

Д.А. Ягодников

# Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах

2-е издание, исправленное и дополненное



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2018

УДК 536.46  
ББК 24.6  
Я30

*Издано при финансовой поддержке программы Президента Российской Федерации «Государственная поддержка ведущих научных школ РФ», грант НШ-9774.2016.8.*

*Рецензент:*

д-р техн. наук проф. А.А. Шишков

**Ягодников, Д. А.**

Я30 Горение порошкообразных металлов в газодисперсных средах / Д. А. Ягодников. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 444, [4] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-4807-4

Представлены современные методики экспериментальных измерений, приведены данные по основам построения математических моделей, описывающих состояния горячей газозвеси при различных начальных характеристиках турбулентности, составах газозвеси и режимных параметрах. Приведены примеры имитационного моделирования рабочего процесса в двигательных установках на металлизированном твердом горючем. Рассмотрены результаты экспериментальных исследований процессов воспламенения и горения газозвесей частиц алюминия, магния, бора, а также методы интенсификации процессов воспламенения и горения частиц порошкообразного горючего. Представлены варианты использования нано- и ультрадисперсных частиц горючего в качестве компонентов топлива.

В издании использованы материалы научно-исследовательских работ, выполненных в НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Книга предназначена для инженеров, работающих в области теории и практики горения газодисперсных систем; может быть полезной для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов.

УДК 536.46  
ББК 24.6

© Ягодников Д.А., 2009  
© Ягодников Д.А., 2018, с изменениями  
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

ISBN 978-5-7038-4807-4

## **Предисловие**

В течение последних десятилетий постоянно расширяется область практического использования порошкообразных металлов, с помощью которых представляется возможным повысить энергетические и улучшить эксплуатационные характеристики двигательных установок, а также разработать технологические процессы высокого уровня.

К настоящему времени порошкообразные металлы, например алюминий и магний, успешно применяются в качестве добавок к горючему в пиротехнических составах, гидрореагирующих и смесевых твердотопливных композициях, нашедших применение в ракетных двигателях твердого топлива (РДТТ), ракетно-прямоточных и гидрореактивных двигателях. Тем не менее существуют ограничения, не позволяющие в максимальной степени реализовать энергетический потенциал порошкообразных металлических горючих (ПМГ). Это связано прежде всего с большими значениями температур плавления и кипения металлов и их оксидов, защитными свойствами оксидных пленок на частицах ПМГ, особенно алюминия и бора, что ведет к увеличению характерного времени преобразования металлсодержащего топлива.

В связи с этим актуальной является задача повышения реакционной способности ПМГ, решение которой позволит интенсифицировать процесс преобразования химической энергии топлива в кинетическую энергию истекающих продуктов сгорания. Для ПМГ на основе алюминия и бора лимитирующим фактором является оксидная пленка, покрывающая частицы и предохраняющая их от активного окисления. Именно начальные характеристики оксидных пленок  $Al_2O_3$ ,  $B_2O_3$  (тип и модификация кристаллической решетки, толщина, пористость и др.) и их эволюция в процессе нагрева определяющим образом влияют на характеристики рабочего процесса в целом. Поэтому устранение или ослабление защитных свойств оксидной пленки является ключом к достижению наибольшего значения полноты сгорания ПМГ в камерах сгорания минимальных габаритов.

С 70-х гг. XX в. открылись новые направления практического применения ПМГ, в частности разработка принципиально новых классов двигательных установок, в которых ПМГ являются самостоятельными источниками энергии. В научно-исследовательских работах, проведенных в НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОКБ «Темп», Тольяттинском государственном университете, показана возможность создания принципиально нового класса установок,

например прямооточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД), использующих ПМГ. Обладая большой теплотой сгорания и высокой плотностью, ПМГ способны существенно увеличить такие важные характеристики двигателей и изделия в целом, как удельный импульс и коэффициент массового совершенства, а также обеспечить большую взрыво- и пожаробезопасность.

Оборонные отрасли промышленности участвовали и продолжают участвовать в решении широкого круга проблем народного хозяйства. К концу XX в. предприятия военно-промышленного комплекса (ВПК) приобрели немалый практический опыт разработки технологий высокого уровня. Широкое внедрение последних достижений ВПК в гражданские отрасли производства является логически необходимым для решения макроэкономических задач, реинвестиции ресурсов ВПК на удовлетворение потребностей общества в целом, а также для поддержания достигнутых в нашей стране приоритетов. В последние годы сформировался экономически обоснованный интерес к эффективному использованию конструкторского и технологического опыта, накопленного при разработке специальных двигательных установок в процессе создания технических устройств различного назначения. К ним относятся, в частности: средства пожаротушения мелкодисперсным аэрозолем и ингибирующими компонентами, генерируемыми при горении твердого топлива; устройства сверхзвуковой резки высоколегированных сталей, хромоникелевых сплавов и бетона; установки сверхзвукового напыления защитных и восстанавливающих покрытий; синтез ультрадисперсных оксидов металлов, например алюминия, цинка, железа, в процессе их газодисперсного горения. Вполне очевидно, что успех конверсионного применения ПМГ в определенной степени зависит от совокупности приобретенных знаний в области макрокинетических процессов воспламенения и горения частиц металлов, умения управлять этими процессами и разрабатывать практические рекомендации по организации высокоэффективных рабочих процессов в каждом конкретном техническом устройстве.

Новые виды двигательных и энергетических установок, работающих на ПМГ, характеризуются широким диапазоном изменения режимных параметров, например давления, соотношения компонентов, дисперсности ПМГ. Их влияние на основные характеристики рабочего процесса необходимо знать для максимальной реализации преимуществ металлосодержащих горючих. В связи с этим оправданными представляются исследования различных научных коллективов, направленные на создание базы данных и комплекса характеристик воспламенения и горения порошкообразных металлических горючих для проектирования и отработки энергосиловых установок и технологических процессов.

С момента опубликования (1949) результатов первых экспериментальных исследований особенностей процессов воспламенения и горения порошкообразного алюминия в кислородсодержащей среде прошло около семидесяти лет. За это время ученые СССР, России, Украины, США, Англии, Франции, Германии, Японии и других стран получили большое количество эмпирических и теоретических данных, отличающихся разнообразием исследованных

металлов, окислительных сред, условий проведения экспериментов и подходов при составлении математических моделей изучаемых процессов. Возрастание активности исследований в области теории и практики горения газодисперсных систем произошло в конце 50-х и середине 60-х гг. XX в., что объясняется началом практического использования порошкообразных металлов в качестве добавок к твердым ракетным топливам и необходимостью решения возникающих при этом проблем, связанных, например, с обеспечением безопасности производства, транспортировки и хранения ПМГ.

Проведенные исследования касались изучения как фундаментальных особенностей, так и практических задач воспламенения и горения металлов, которые пришлось решать разработчикам и конструкторам ракетного двигателестроения. Естественная потребность в систематизации и обобщении громадного фактического материала привела ученых США и СССР к необходимости издания монографий, объединяющих результаты экспериментально-теоретических исследований. Эти монографии стали классическими трудами в области физики горения и взрыва. За прошедшие четыре десятилетия с момента выхода последней монографии появились новые идеи относительно практического использования металлов в двигателестроении и технологических производствах. Более актуальными становятся проблемы безопасного и экологически чистого производства ПМГ, а также эксплуатации промышленных устройств и энергетических установок, использующих металлосодержащее горючее (в той или иной форме) или реализующих отдельные стадии организации рабочего процесса. Поэтому сейчас, в первой четверти XXI в., необходимо систематизировать и составить аналитический обзор большого объема экспериментально-теоретических работ, посвященных воспламенению и горению газозвесей частиц порошкообразных металлов в различных условиях.

При подготовке рукописи автор использовал накопленную в течение четверти века информацию по горению газодисперсных систем, опубликованную в различных научных изданиях, а также материалы своих статей, докладов и сообщений. Кроме того, дополнительно включены результаты экспериментально-теоретических исследований, ставших известными после выхода монографии<sup>1</sup>, являющейся основой данной книги.

Выражаю искреннюю признательность всем, кто содействовал и помогал в проведении расчетов и экспериментальных исследований, в обработке большого объема полученной информации, а также всем, кто участвовал в обсуждении результатов и оказывал дружескую поддержку.

---

<sup>1</sup> Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. — 432 с.

## Перечень сокращений, условных обозначений, символов

АДНА	— аммония динитрамид
ВВ	— взрывчатое вещество
ВЗУ	— воздухозаборное устройство
ВЭП	— внешнее электрическое поле
ГГ	— газогенератор
ГГП	— газогенератор подогрева
ГРД	— гидрореактивный двигатель
ГС	— горючесвязующее
ГСВ	— горючесвязующее вещество
ДПТ	— двухкомпонентное порошкообразное топливо
ДУ	— двигательная установка
ЖРД	— жидкостный ракетный двигатель
ЗОТ	— зона обратных токов
КД	— камера дожигания
КПС	— конденсированные продукты сгорания
КС	— камера сгорания
НД	— нанодисперсный
НДА	— нанодисперсный порошок алюминия
НДБА	— нанодисперсный диборид алюминия
НДЧ	— нанодисперсные частицы
НП	— нанопорошок
ПБА	— полиборид алюминия
ПВРД	— прямоточный воздушно-реактивный двигатель
ПГС	— пневмогидравлическая система
ПМГ	— порошкообразное металлическое горючее
ПММА	— полиметилметакрилат
ПО	— порошкообразный окислитель
ПП	— перфорированная пластина
ПРВ	— плотность распределения вероятности
ПС	— продукты сгорания
ПХА	— перхлорат аммония
ПЭ	— полиэтилен
РДТТ	— ракетный двигатель твердого топлива

РПД	— ракетно-прямоточный двигатель
РУ	— рабочий участок
СВС	— самораспространяющийся высокотемпературный синтез
СГН	— сверхзвуковое газопламенное напыление
СКО	— среднеквадратическое отклонение
СРТТ	— смесевое ракетное твердое топливо
ТПС	— твердый пиротехнический состав
УДП	— ультрадисперсный порошок
УПО	— установка постоянного объема
ФК	— форкамера
ФП	— фронт пламени
ЭВП	— электрический взрыв проволок
ЭКС	— энергетическая конденсированная система
ЭСУ	— энергосиловая установка
$C_p$	— теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К)
$e_k$	— скорость изменения толщины оксидной пленки, м/с
$E$	— модуль упругости Юнга, МПа
$E$	— энергия активации, Дж/кг
$D$	— коэффициент диффузии, м <sup>2</sup> /с
$D$	— диаметр, м
$f$	— коэффициент живого сечения стабилизатора
$f_k$	— скорость изменения радиуса частицы, м/с
$F$	— сила сопротивления, Н
$G$	— скорость реагирования компонента, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
$\Delta H$	— теплота сгорания, Дж/кг
$\Delta H_f^0$	— теплота образования при стандартных условиях, Дж/кг
$I$	— плотность потока массы, кг/(м <sup>2</sup> ·с)
$I_{y.п}$	— пустотный удельный импульс, м/с
$K_y$	— коэффициент укладки
$K_{m0}$	— массовое стехиометрическое соотношение
$K$	— предэкспоненциальный множитель
$l$	— длина, м
$m, n$	— относительная массовая концентрация
$n_k$	— счетная концентрация частиц, м <sup>-3</sup>
$\mathcal{P}$	— трехмерная плотность распределения вероятности
$P$	— двумерная плотность распределения вероятности
$p$	— давление, Па
$Q$	— плотность теплового потока, Дж/(м <sup>2</sup> ·с)
$r_k$	— радиус частицы, м
$R_\mu$	— универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К)
$t$	— время, с
$T$	— температура, К

Перечень сокращений, условных обозначений, символов

---

$u, v$	— скорость газа, м/с
$u_n$	— нормальная скорость пламени, м/с
$U$	— напряжение, В
$w_f$	— скорость распространения пламени, м/с
$w_{ос}$	— скорость оседания, м/с
$x$	— координата, м
$g_{п}$	— массовая доля покрытия
$\alpha$	— коэффициент избытка окислителя
$\beta$	— температурный коэффициент объемного расширения, $K^{-1}$
$\beta$	— коэффициент корреляции
$\gamma$	— коэффициент Пуассона
$\delta_k$	— толщина оксидной пленки, м
$\Phi_k$	— полнота сгорания
$\Phi_{\beta}$	— коэффициент расходного комплекса
$\lambda$	— коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
$\lambda$	— длина волны излучения, нм
$\mu$	— молярная масса, кг/кмоль
$\eta$	— коэффициент динамической вязкости, Па·с
$\nu$	— мольный стехиометрический коэффициент
$\rho$	— плотность, кг/м <sup>3</sup>
$\chi_t$	— коэффициент относительного уменьшения периода индукции
$\chi_w$	— коэффициент относительного увеличения скорости пламени
$\sigma_{пр}$	— предел прочности никелевого покрытия, МПа
$\sigma$	— среднее квадратичное отклонение
$\sigma_э$	— эквивалентное напряжение, МПа
$\tau_i$	— период индукции воспламенения, с
$\Theta_k$	— безразмерная температура частиц
$\omega_k$	— скорость изменения температуры частиц, К/с
$\Omega_k$	— безразмерный радиус частиц
$\Psi_k$	— безразмерная толщина оксидной пленки

## Теплофизические и макрокинетические свойства ПМГ

---

Можно с уверенностью утверждать, что успех практического применения ПМГ был обусловлен системным подходом к экспериментально-теоретическим исследованиям, позволившим сформировать базу данных по макрокинетическим характеристикам воспламенения и горения одиночных частиц порошкообразных металлов и их совокупности. В создании базы данных принимали участие и внесли большой вклад ряд научных, учебных и производственных организаций нашей страны: Исследовательский центр им. М.В. Келдыша, Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, Институт проблем химической физики РАН, Институт химической кинетики и горения СО РАН, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Институт проблем материаловедения АН Украины, Одесский государственный университет им. И.И. Мечникова, Томский государственный университет, Ленинградский механический институт, Ленинградский политехнический институт, Государственный научно-исследовательский институт химической технологии и элементоорганических соединений, Научное производственное объединение «Энергомаш» им. акад. В.П. Глушко, Опытно-конструкторское бюро «Темп», Научно-исследовательский институт прикладной химии и др.

Основные результаты исследований, выполненных в течение 60–70-х гг. XX в., объектом которых были одиночные частицы металлов или металлизированные твердые топлива, нашли отражение в нескольких монографиях, среди которых наиболее авторитетными являются [1–4]. Содержащиеся в них данные относятся в основном к одиночным частицам или к металлизированным смесевым конденсированным системам. Знание процессов горения частиц является необходимым условием для организации эффективных рабочих процессов в натуральных и модельных камерах сгорания энергосиловых и технологических установок, а также для понимания и объяснения возникающих закономерностей и корреляций.

## **Экспериментальные установки и методы исследования процессов воспламенения и горения газовзвесей частиц ПМГ**

---

Для экспериментального исследования особенностей процессов воспламенения и горения ПМГ в состоянии газовзвесей при различных режимах организации взаимодействия частиц с несущим газом, являющимся одновременно и диспергируемой средой, а также с целью проверки надежности разрабатываемых математических моделей проектируются и изготавливаются экспериментальные рабочие участки, позволяющие определять изучаемые характеристики газовзвесей с различным дисперсным и химическим составом в широких диапазонах режимных параметров работы установки.

### **2.1. Основные способы подачи и псевдоожижения порошкообразных компонентов**

В общем случае исследователи и конструкторы решают одну и ту же задачу обеспечения подачи порошкообразного компонента в модельный рабочий участок, где осуществляются процессы воспламенения и горения. Выбор способа подачи порошкообразного компонента определяется, как правило, его реологическими характеристиками, к которым относятся дисперсность, параметры аутогезионного взаимодействия частиц и порозность. Параметры, в свою очередь, зависят от способа получения частиц, который связан с физическими свойствами материала.

Так, например, невысокая температура плавления алюминия (933 К) позволяет изготавливать из него порошок методом распыления расплава алюминия в инертной атмосфере. Поэтому частицы имеют форму, близкую к сферической, хорошо укладываются и в дальнейшем легко подвергаются разуплотнению и псевдоожижению.

## Математическое моделирование воспламенения и горения газодисперсных систем

Общий подход к исследованию процессов воспламенения и горения металлов, а также основные определяющие и определяемые при этом параметры наглядно иллюстрируются приведенной на рис. 3.1 схемой. Проведение того или иного исследования определяется в первую очередь практическими потребностями, возникающими при использовании металлов в качестве горючего топливных композиций или добавок к нему. Известно, что в момент



**Рис. 3.1.** Основные направления исследования горения металлов

## **Экспериментальные исследования воспламенения и горения газодисперсных систем в ламинарных условиях**

---

В процессе воспламенения и горения газозвесей порошкообразных металлических горючих становятся определяющими коллективные эффекты, влияющие на качественные и количественные характеристики. Поэтому проектирование новых установок и применение технологий на базе газодисперсных систем, поставили новые задачи, требующие исследований газозвесей и аэрозвесей порошкообразного горючего, организованных на более высоком уровне как по экспериментальному оборудованию, так и по характеру и объему получаемой информации. При этом преследовалась цель получить результаты, обладающие фундаментальной новизной, имеющие практическое значение и отражающие основные закономерности, механизмы и характеристики процессов воспламенения и горения в активных средах газозвесей металлов.

### **4.1. Стабилизация и распространение газодисперсного пламени в ламинарных условиях**

Рассмотренные выше аналитические и численные методы моделирования процессов горения газодисперсных систем вследствие известных причин можно рассматривать как идеализированное описание реальных физико-химических и термогазодинамических явлений, протекающих в технических объектах. Поэтому возникает задача проверки достоверности моделей, например, при их сравнении с основанными на других подходах моделями, с одной стороны, и с результатами экспериментального определения характеристик

## **Основные закономерности процессов распространения и стабилизации пламени в газодисперсных турбулентных потоках**

---

Результаты, полученные в лабораторных условиях на экспериментальном оборудовании, в силу объективных причин не могут дать ответ на принципиальный вопрос: сохранятся ли установленные закономерности процессов горения металлизированных газодисперсных систем в условиях, приближенных к их практическому применению? Поэтому перспективы использования порошкообразных металлов и новых технологий, созданных на их основе, непосредственно связаны с проведением экспериментальных исследований в модельных камерах сгорания, в которых рабочий процесс характеризуется пространственной неоднородностью, высоким давлением, а также турбулентностью, проявляющейся в пульсации основных режимных параметров. В связи с этим рассмотрим результаты, полученные в указанных условиях, поскольку помимо научной значимости они обладают большой практической ценностью.

### **5.1. Горение газозвеси порошкообразного алюминия в турбулентном потоке**

В эксперименте перед исследователями возникают две взаимосвязанные задачи: реализация в модельных или лабораторных установках условий, в максимальной степени соответствующих натурным, и определение корреляции между различными характеристиками рабочего процесса, влияющими не только на его совершенство, но и на потребительские качества технического устройства, использующего порошкообразные металлы как горючее

## **Интенсификация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлических горючих**

---

Практическая реализация высокой теплоты сгорания ПМГ ограничена относительно большими значениями времени воспламенения и времени горения частиц, а также их агломерацией в волне горения. Кроме того, наличие конденсированного оксида как основного продукта сгорания металлов обуславливает ряд специфических проблем: накопление шлаков в камере сгорания, эрозию элементов конструкции проточной части энергетической или двигательной установки и т. д.

Для уменьшения периода индукции воспламенения, подавления процесса агломерации и, как следствие, уменьшения времени превращения металла в оксид в рецептуре топлива снижают массовую долю металла и выбирают оптимальную дисперсность порошкообразных компонентов, прежде всего окислителя. Очевидно, что возможности этих методов ограничены, а в некоторых случаях они могут быть неприемлемы (когда требуется обеспечить заданную энергетику топлива и т. п.). Поэтому представляется актуальным изыскание нетрадиционных способов решения указанных задач, например, путем физико-химического воздействия на частицы металлического горючего и прежде всего — на покрывающую частицы защитную пленку оксида.

В данной главе рассмотрены основные методы модификации частиц порошкообразных металлических горючих, представлены результаты термодинамических расчетов топливных композиций на основе модифицированных ПМГ с алюминием и фторсодержащими полимерами (материалами покрытий), описаны модели воспламенения частиц ПМГ с различными покрытиями и приведены результаты экспериментально-теоретических исследований, позволяющих оценить эффективность различных способов модификации частиц ПМГ.

## **Электрофизические аспекты горения порошкообразных металлических горючих**

---

Генерация электрического поля в процессах горения была обнаружена еще в 1600 г., когда У. Гильберт, придворный врач английской королевы Елизаветы I, продемонстрировал электризацию электроскопа пламенем горелки. С этого момента электрофизические аспекты процессов горения постоянно находятся в поле пристального внимания фундаментальной и прикладной науки. Первоначальные исследования в данной области были направлены на изучение собственных электрофизических характеристик ламинарного пламени, реализуемого, например, в горелке Р.В. Бунзена или плоскопламенной горелке.

Электрические явления, сопровождающие процессы горения по природе, подразделяют на собственные и внешние. Первые обусловлены естественным, а вторые — искусственным разделением заряженных частиц в пламени. Собственные электрогазодинамические процессы возникают вследствие различной подвижности ионов, электронов и электризованных конденсированных частиц, что приводит к диффузионному разделению зарядов и образованию электрического поля в пламени. В процессе обтекания газодинамического тракта энергосиловых установок потоком элементов, содержащим ионы, на границе раздела ионизированного газа и стенки образуется слой определенным образом ориентированных ионов, обуславливающий соответствующее перераспределение ионной структуры поверхностного слоя в материале стенки, в результате чего последняя электризуется и приобретает некоторый потенциал [1–4].

Указанные электрофизические особенности процессов горения и истечения продуктов сгорания, несущие информацию о состоянии системы, могут быть использованы для создания систем диагностики и аварийной защиты энергосиловых установок [5, 6].

Наложение внешних электрических полей можно применять для повышения устойчивости рабочих процессов в энергосиловых установках,

## Нанодисперсные порошкообразные компоненты топливных композиций

---

Одно из направлений повышения реакционной способности ПМГ заключается в использовании наноматериалов и нанотехнологий, позволяющих генерировать стабильные структуры нанометрового диапазона. Под термином «нанодисперсные материалы» подразумевают системы, в которых размер элементов (частиц, зерен, кристаллитов, пор) менее 100 нм. Этот класс материалов известен ученым уже более века, но интерес к ним исследователи различных научных школ начали проявлять только в 2005–2015 гг. Актуальность ультрадисперсных систем связана с особенностью их физико-химических свойств, которые отличаются от свойств обычных материалов, состоящих из тех же элементов.

Новые технологии производства нанодисперсных материалов ( $0,001 \text{ мкм} < d_{43} < 0,1 \text{ мкм}$ ) и, в частности, порошкообразных металлических горючих (рис. 8.1) позволяют создавать топливные композиции с новыми характеристиками, что открывает пути для дальнейшего развития энергетических установок за счет повышения энергетики и плотности топлив посредством применения более энергоемких и тяжелых металлов, включая те, которые являются неэффективными, если их характерный размер лежит в диапазоне 1...100 мкм.

Внедрение топлив на основе нанодисперсных компонентов может дать следующие преимущества:

— улучшение характеристик воспламеняемости, в частности, снижение температуры теплового взрыва (воспламенения) до уровня 320...370 К и, следовательно, сокращение периода индукции воспламенения и времени горения частиц на 2–4 порядка;

— упрощение зарядов твердых топлив вследствие отказа от воспламеняемых и переходных составов;

— уменьшение двухфазных потерь в соплах из-за более мелкой дисперсности частиц конденсированной фазы и интенсификации процессов

## Заключение

Анализ последних научных публикаций, посвященных горению порошкообразных металлов в активных средах, свидетельствует о том, что работы в ведущих мировых научных центрах продолжают, причем благодаря интенсивному развитию информационных технологий, нанотехнологий и высокоточных средств диагностики ожидается получение новых фундаментальных характеристик. Основываясь на приведенных в настоящем издании экспериментальных и теоретических результатах, отметим несколько направлений возможных исследований:

— непосредственное измерение характеристик турбулентного двухфазного потока (характерные размеры неоднородностей, пульсационные и корреляционные характеристики фаз и др.) в камерах сгорания двигательных и энергетических установок;

— разработка гидродинамических, физико-химических методов интенсификации процессов воспламенения и горения частиц порошкообразных металлов, а также реализация химико-технологических мероприятий по их практическому применению;

— усовершенствование технологий получения и диагностики физико-механических и дисперсных характеристик топливных композиций на основе нано- и ультрадисперсных частиц порошкообразных окислителей и металлических горючих;

— морфологический, дисперсный и химический анализ конденсированных продуктов сгорания, а также определение полноты сгорания ПМГ на основе бора и его соединений;

— разработка теоретических основ и практическая реализация методов автоматического регулирования и управления процессами горения аэродисперсных систем;

— разработка и внедрение бесконтактных методов диагностики процессов горения газодисперсных систем с использованием высокоскоростной видеосъемки и цифровых информационных технологий;

— разработка на основании экспериментальных данных теории стабилизации газодисперсного пламени и инженерной методики расчета турбулизаторов, необходимых для конструкторской реализации двигательных и энергетических установок;

— имитационное моделирование рабочих процессов в камерах сгорания ракетных, реактивных двигателей и энергосиловых установок, где в качестве добавок к горючему применяются порошкообразные металлы;

— получение экспериментальных данных, позволяющих оптимизировать технологический процесс в целом и повысить его эффективность для разрабатываемых конверсионных направлений использования ПМГ.

Определенная уверенность в возможности выполнения приведенной программы существует, поскольку экспериментально-теоретическое исследование горения газодисперсных систем представляется исключительно интересным и захватывающим процессом, хранящим еще много неразгаданного и способным преподнести настойчивым исследователям необычные и красивые результаты, удовлетворяющие основным целям научного познания и потребностям практики.

## Оглавление

Предисловие .....	3
Перечень сокращений, условных обозначений, символов .....	6
<b>Глава 1. Теплофизические и макрокинетические свойства ПМ .....</b>	<b>9</b>
1.1. Теплофизические свойства компонентов порошкообразных топлив .....	10
1.1.1. Классификация дисперсных систем .....	10
1.1.2. Порошкообразные горючие .....	12
1.1.3. Порошкообразные окислители .....	12
1.1.4. Жидкие и газообразные окислители .....	15
1.1.5. Стехиометрическое соотношение компонентов топлива .....	18
1.2. Воспламенение и горение одиночных частиц металлов .....	20
1.2.1. Температуры фазовых превращений металлов, их оксидов и особенности процессов воспламенения и горения .....	21
1.2.2. Основные характеристики воспламенения и горения одиночных частиц металлов .....	24
1.2.3. Особенности воспламенения и горения магния .....	25
1.2.4. Особенности воспламенения и горения алюминия .....	28
1.2.5. Воспламенение и горение частиц бора .....	41
1.2.6. Особенности воспламенения и горения боридов алюминия .....	46
1.3. Дисперсные характеристики порошкообразных компонентов .....	53
1.4. Термодинамические характеристики равновесных продуктов сгорания газодисперсных систем .....	61
Литература к главе 1 .....	66
<b>Глава 2. Экспериментальные установки и методы исследования процессов воспламенения и горения газовзвесей частиц ПМГ .....</b>	<b>70</b>
2.1. Основные способы подачи и псевдооживления порошкообразных компонентов .....	70
2.2. Установки для исследования распространения и стабилизации пламени в ламинарных условиях .....	75

2.3. Установки для исследования распространения пламени в условиях, близких к ламинарным . . . . .	78
2.3.1. Установка постоянного объема . . . . .	79
2.3.2. Установки постоянного объема для визуализации распространения пламени . . . . .	80
2.3.3. Установка постоянного давления . . . . .	86
2.4. Установки для исследования процессов воспламенения и горения ПМГ в свободном объеме . . . . .	86
2.5. Установки для исследования турбулентного горения ПМГ . . . . .	88
2.5.1. Описание конструкции и методики проведения эксперимента на модельной установке П-70с . . . . .	88
2.5.2. Описание конструкции и методики проведения эксперимента на порошковом газогенераторе . . . . .	91
2.5.3. Описание конструкции энергосиловой установки, работающей на порошкообразном металлическом горючем и воздухе . . . . .	92
2.6. Модельные установки на двухкомпонентном порошкообразном топливе . . . . .	93
2.7. Экспериментальная установка для исследования горения борсодержащих топлив . . . . .	98
Литература к главе 2 . . . . .	105
<b>Глава 3. Математическое моделирование воспламенения и горения газодисперсных систем . . . . .</b>	<b>108</b>
3.1. Основы математического моделирования горения газозвесей частиц металлов . . . . .	109
3.1.1. Построение физических и математических моделей . . . . .	109
3.1.2. Моделирование процессов межфазного взаимодействия . . . . .	112
3.1.3. Моделирование состояния газовой фазы . . . . .	114
3.2. Тепловая теория горения газозвесей . . . . .	116
3.3. Решения с помощью методов Эйлера и Лагранжа . . . . .	117
3.3.1. Влияние массовой концентрации частиц . . . . .	121
3.3.2. Влияние начального размера частиц . . . . .	122
3.3.3. Влияние давления . . . . .	123
3.4. Моделирование распространения пламени в двухкомпонентной газозвеси . . . . .	125
3.5. Статистические методы расчета характеристик горения газодисперсных систем . . . . .	136
3.5.1. Физический смысл функции ПРВ при моделировании газодисперсных систем . . . . .	136
3.5.2. Одномерные ПРВ-модели . . . . .	137
3.5.3. Многомерные ПРВ-модели . . . . .	139
3.6. Статистические методы моделирования турбулентного горения газозвесей . . . . .	146
3.7. Моделирование процесса распространения пламени в газозвеси частиц бора . . . . .	150

3.7.1. Одномерная модель воспламенения и горения газозвеси частиц бора . . .	150
3.7.2. Статистическая модель горения газозвеси частиц бора . . . . .	152
3.8. Имитационное моделирование воспламенения и горения порошкообразных горючих в камерах сгорания реактивных двигателей . . . . .	173
Литература к главе 3 . . . . .	192

**Глава 4. Экспериментальные исследования воспламенения и горения газодисперсных систем в ламинарных условиях . . . . .** 197

4.1. Стабилизация и распространение газодисперсного пламени в ламинарных условиях . . . . .	197
4.1.1. Исследования и характеристики стационарного газодисперсного пламени . . . . .	198
4.1.2. Исследования и характеристики распространения пламени . . . . .	211
4.2. Дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси частиц алюминия . . . . .	226
4.2.1. Влияние дисперсного состава ПМГ на дисперсный состав конденсиро- ванных продуктов сгорания аэрозвеси . . . . .	227
4.2.2. Влияние давления на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания аэрозвеси . . . . .	233
4.2.3. Анализ влияния условий сжигания порошкообразного алюминия на дисперсный состав конденсированных продуктов сгорания . . . . .	234
4.3. Характеристики распространения сферически-симметричного пламени в аэрозвеси . . . . .	236
4.4. Температура воспламенения газозвеси . . . . .	239
4.5. Радиационные методы диагностики процессов воспламенения и горения га- зодисперсных систем . . . . .	240
Литература к главе 4 . . . . .	260

**Глава 5. Основные закономерности процессов распространения и стабили-  
зации пламени в газодисперсных турбулентных потоках . . . . .** 266

5.1. Горение газозвеси порошкообразного алюминия в турбулентном потоке . . . .	266
5.1.1. Стабилизация аэродисперсного пламени турбулизирующими пласт- тинами . . . . .	267
5.1.2. Горение аэрозвеси частиц алюминия в следе за турбулизатором и при внезапном расширении . . . . .	278
5.2. Воспламенение и горение ПМГ в камерах сгорания модельных энергетиче- ских установок . . . . .	283
5.3. Воспламенение и горение двухкомпонентного порошкообразного топлива . . .	303
5.4. Конверсионное использование ПМГ . . . . .	311

5.4.1. Газодисперсный синтез оксидов металлов .....	311
5.4.2. Сверхзвуковой терморезак на порошкообразном металлическом горючем .....	314
5.4.3. Сверхзвуковое газопламенное напыление защитных покрытий .....	315
Литература к главе 5 .....	318

**Глава 6. Интенсификация процессов воспламенения и горения порошкообразных металлических горючих .....** 322

6.1. Анализ методов повышения реакционной способности порошкообразного металлического горючего .....	323
6.2. Характеристики модифицированных ПМГ на основе алюминия .....	325
6.2.1. Модификация частиц ПМГ никелевым покрытием .....	326
6.2.2. Модификация частиц ПМГ фторсодержащими органическими покрытиями .....	327
6.2.3. Порошкообразные модификаторы .....	329
6.3. Термодинамический расчет горения топлив на основе модифицированных частиц порошкообразного металлического горючего .....	330
6.3.1. Термодинамические расчеты горения аэродисперсных систем .....	330
6.3.2. Термодинамические расчеты горения смесевых твердых топлив .....	331
6.4. Основы математического моделирования процессов воспламенения и горения капсулированных частиц алюминия .....	333
6.4.1. Постановка задачи воспламенения одиночной частицы алюминия .....	333
6.4.2. Модель воспламенения частиц алюминия, капсулированных никелем .....	335
6.4.3. Математическое моделирование воспламенения частицы алюминия с разлагающимся полимерным покрытием .....	339
6.5. Экспериментальное исследование характеристик горения модифицированных частиц ПМГ .....	344
6.5.1. Распространение пламени по аэрозвеси модифицированных частиц алюминия .....	346
6.5.2. Характеристики горения модифицированных частиц ПМГ в составе энергетических конденсированных систем .....	354
Литература к главе 6 .....	360

**Глава 7. Электрофизические аспекты горения порошкообразных металлических горючих .....** 363

7.1. Собственное электрическое поле горения газодисперсных систем .....	364
7.2. Влияние электрического поля на горение газодисперсных систем .....	367
7.3. Влияние электрического поля на горение энергетических конденсированных систем .....	382
Литература к главе 7 .....	388

<b>Глава 8. Нанодисперсные порошкообразные компоненты топливных композиций</b> .....	391
8.1. Технология получения и свойства нанодисперсных порошкообразных материалов .....	393
8.2. Горение нанодисперсных частиц металлического горючего в активных средах .....	403
8.2.1. Взаимодействие ультрадисперсного алюминия с водой .....	403
8.2.2. Горение ультрадисперсного алюминия в твердотопливных композициях .....	404
8.2.3. Горение НДА в пиротехнических составах .....	415
8.2.4. Воспламенение и горение навесок нанопорошков алюминия .....	425
8.2.5. Горение ультрадисперсного алюминия в гелеобразных композициях .....	431
8.2.6. Использование нанодисперсного алюминия во взрывчатых композициях .....	433
Литература к главе 8 .....	435
Заключение .....	439

*Научное издание*

**ЯГОДНИКОВ** Дмитрий Алексеевич

**ГОРЕНИЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МЕТАЛЛОВ  
В ГАЗОДИСПЕРСНЫХ СРЕДАХ**

Корректор *Л.В. Забродина*  
Художник *Я.Н. Асинкритова*  
Компьютерная графика *Т.Ю. Кутузовой*  
Компьютерная верстка *И.Д. Звягинцевой*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 30.11.2017. Формат 70×100/16.  
Усл. печ. л. 36,4. Тираж 500 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.  
[press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru)  
[www.baumanpress.ru](http://www.baumanpress.ru)

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»  
109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5.

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышла в свет монография  
под редакцией Д.А. Ягодникова  
**«Актуальные проблемы  
ракетного двигателестроения»**



Приведена классификация конверсионных технологий на основе ракетных и реактивных двигателей. Рассмотрены основные методы термо- и газодинамического расчета характеристик рабочего тела и рабочего процесса в камерах сгорания конверсионных разработок. Представлены примеры проектирования и практического использования технологических установок газопламенной обработки конструкционных материалов, сверхзвукового напыления многофункциональных покрытий, установок пожаротушения на основе генерации микродисперсного аэрозоля и газодисперсного синтеза нанодисперсных частиц оксидов и нитридов металлов. Практическое применение конверсии ракетных и реактивных двигателей изложено на примере реальных разработок.

Для преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов старших курсов. Представляет интерес для инженеров и конструкторов, работающих в области конверсии ракетного двигателестроения.

**Год издания:** 2017

**Тип издания:** Монография

**Объем:** 296 стр. / 18,5 п.л.

**Формат:** 60x90/16

**ISBN:** 978-5-7038-4586-8

---

Информацию о других новых книгах можно получить  
на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана  
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: [press@baumanpress.ru](mailto:press@baumanpress.ru)

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана  
вышло в свет учебное пособие  
под общей редакцией В.А. Сорокина  
**«Проектирование и отработка  
ракетно-прямоточных двигателей  
на твердом топливе»**



Приведены основы расчета характеристик ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе и их узлов, позволяющих выполнять основные термодинамические, газодинамические, тепловые и прочностные расчеты для выбора конструктивной схемы и основных размеров ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе.

Для студентов старших курсов и аспирантов авиационных и ракетостроительных специальностей высших технических учебных заведений, научных работников и инженеров, занимающихся разработкой, проектированием и испытаниями высокоскоростных летательных аппаратов и двигательных установок на основе ракетно-прямоточного двигателя на твердом топливе.

**Год издания:** 2016

**Тип издания:** Учебное пособие

**Объем:** 320 стр. / 26 п.л.

**Формат:** 70x100/16

**ISBN:** 978-5-7038-4579-0

---

Информацию о других книгах можно получить на сайте Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана  
<http://baumanpress.ru>

По вопросам приобретения обращаться в отдел реализации Издательства:

телефон: 8 499 263-60-45;

факс: 8 499 261-45-97

e-mail: [press@baumanpress.ru](mailto:press@baumanpress.ru)