

УДК 536.46

ГОРЕНИЕ КРУПНЫХ МОНОЛИТНЫХ ЧАСТИЦ ТИТАНА В ВОЗДУХЕ. II. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ

О. Г. Глотов^{1,2}, Н. С. Белоусова^{1,2}, Г. С. Сурадин¹

¹Институт химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН,
630090 Новосибирск, glotov@kinetics.nsc.ru

²Новосибирский государственный технический университет, 630073 Новосибирск, nata.bel.94@mail.ru

Описаны методики отбора и анализа конденсированных продуктов горения (КПГ) крупных монокристаллических частиц титана диаметром $350 \div 460$ мкм в воздухе при атмосферном давлении. Представлены детальные данные о гранулометрическом, морфологическом и фазовом составе КПГ и о штучном количестве частиц, производимых одной горящей материнской частицей. Выделены следующие морфологические типы частиц КПГ: компактные сферы — остатки горения материнских частиц и их фрагментов, аэрогелевые объекты круглой и продолговатой кометообразной формы — разреженные (ажурные) частицы, состоящие из цепочек наноразмерных сферул. По соотношению атомов O/Ti все типы частиц КПГ — оксидные. Массовая доля аэрогелевых объектов в КПГ составляет $0.52 \div 0.98$, их физическая плотность около 0.8 г/см^3 . Характерные размеры компактных сфер $2 \div 410$ мкм, круглых аэрогелевых объектов $11 \div 470$ мкм, длина кометообразных аэрогелевых объектов может достигать 13 мм. Типичные размеры сферул $25 \div 100$ нм. Крупные компактные сферы размером $200 \div 400$ мкм типично имеют внутри газовый пузырь и плотность около 0.9 г/см^3 .

Ключевые слова: частица титана, горение в воздухе, фрагментация, конденсированные продукты горения, оксиды титана, оксидные частицы, остаток горения материнской частицы, остаток горения фрагмента, наночастицы, сферулы, аэрогель, аэрогелевые объекты, эффективная плотность.

DOI 10.15372/FGV20220605

ВВЕДЕНИЕ

Механизмы воспламенения и горения металлических горючих — частиц Al, Mg, Ti, Zr и др. — определяются физико-химическими свойствами металла и его оксида, в общем случае индивидуальны для каждого металла [1, 2], но при этом имеют как общие, так и специфические особенности. Так, основной продукт горения металлов, в частности титана, — конденсированный оксид, однако закономерности его образования и характеристики частиц дисперсного оксида для каждого металла своеобразны. Специфическая особенность механизма горения частиц титана — явление фрагментации. Изучение механизма горения и его составляющих необходимо для эффективной организации процесса горения, под которой подразумевается удовлетворение разнообразных практи-

ческих требований, касающихся скорости горения, характеристик продуктов горения и других. Горение частиц титана в воздухе можно рассматривать как «технологическое», нацеленное на получение высокодисперсного диоксида титана. В связи с этим составляющие механизма горения титана, такие как фрагментация и образование дисперсного оксида, следует анализировать с точки зрения достижения поставленной цели.

В предыдущей статье цикла [3] была исследована фрагментация частиц титана в процессе горения. Выявлено, что фрагментация может происходить в различных режимах. Для повышения выхода высокодисперсного оксида предпочтителен режим «звезда». В этом режиме реализуется однократный взрыв горящей частицы, обеспечивающий образование мелких, быстро сгорающих фрагментов, при этом крупная частица-остаток не образуется. В [3] были определены условия реализации того или иного режима фрагментации. Установлено, что ключевую роль играет размер горящей материнской частицы и смена режима фрагмента-

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-03-00294, проект № 20-33-90208 («аспиранты»)).

© Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Сурадин Г. С., 2022.

ции происходит в интервале диаметров около $280 \div 300$ мкм. Характерный для мелких частиц режим «звезда» при увеличении размера сменяется режимом «еловая ветвь», особенности которого — выбросы из материнской частицы множества фрагментов в течение некоторого интервала времени и наличие частицы-остатка. В процессе горения и в результате фрагментации размер горячей частицы уменьшается, однако даже если остаток состоит из оксида и не содержит несгоревшего металла, присутствие такого остатка снижает выход целевого продукта — высокодисперсного оксида.

В данной статье определены характеристики конденсированных продуктов горения (КПГ) частиц титана, которые имеют непосредственное отношение к другому важнейшему аспекту механизма горения — образованию дисперсных продуктов горения. Целью работы было получение детальной информации о частицах КПГ всех типов и размеров, в том числе нанометровых, при горении частиц титана в воздухе, т. е. в условиях, соответствующих возможному практическому применению. Полученные данные включают в себя количественное соотношение типов частиц КПГ, морфологический, гранулометрический и элементный составы частиц. В литературе (см., например, [4]) можно найти данные лишь о некоторых типах частиц КПГ. Поэтому представленный здесь массив данных, с одной стороны, может служить основой для разработки и верификации моделей горения частиц титана, с другой стороны, может быть полезен для оптимизации процесса генерации пиротехническим способом наноксидного аэрозоля с требуемыми свойствами.

ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С ОТБОРОМ. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ ЧАСТИЦ КПГ

Для создания горящих частиц титана определенного размера используется образец из безметалльного топлива-матрицы, в который помещено заданное количество миниатюрных металлизированных включений. Образец представлял собой полоску топлива-матрицы шириной $W \approx 4$ мм, толщиной $H \approx 2$ мм, длиной $L \approx 10 \div 20$ мм, нанесенную на кварцевую трубку-держатель диаметром 12 мм. Внедренные в полоску включения были изготовлены из титана чистотой 99.38 % и имели форму плоских тонких четырехугольников размерами примерно $1 \times 1 \times 0.06$ мм. Практическая реали-

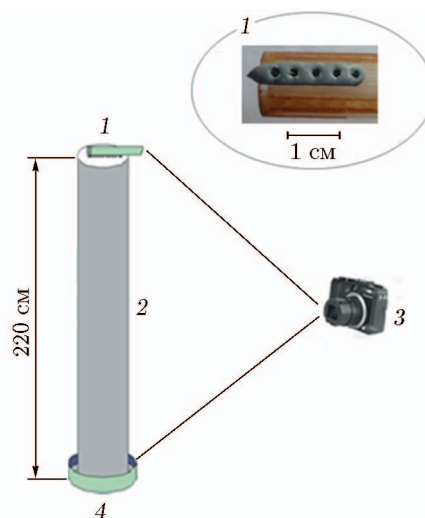


Рис. 1. Схема сбора остатков горения:

1 — образец на трубке-держателе, 2 — большая кварцевая труба, 3 — фотокамера, 4 — чашка Петри; на врезке — вид образца на кварцевой трубке-держателе

зация подхода детально описана в работе [3]. В волне горения матрицы включения воспламеняются и превращаются в горящие частицы. Вылетевшие из образца частицы горели в свободном падении в воздухе на дистанции до 2.2 м. Согласно [3] точность расчетного определения диаметра материнских частиц составляет $1 \div 3$ мкм. Поэтому диаметры материнских частиц приводятся без применения правил округления приближенных чисел.

Для отбора частиц КПГ использовали простой, но эффективный способ, в идеале обеспечивающий полный сбор частиц продуктов горения всех типов и размеров (рис. 1). Образец располагали в центре верхнего открытого торца большой кварцевой трубы $\varnothing 9 \times 220$ см, установленной вертикально на чашку Петри (далее просто «чашка»). Падение и горение частиц происходило внутри трубы. После опыта трубу сверху закрывали крышкой и оставляли в покое на срок от 1 ч до нескольких суток (максимально 41 сут), в течение которого продукты горения постепенно оседали на чашку. Прокомментируем использование длительных выдержек. В пробных опытах было обнаружено наличие в продуктах горения аэрогелевых частиц миллиметровых размеров. Поскольку плотность аэрогеля может быть сопоставима с плотностью воздуха [5], а параметры нашего аэрогеля априори неизвестны, было решено

применить суточные выдержки для осаждения аэрогелевых частиц. Забегая вперед, отметим, что одним из результатов данной работы была оценка физической плотности аэрогелевых частиц.

Основываясь на предварительных результатах [6–13], будем рассматривать следующие морфологические типы КПП:

компактные сферы CS (compact sphere) — представлены крупными остатками горения материнской частицы размером порядка исходной материнской частицы, а также морфологически подобными остатками горения фрагментов — частицами размером порядка единиц-десятков микрон;

аэрогелевые объекты двух форм — круглые ARO (aerogel round object) и продолговатые AEO (aerogel elongated object). Это ажурные образования [5], состоящие из первичных оксидных наночастиц — сферул — с типичным диаметром порядка десятков нанометров. Присвоим сферулам обозначение nS (nano sphere).

Поскольку оксидные наночастицы есть целевой продукт технологического горения частиц титана [14, 15], аэрогелевым частицам ARO и AEO уделено особое внимание. В отношении ARO и AEO термины «объект» и «частица» используются как равнозначные. Слово «компактные» для типа CS употреблено, чтобы подчеркнуть принципиальное отличие этих частиц от разреженных аэрогелей ARO и AEO.

Ключевыми параметрами опыта являются время выдержки чашки для осаждения и отбора частиц КПП, называемое временем осаждения td , и диаметр горящей материнской частицы D_0 (или диапазон диаметров, если материнских частиц несколько). Обозначения опытов состоят из буквы t и числа, соответствующего времени осаждения td в часах, например, обозначение «опыт $t3$ » означает, что td в этом опыте было 3 ч. Характеристики КПП рассматриваются в зависимости от времени осаждения td , результаты гранулометрического анализа (функции распределения числа частиц типов CS, ARO и AEO по размерам) нормируются на количество материнских частиц, сгоревших в невозмущенном режиме. Идеальное невозмущенное горение реализуется, когда частица не задевает стенки трубы и заканчивает своё горение в полёте. Типичный пример возмущенного горения: горящая частица отклоняется от осевой линии трубы и ударяется о её стенку, в результате чего частица может по-

гаснуть или фрагментировать. Для фиксации подобных обстоятельств используем параметр «адекватность опыта» (ассигасу, Ac), характеризующий сравнительную надёжность конкретного эксперимента. Параметр Ac численно равен количеству материнских частиц, сгоревших в невозмущенном режиме, отнесенному к общему количеству материнских частиц в образце.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО, ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО И ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗОВ ЧАСТИЦ КПП

Рассмотрим результаты экспериментов, упорядочив их по возрастанию времени td .

Отобранные частицы подвергали гранулометрическому анализу с использованием методов с построением изображения и следующей аппаратуры: фотокамера Sony DSC-TX30 в режиме «лупа плюс»; проекционный микроскоп Carl Zeiss Pictoval с масштабом отображения на экране 8.3 мкм/мм; микроскоп МБС-10 с окулярной камерой DCM-300; сканер Epson Perfection 4990 Photo с разрешением 4800 dpi; сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Merlin|VP Compact (Zeiss) с EDS-приставкой X-Max^N (Oxford Instruments) для локального элементного энергодисперсионного (energy dispersive spectroscopy, EDS) анализа.

Опишем технологию обработки на примере опыта $t01$, который характеризуется следующим набором параметров: время осаждения $td \approx 0.1$ ч, диаметр материнской частицы $D_0 = 440$ мкм, адекватность опыта $Ac \approx 1$, поскольку единственная материнская частица большую часть времени горела в невозмущенном режиме. В данном опыте частица начала фрагментировать в момент времени 0.76 с на высоте 12 см над чашкой, спустя 0.08 с упала на чашку и продолжала гореть и фрагментировать еще 0.68 с. Время горения частицы 1.12 с, причем 75 % этого времени частица горела в полёте и 25 % времени на дне чашки, так что режим горения условно считаем невозмущенным. Поскольку фрагментация происходила вблизи чашки и непосредственно на ней, чашку извлекли для обработки спустя ≈ 6 мин после сгорания образца. По оценке [16] скорость оседания сферических частиц диаметром 10 мкм и плотностью 4.2 г/см³ составляет 1.3 см/с. Дистанцию 12 см они преодолеют примерно за 9 с, так что к моменту извлече-

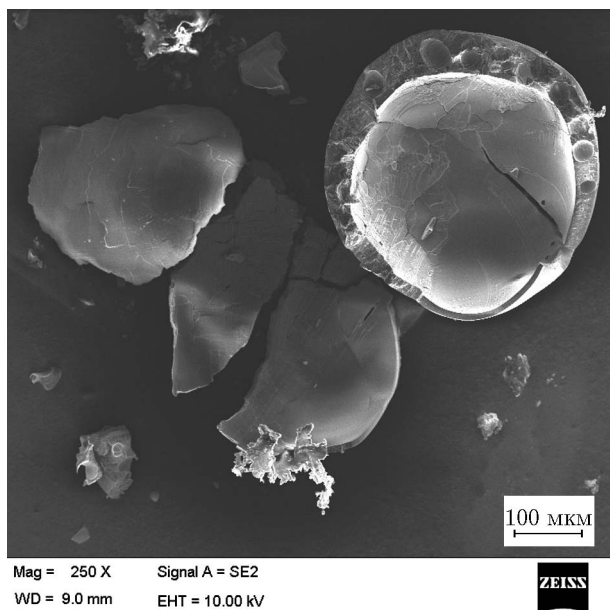


Рис. 2. Вид разрушенной крупной частицы-остатка диаметром 408 мкм под электронным микроскопом. Опыт $t01$, $td \approx 0$, $D_0 = 440$ мкм

ния чашки все частицы-остатки горения фрагментов уже осели на чашку. Опишем процедуру обработки осадка с указанием применяемых приемов и программного обеспечения.

В результате осмотра чашки под оптическим микроскопом около 20 частиц, выделяющихся своими крупными размерами, были квалифицированы как крупные остатки материнской частицы и измерены непосредственно под микроскопом. Их размеры составили от 408 до 62 мкм. Частицы имели гладкую матовую поверхность и светло-золотистый цвет. Две частицы, самая крупная и некоторая средняя, диаметрами 408 и 228 мкм, что составляет примерно 0.9 и 0.5 от начального диаметра материнской частицы, были перенесены на держатель образца СЭМ, покрытый углеродным скотчем. Затем частицы были механически разрушены с целью исследования их внутренней структуры. Обе частицы оказались полыми, одна из них показана на рис. 2. Толщина стенки «скорлупки» не постоянна — варьируется от 9 до 64 мкм для частицы диаметром $D = 408$ мкм. Для частицы-остатка с $D = 228$ мкм толщина стенки в тонком и толстом месте составляет 9 и 24 мкм. Если геометрическую структуру частицы представить как сферу с асимметричной сферической полостью, то эффективная плотность частиц диаметром

$D = 408$ и 228 мкм составит соответственно $0.20\rho_w$ и $0.24\rho_w$, где ρ_w — плотность материала стенки. Приняв $\rho_w = 4.2$ г/см³ (как у диоксида титана), найдем плотность рассматриваемых частиц: $\rho = 0.8$ и 1.0 г/см³, в среднем 0.9 г/см³. Это значение используется в дальнейшем в качестве эффективного значения плотности ρ_{eff} частиц типа CS.

В табл. 1 представлены результаты EDS-анализа частиц-остатков диаметром 408 и 228 мкм из опыта $t01$. Табл. 1 дополнена данными других опытов, проведенных в аналогичной постановке. Как видно из табл. 1, материал частицы-остатка состоит преимущественно из атомов кислорода и титана. Отношение количества атомов O/Ti варьируется от 0.6 до 6.5. Среднее значение O/Ti = 3.3 ($n = 14$, SD = 1.7, SE = 0.4) превышает стехиометрическое значение 2 для TiO₂. Здесь и далее n — количество измерений, SD — стандартное отклонение, SE — стандартная ошибка среднего [17, 18]. Каких-либо тенденций в распределении атомов в зависимости от положения точки анализа не выявлено. Заметим, что величина O/Ti = 3.3 с учетом разброса данных соответствует соотношению атомов O/Ti = 2.8 ($n = 12$, SD = 1.2, SE = 0.3) для остатков горения титановых агломератов в [13]. Полученные данные позволяют квалифицировать частицы-остатки как оксидные.

На следующей стадии обработки чашку целиком отсканировали с разрешением 4800 dpi (масштаб изображения 5.29 мкм/пиксель). Полученное изображение разрезали на 25 полей, каждое поле было сохранено в отдельный графический файл с использованием программы «Сетка» [19] и обработано с помощью оригинальной программы (рис. 3). Затем применяли так называемую трёхэтапную процедуру. На первом этапе измеряли частицы типа CS, на втором — ажурные аэрогелевые частицы типа ARO. Измерения объектов CS и ARO проводили путём фитирования (подгонки) их изображений окружностями (рис. 4) с применением программного обеспечения [20]. В опыте $t01$ для измерения частиц CS и ARO использовали трехкратное программное увеличение изображений, так что масштаб был 1.8 мкм/пиксель, диапазон измеренных частиц $11 \div 408$ мкм для CS и $18 \div 258$ мкм для ARO, ширина интервала гистограммы 20 мкм, соответственно точность определения размера 10 мкм [21]. На третьем этапе измеряли частицы типа AEO. В отличие

Таблица 1

Локальное содержание элементов в крупных частицах-остатках материнской частицы

D , мкм	Местоположение точки анализа	Содержание элементов, % (ат.)						O/Ti
		C	O	Ti	Si	Al	V	
228	Внутренняя поверхность скорлупки	3.75	71.95	24.30	—	—	—	3
228	Внутренняя поверхность скорлупки	3.54	35.67	59.79	—	—	1.00	0.6
408	Внутренняя поверхность скорлупки	4.17	44.71	49.28	—	0.17	—	0.9
408	Наружная поверхность скорлупки	4.23	75.13	20.64	—	—	—	3.6
408	Разлом стенки скорлупки	25.51	35.00	39.29	—	0.20	—	0.9
408	Разлом стенки скорлупки	7.05	80.38	12.29	0.27	—	—	6.5
272	Лобовая точка*	9.05	71.56	19.40	—	—	—	3.7
343	Лобовая точка*	8.83	71.89	19.29	—	—	—	3.7
343	Внутренняя поверхность скорлупки	9.15	74.74	16.11	—	—	—	4.6
343	Внутренняя поверхность скорлупки	7.02	73.59	19.39	—	—	—	3.8
343	Разлом стенки скорлупки	8.95	75.86	15.18	—	—	—	5.0
343	Разлом стенки скорлупки	9.47	62.15	28.38	—	—	—	2.2
343	Разлом стенки скорлупки	10.13	71.84	18.03	—	—	—	4.0
343	Наружная поверхность скорлупки	17.82	62.97	18.20	1.02	—	—	3.5

Примечание. *Лобовая точка — центр видимой стороны неразрушенной частицы, во всех остальных случаях частицы были целенаправленно разрушены.

от ARO, размер которых в любом направлении примерно одинаков, АЕО имеют кометообразную форму и измерялись в двух перпендикулярных направлениях, первое из которых совпадало с более протяженной осью. Эти измерения выполнены в программе ScopePhoto [22]. Характерным размером объекта АЕО считали его длинную ось. Схема измерений иллюстрируется рис. 4. На нижнем изображении на рис. 4,б видно, что АЕО имеет спиралевидную форму, что свидетельствует о вращении горячей частицы. В опыте $t01$ измерение частиц АЕО проводили непосредственно на каждом из 25 полей, показанных на рис. 3, без использования дополнительного программного увеличения. Масштаб изображения 5.3 мкм/пиксель. Диапазон значений длинной оси измеренных объектов АЕО $160 \div 11\,245$ мкм, ширина интервала гистограммы 20 мкм.

На рис. 5 показаны полученные распределения частиц по размерам в виде счетных гистограмм. Ось абсцисс графика ограничена значением 500 мкм. Число частиц на гистограммах нормировано на количество материн-

ских частиц-источников, сгоревших в невозмущенном режиме.

В табл. 2 результаты гранулометрического анализа частиц КПП всех типов для всех опытов представлены в виде средних диаметров D_{mn} , основанных на моментах функции распределения [23], а также в виде параметров (медиана x_c , ширина w и амплитуда Am) логарифмически-нормального распределения количества частиц по размерам в виде $y(D) = \frac{Am}{wD\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2w^2} \ln \left(\frac{D}{x_c} \right)^2 \right]$. В табл. 2 также приведён коэффициент детерминации R^2 [17].

Кроме измерения размеров частиц CS, ARO и АЕО, опционально в ряде опытов проводили подсчёт количества частиц мельче минимального измеряемого размера с целью более точной оценки штучного соотношения частиц разных типов. В опыте $t01$ подсчёт количества объектов ARO и АЕО мельче измеряемого размера был проведен на двух полях сканированного изображения (см. рис. 3,а). Обработке подвергли центральное поле № 13 и

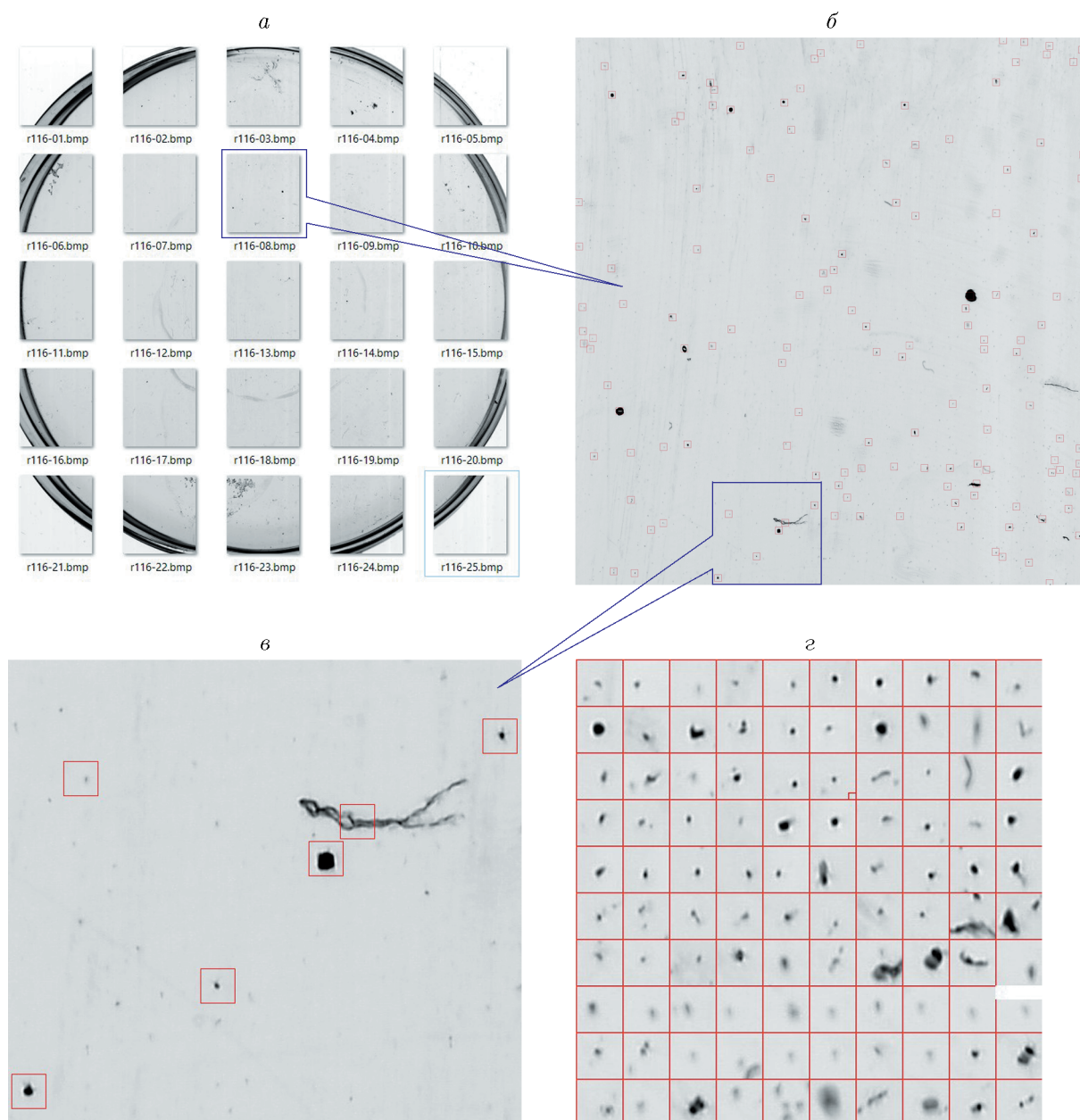


Рис. 3. Схема обработки изображений вида «очень большое поле с редко расположенными измеряемыми объектами»:

a — сканированное с высоким разрешением изображение чашки Петри с отобранными частицами разрезается на 25 полей; *б* — на каждом поле вручную (кликом кнопки мыши) помечаются объекты для последующих измерений и программа очерчивает их красным квадратом; *в* — увеличенный фрагмент предыдущего изображения, демонстрирующий квадраты выбора объектов; *г* — выбранные квадраты автоматически копируются в новый графический файл-мозаику

случайно выбранное периферийное поле № 9. Минимальный размер подсчитываемых частиц был 12 мкм. Подсчет объектов проводили в программе ScopePhoto [22]. Затем количество объектов ARO и AEO было оценено по соотношению суммарной площади двух обработан-

ных полей и полной площади осадка, равной площади внутреннего сечения кварцевой трубы (см. рис. 1, поз. 2). Результаты подсчета штучного количества частиц КПГ типов CS, ARO и AEO и их соотношения представлены в табл. 3.

Таблица 2

Данные о гранулометрическом составе частиц КПП разных типов. Средние размеры D_{mn} и параметры y_0 , x_c , w , Am аппроксимирующих логарифмически-нормальных функций распределений частиц КПП по размерам

Параметры опыта			Тип частиц КПП	N , шт. (измерено всего)	$D_{\min} \div D_{\max}$, мкм (кроме nS)	Средние размеры D_{mn} ($\pm$ SD)					Параметры логнормального распределения (нормировано на число частиц-источников)			R^2
Номер	td , ч	D_0 , мкм				D_{10}	D_{30}	D_{32}	D_{43}	SD	x_c , мкм (кроме nS)	w	Am	
t_{01}	0	440	CS	1 623	$11 \div 408$	31	59	117	211	28	23.8 ± 0.2	0.500 ± 0.007	$32\,106 \pm 522$	0.9983
			ARO	2 071	$18 \div 252$	42	56	78	114	23	34.5 ± 0.5	0.418 ± 0.014	$41\,392 \pm 730$	0.9974
			AEO	1 502	$12 \div 3\,742$	221	631	1 645	2 342	323	110 ± 1	0.410 ± 0.008	$24\,570 \pm 416$	0.9634
			nS	289	$25 \div 85$ нм	47 нм	50 нм	52 нм	54 нм	12	47.6 ± 0.4 нм	0.240 ± 0.009	10.05 ± 0.33	0.9902
t_{11}	1	406, 429	CS	634	$21 \div 286$	67	85	110	140	35	58.4 ± 1.3	0.46 ± 0.02	$6\,227 \pm 229$	0.9822
			ARO	784	$27 \div 324$	113	130	150	168	44	109 ± 4	0.38 ± 0.04	$7\,699 \pm 639$	0.8837
			AEO	240	$166 \div 5\,781$	831	1 537	2 668	3 516	819	403 ± 8	0.44 ± 0.02	$1\,806 \pm 67$	0.7411
			CS	420	$53 \div 338$	118	131	145	164	38	112 ± 1	0.29 ± 0.01	$2\,751 \pm 94$	0.9824
t_{13}	3	414, 425, 442	ARO	2 071	$68 \div 473$	164	182	204	235	52	147 ± 2	0.19 ± 0.02	$46\,689 \pm 3\,216$	0.9204
			AEO	257	$160 \div 11\,245$	585	1 854	6 374	10 064	813	367 ± 3	0.33 ± 0.01	$4\,988 \pm 113$	0.8234
			CS	$411 + 963$	$16 \div 169$	35	42	51	72	14	31.7 ± 0.3	0.18 ± 0.01	$9\,996 \pm 412$	0.9620
			ARO	1 476	$11 \div 213$	32	37	44	69	11	27.4 ± 0.4	0.309 ± 0.007	$257\,327 \pm 3\,942$	0.9996
t_{24}	24	381, 398, 462	AEO	$632 + 208$	$30 \div 3\,930$ $155 \div 3\,922$	95	233	789	2 211	83	81.6 ± 0.2	0.390 ± 0.002	$86\,467 \pm 423$	0.9969
			CS	3 899	$9.9 \div 129$	17	25	38	54	11	8.6 ± 0.6	0.76 ± 0.05	$39\,190 \pm 802$	0.9985
			CS	$764 + 2\,422 + 1\,144 = 4\,330$	$6.6 \div 130$ $2.6 \div 126$	16	24	38	58	11	11.7 ± 0.2	0.43 ± 0.02	$163\,203 \pm 1\,309$	0.9894
			ARO	205	$19 \div 58$	32	34	37	39	9	29.3 ± 0.4	0.137 ± 0.008	$219\,503 \pm 12\,622$	0.9670
t_{168}	168	379, 411, 416	AEO	$145 + 133 = 278$	$10 \div 330$	78	100	131	173	40	64 ± 1	0.34 ± 0.02	$957\,992 \pm 50\,138$	0.9618
			nS	505	$18 \div 156$ нм	85 нм	93 нм	101 нм	106 нм	28	93 ± 5 нм	0.31 ± 0.05	10 ± 1	0.6699
			CS	4 206	$10 \div 96$	11	15	22	41	5	9 ± 4	0.3 ± 0.2	$14\,894 \pm 4\,864$	0.9997
			ARO	629	$13 \div 173$	28	37	49	77	15	25.7 ± 0.2	0.266 ± 0.009	$1\,240\,379 \pm 38\,978$	0.9961
t_{984}	984	353, 357, 370, 385, 457	AEO	256	$30 \div 13\,000$	203	2 047	12 301	12 989	810	99 ± 4	0.57 ± 0.04	920 ± 54	0.8980

Примечания. Распределения частиц CS, ARO, AEO по размерам нормированы на одну материнскую частицу-источник. D_{10} , D_{30} , D_{32} , D_{43} — средние размеры, основанные на моментах функции распределения числа частиц по размерам, $SD = \sqrt{D_{20}^2 - D_{10}^2}$ — среднеквадратичное отклонение.

Таблица 3

Соотношение числа частиц КПП типов CS, ARO и AEO и их оценочное количество, нормированное на одну материнскую частицу

Номер опыта	td , ч	D_0 , мкм (количество материнских частиц)	Тип частиц	Первичные данные ¹⁾			Данные, пересчитанные с учетом числа частиц с размером меньше измеряемого ²⁾	
				Диапазон, мкм	N , шт.	Штучная доля ³⁾ , %	Измеренные + подсчитанные частицы	Штучная доля ³⁾ , %
t_{01}	0	440 (1)	CS	11 ÷ 408	1 623	45	1 623	6
			ARO	18 ÷ 252	2 071	58	15 192	55
			AEO	12 ÷ 3 742	1 502	42	11 001	40
t_1	1	406 ÷ 429 (2)	CS	27 ÷ 324	634	39	317	39
			ARO	21 ÷ 286	784	47	392	47
			AEO	166 ÷ 5 781	240	14	120	14
t_3	3	414 ÷ 442 (3)	CS	68 ÷ 338	420	15	8 842	51
			ARO	100 ÷ 473	2 071	75	8 277	48
			AEO	160 ÷ 11 245	257	10	86	1
t_{24}	24	381 ÷ 462 (3)	CS	3.3 ÷ 169	411 → 5 492	16	1 831	13
			ARO	11 ÷ 213	1 476 → 20 982	59	6 994	47
			AEO	30 ÷ 3 930	632 → 17 956	25	5 985	40
t_{168}	168	379 ÷ 416 (3)	CS	3.6 ÷ 130	3 186	1	1 062	1
			ARO	19 ÷ 58	205 → 114 267	50	38 089	50
			AEO	36 ÷ 290	145 → 110 928	49	36 976	49
t_{984}	984	353 ÷ 457 (5)	CS	9 ÷ 109	4 038	2	3 465	1
			ARO	13 ÷ 173	629 → 191 845	87	250 170	85
			AEO	30 ÷ 13 000	256 → 24 136	11	41 793	14

Примечания. ¹⁾Первичные данные — число частиц разных типов, непосредственно измеренных на одних и тех же полях. Запись вида $N_0 \rightarrow N$ (в колонке числа частиц N) означает, что N_0 частиц были измерены непосредственно на фрагменте поля, а число N получено путем пересчета с учетом соотношения площадей поля и фрагмента. Примеры полей: полное изображение чашки Петри; стекло, уложенное на дно чашки; программно выделенные фрагменты изображения.

²⁾При проведении данной оценки учитывали как измеренные частицы, так и посчитанные без определения размера (частицы размером меньше минимального измеряемого размера).

³⁾Штучная доля — отношение количества частиц конкретного типа к суммарному количеству частиц всех типов (CS, ARO и AEO), %.

В опыте t_{01} проводили исследование аэрогелевых объектов под СЭМ. Как видно на рис. 6, они состоят из цепочек сферул нанометрового размера. Фотографии, подобные представленной на рис. 6, б, использовали для гранулометрического анализа, измеряя сферулы, попавшие в резкость. На рис. 7 показано счетное распределение числа сферул по размерам.

В данном случае гистограмма представляет относительную долю частиц в соответствующем интервале размеров, а нормировка выполнена таким образом, чтобы площадь под кривой была равна единице. Результаты гранулометрического анализа сферул представлены в табл. 2.

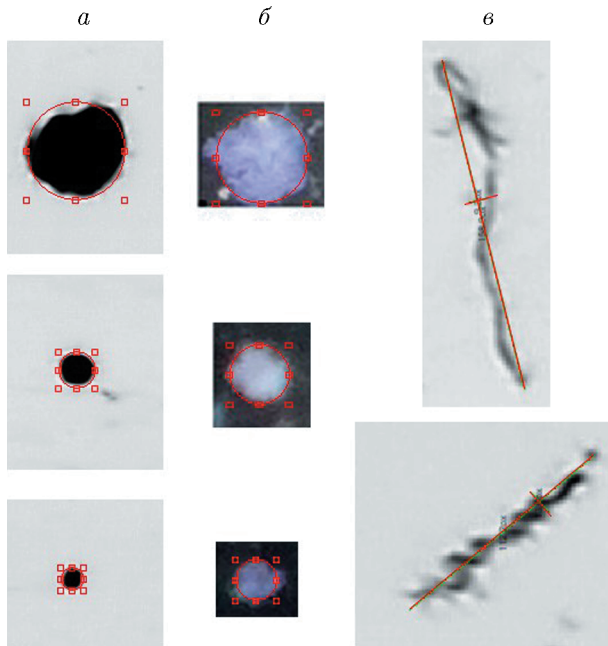


Рис. 4. Схема и примеры измерения частиц КПП типов CS (а), ARO (б), AEO (в):

а, б — «измерительные» окружности, 8 квадратных маркеров служат для растяжения/сжатия окружностей в процессе фитирования; в — два перпендикулярных измерительных отрезка для каждого объекта AEO

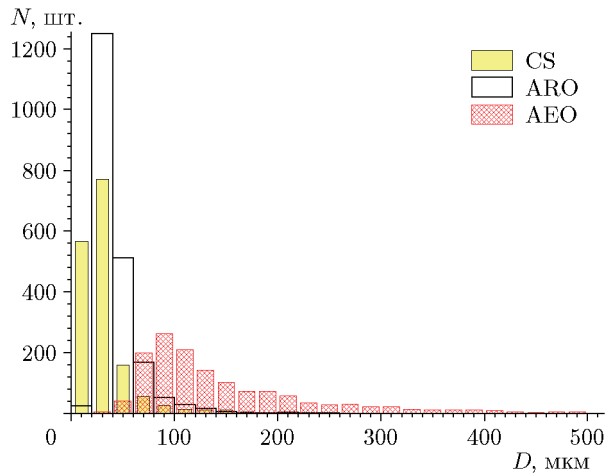


Рис. 5. Гистограмма распределения частиц КПП типов CS, ARO и AEO по размерам. Опыт t_{01} , $td \approx 0$, одна материнская частица с $D_0 = 440$ мкм

Для изображения на рис. 6,а был проведен EDS-анализ по площадке размером $\approx 30 \times 40$ мкм. Зарегистрированы следующие элементы: O 79.85 % (ат.), Si 7.76, Ti 8.69, Fe 3.70 % (ат.); соотношение O/Ti = 9.2.

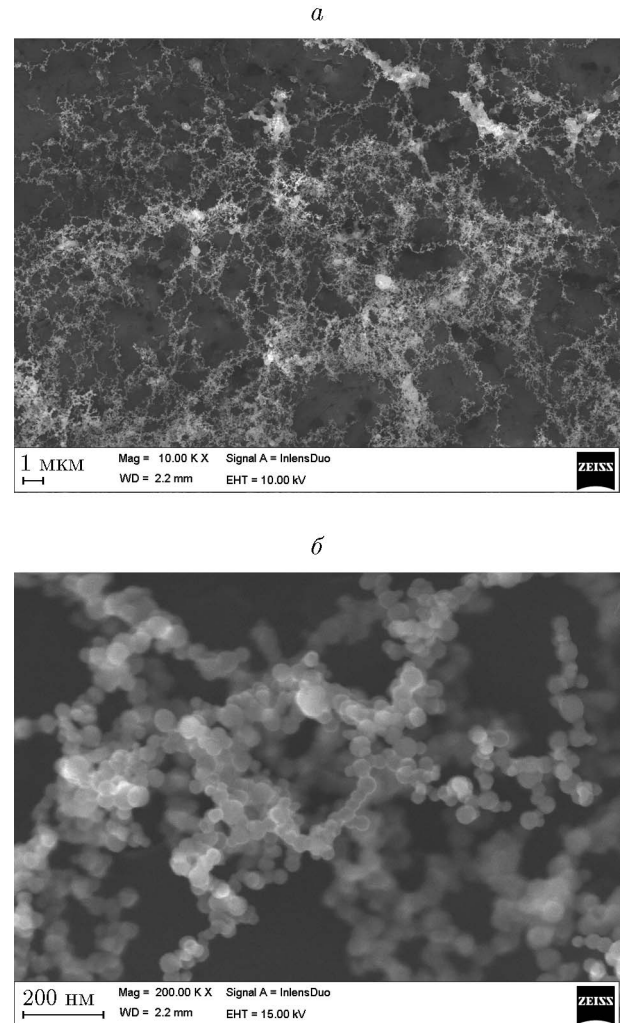


Рис. 6. Структура аэрогелевых объектов под электронным микроскопом при двух увеличениях. Опыт t_{01} , $td \approx 0$, $D_0 = 440$ мкм

Оценим долю наночастиц в КПП. Для опыта t_{01} теоретическую массу оксида найдем следующим образом: $M_{ox}^{theor} = 1.66848 M_{mother}$, где 1.66848 — стехиометрический коэффициент превращения $Ti \rightarrow TiO_2$, $M_{mother} = (\pi/6) D_0^3 \rho_{Ti}$ — масса материнской частицы, $D_0 = 440$ мкм — её диаметр, $\rho_{Ti} = 4.5$ г/см³ — плотность титана. В опыте t_{01} была единственная материнская частица, в общем случае M_{mother} и M_{ox}^{theor} вычисляются как суммы по всем материнским частицам. Вычислить массу частиц КПП всех типов не представляется возможным, однако можно оценить суммарную массу частиц типа CS: $M_{CS} = (\pi/6) D_{30CS}^3 \rho_{eff} N$, где D_{30CS}^3 — средний диаметр D_{30} частиц CS, $\rho_{eff} = 0.9$ г/см³ — оце-

Таблица 4

Масса материнских частиц, теоретическая масса образованного оксида, измеренная масса оксида в форме частиц CS и доля оксида в частицах CS

Опыт	td , ч	Адекватность опыта Ac	Материнские частицы		M_{ox}^{theor} , мг	Измеренные частицы CS			M_{CS}/M_{ox}^{theor}
			$D_{10} \pm SD$, мкм	M_{mother} , мг		D_{CS} , мкм	N , шт.	M_{CS} , мг	
$t01$	0	$1/1 = 1$	440	0.20071	0.33488	$11 \div 408$	1 623	0.15456	0.46
$t1$	1	$2/4 = 0.5$	418 ± 16	0.34372	0.57348	$21 \div 286$	634	0.18666	0.33
$t3$	3	$3/5 \approx 0.6$	427 ± 14	0.55154	0.92021	$53 \div 338$	420	0.4434	0.48
$t24$	24	$3/7 \approx 0.4$	414 ± 43	0.51121	0.85294	$3.3 \div 169$	1 374	0.14807	0.17
$t72$	72	$3/9 \approx 0.3$	390 ± 38	0.42748	0.71324	$9.9 \div 129$	3 899	0.02759	0.04
$t168$	168	$3/9 \approx 0.3$	402 ± 20	0.46148	0.76997	$2.6 \div 126$	4 330	0.02585	0.34
$t984$	984	$5/10 = 0.5$	384 ± 42	0.68954	1.15	$10 \div 109$	4 206	0.01752	0.02

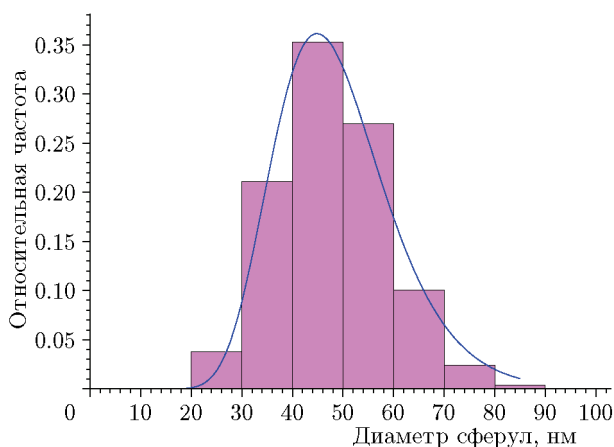


Рис. 7. Счетное распределение (относительная частота) сферул по размерам и его аппроксимация логарифмически-нормальным распределением (параметры в табл. 2). Опыт $t01$, $td \approx 0$, $D_0 = 440$ мкм

ненная выше эффективная плотность частиц CS, N — количество измеренных частиц. Значения D_{30} и N берем из табл. 2. В результате вычислений имеем $M_{ox}^{theor} = 2.0071 \cdot 10^{-4}$ г, $M_{CS} = 3.3488 \cdot 10^{-4}$ г, $M_{CS}/M_{ox}^{theor} = 0.46$. Соответственно, доля массы КПП в форме наночастиц, составляющих объекты ARO и AEO, может быть оценена величиной 0.54. Результаты оценки представлены в табл. 4.

Ниже описаны другие опыты с указанием особенностей их обработки, а также примечательных фактов, имеющих отношение к механизму горения. Результаты обработки опытов приведены в табл. 2–4.

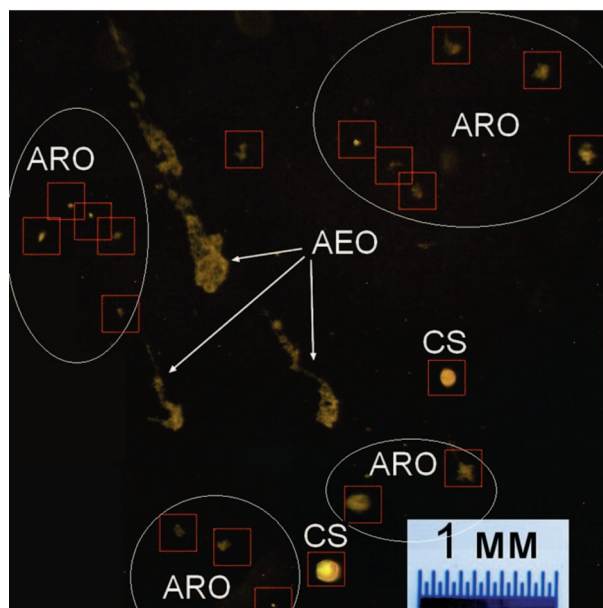


Рис. 8. Вид осадка на чашке под микроскопом. Опыт $t1$, $td = 1$ ч, $D_0 = 406$ и 429 мкм

В опыте $t1$ ($td = 1$ ч, $D_0 = 406$ и 429 мкм, $Ac = 0.5$) было проведено фотографирование всех объектов ARO и AEO непосредственно на чашке под оптическим микроскопом. Пример фрагмента фотографии представлен на рис. 8. Полученные фотографии (всего 47 шт) были программно увеличены в два раза и обработаны по описанной выше трехэтапной процедуре.

В опыте $t3$ ($td = 3$ ч, пять частиц с $D_0 = 354 \div 442$ мкм, $Ac = 0.6$) одна из частиц диаметром $D_0 = 552$ мкм (не входит в список частиц с невозмущенным горением) в результате удара о стенку трубы фрагментировала в

режиме звездообразного взрыва на ранней стадии горения. Среди продуктов горения обнаружены частицы-остатки тёмного цвета диаметром 108, 110, 119 и 125 мкм, которые, вероятно, принадлежат именно этой частице. Имеется два аргумента в пользу этого предположения. Во-первых, темные частицы-продукты наблюдали в [24] при фрагментации частиц $\varnothing 240$ и 280 мкм в режиме звездообразного взрыва. Во-вторых, известно [25], что темный цвет могут иметь низшие оксиды, а именно: TiO — тёмно-коричневый, коричнево-фиолетовый; Ti_2O_3 — тёмно-фиолетовый, чёрный; Ti_3O_4 — чёрный. Наличие этих оксидов соответствует гипотезе о том, что в процессе горения низшие оксиды переходят в высшие [14].

При обработке опыта $t24$ ($td = 24$ ч, три частицы с $D_0 = 381 \div 462$ мкм, $Ac = 0.4$) применяли приём двух увеличений с последующим объединением гистограмм в соответствии с руководством [21]. Для частиц типа CS использовали сканер и проекционный микроскоп. Для частиц АЕО использовали два разрешения сканера: 4800 dpi для фрагмента изображения и 1200 dpi для полного изображения чашки.

В опыте $t72$ ($td = 72$ ч, три частицы с $D_0 = 366 \div 434$ мкм, $Ac = 0.3$) на дно чашки симметрично относительно центра были уложены две половинки предметного стекла для оптического микроскопа. Половинки примыкали друг к другу длинными сторонами и имели размер $\approx 26 \times 38$ мм. Измерение частиц типа CS на стеклах проводили с использованием проекционного микроскопа. Затем количество частиц пересчитывали пропорционально отношению площадей сечения трубы и суммарной площади двух стекол. Частицы других типов в опыте $t72$ не измеряли.

В опыте $t168$ ($td = 168$ ч, три частицы с $D_0 = 379 \div 416$ мкм, $Ac = 0.3$) дно чашки было застелено алюминиевой фольгой толщиной 30 мкм. В центре чашки на фольгу были уложены два стекла размером 26×38 мм, так же как в опыте $t72$. По достижении заданного времени осаждения (7 сут) стекла извлекли из чашки, из фольги вырезали бритвой два участка размером $\approx 8 \times 8$ мм с аэрогелевыми объектами. Фольга дает возможность перенести АРО и АЕО под СЭМ, не повредив их. Частицы на стеклах и с фольги обрабатывали как отдельные фракции, затем строили совокупные гистограммы, как описано в [23], считая массу фракций пропорциональной ND_{30} .

В опыте $t168$ детально исследовали сферулы в аэрогелевых объектах. Измерения проведены на трёх кадрах, в табл. 2 представлены осредненные результаты. По СЭМ-изображениям АРО и АЕО, полученным в опытах $t01$ (см. рис. 6) и $t168$, была оценена плотность аэрогелевых объектов. Для этого суммарный объем измеренных сферул, попавших в резкость, делили на объем параллелепипеда с основанием, равным площади обрабатываемого кадра, и высотой, равной глубине резкости изображения. Так была оценена объемная доля сферул в пространстве объекта. Умножив эту долю на плотность диоксида титана (4.2 г/см^3), можно найти эффективную физическую плотность аэрогелевых объектов. Получены следующие результаты. Опыт $t01$: $td \approx 0$, $D_0 = 440$ мкм, сферулы $D_{10} = 47 \pm 1$ нм, объемная доля сферул $0.08 \div 0.15$ (на разных кадрах), плотность $0.3 \div 0.6 \text{ г/см}^3$. Опыт $t168$: $td \approx 168$ ч, $D_0 = 402 \pm 20$ мкм, сферулы $D_{10} = 85 \pm 2$ нм, объемная доля сферул $0.11 \div 0.27$ (на разных кадрах), плотность $0.5 \div 1.1 \text{ г/см}^3$. Средние значения по опытам $t01$ и $t168$: объемная доля сферул 0.20 ± 0.05 , физическая плотность АРО и АЕО $0.8 \pm 0.1 \text{ г/см}^3$.

Некоторые частицы типов CS и АРО в опыте $t168$ были подвергнуты локальному элементному анализу, результаты приведены в табл. 5. Материал мелких частиц-остатков CS диаметром $2 \div 10$ мкм в большинстве случаев состоит из атомов кислорода и титана в соотношении $\text{O/Ti} = 3.6 \div 3.8$, и лишь для одной частицы из четырех $\text{O/Ti} = 2.9$. В объекте типа АРО, независимо от проведения анализа в точке или по площадке, соотношение атомов O/Ti примерно такое же, как и для частиц типа CS, а именно $3.9 \div 4.1$. В одном из трех случаев получено значение $\text{O/Ti} = 9.9$, при этом количество атомов кислорода было примерно на том же уровне, а повышенное значение O/Ti обусловлено присутствием атомов иных элементов, замесивших титан.

В опыте $t984$ ($td = 984$ ч, пять частиц с $D_0 = 353 \div 457$ мкм, $Ac = 0.5$) чашку с осадком извлекли для обработки через 41 сут после сжигания образца. В этом опыте дно чашки было покрыто фольгой, на фольгу уложены два стекла, одно в центре чашки, другое на периферии. В табл. 2–4 представлены осредненные данные. В опыте $t984$ зарегистрирован наибольший объект АЕО длиной около 13 мм (рис. 9).

Таблица 5

Локальное содержание элементов в частицах КПП разных типов.
Опыт t168, $td = 168$ ч, три материнские частицы (диаметр 379, 411, 416 мкм)

Тип объекта и расположение точки или площадки анализа	Элемент и его содержание, % (ат.)					O/Ti
	O	Fe	Si	Ti	Ag	
Частица CS, $D = 2.1$ мкм, лобовая точка	78.22	0	0	21.78	0	3.6
Частица CS, $D = 5.1$ мкм, лобовая точка	78.66	0	0	21.34	0	3.7
Частица CS, $D = 8.6$ мкм, лобовая точка (два анализа на одной и той же частице)	74.62	0	0	25.38	0	2.9
	75.59	0	0	24.41	0	2.9
Частица CS, $D = 10.2$ мкм, точка на поверхности	79.34	0	0	20.66		3.8
Объект типа ARO, площадка в форме квадрата со стороной 7 мкм (два анализа)	79.41	0	0	20.59	0	3.9
	87.00	24.41	1.91	8.82	1.23	9.9
Тот же объект ARO, но анализ в точке	80.54	0	0	19.46	0	4.1

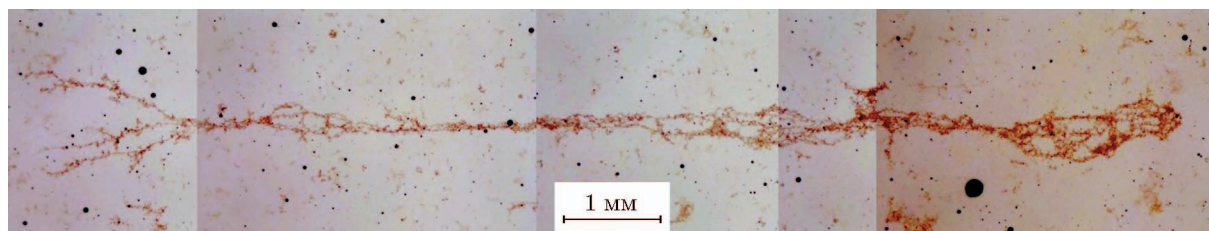


Рис. 9. Объект типа АЕО рекордной длины 13 мм:

изображение смонтировано из пяти кадров, снятых под оптическим микроскопом при увеличении $\times 40$. Фотографии В. В. Карасёва

Таким образом, проведены представительный отбор и количественная характеристика всех типов дисперсных конденсированных продуктов, образующихся при горении частиц титана размером $350 \div 460$ мкм в воздухе при атмосферном давлении.

Основные типы частиц и их характеристики следующие.

Частицы типа CS — компактные сферы, остатки горения материнских частиц и их фрагментов, размер $2 \div 410$ мкм, распределение по размерам описывается логарифмически-нормальным законом. Локальное соотношение атомов O/Ti по данным EDS в среднем составляет 3.3 ± 0.4 , что позволяет квалифицировать частицы-остатки CS как оксидные. Крупные ($200 \div 400$ мкм) частицы CS типично имеют

внутри полость, и их плотность оценена величиной 0.9 г/см^3 . На рис. 10 в виде столбчатого трехмерного графика представлены значения среднего диаметра D_{43} частиц CS (аппликата) в зависимости от среднего в опыте арифметического размера материнских частиц D_0 (абсцисса) и времени осаждения td (ордината). Отметим некоторые тенденции (будем обозначать их буквой «т» с цифрой). Можно говорить об уменьшении размера частиц CS как при увеличении времени осаждения ($t1$), так и при уменьшении размера материнских частиц ($t2$). Тенденции $t1$ и $t2$ частично объясняются скоростью осаждения частиц на чашку. По оценкам [16], чтобы преодолеть дистанцию 2.2 м (высота трубы), частицам типа CS плотностью 0.9 г/см^3 необходимо следующее вре-

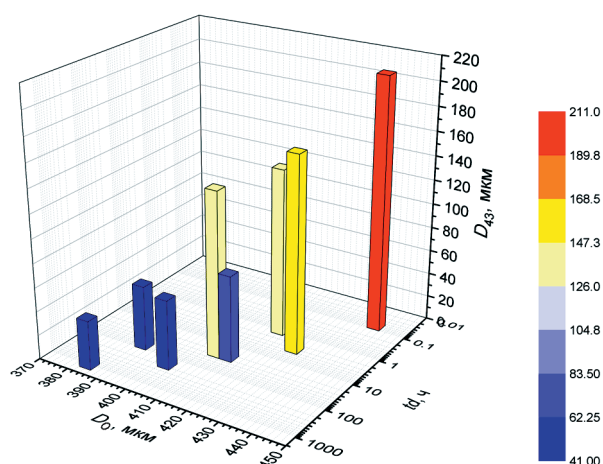


Рис. 10. Средний размер D_{43} частиц типа CS как функция размера материнских частиц D_0 и времени осаждения td

мя: 8 с для частиц диаметром 100 мкм, 13 мин для частиц 10 мкм, 20 ч для частиц диаметром 1 мкм. При этом чем крупнее материнская частица, тем больше характерное время начала ее фрагментации [3] и тем ниже (на меньшей высоте над чашкой) она находится в момент начала фрагментации. Как видно на рис. 10, четыре столбика в левой части графика имеют сопоставимую высоту ($D_{43} \approx 41 \div 72$ мкм), которая существенно меньше, чем высота четырех столбиков в правой части графика ($D_{43} \approx 138 \div 211$ мкм). Эта тенденция (т3) отражает закономерности фрагментации, а именно смену режима «звездообразного взрыва» (для мелких материнских частиц) на режим «еловая ветвь» (для крупных материнских частиц). Для режима «еловая ветвь» характерно наличие крупного остатка материнской частицы [3], что обуславливает различие размеров частиц CS в левой и правой частях графика. Высота низких столбиков, представляющих преимущественно фрагменты, снижается с уменьшением размера материнских частиц (т4). Ранее в [13] также регистрировали снижение размеров частиц-фрагментов при уменьшении размера материнской частицы.

Аэрогелевые частицы типа ARO и AEO круглой и кометообразной формы имеют ажурную разреженную структуру, состоят из цепочек наноразмерных сферул nS и типично характеризуются локальным соотношением атомов O/Ti $3.9 \div 4.1$ (см. табл. 5). Диаметры сферул находятся в диапазоне $25 \div 100$ нм, а их счётные распределения описы-

ваются логарифмически-нормальным законом (см. табл. 2). Распределения частиц ARO и AEO по размерам также удовлетворительно описываются логарифмически-нормальным законом (см. табл. 2). При этом максимальный размер (длинная ось) объектов AEO может достигать 13 мм. Объекты ARO наиболее многочисленны среди CS, ARO и AEO, и их штучная доля равна $47 \div 87$ % (табл. 3). Массовая доля $(1 - M_{CS}/M_{ox}^{theor})$ наноструктурированных аэрогелей ARO и AEO составляет $0.52 \div 0.98$ от всех КПП, в среднем 0.75 ± 0.06 (см. табл. 4). Физическая плотность объектов ARO и AEO оценена величиной 0.8 ± 0.1 г/см³. Структура, плотность и размеры аэрогелевых объектов определяют закономерности их движения в воздухе.

Следует отметить, что данные табл. 2–4 имеют оценочный характер, поскольку получены в условиях конкретных экспериментов, особенность которых — диапазон размеров материнских частиц $350 \div 460$ мкм и возможные потери частиц-продуктов вследствие осаждения на стенки трубы. Тем не менее полученные данные могут быть использованы для описания ряда процессов с участием дисперсной фазы. Так, функции распределения частиц по размерам и плотности будут востребованы при расчетах осаждения и распространения оксидного аэрозоля в атмосфере. Размеры и масса сферул необходимы для расчета удельной поверхности аэрозоля, которая определяет его каталитическую активность. При этом из таблиц следует выбирать опыты, условия проведения которых ближе соответствуют условиям рассчитываемого процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты демонстрируют закономерности образования дисперсного оксида как неотъемлемой части механизма горения и дают основу для математического моделирования процессов горения и фрагментации частиц титана, а также для описания движения и распространения аэрозоля диоксида титана в атмосфере.

Показано, что целевой продукт — высокодисперсные оксидные частицы — существует в форме макроскопических наноструктурированных аэрогелевых объектов. Масса аэрогеля тем больше, чем меньше масса компактных частиц-остатков горения материнских частиц

и их фрагментов. Учитывая результаты [3] по смене режима фрагментации в зависимости от размера материнских частиц, считаем, что для повышения массового выхода наноразмерного оксида следует использовать горящие частицы размером менее 250 мкм. Поэтому следующим этапом работы должно стать исследование агломерации титана в составе смесевых топлив и поиск рецептур, генерирующих агломераты размером не более 250 мкм при как можно большем содержании титана в топливе.

Авторы выражают благодарность О. Н. Житнической (гранулометрический анализ), Я. Л. Лукьянову (SEM- и EDS-анализы), Д. Ю. Беляевой и В. В. Карасёву (сканирование и фотографирование частиц), А. М. Бакланову (идея использования фольги для переноса частиц под СЭМ), В. Е. Зарко за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачёв В. С., Коротков А. И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972.
2. Брейтер А. Л., Мальцев В. М., Попов Е. И. Модели воспламенения металлов // Физика горения и взрыва. — 1977. — Т. 13, № 4. — С. 558–570.
3. Глотов О. Г., Белоусова Н. С., Суродин Г. С. Горение крупных монолитных частиц титана в воздухе. I. Экспериментальные методики, время горения и режимы фрагментации // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 6. — С. 20–31. — DOI: 10.15372/FGV20210603.
4. Полетаев Н. И., Золотко А. Н., Дорошенко Ю. А. Дисперсность продуктов сгорания металлов в ламинарном пылевом факеле // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 2. — С. 30–44.
5. Смирнов Б. М. Аэрогели // Успехи физ. наук. — 1987. — Т. 152, № 1. — С. 133–157. — DOI: 10.3367/UFNr.0152.198705e.0133.
6. Glotov O. G., Belousova N. S., Surodin G. S., Zarko V. E. Combustion characteristics of coarse titanium particles in air // 49th Int. Annu. Conf. of ICT: Energetic Materials. Synthesis, Processing, Performance. Karlsruhe, Germany, June 26–29, 2018. — P. 111(1–14).
7. Glotov O. G., Belousova N. S., Surodin G. S., Zarko V. E. Combustion characteristics of coarse titanium particles in air // High Energy and Special Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application: Book of Abstr. XIV Int. Workshop «HEMs-2018». — Tomsk: House of Tomsk State Univ., 2018. — P. 35–38.
8. Belousova N. S., Glotov O. G., Surodin G. S. Fragmentation and formation of condensed products upon combustion of titanium particles in air // 50th Int. Annu. Conf. of ICT: Energetic Materials — Past, Present and Future. Karlsruhe, Germany, June 25–28, 2019. — P. 13(1–14).
9. Belousova N. S., Glotov O. G., Guskov A. V. Study of the free falling particles trajectory at the burning monolithic titanium particles // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — V. 1214. — 012010. — P. 1–7. — <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1214/1/012010>.
10. Belousova N. S., Glotov O. G., Surodin G. S. Fragmentation and formation of the condensed products during combustion of titanium particles in air // 8th Eur. Conf. for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS 2019), Spain, Madrid, 1–4 July, 2019. — P. 1–10. — DOI: 10.13009/EUCASS2019-258. — <https://www.eucass.eu/index.php/component/docindexer/?task=download&id=5905>.
11. Glotov O. G., Belousova N. S., Reshetnikov I. V., Karasev V. V., Surodin G. S. Oxide products of the titanium particles burning in air // High Energetic Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Applications: Book of Abstr. XV Int. Workshop «HEMs-2019», Monaco (Principality of Monaco), 28–31 October, 2019. — P. 8–13. — <https://elibrary.ru/item.asp?id=41503000&>.
12. Захаров Р. С., Глотов О. Г. Характеристики горения пиротехнических композиций с порошкообразным титаном // Вестн. НГУ. Сер. Физика. — 2007. — Т. 2, № 3. — С. 32–40.
13. Глотов О. Г. Горение сферических титановых агломератов в воздухе. II. Результаты экспериментов // Физика горения и взрыва. — 2013. — Т. 49, № 3. — С. 58–71.
14. Глотов О. Г. Воспламенение и горение частиц титана. Экспериментальные методы исследования и результаты // Успехи физ. наук. — 2019. — Т. 189, № 2. — С. 135–171. — DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.04.038349>.
15. Glotov O. G., Zarko V. E. Formation of nanosized products in combustion of metal particles // Energetic Nanomaterials: Synthesis, Characterization, and Application. — Elsevier, 2016. — P. 285–321.
16. Aerosol Calculator Program [Электронный ресурс]. — <http://cires.colorado.edu/jimenez-group/Reference/aerocalc.zip/www.cheresources.com/che-links/content/particle-technology/aerosol-calculator-program> — 2012 (дата обращения: 6.12.2021).
17. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. — М.: Мир, 1982.

18. **Тейлор Д.** Введение в теорию ошибок. — М.: Мир, 1985.
19. **Программа СЕТКА** делит фото на части [Электронный ресурс]. — 2018. — <https://bombina.com/setka.htm> (дата обращения: 6.12.2021).
20. **Glotov O. G.** Image processing of the fractal aggregates composed of nanoparticles // Russ. J. Phys. Chem. A. — 2008. — V. 82, N 13. — P. 2213–2218. — DOI: 10.1134/S0036024408130098.
21. **Градус Л. Я.** Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. — М.: Химия, 1979.
22. **ScopePhoto** Image Software Ver. 3.1.386 [Электронный ресурс]. — 2009. — http://labx.narod.ru/documents/scope_photo_image_software.html.
23. **Глотов О. Г., Зырянов В. Я.** Конденсированные продукты горения алюминизированных топлив. I. Методика исследования эволюции частиц дисперсной фазы // Физика горения и взрыва. — 1995. — Т. 31, № 1. — С. 74–80.
24. **Molodetsky I. E., Dreizin E. L., Vicenzi E. P., Law C. K.** Phases of titanium combustion in air // Combust. Flame. — 1998. — V. 112, N 4. — P. 522–532. — DOI: 10.1016/S0010-2180(97)00146-6.
25. **Физико-химические свойства окислов:** справочник / под ред. Г. В. Самсонова. — 2-е изд. — М.: Металлургия, 1978.

Поступила в редакцию 04.03.2021.

После доработки 07.12.2021.

Принята к публикации 26.01.2022.