

УДК 66.088, 537.523, 533.924, 539.23:621.793

ТЕМПЕРАТУРА ПОВЕРХНОСТИ ПОРОШКОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ЦЕПНЫМИ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМИ РЕАКЦИЯМИ, ИНИЦИИРУЕМЫМИ ИЗЛУЧЕНИЕМ ГИРОТРОНА В СМЕСЯХ Pd + Al₂O₃

© 2022 г. Е. В. Воронова^а, *, А. В. Князев^а, А. А. Летунов^а,
В. П. Логвиненко^а, Н. Н. Скворцова^а, В. Д. Степахин^а

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991 Россия

*E-mail: voronova.elena@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 06.07.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

Представлены результаты определения температуры поверхности порошков в экспериментах по плазмохимическому синтезу структур микро- и наноразмеров в смесях оксида алюминия Al₂O₃ и палладия Pd с разными концентрациями палладия. Полученные оценки температур поверхности (2400–3100 K) находятся между температурами плавления и кипения при атмосферном давлении компонент порошковой смеси Al₂O₃ и Pd, что создает подходящие условия для инициации самоподдерживающихся (цепных) плазмохимических реакций.

Ключевые слова: плазмохимия, гиротрон, синтез структур микро- и наноразмеров, измерение температуры поверхности порошков, планковская температура

DOI: 10.56304/S2079562922010407

1. ВВЕДЕНИЕ

В данной работе исследовался нагрев порошковых смесей Al₂O₃ + Pd с добавлением меламина при возбуждении в них разряда для создания каталитического субстрата с палладием на оксидном носителе, обладающего сверхвысокоразвитой поверхностью.

Для создания субстрата использовался ранее разработанный в ИОФ РАН плазмохимический метод синтеза структур микро- и наноразмеров со сложным химическим составом и чрезвычайно развитой поверхностью [1–3]. (Такие структуры могут служить эффективными каталитическими средами для трансформации углеводородов, в том числе, в водородной энергетике.) Метод заключается в инициации микроволнового разряда, возникающего при облучении смеси порошков металл – диэлектрик мощным импульсом гиротрона. Разряд, в свою очередь, возбуждает цепные самоподдерживающиеся реакции, в результате которых происходит создание субстрата. Эксперименты проводятся в воздухе или азоте при давлениях близких к атмосферному. Выход реакций синтеза может быть значительно увеличен добавлением небольших количеств органических примесей [2].

Оценка термических условий на поверхности реагирующей смеси является одним из важных

диагностических методов в данных экспериментах. В частности, измерения температуры показали, что реакции инициируются в области температур поверхности смеси между температурами плавления и кипения палладия и оксида алюминия.

2. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАНКОВСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Спектр теплового излучения объекта с произвольной излучательной способностью $\epsilon(\lambda, T)$ описывается выражением

$$I = \epsilon C_1 \lambda^{-5} \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1}, \quad (1)$$

где $C_1 = 37418$ Вт мкм⁴/см², $C_2 = 14388$ мкм град – постоянные Вина, длина волны – в микрометрах, интенсивность – в Вт/(см² мкм).

Для области Вина, где $e^{C_2/\lambda T} \gg 1$, после преобразования получаем

$$\ln(\epsilon C_1) - \frac{C_2}{\lambda T} = \ln(\lambda^5 I). \quad (2)$$

Для серого тела ($\epsilon = \text{const}$) это выражение является уравнением прямой в плоскости (x, y), где $x = \ln(\lambda^5 I)$ и $y = C_2/\lambda$, наклон которой определя-

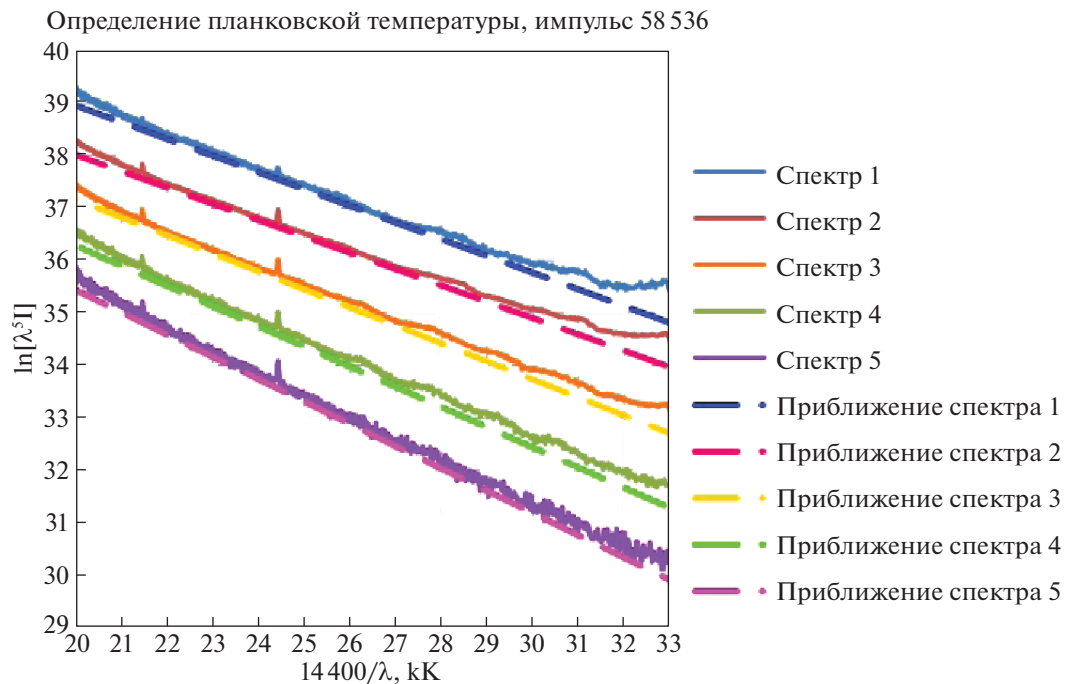


Рис. 1. Спектры излучения в импульсе 58536 (Pd 1% + Al₂O₃).

ется температурой. При наличии атомных линий и молекулярных полос выражение (2) — это нижняя касательная к графику спектра в этих, так называемых виновских, координатах, по наклону которой сразу можно определить температуру излучателя в случае, если графическая зависимость спрямляется, т.е., объект является серым телом [4].

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже представлены результаты определения температур нижней поверхности смеси порошков указанным способом во время разрядов в смесях Pd с Al₂O₃ в разных пропорциях (1, 5, 10% Pd) по последовательным спектрам, регистрируемым спектрометром AvaSpec 2048 фирмы Avantes, мертвое время которого пренебрежимо мало в сравнении с минимальной экспозицией. Спектрометр регистрировал оптическое излучение в видимом диапазоне от нижней поверхности лежащего на дне реактора порошкового слоя тол-

щиной 1–2 мм, облучаемого снизу мощными микроволновыми импульсами.

На рис. 1 показаны спектры излучения плазмы в импульсе 58536 (1% Pd, длительность импульса гиротрона 4 мс, мощность 250 кВт), построенные в виновских координатах. Изображены спектры, зарегистрированные с экспозицией 1.1 мс, с задержками 0 (спектр 1), 1.1 (спектр 2), 2.2 (спектр 3), 3.3 (спектр 4), 5.5 (спектр 5) мс от начала импульса гиротрона. Поскольку для вычисления температуры значим только лишь угол наклона касательной приближающей прямой, для удобства восприятия, спектры были разнесены вдоль оси ординат на всех трех рисунках.

На рис. 2 представлены спектры излучения плазмы в импульсе 58548 (5% Pd, длительность импульса гиротрона 4 мс, мощность 250 кВт). Изображены спектры, зарегистрированные через 1.1 (спектр 2), 2.2 (спектр 3), 3.3 (спектр 3), 4.4 (спектр 4), 5.5 (спектр 5) мс после начала импульса гиротрона.

На рис. 3 изображены спектры излучения плазмы в импульсе 58471 (10% Pd, длительность импульса гиротрона 4 мс, мощность 250 кВт). Представлены спектры, зарегистрированные через 0 (спектр 1), 2.5 (спектр 2), 5 (спектр 3), 5.5 (спектр 4), 7 (спектр 5) мс после начала импульса гиротрона.

В табл. 1 приведены результаты измерения температуры поверхностей смесей (Δt_1 — задержка регистрации первого представленного спектра

Таблица 1. Параметры порошков

Смесь порошков	% Pd	Δt_1 , мс	t_1 , мс	T_1 , кК	T_5 , кК
Pd + Al ₂ O ₃	1	0	1.1	2.9 ± 0.2	2.7 ± 0.2
Pd + Al ₂ O ₃	5	1.1	1.1	2.8 ± 0.2	2.6 ± 0.2
Pd + Al ₂ O ₃	10	0	2.5	2.8 ± 0.2	2.7 ± 0.2

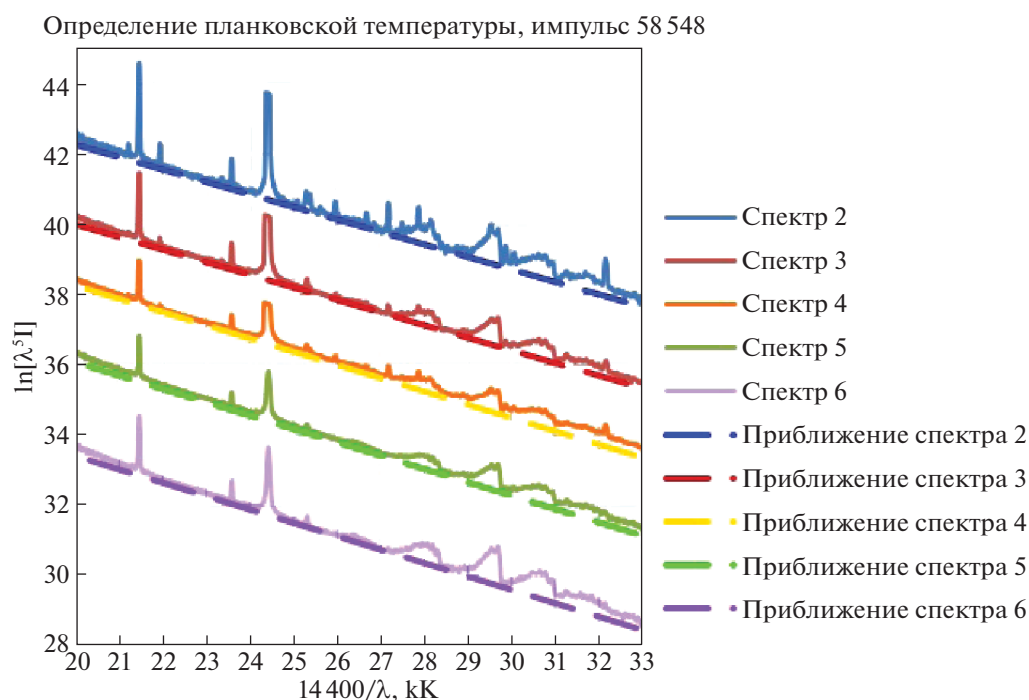


Рис. 2. Спектры излучения в импульсе 58 548 (Pd 5% + Al₂O₃). Интенсивность излучения в спектре № 1 была недостаточной для вычисления температуры.

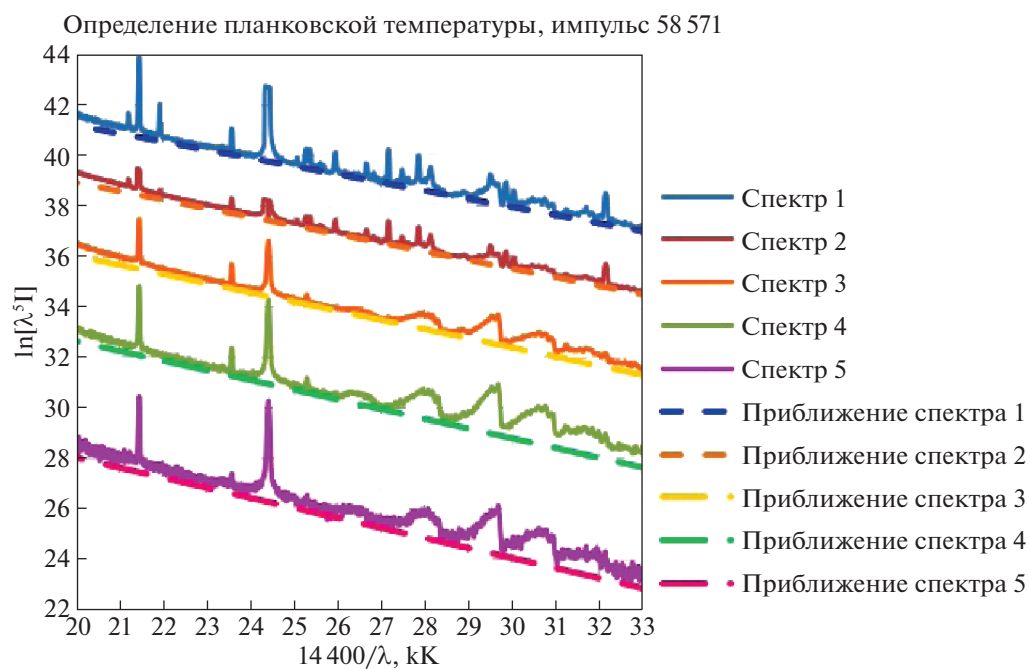


Рис. 3. Спектры излучения в импульсе 58 571 (Pd 10% + Al₂O₃).

относительно начала импульса гиротрона, t_1 — время экспозиции для каждого спектра в данном разряде, T_1 — температура, определенная по первому рассматриваемому спектру, T_5 — температура, определенная по последнему спектру).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, исходя из экспериментально зарегистрированных спектров видимого диапазона в плазмохимических экспериментах по синтезу катализаторов Pd/оксидный носитель в смесях Pd +

+ Al_2O_3 с добавлением меламина, проведены расчеты планковской температуры нижней поверхности порошковых смесей. Полученные оценки температур в различные моменты времени в течение разряда для экспериментов с 1–10% Pd в смеси, находятся в диапазоне 2400–3100 К. Как показали эти эксперименты, для стадии инициации процессов синтеза при данном составе смеси характерна область температур выше фазового перехода плавления (Pd – 1827 К, Al_2O_3 – 2320 К) и вблизи кипения (Pd – 3382 К, Al_2O_3 – 3253 К, при атмосферном давлении) двух основных компонентов смеси.

Эта работа является одним из первых результатов обработки большого массива данных, полученных в конце 2020 г., по синтезу структур микро- и наноразмеров со сложным физико-химическим составом и чрезвычайно развитой поверхностью в разрядах в смесях порошков металл – диэлектрик, иницируемых импульсным излучением мощного гиротрона. В будущих экспериментах, наряду с определением температуры нижней поверхности порошковых образцов, планируется проведение аналогичных измерений температуры их чрезвычай-

но интересной, но технически менее доступной верхней поверхности.

Работа выполнена в рамках реализации федерального проекта “Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Сковцова Н.Н., Степахин В.Д., Малахов Д.В., Сорокин А.А., Батанов Г.М., Борзосексов В.Д., Глявин М.Ю., Колик Л.В., Кончечков Е.М., Летунов А.А., Петров А.Е., Рябкина И.Г., Сарксян К.А., Соколов А.С., Смирнов В.А., Харчев Н.К. // Изв. высш. уч. завед. Радиофизика. 2015. Т. 58. № 9. С. 779.
2. Skvortsova N.N., Shishilov O.N., Akhmadullina N.S., Konchekov E.M., Letunov A.A., Malakhov D.V., Obraztsova E.A., Stepakhin V.D. // Ceram. Int. 2021. V. 47 (3). P. 3978.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.262>
3. Борзосексов В.Д., Сковцова Н.Н., Соколов А.С. // Современные средства диагностики плазмы и их применение. Сб. тез. док. XII конф. 2020. Москва: НИЯУ МИФИ. 16–18 декабря 2020. С. 146.
4. Магунов А.Н. // Научное приборостроение. 2010. Т. 20. № 3. С. 22.

Temperature of the Surface of Powders in Experiments with Chain Plasmachemical Reactions Initiated by the Radiation of a Gyrotron in Pd + Al_2O_3 Mixtures

E. V. Voronova^{1, *}, A. V. Knyazev¹, A. A. Letunov¹, V. P. Logvinenko¹,
N. N. Skvortsova¹, and V. D. Stepakhin¹

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: voronova.elena@gmail.com

Received June 29, 2021; revised July 6, 2021; accepted July 8, 2021

Abstract—Results are presented of the determination of the temperature of the surface of powders in experiments on plasmachemical synthesis of micro- and nanosize structures in the mixtures of aluminum oxide Al_2O_3 and palladium Pd with different palladium concentrations. The obtained estimates of surface temperature (3100–2400 K) are between the melt and boiling points at atmospheric pressure of the components of the powder mixture Al_2O_3 and Pd, which creates suitable conditions for the ignition of self-sustained (chain) plasmachemical reactions.

Keywords: plasma chemistry, gyrotron, synthesis of micro- and nanosize structures, measurement of the temperature of powder surface, Planck temperature