

Министерство образования РФ

Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

На правах рукописи

КОРОЛЕВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ
СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ
ОТ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА КОМПОНЕНТОВ**

Специальность 05.17.10 — технология специальных продуктов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2000

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Отсутствие единого математического описания зависимости скорости горения гетерогенных конденсированных систем (ГКС) от структурно-технологических факторов (дисперсного состава, соотношения компонентов, коэффициента уплотнения и т. д.) тормозит разработку новых изделий и не позволяет учитывать технологические факторы при переходе с одного сырья на другое.

Поверхность контакта компонентов является одним из основных факторов, который определяет скорость протекания химических реакций в режиме горения и свойства конечных продуктов. Знание поверхности контакта позволяет осуществлять оценку тепло-, электропроводности гетерогенных композиций и концентрационных пределов горючести, моделировать процессы прессования и более обоснованно подходить к выбору технологических параметров изготовления изделий из порошкообразных материалов. В рамках фрактальной теории показано, что поверхность контакта компонентов может служить универсальным параметром для описания зависимости скорости горения от структуры заряда ГКС.

Попытки обобщения накопленного за последние годы большого количества экспериментальных данных по зависимости скорости горения ГКС от структурно-технологических факторов с целью получения многопараметрических зависимостей скорости горения оказались безуспешными.

Существующие модели расчета поверхности контакта компонентов не учитывают законы распределения частиц порошкообразных материалов по размерам. Это существенно ограничивает точность расчетов и отрицательно сказывается на возможности их практического использования.

Поэтому создание математической модели зависимости скорости горения ГКС от поверхности контакта компонентов является актуальной задачей.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом научно-исследовательских работ Министерства образования Российской Федерации по направлению «Исследование кинетики, катализа, горения и взрыва гетерогенных конденсированных веществ».

В 1998—1999 гг. работа получила финансовую поддержку в рамках конкурса грантов для студентов, аспирантов, молодых ученых и специалистов Санкт-Петербурга.

Цель и задачи работы:

Основной целью работы являлось создание математической модели зависимости скорости горения пиротехнических составов от поверхности контакта компонентов.

В соответствии с этим решены следующие задачи:

— сделан анализ применимости поверхности контакта компонентов для описания зависимости скорости горения ГКС от структурно-технологических факторов;

— разработана математическая модель для расчета поверхности контакта компонентов, учитывающая дисперсность и соотношение компонентов при различных коэффициентах уплотнения;

— разработан программно-аппаратный комплекс для определения дисперсного состава порошков и поверхности их контакта;

— проверена применимость разработанной модели для описания и прогнозирования скорости горения различных ГКС в зависимости от поверхности контакта компонентов;

— сопоставлены различные подходы для получения зависимости скорости горения от дисперсности компонентов, их соотношения и степени уплотнения.

Научная новизна работы заключается в установлении закономерности влияния поверхности контакта компонентов на скорость горения ГКС.

Предложена модель расчета поверхности контакта компонентов с учетом пористости заряда, особенностей гранулометрического состава компонентов, их соотношения и агрегатного состояния в зоне реакции.

Создан аппаратно-программный комплекс, позволяющий осуществлять моделирование поверхности контакта компонентов в зависимости

от плотности и соотношения компонентов, их дисперсного состава и степени уплотнения.

Новизна результатов научных исследований подтверждена решением о выдаче патента РФ и свидетельством на регистрацию программы для ЭВМ.

Практическая значимость

Модель позволяет разрабатывать новые составы с заданными свойствами, снизить время и трудоемкость разработки, рассчитывать скорость горения пиротехнических составов, оценивать тепло-, электропроводность порошковых материалов, моделировать процессы прессования смесевых композиций.

Созданный программно-аппаратный комплекс внедрен в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (техническом университете) и используется для обработки результатов микроскопического анализа шлифов и порошковых материалов в научных исследованиях и лабораторном практикуме.

Апробация работы

Основные материалы по выполненным исследованиям были доложены на конференциях:

— III международная электронная научная конференция «Современные проблемы информатизации-98» (Воронеж, октябрь 1997 — апрель 1998 г.);

— II научно-техническая конференция аспирантов СПбГТИ(ТУ) (Санкт-Петербург, май 1999 г.);

— заочная научно-практическая конференция «Биотехнология в ФЦП «Интеграция» (Санкт-Петербург, октябрь 1999 г.);

— III научно-техническая конференция аспирантов СПбГТИ(ТУ) (Санкт-Петербург, май 2000).

Публикации

Результаты работы опубликованы в 1 информационном листке 4 сборниках тезисов докладов конференций, в описании 1 патента РФ и 1 программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, восьми глав, выводов, списка литературы и приложения. Материалы работы изложены на 124 листах машинописного текста.

В аналитическом обзоре отражено состояние проблемы на сегодняшний день.

Приведена классификация основных моделей структуры порошковых материалов, указаны их характерные особенности, достоинства и недостатки.

Рассмотрены классические представления о зависимости скорости горения пиротехнических составов от дисперсности компонентов и поверхности их контакта.

Рассмотрены современные представления о зависимости скорости горения ГКС от различных структурных параметров. Рассмотрена теория горения смесевых твердых топлив, «карманная» и фрактальная теории.

Изложены принципы и основные функциональные зависимости энтальпийного подхода. Рассмотрена возможность его применения для определения зависимости скорости горения ГКС от поверхности контакта компонентов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

А. МЕТОДЫ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приведены свойства компонентов и смесей, методы изготовления зарядов и методики проведения эксперимента.

В работе использованы полученные ранее данные по скоростям горения смесей магния, алюминия и алюминий-магниевого сплава с нитратами щелочных и щелочноземельных металлов, с перекисью бария и оксидом марганца (IV). Рассмотрены смеси никеля и циркония с алюминием и титана с кремнием.

Дополнительно нами получены данные по скоростям горения смеси магния с оксидом никеля (II) и оксидом меди (I).

Подготовка компонентов, приготовление смесей и прессование зарядов осуществлялись по общепринятой в лабораторной практике технологии.

Окислители сушились при температуре 80°C в течение 6 часов в термостате. Компоненты просеивались через металлическую сетку необходимого размера (ГОСТ 6613-53) для выделения нужной фракции.

Коэффициент уплотнения смесей определялся по кривым прессования. Относительная погрешность определения плотности не превышала 5%.

Зависимость скорости горения ГКС от начальной температуры определялась при помощи установки, разработанной на кафедре высокоэнергетических процессов Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

Испытаниям подвергались заряды ГКС диаметром 15 мм в бумажной оболочке в диапазоне начальных температур от 298 до 406 К. Относительная погрешность определения скорости горения не превышала 5%.

Микроскопический анализ дисперсного состава исходных порошков и расчет поверхности контакта компонентов проводился с помощью специально разработанного программно-аппаратного комплекса.

Для статистической обработки экспериментальных данных по скоростям горения использовался пакет STATGRAPHICS.

Б. РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработан программно-аппаратный комплекс, состоящий из экспериментальной установки и программы для ЭВМ. Установка включает видеокамеру, плату оцифровки изображения и компьютер, на котором производится анализ изображения и обработка результатов.

Разработанная программа позволяет решать следующие задачи:

- производить предварительную обработку микроскопических изображений (фильтрация, удаление шумов и т. д.);
- определять число и размеры частиц на микроскопических изображениях;

- оценивать оптимальное число столбцов гистограммы и группировать данные;
- определять вид и параметры закона распределения объектов по размерам;
- осуществлять визуализацию результатов микроскопического анализа и выводить данные на печать;
- рассчитывать поверхность контакта частиц смеси порошков с учетом их дисперсного состава.

Подробно описаны методы анализа изображений и статистические методы обработки экспериментальных данных.

Обоснован выбор оптимального числа столбцов гистограммы. Наилучшие результаты при этом дают формулы Хайнхольда-Гаеде и Уильямса.

Дисперсный состав порошков предложено описывать одним из четырех статистических распределений: нормальным, логонормальным, Розина-Раммлера, Годена-Андреева.

В. ВЫВОД ФОРМУЛ ДЛЯ РАСЧЕТА УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА КОМПОНЕНТОВ

Представлена модель поверхности контакта частиц компонентов. Приведены соотношения для одноименных и разноименных компонентов с учетом и без учета плавления:

При выводе формул для расчета поверхности контакта сделаны следующие допущения

- частицы имеют форму, близкую к шарообразной;
- компоненты смеси идеально перемешаны.

Для формул, учитывающих плавление компонентов, сделаны дополнительные допущения:

- плавящийся компонент покрывает всю поверхность твердого компонента;
- твердый компонент сохраняет структуру каркаса при плавлении другого компонента.

Формулы для определения поверхности контакта частиц компонентов приведены в таблице 1. Вероятность контакта одной фракции с дру-

гой предложено оценивать с учетом кривых распределения частиц по размерам в исходных порошках.

Следует отметить, что по полученным данным расхождение между поверхностью контакта компонентов, определенной с учетом и без учета дисперсного состава порошков может достигать 70%.

Анализ поведения модели позволяет объяснить многие закономерности изменения скорости горения ГКС в зависимости от структурных параметров. В частности, анализ модели позволяет объяснить смещение положения максимума скорости горения составов при различном среднем размере частиц (рис. 1). Кроме того, разработанная модель объясняет различный характер зависимости скорости горения от среднего размера частиц при различном соотношении компонентов.

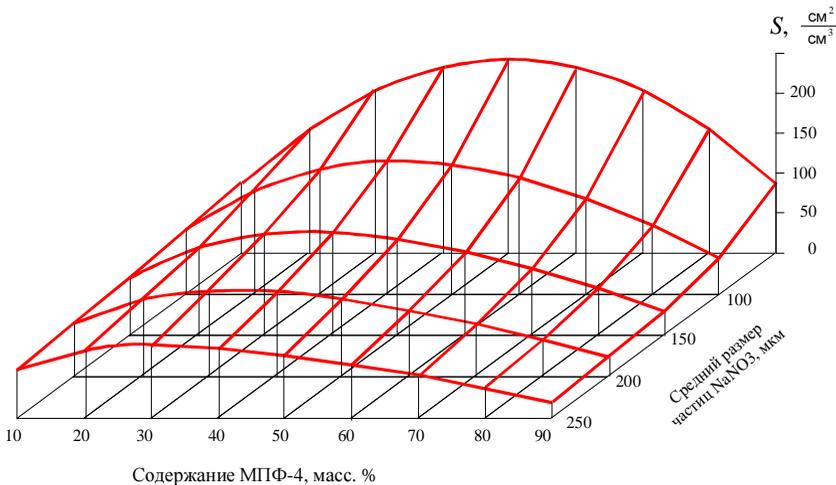


Рис. 1. Зависимость поверхности контакта от соотношения компонентов и среднего размера частиц окислителя

Таблица 1

Формулы для определения поверхности контакта частиц компонентов

Вид поверхности	Без плавления компонентов	При плавлении компонента 2
Одноименные компоненты	$S_{1-1} = \frac{3d_2 K_y^2 \alpha_1^2 \rho_2^2}{d_1(\alpha_1 \rho_2 d_2 + \alpha_2 \rho_1 d_1)(\alpha_1 \rho_2 + \alpha_2 \rho_1)}$	$S_{1-1} = \frac{3d_2 K_y^2 \alpha_1^2 \rho_2^2}{d_1(\alpha_1 \rho_2 d_2 + \alpha_2 \rho_1 d_1)(\alpha_1 \rho_2 + \alpha_2 \rho_1)}$
Разноименные компоненты	$S_{1-2} = \frac{6 K_y^2 \alpha_1 \alpha_2 \rho_1 \rho_2}{(\alpha_1 \rho_2 d_2 + \alpha_2 \rho_1 d_1)(\alpha_1 \rho_2 + \alpha_2 \rho_1)}$	$S_{1-2} = \alpha_1 K_y \frac{3}{d_1} \left(2 - \frac{d_2 K_y \alpha_1 \rho_2^2}{(\alpha_1 \rho_2 d_2 + \alpha_2 \rho_1 d_1)(\alpha_1 \rho_2 + \alpha_2 \rho_1)} \right)$
С учетом распределения частиц по размерам	$S = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{M_j} p_{i,j} S_{i,j}$	

Примечание:

- K_y — коэффициент уплотнения смеси;
 $\alpha_1, \rho_1, d_1,$ — массовая доля, плотность и размер частиц компонента 1;
 $\alpha_2, \rho_2, d_2,$ — массовая доля, плотность и размер частиц компонента 2;
 $S_{i,j}$ — поверхность контакта одной фракции порошка с другой;
 $p_{i,j}$ — вероятность контакта одной фракции порошка с другой

Г. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ОТ СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Рассмотрен статистический подход для описания зависимости скорости горения ГКС от структурных параметров. В рамках этого подхода при описании экспериментальных данных использовалось уравнение множественной регрессии вида

$$U = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + \dots + a_n \cdot X_n, \quad (3)$$

где $a_0 \dots a_n$ — эмпирические коэффициенты;

$X_1 \dots X_n$ — функции структурных параметров (размер частиц компонентов, коэффициент уплотнения и т. д.).

Зависимость скорости горения от размеров частиц компонентов стехиометрических магниевых смесей показана в таблице 2.

При использовании данных зависимости скорости горения от размеров частиц компонентов и коэффициента уплотнения для стехиометрических магниевых смесей получено уравнение вида

$$U = 17.574 + \frac{19874}{d_s^2} - \frac{13058}{d_o^2} - 6.1252K_y^2 - 0.027326K_y d_o + 3.5304 \times 10^{-5} d_o^2$$

Подбором вида функций структурных параметров можно добиться невязки расчетных и экспериментальных данных δ , не превышающей 3% для зависимости от размеров частиц (табл. 2) и 16,6% с учетом коэффициента уплотнения.

Однако, практическое значение такого подхода весьма ограничено. Его существенным недостатком является отсутствие универсальности и переносимости с одной системы на другую.

Сопоставление экспериментальной и расчетной скорости горения стехиометрических магниевых смесей

Система	K_y	$d_{г, мкм}$	$d_{о, мкм}$	Коэффициенты уравнение множественной регрессии				Скорость горения, мм/с		$\delta, \%$
				$U = a_0 + a_1 \frac{1}{d_г^2} + a_2 \frac{1}{d_о^2} + a_3 d_г d_о$				эксперимент	расчет	
				a_0	a_1	a_2	a_3			
Магний— нитрат натрия	0,78	260	94	12.28	14040	-1598	$-5.450 \cdot 10^{-5}$	11,1	11.98	-1.1
		135	94					12,2	12.19	-0.1
		94	94					13,2	13.21	0.1
		54	94					16,7	16.65	-0.3
		94	260					12,4	12.52	1.0
		94	54					13,0	13.05	0.4
Магний— нитрат бария	0,78	260	94	3.78	2856	-3482	$-1.599 \cdot 10^{-5}$	3,1	3.03	-2.3
		135	94					3,3	3.34	1.2
		94	94					3,6	3.56	-1.1
		54	94					4,3	4.28	-0.5
		94	260					3,6	3.66	1.7
		94	54					2,8	2.82	0.7
Магний— нитрат стронция	0,78	260	94	3.00	3708	-2549	$7.175 \cdot 10^{-6}$	2,9	2.94	1.4
		135	94					3,0	3.01	0.3
		94	94					3,2	3.19	-0.3
		54	94					4,0	4.02	0.5
		94	260					3,6	3.56	-1.1
		94	54					2,6	2.58	-0.8
Магний— перекись бария	0,77	260	94	3.89	5989	6195	$-3.215 \cdot 10^{-5}$	4,0	3.90	-2.5
		135	94					4,4	4.52	2.7
		94	94					5,1	4.99	-2.2
		54	94					6,5	6.49	-0.2
		94	260					3,8	3.88	2.1
		94	54					6,5	6.53	0.5
Магний— двуокись марганца	0,57	260	94	4.73	7032	1471	$-2.192 \cdot 10^{-5}$	4,3	4.47	4.0
		135	94					4,9	5.00	2.0
		94	94					5,6	5.50	-1.8
		54	94					7,1	7.20	1.4
		94	260					5,2	5.01	-3.7
		94	54					6	5.92	-1.3

Как правило, полученные уравнения хорошо описывают поведение лишь рассматриваемой системы в пределах изменения варьируемых факторов. Прогнозирование скорости горения вне пределов варьирования значений факторов приводит к необходимости изменения, как значений коэффициентов, так и изменения вида функций.

Д. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ СОСТАВОВ ОТ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА КОМПОНЕНТОВ

Исследована зависимость скорости горения пиротехнических составов от поверхности контакта частиц компонентов.

Выявлены методические ошибки, которые способствуют увеличению неточностей при использовании существующих и разработке новых моделей, описывающих зависимость скорости горения от структурно-технологических факторов:

- использование данных о гранулометрическом составе компонентов на основании просева через ограниченное количество сит;
- использование среднего размера частиц при полимодальном или отличном от нормального распределения компонентов;
- вычисление среднего размера частиц по массовому распределению, если требуется частичное, и наоборот;
- неоднозначный состав продуктов реакций и связанная с этим неопределенность при расчетах стехиометрических соотношений смесей.

Данных о просеве порошков через стандартный набор сит вполне достаточно для организации технологического процесса и контроля поступающих в производство порошков. Однако для построения математической модели, позволяющей адекватно описывать экспериментальные данные, такой информации явно недостаточно. В таком случае необходимо проводить либо ситовый анализ, используя большее количество сит, либо микроскопирование.

Экспериментально доказано, что даже в пределах одной марки порошка (например, МПФ-4) встречаются бимодальные распределения частиц по размерам. В технологическом процессе изготовления пиротехнических зарядов для регулирования скорости горения ГКС применяются

смеси различных марок порошков, что также приводит к бимодальному распределению. В данном случае использование среднего диаметра частиц приводит к существенным ошибкам в расчетах.

При описании математических моделей зависимости скорости горения ГКС от диаметра частиц компонентов, довольно часто авторы не указывают, какой диаметр они использовали в расчетах: массовый или частичный, средний или среднегеометрический и т. д.

Так, например, при микроскопическом анализе порошка марки ПАМ-4 обнаружено (рис. 2), что частичное распределение подчиняется закону Розина-Раммлера, а массовое — нормальному. В зависимости от этого в дальнейшем можно считать, что средний медианный диаметр ПАМ-4 может быть равен или 77 мкм (среднечисловой) или 110 мкм (среднемассовый).

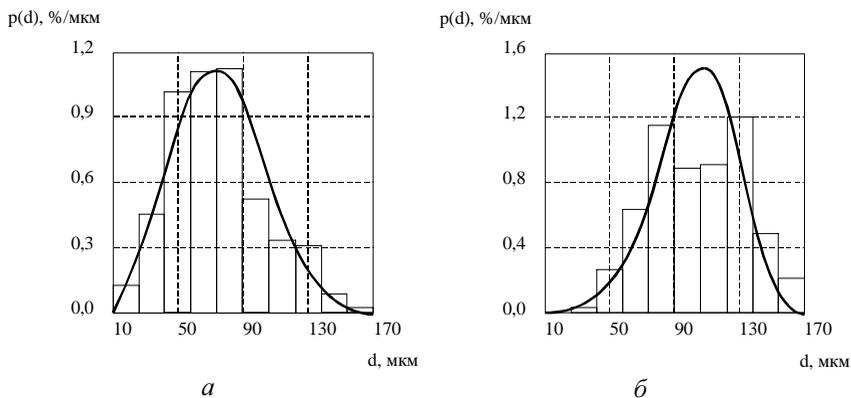


Рис. 2. Гранулометрический состав порошка ПАМ-4:
a — частичное распределение; *б* — массовое распределение

По-видимому, поверхность контакта может являться универсальным критерием, достаточно точно характеризующим ГКС при наличии достоверных данных о дисперсном составе компонентов.

Таблица 3

Зависимость скорости горения стехиометрических магниевых смесей от поверхности контакта компонентов

Система	K_{γ}	$d_{\text{г}}$, мкм	$d_{\text{о}}$, мкм	$S_{\text{г-о}}$, м ² /м ³	Коэффициенты уравнение линейной регрессии $U = a + bS_{\text{г-о}}$		Скорость горения, мм/с		δ , %
					a	b	эксперимент	расчет	
Магний— Нитрат натрия	0,78	260	94	7285	8,62	$2,59 \cdot 10^{-4}$	11,1	10,5	6
		135	94	12973			12,2	12,0	2
		94	94	17715			13,2	13,2	0
		54	94	28479			16,7	16,0	4
		94	260	15387			12,4	12,6	-2
		94	54	19105			13,0	13,6	-4
Магний— Нитрат бария	0,78	260	94	5470	2,62	$6,42 \cdot 10^{-5}$	3,1	3,0	4
		135	94	9526			3,3	3,2	2
		94	94	12794			3,6	3,4	5
		54	94	19957			4,3	3,9	10
		94	260	10496			3,6	3,3	9
		94	54	14135			2,8	3,5	-21
Магний— нитрат стронция	0,78	260	94	6211	2,48	$5,07 \cdot 10^{-5}$	2,9	2,8	4
		135	94	10851			3,0	3,0	0
		94	94	14637			3,2	3,2	0
		54	94	23078			4,0	3,6	10
		94	260	12281			3,6	3,1	16
		94	54	16078			2,6	3,3	-21
Магний— перекись бария	0,77	260	94	4770	1,90	$3,68 \cdot 10^{-4}$	4,0	3,7	10
		135	94	7571			4,4	4,7	-6
		94	94	9377			5,1	5,3	-5
		54	94	12223			6,5	6,4	2
		94	260	5210			3,8	3,8	0
		94	54	11617			6,5	6,2	5
Магний— двуокись марганца	0,57	260	94	2921	3,55	$4,34 \cdot 10^{-4}$	4,3	4,8	-11
		135	94	4218			4,9	5,4	-9
		94	94	4936			5,6	5,7	-2
		54	94	5920			7,1	6,1	16
		94	260	2377			5,2	4,6	14
		94	54	6664			6	6,4	-7

Установлено, что большинство известных формул для определения зависимости скорости горения ГКС от структурных параметров сводится к зависимости скорости горения от поверхности контакта в виде

$$U\rho \sim \sqrt{S}, \quad (4)$$

либо

$$U\rho \sim S. \quad (5)$$

Последнее соотношение согласуется с результатами, полученными в рамках фрактальной теории.

Экспериментальные значения скоростей горения смесей магния с нитратами натрия, бария, стронция, перекисью бария и двуокисью марганца удовлетворительно аппроксимируются линейной зависимостью от поверхности реакционного контакта (таблица 3).

Аналогичные зависимости получены для смесей алюминия и алюминиево-магниевого сплава с указанными окислителями. Для рассмотренных смесей невязка расчетных и экспериментальных данных не превышает 21%.

По-видимому, аппроксимационные уравнения настолько точно могут описывать закономерности изменения скорости горения ГКС от поверхности реакционного контакта, насколько точно используемая в расчетах поверхность контакта отражает изменение действительного значения от различных параметров.

Е. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ГОРЕНИЯ ОТ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА КОМПОНЕНТОВ В РАМКАХ ЭНТАЛЬПИЙНОГО ПОДХОДА

Рассмотрена зависимость скорости горения ГКС от поверхности контакта компонентов в рамках энтальпийного подхода.

При использовании энтальпийного подхода общепринято зависимость скорости горения ГКС от различных параметров искать в виде:

$$U r = \frac{q_m(P, P, d_i, a_i)}{h_m(P, d_i, a_i) - h(T_n, P, a_i)}, \quad (6)$$

где q_m , h_m — тепловой поток и энтальпия системы в критическом сечении волны горения;

P — давление окружающей среды;

Π — пористость системы.

В работе предложено использовать зависимость массовой скорости горения от теплофизических параметров волны горения в виде:

$$U \rho = \frac{q_m(P, S)}{h_m(P, S) - h(T_n, P)}. \quad (7)$$

Рассмотрена зависимость теплофизических характеристик и скорости горения от поверхности контакта компонентов для нитратных, термитных и СВС систем. Для обработки экспериментальных данных использована известная методика, адаптированная для получения зависимости в виде (7).

Показано, что для смесей магния с нитратами натрия и бария теплофизические параметры волны горения линейно зависят от поверхности контакта горючее-горючее S_{z-z} и горючее-окислитель S_{z-o} .

$$q_m = a + b S_{z-z} + c S_{z-o}, \quad (8)$$

$$h_m = a + b S_{z-z} + c S_{z-o}, \quad (9)$$

Для рассмотренных термитных и СВС систем зависимость теплофизических параметров от поверхности разноименных компонентов может быть представлена в виде полинома второй степени

$$q_m = a + b S + c S^2, \quad (10)$$

$$h_m = a + b S + c S^2. \quad (11)$$

Значения экспериментальной и вычисленной по уравнению 7 скорости горения приведены в таблице 4.

В рамках энтальпийного подхода зависимость скорости горения от поверхности контакта компонентов можно описать с погрешностью, не превышающей 20%.

Зависимость скорости горения ГКС от поверхности контакта компонентов

Система	K_y	S_{2-0} м ² /м ³	S_{2-01} м ² /м ³	Коэффициенты уравнения регрессии для h_m			Коэффициенты уравнения регрессии для q_m			Скорость горения, мм/с		δ , %
				a	b	c	a	b	c	экспери- мент	расчет	
Магний— Нитрат натрия	0,80	6747	2879	768,61	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$-1,64 \cdot 10^{-2}$	12311	$1,43 \cdot 10^{-1}$	$-3,85 \cdot 10^{-1}$	10,7	10,3	4
		1730	12914							8,6	8,3	4
		2635	6426							8,9	9,4	-6
		52762	12727							16,5	16,2	2
Магний— бария	0,80	7793	2586	768,61	$3,50 \cdot 10^{-5}$	$-1,64 \cdot 10^{-2}$	12311	$1,43 \cdot 10^{-1}$	$-3,85 \cdot 10^{-1}$	3,1	3,3	-4
		2327	13517							2,5	2,6	-1
		3331	6318							3,0	2,8	7
		59997	11256							5,4	5,4	0
Магний— окись никеля	0,87	—	11200	277,12	$2,44 \cdot 10^{-2}$	$-8,46 \cdot 10^{-7}$	2664	$2,35 \cdot 10^{-1}$	$-7,01 \cdot 10^{-6}$	3,6	3,6	1
		—	12050							3,9	3,7	-7
		—	18420							4,2	3,8	-10
		—	26370							4,7	4,4	-7
Магний— окись меди	0,76	—	6550	380,53	$-8,36 \cdot 10^{-3}$	$-8,54 \cdot 10^{-8}$	3745	$-5,46 \cdot 10^{-2}$	$9,03 \cdot 10^{-7}$	3,4	3,5	3
		—	7041							3,6	3,6	-1
		—	10970							3,8	3,9	2
		—	16250							4,0	4,6	13
Никель— алюминий	0,77	—	34250	308,72	$4,14 \cdot 10^{-3}$	$-5,45 \cdot 10^{-8}$	9030	3,88	$-3,14 \cdot 10^{-5}$	94,0	109,6	14
		—	46910							116,0	109,7	-6
		—	80380							86,0	107,3	20
		—	4490							31,0	27,3	-14
Титан— кремний	0,57	—	18030	943,25	$-2,16 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-8}$	-95540	12,51	$-3,30 \cdot 10^{-4}$	22,0	22,0	0
		—	19120							23,0	22,8	-1
		—	21610							22,2	21,5	-3
		—	25320							11,3	11,1	-2

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании литературных и собственных экспериментальных данных показано, что скорость горения гетерогенных композиций функционально связана с поверхностью контакта компонентов. Полученные результаты согласуются с фрактальной теорией и энтальпийным подходом к теории горения. Найденные функциональные зависимости позволяют предсказывать скорость горения гетерогенных композиций с погрешностью, не превышающей 20%.

2. Показана ограниченность статистического подхода к установлению многофакторной функциональной зависимости скорости горения от размеров частиц компонентов, их соотношения и коэффициента уплотнения.

3. Предложена математическая модель для расчета величины поверхности контакта компонентов в гетерогенных композициях. Получены соотношения для одноименных, разноименных, твердофазных и плавящихся компонентов. В расчетных формулах учтены особенности дисперсного состава порошков. Показано, что расхождение в величине расчетной поверхности контакта с учетом и без учета дисперсного состава порошков может достигать существенной величины (~70%). Для определения поверхности контакта компонентов создан специальный программно-аппаратный комплекс.

4. Изложенные в работе методы описания зависимости скорости горения ГКС от различных параметров могут найти широкое применение в научной и технологической практике при проектировании и изготовления пиротехнических зарядов с целью прогнозирования и регулирования скорости их горения.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Информационный листок № 147-98 от 26.01.98. Суворов К. А., Королев Д. В. Программная обработка изображений при определении числа и размеров частиц методом микрофотоирования// Санкт-

Петербургский межотраслевой территориальный центр научно-технической пропаганды. — СПб, 1998. — 2 с.

2. Дудырев А. С., Королев Д. В., Суворов К. А. Автоматизация микроскопического анализа при помощи программной обработки изображений// Сборник тезисов докладов III Международной электронной конференции «Современные проблемы информатизации-98». — Воронеж, 1998. — С. 54.

3. Дудырев А. С., Королев Д. В., Суворов К. А. Определение вида и параметров функции распределения частиц по размерам// Сборник тезисов докладов III Международной электронной конференции «Современные проблемы информатизации-98». — Воронеж, 1998. — С. 148.

4. Определение параметров распределения частиц по размерам в полифракционных порошкообразных материалах/А. С. Дудырев, Д. В. Королев, А. А. Кюлленен, К. А. Суворов// Сборник тезисов докладов II научно-технической конференции аспирантов СПбГТИ(ТУ). Ч. II — СПб: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 1999. — С. 113.

5. Получение сорбента гербицидов в режиме самораспространяющегося высокотемпературного синтеза/ Ю. И. Климентьева, Д. В. Королев, В. В. Самонин, К. А. Суворов// Биотехнология в ФЦП «Интеграция»: Тезисы докладов заочной научно-практической конференции. — СПб: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 1999. — С. 91.

6. Зависимость скорости горения гетерогенных конденсированных систем от поверхности контакта частиц/А. С. Дудырев, Ю. И. Климентьева, Д. В. Королев, К. А. Суворов // Сборник тезисов докладов международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ—2000». — СПб: Изд-во СПбГТИ(ТУ), 2000 — С. 123.

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 990213 от 12.02.1999. «Программа автоматизации микроскопического анализа – Little 2» (Little 2)/ А. С. Дудырев, Д. В. Королев К. А. Суворов.