigation of the processes in the high-pressure chamber of shock tube <i>N. G. Bykova, I. E. Zabelinsky, P. V. Kozlov, Yu. V. Tunik, V. Yu. Levashov, and V. O. Mayorov</i> .....	169
Detonability of fuel-air mixtures in terms of deflagration-to-detonation transition <i>S. M. Frolov, V. I. Zvegintsev, I. O. Shamshin, M. V. Kazachenko, V. S. Aksenov, and I. V. Bilera</i> .....	174
Organic waste gasification with highly superheated steam produced by cyclic detonations of methane-steam-oxygen mixtures <i>S. M. Frolov, V. A. Smetanyuk, I. O. Shamshin, V. S. Aksenov, I. A. Sadykov, A. S. Silantiev, and F. S. Frolov</i> .....	178
<b>Chapter 6 TECHNOLOGIES</b>	<b>183</b>
Control of the composition of gas phase reaction reagents using a liquid electrocapillary resonator <i>P. S. Kuleshov</i> .....	185
Catalytic processes on the surface of thermal protection silicon-based coating under interaction with dissociated air flow <i>A. A. Krupnov and M. Ju. Pogosbekian</i> .....	187
Advantages of high voltage consolidation of hafnium carbide powders and tungsten-based alloys <i>E. G. Grigoryev, V. Yu. Goltsev, A. V. Osintsev, A. S. Plotnikov, E. L. Strizhakov, S. V. Nescoromniy, V. G. Vinogradov, and S. O. Ageev</i> .....	190
Integrated simulation of plasma and gasdynamics of prospective propulsion systems with the emphasis to thermoemission cooling of their elements <i>A. V. Kolychev, V. A. Kernozhitsky, M. V. Chernyshov, and V. A. Savelov</i> .....	193

INFLUENCE OF FLOW SWIRLING  
ON COMBUSTION OF ALUMINUM POWDER  
AEROSUSPENSION IN A CHAMBER  
WITH EXTENSION

A. Yu. Krainov, K. M. Moiseeva, and V. A. Poryazov

Tomsk State University  
36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russia  
e-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru

A numerical study of combustion of the aluminum–air suspension in the swirling flow in the expansion chamber has been performed. The physical and mathematical formulation of the problem is based on the dynamic model of the multiphase reacting media. Calculations have been performed under the varying values of particle size, particle mass concentration, and linear and angular components of the flow velocity at the inlet of the combustion chamber. The numerical study has provided the temperature patterns and concentration of gas and particles in the combustion chamber depending on the size and mass concentration of aluminum particles. The study has demonstrated the effect of the swirl rate on the shape of the flame front.

### Acknowledgments

This work was carried out with financial support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the framework of State Assignment No. 0721-2020-0036.

# ВЛИЯНИЕ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА ГОРЕНИЕ АЭРОВЗВЕСИ ПОРОШКА АЛЮМИНИЯ В КАМЕРЕ С РАСШИРЕНИЕМ

А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева, В. А. Порязов

Томский государственный университет  
Россия, Томск 634050, просп. Ленина, д. 36  
e-mail: Moiseeva\_KM@t-sk.ru

В работе выполнено численное исследование задачи горения аэровзвеси порошка алюминия в камере с расширением при закрутке потока. Физико-математическая постановка задачи основана на модели динамики многофазных реагирующих сред [1]. Основные допущения, касающиеся горения аэровзвеси порошка алюминия, соответствуют работе [2]. Схема камеры сгорания представлена на рисунке.

Задача описывается системой уравнений, записанных в двухмерной осесимметричной постановке, состоящей из уравнений сохранения импульса, массы и энергии газа и частиц, дополненной уравнениями сохранения массы окислителя в газе и счетного количества частиц. Система уравнений, описывающих движение газозвеси, учитывает изменение скорости потока по осевой и радиальной составляющей, производная скорости потока по угловой составляющей равна нулю. Закрутка потока моделируется через учет угловой составляющей скоростей движения газа и частиц.

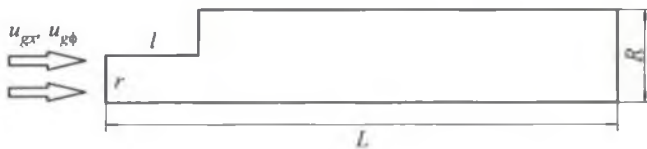


Схема цилиндрической камеры сгорания с внезапным расширением

Метод решения задачи аналогичен [2] и основан на алгоритмах распада произвольного разрыва [3, 4]. Шаги расчетной сетки по пространству вдоль осевого и радиального направления задавались равными  $10^{-3}$  м, шаг по времени вычислялся из условия устойчивости Куранта [3]. В расчетах варьировались размер, массовая концентрация частиц, линейная и угловая составляющие скорости подачи потока на входе в камеру сгорания. Из расчетов получены распределения температуры и концентрации газа и частиц по камере сгорания в зависимости от размера и массовой концентрации частиц алюминия, показано влияние скорости закрутки на форму фронта пламени.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 0721-2020-0036.

## Литература

1. Нигматуллин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. 360 с.
2. Моисеева К. М., Крайнов А. Ю., Деметьев А. А. Определение критических условий искрового зажигания бидисперсного порошка алюминия в воздухе // Физика горения и взрыва, 2019. Т. 55. № 4. С. 26–33.
3. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокоров Г. П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. — М.: Наука, 1976. 400 с.
4. Крайко А. П. О поверхностях разрыва в среде, лишенной «собственного» давления // Прикладная математика и механика, 1979. Т. 43. № 3, С. 500–510.



<p>Подавление высокочастотных режимов неустойчивого горения в малоэмиссионных камерах сгорания промышленных газотурбинных установок  <i>А. Н. Дубовицкий, Е. Д. Свердлов, К. С. Пьянков, Х. Ф. Валиев, С. А. Чепрасов</i>.....</p>	136
<p>Влияние закрутки потока на горение аэрозвеси порошка алюминия в камере с расширением  <i>А. Ю. Крайнов, К. М. Моисеева, В. А. Порязов</i>.....</p>	139
<p>Импульсный тепловой контроль влаги в жидких топливах летательных аппаратов  <i>А. А. Старостин, Д. В. Волосников, П. В. Скрипов</i>....</p>	142
<p>Моделирование несжимаемых и сжимаемых течений бессеточным методом гидродинамики сглаженных частиц  <i>С. М. Фролов, В. С. Иванов, Вас. С. Иванов, Р. Р. Тухватуллина, Б. Басара</i>.....</p>	146
<p>Термическое и калорическое уравнения состояния азота: применение к расчетам истечения криогенных струй  <i>Н. М. Кузнецов, С. Н. Медведев, С. М. Фролов, Ф. С. Фролов, Б. Басара, К. Пазлер</i>.....</p>	152
<p>Натурные испытания буксируемой модели судна с горением топливной смеси в днищевой каверне  <i>С. М. Фролов, С. В. Платонов, К. А. Авдеев, В. С. Аксёнов, В. С. Иванов, А. Е. Зангиев, И. А. Садыков, Ф. С. Фролов, И. О. Шамиши</i>.....</p>	155
<p><b>Глава 5 УДАРНЫЕ ВОЛНЫ И ДЕТОНАЦИЯ</b> <span style="float: right;"><b>159</b></span></p>	
<p>Релаксационные процессы за воздушной ударной волной  <i>А. И. Брызгалов</i>.....</p>	161
<p>Параллельный солвер для моделирования детонационных волн на неструктурированных сетках  <i>А. И. Лопато, А. Г. Еременко</i>.....</p>	165

Исследование процессов в камере высокого давления ударной трубы <i>Н. Г. Быкова, И. Е. Забелинский, П. В. Коллов, Ю. В. Туркич, В. Ю. Левашов, В. О. Майоров</i> .....	169
Детонационная способность топливно-воздушных смесей при переходе горения в детонацию <i>С. М. Фролов, В. И. Звездинцев, И. О. Шамшин, М. В. Казиченко, В. С. Аксёнов, И. В. Билера</i> .....	174
Газификация органических отходов сильно перегретым водяным паром, получаемым циклической детонацией тройных смесей метан – кислород – водяной пар <i>С. М. Фролов, В. А. Сметанюк, И. О. Шамшин, В. С. Аксёнов, И. А. Садыков, А. С. Силахтьев, Ф. С. Фролов</i> .....	178
<b>Глава 6 ТЕХНОЛОГИИ</b>	<b>183</b>
Влияние жидкостного электрокапиллярного волнового резонатора на состав реагентов газофазных реакций <i>П. С. Кулешов</i> .....	185
Каталитические процессы на поверхности теплозащитных кремнесодержащих покрытий при взаимодействии с диссоциированным потоком воздуха <i>А. А. Крутков, М. Ю. Погосбежян</i> .....	187
Преимущества высоковольтной консолидации порошков карбида гафния и сплавов на основе вольфрама <i>Е. Г. Григорьев, В. Ю. Гольцев, А. В. Осинцев, А. С. Плотников, Е. Л. Стрижаков, С. В. Нескормный, В. Г. Виноградов, С. О. Азеев</i> .....	190
Комплексное моделирование плазмы и газодинамика перспективных двигательных установок с термоэмиссионным охлаждением их элементов <i>А. В. Кольчев, В. А. Керножицкий, М. В. Чернышов, В. А. Савелов</i> .....	193

Консолидация порошков с использованием технологического горения при создании каталитически активных мембран для дегидрирования углеводородов <i>В. И. Уваров, Р. Д. Капустин, А. О. Кириллов</i> . . . . .	197
Пористые каталитически активные керамические мембраны для дегидрирования углеводородов <i>В. И. Уваров, Р. Д. Капустин, А. О. Кириллов</i> . . . . .	200
Авторский указатель	206

Научное издание

**Неравновесные процессы: последние достижения**

Под ред. С. М. Фролова, А. И. Ланшина

Технический редактор: *Л. Кокушкина*  
Художественный редактор: *М. Седакова*  
Дизайн обложки: *В. Буданова*

Сдано в набор 01.08.20. Подписано в печать 23.09.20.  
Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.  
Усл.-печ. л. 13,49. Уч.-изд. л. 10,0. Тираж 100 экз.

Заказ № 1116.

Издательство «ТОРУС ПРЕСС»  
121614, г. Москва, ул. Крылатская 29-1-43  
torus@torus-press.ru  
<http://www.torus-press.ru>

Отпечатано в НИПКЦ «Восход-А» с готовых файлов  
Москва, наб. Новикова-Прибоя, д. 3, корп. 2