ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ им. С. С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

**ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯХ**

Монография

*Под редакцией
академика РАН Д. М. Марковича,
доктора физ.-мат. наук О. В. Шарыпова*

Новосибирск · 2023

УДК 544.45+662+536.7+532

ББК 24.54+31.3+22.253

П84

П84 Процессы горения и детонации в перспективных энерготехнологиях / под ред. Д. М. Марковича и О. В. Шарыпова; Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН. — Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2023. — 536 с.

ISBN 978-5-4437-1516-2

В монографии представлены результаты междисциплинарных фундаментальных исследований физико-химических процессов горения и детонации различных типов перспективных топливных смесей в многофазных потоках со сложной пространственной структурой. Проблематика относится к механике многофазных и реагирующих сред, теплофизике, химической физике и охватывает широкий спектр задач, имеющих важное значение для развития и создания перспективных технологий теплоэнергетики, энергомашиностроения и двигателестроения: управление физико-химическими процессами в многофазных многокомпонентных средах при горении традиционных и новых видов топлива, возникновение и устойчивость детонации в сложных условиях, структура детонационных волн в перспективных топливных смесях. В монографию включены результаты выполнения крупного научного проекта «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий» (грант Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение от 29.09.2020 № 075-15-2020-806, 2020-2023 гг.) консорциумом, объединяющим десять российских научных организаций и вузов.

Книга представляет интерес для научных работников, аспирантов и студентов, специализирующихся в области экспериментального и численного моделирования процессов горения и детонации в различных условиях, в том числе приближенных к реализующимся в перспективных высокоэффективных и безопасных технологиях производства тепловой энергии, новых типах двигателей и энергоустановок, а также занимающихся разработкой эффективных методов обеспечения взрывобезопасности технологий добычи и использования топлива.

УДК 544.45+662+536.7+532

ББК 24.54+31.3+22.253

*Издано при поддержке Минобрнауки России,
соглашение от 29.09.2020 № 075-15-2020-806*

ISBN 978-5-4437-1516-2

© Институт теплофизики
им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2023

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография посвящена фундаментальным исследованиям физико-химических процессов горения и детонации различных типов перспективных топливных смесей (в том числе многотопливных) в многофазных потоках со сложной пространственной структурой.

Активные исследования в этой области ведутся мировыми державами в течение многих десятилетий. Отечественные ученые внесли весомый вклад в генерацию новых знаний, лежащих в основе современных российских промышленных и оборонных технологий. В настоящее время появился новый инструментарий исследования процессов горения и детонации, позволяющий достичь результатов принципиально нового уровня и открывающий широкие перспективы для изучения горения и детонации, обоснования эффективных методов управления этими процессами. Это прежде всего высокопроизводительная вычислительная техника, лазерно-оптические системы диагностики потоков, сверхчувствительные ультраскоростные регистраторы процессов в различных спектральных диапазонах, обеспечивающие получение детальной экспериментальной информации о четырехмерной ($t + 3D$) гидродинамике, полях температуры и концентрации молекул и радикалов в широком диапазоне параметров.

В рамках чрезвычайно широкой научной области, охватывающей механику многофазных и реагирующих сред, теплофизику, химическую физику, материал, представленный в монографии, сфокусирован на ряде крупных фундаментальных проблем, связанных с управлением физико-химическими процессами в многофазных многокомпонентных средах при горении традиционных и новых перспективных видов топлива; моделированием кинетики химических реакций; контролем возникновения, устойчивости и параметров детонационных режимов.

Коллектив авторов представляет десять российских научных организаций и вузов, занимающих лидирующие позиции в различных областях изучения процессов горения и детонации и образовавших консорциум для выполнения в 2020–2023 гг. крупного научного проекта (далее — КНП) «Фундаментальные исследования процессов горения и детонации применительно к развитию основ энерготехнологий», поддержанного грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 29.09.2020 № 075-15-2020-806). Среди членов консорциума: Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, ФИЦ химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН, Институт теоретической и прикладной механики

им. С. А. Христиановича СО РАН, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Институт механики), Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Дальневосточный федеральный университет.

Представленные в монографии новые научные результаты получены в рамках выполнения КНП и относятся к следующим направлениям:

– устойчивость, волновые явления, структуры и турбулентность в реагирующих системах, управление эффективностью горения и параметрами детонации различных топливных смесей;

– анализ кинетических механизмов, разработка новых моделей химического реагирования в системах с наличием усложняющих факторов: повышенное давление, многокомпонентные и многофазные горючие смеси;

– получение данных о кинетических параметрах перспективных видов топлива (многотопливные смеси, высокоэнергетические топлива);

– изучение диспергирования жидких и композитных топлив, газификации и пиролиза твердого топлива, производство вредных продуктов сгорания и других процессов, сопутствующих горению в различных условиях;

– математическое моделирование горения и детонации на основе современных вихререзающих подходов, новых верифицированных кинетических механизмов с использованием суперкомпьютерных ресурсов и масштабных параллельных вычислений;

– развитие современных методов диагностики высокотемпературных реагирующих потоков на основе лазерно-оптических технологий, получение массивов детальной экспериментальной информации для анализа физических процессов и эффектов, верификации данных математического моделирования.

Результаты исследований вносят вклад в создание основ высокоэффективных и безопасных технологий производства тепловой энергии и усовершенствованных и принципиально новых типов двигателей и энергоустановок, эффективных методов обеспечения взрывобезопасности технологий добычи и использования топлива. Практическая значимость полученных результатов подтверждена отзывами ряда крупных российских предприятий и специализированных организаций, среди которых: АО «Объединенная двигателестроительная корпорация», ФАУ ЦИАМ им. П. И. Баранова, ФГУП ВНИИПО МЧС России, АО «Атомтехэнерго» (ГК «Росатом»), ФГУП «РФЯЦ — ВНИИТФ им. акад. В. И. Забабахина» и др.

*Академик РАН Д. М. Маркович,
д-р физ.-мат. наук О. В. Шарыпов*

Содержание

Яновский Л. С., Арефьев К. Ю., Ежов В. М. Периоды индукции воспламенения высокоэнергетических сложных углеводородных соединений при высоких температурах	5
Дракон А. В., Еремин А. В., Колотушкин Р. Н., Коршунова М. Р., Михеева Е. Ю. Применение оксигенатов для снижения вредных выбросов процессов горения	20
Шмаков А. Г., Князьков Д. А., Большова Т. А., Герасимов И. Е., Дмитриев А. М., Осипова К. Н., Черепанов А. В. Методические аспекты исследования химии образования полициклических ароматических углеводородов и прекурсоров сажи при горении углеводородных топлив.....	38
Алексеев С. В., Копьев Е. П., Красинский Д. В., Шадрин Е. Ю., Шарыпов О. В. Режимы горения жидкого углеводородного топлива при диспергировании струей водяного пара	69
Мисюра С. Я., Морозов В. С. Диссоциация двойных газовых гидратов: повышение эффективности горения	105
Крикунова А. И. Устойчивость и динамика обратного конического метановоздушного пламени М-формы при акустическом и гравитационном воздействии.....	125
Чижишев Л. М., Шараборин Д. К., Лобасов А. С., Савицкий А. Г., Толстогузов Р. В., Дулин В. М., Маркович Д. М. Экспериментальное исследование процессов переноса и горения в модельной камере сгорания ГТУ	147
Пономарев А. А., Сладкая Д. А., Кундашкин А. Д., Хребтов М. Ю., Палкин Е. В., Мулладжанов Р. И., Дулин В. М. Численные исследования ламинарных и турбулентных пламен в экспериментальных установках	172
Козлов В. В., Литвиненко М. В., Литвиненко Ю. А., Тамбовцев А. С. Сценарии горения микроструй водорода	192
Арбузов В. А., Арбузов Э. В., Дубнищев Ю. Н., Золотухина О. С., Леманов В. В., Лукашов В. В., Тупикин А. В., Шаров К. А. Исследование влияния вихревых суперструктур на горение водорода.....	222

Минаев С. С., Мокрин С. Н., Штым К. А. Исследование совместного сжигания угля и газовых смесей	243
Высокоморная О. В., Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Исследование горения капель композиционных жидких топлив и образования летучей золы с учетом взаимосвязанных теплофизических и газодинамических факторов применительно к условиям работы энергоустановок	272
Абдуракипов С. С., Бутаков Е. Б. Система диагностики и оптимизации горения в пылеугольном котле на основе методов искусственного интеллекта	320
Киверин А. Д., Смыгалина А. Е., Яковенко И. С. Ускоренное распространение пламени и переход в детонацию при нестационарном горении.....	343
Шамшин И. О., Иванов В. С., Аксенов В. С., Гусев П. А., Фролов С. М., Внучков Д. А., Звегинцев В. И., Лукашевич С. В., Наливайченко Д. Г. Переход горения в детонацию в полуограниченном щелевом зазоре: эксперимент и расчет	364
Шамшин И. О., Аксенов В. С., Казаченко М. В., Гусев П. А., Фролов С. М. Переход горения в детонацию в спиралевидных трубах	387
Сутырин О. Г., Георгиевский П. Ю., Левин В. А. Численное моделирование инициирования детонации при падении ударной волны на пузырь горючего газа повышенной плотности	406
Васильев А. А., Пинаев А. В., Пинаев П. А. Волны горения и детонации в многотопливных газоугольных системах. Их взрывоопасность.....	428
Троцюк А. В. Численное исследование детонационных течений двухтопливной смеси (синтез-газ + воздух).....	458
Левин В. А., Журавская Т. А. Управление детонационным горением водородно-воздушной смеси посредством внесения добавок	481
Быковский Ф. А., Ждан С. А. Непрерывная детонация гетерогенных смесей «керосин — воздух» в кольцевых камерах сгорания	495
Левин В. А., Мануйлович И. С., Марков В. В. Многоголовая вращающаяся детонация в кольцевом зазоре между плоскопараллельными пластинами	521

Научное издание

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ДЕТОНАЦИИ
В ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЯХ

Монография

*Под редакцией
академика РАН Д. М. Марковича,
доктора физ.-мат. наук О. В. Шарыпова*

Редактор *Д. И. Ковалёва*
Верстка *А. С. Терёшкиной*
Обложка *Е. В. Неклюдовой*

Подписано в печать 18.11.2023 г.
Формат 70 × 100/16. Уч.-изд. л. 33,5. Усл. печ. л. 41,2.
Тираж 1000 экз. Заказ № 279.

Издательско-полиграфический центр НГУ.
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2.