

УДК 536.521.3:546.26:536.46:533.6

ФОТОЭМИССИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССАХ

*Баранышин Е.А.¹, Пенязьков О.Г.¹, Миронов В.Н.¹, Кривошеев П.Н.¹,
Каспаров К.Н.², Белозерова Л.И.²*

*¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь*

*²Институт физики имени Б.И. Степанова
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Беларусь*

Введение. Измерение высоких температур в процессах горения, где протекают всевозможные физико-химические превращения, всегда вызывает определенные трудности у исследователей. Для этих целей, как правило, используют оптические методы измерения температуры. Но в этом случае необходимо обладать информацией об оптических свойства объекта, которые зачастую неизвестны и, в свою очередь, могут зависеть от температуры.

В данной работе описан фотоэмиссионный метод измерения температуры с помощью импульсного фотоэмиссионного пирометра, который позволяет бесконтактно с временным разрешением до 1 мкс проводить измерение температуры, скорость изменения которой может достигать 10^8 К/с, причем излучательная способность объекта слабо влияет на результат измерения [1].

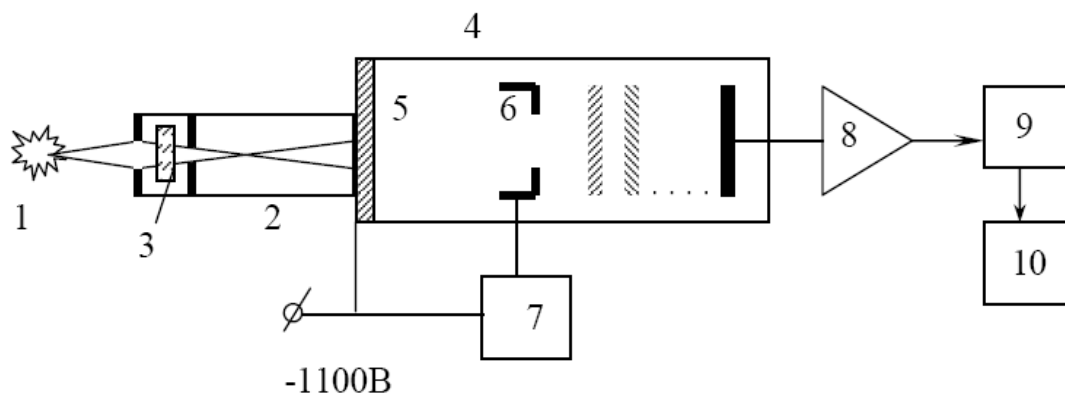
Для демонстрации возможностей описанного прибора приведена экспериментально зарегистрированная динамика изменения температуры наночастиц углеродной сажи, образующихся за отраженной ударной волной. Исследование выполнено для смеси этилен–аргон в диапазоне температур 2000 – 3500 К и давлений 7,0 – 11,5 бар. Также представлены результаты исследования процесса гетерогенного горения насыпок микрочастиц железа 63 – 90 мкм в кислороде при давлениях 3,0 – 17,5 бар.

Фотоэмиссионный метод измерения температуры. Фотоэмиссионный метод является одним из видов пирометрии спектрального распределения, где температура определяется по отношению потоков суммарной радиации. Данный метод основан на анализе распределения по энергиям электронов внешнего фотоэффекта, которые выбиваются из фотокатода излучением, испускаемым исследуемым объектом. Из закона Эйнштейна для фотоэффекта следует, что распределение по энергиям фотоэлектронов определяется величиной энергии кванта электромагнитного излучения. С увеличением энергии кванта монохроматического излучения увеличиваются максимальная и наиболее вероятная скорости в максвелловском распределении фотоэлектронов вблизи фотокатода. Различными техническими методами и средствами можно зарегистрировать и измерить изменение энергетического распределения. Это можно осуществить, например, при помощи фотоэлектронного прибора по напряжениям отсечки фототоков в

тормозящем поле для монохроматических световых потоков. В этом случае детектором излучения и одновременно анализатором изменения энергетического распределения фотоэлектронов может служить фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), в прикатодной области которого сепарацию фотоэлектронов по энергиям осуществляют тормозящим полем модулятора.

Тепловое излучение нагретой поверхности вызывает фотоэффект, при котором наиболее вероятная скорость фотоэлектронов такая же, как и при освещении фотокатода излучением какой-то одной длиной волны. Эта длина волны является характерной для излучения тела при данной температуре и определяется по параметру производимого ею фотоэффекта. Таким параметром является соотношение количества фотоэлектронов различных энергий, измеренных в постоянном тормозящем поле и в его отсутствии. Это отношение k не изменяется с изменением светового потока в пределах линейности световой характеристики ФЭУ. С уменьшением длины волны излучения напряжение отсечки фототока, измеряемое на уровне темновых токов фотоэлектронного прибора, увеличивается. Аналогичный эффект имеет место с ростом температуры, поскольку согласно закону Вина с увеличением температуры максимальные значения спектральной плотности энергетической яркости абсолютно черного тела смещаются в сторону коротких длин волн. Таким образом, смещению Вина соответствует смещение максимума распределения фотоэлектронов, вызванных тепловым излучением. Это обстоятельство позволяет измерять температуру по изменению энергетического распределения фотоэлектронов вызванных излучением исследуемого объекта. Используя эталонные температурные излучатели, можно построить градуировочную кривую $T(k)$ при постоянном значении тормозящего напряжения ФЭУ. С этой градуировочной кривой сравниваются значения параметра $k(t)$, полученные при регистрации излучения объекта, для вычисления его температуры в каждый момент времени $T(t)$ [2].

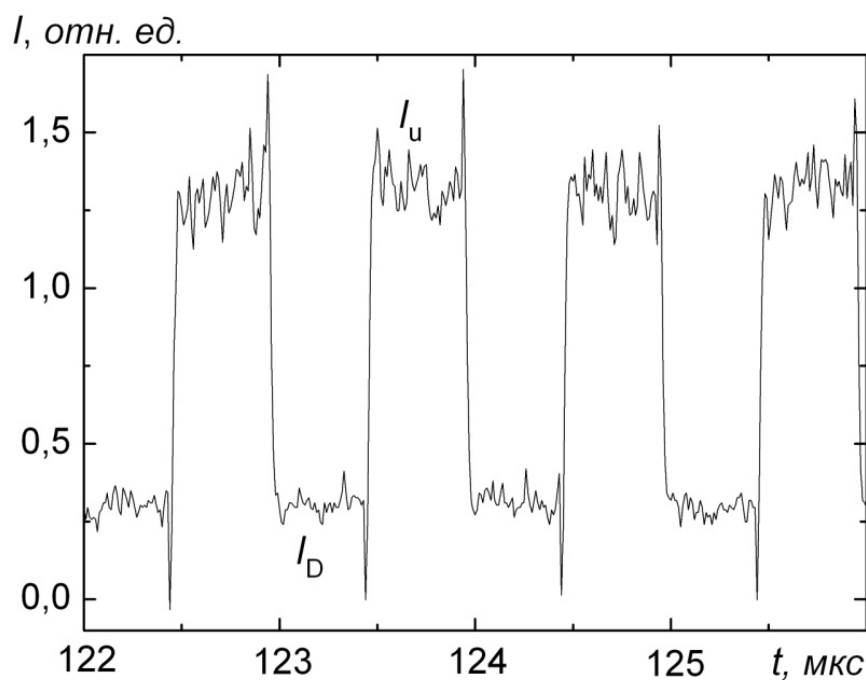
Предложенная методика измерения температуры была реализована нами следующим образом. На рис. 1 представлена структурная схема импульсного фотоэмиссионного пирометра. Детектором излучения и одновременно анализатором энергии фотоэлектронов в нем служит фотоэлектронный умножитель ФЭУ 114, на модулятор которого от генератора подаются прямоугольные импульсы длительностью 1 мкс и напряжением -0,6 В. Это позволяет модулировать поток фотоэлектронов с частотой 1 МГц и получать временное разрешение регистрации температуры 1 мкс. Ускоряющее напряжение ФЭУ составляет 1100 В, регистрируемый осциллографом сигнал ФЭУ имеет двухуровневый вид (рис. 2). Нижний уровень соответствует периодам времени, когда на модуляторе присутствует тормозящее напряжение. Отношение уровней в каждый момент времени регистрации позволяет получить значения параметра $k(t) = I_u(t)/I_d(t)$, который сравнивается с выполненной при помощи температурных ламп градуировочной кривой (рис. 3) для получения значений температуры. Получение градуировочной кривой состоит в определении зависимости $T(k)$ для эталонных температурных источников света. В качестве таких источников нами использовались специальные температурные лампы типа СИ6-40 и ТРШ-2850-3000.



1 – излучающий объект, 2 – коллиматор, 3 - нейтральный светофильтр (используется при необходимости ослабления светового потока), 4 – ФЭУ, 5 – фотокатод, 6 – модулятор, 7 – генератор прямоугольных импульсов, 8 – усилитель, 9 – цифровой осциллограф, 10 – компьютер

Рис. 1. Структурная схема импульсного фотоэмиссионного пирометра

Таким образом, методика измерения температуры включает в себя регистрацию модулированного сигнала интенсивности излучения объекта, измерение его уровней, вычисление их отношения $k(t)$ и нахождении по предварительно построенной градуировочной кривой искомых значений температуры $T(t)$.



I_u – верхний уровень, I_d – нижний уровень

Рис. 2. Модулированный сигнал интенсивности излучения объекта, регистрируемый импульсным фотоэмиссионным пирометром

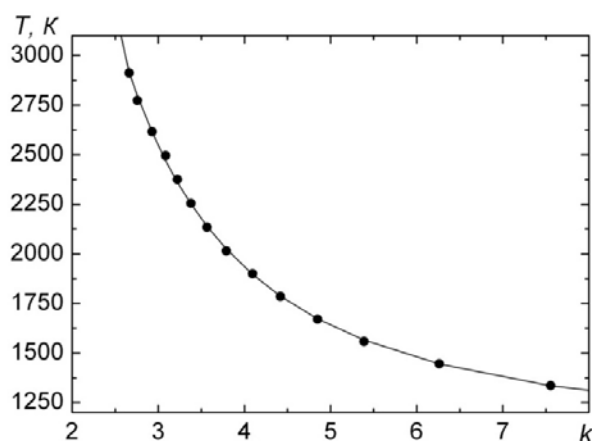


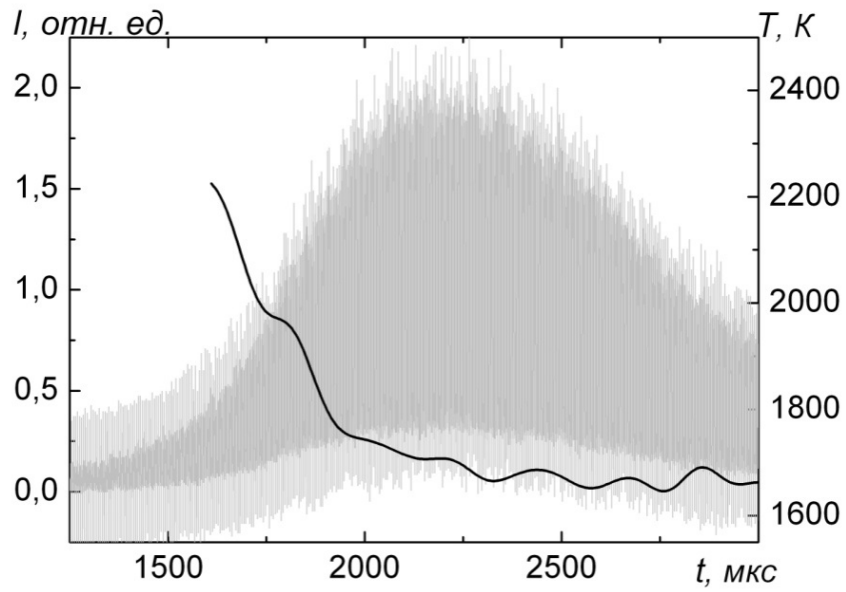
Рис. 3. Градуировочная кривая импульсного фотоэмиссионного пирометра

Измерение температуры частиц углеродной сажи. Фотоэмиссионный метод измерения температуры с микросекундным временным разрешением был использован нами для измерения температуры частиц углеродной сажи, образующейся в процессе пиролиза в ударной трубе.

Исследование проводилось в ударной трубе из нержавеющей стали длиной 7,1 м и диаметром 50 мм. В качестве рабочего газа использовалась смесь этилен–аргон (5% C_2H_4 – 95% Ar), а в качестве толкающего — гелий. Формирование сажи происходило в результате пиролиза газовой смеси за отраженной ударной волной. Эксперименты выполнялись для температуры пиролиза от 2000 до 3500 К и давления за отраженной ударной волной от 7,0 до 11,5 бар. Параметры газовой смеси в рабочей камере рассчитывались по измерению скорости падающей и отраженной ударных волн [3, 4] с помощью высокочастотных датчиков давления. Регистрация излучения частиц сажи осуществлялась через кварцевое окно диаметром 5 мм, выполненное в боковой стенке трубы на расстоянии 300 мм от отражающей поверхности. Характерный вид модулированного сигнала интенсивности излучения частиц углеродной сажи, регистрируемый импульсным фотоэмиссионным пирометром в процессе пиролиза из ударной трубы и рассчитанная по нему температура, приведены на рис. 4.

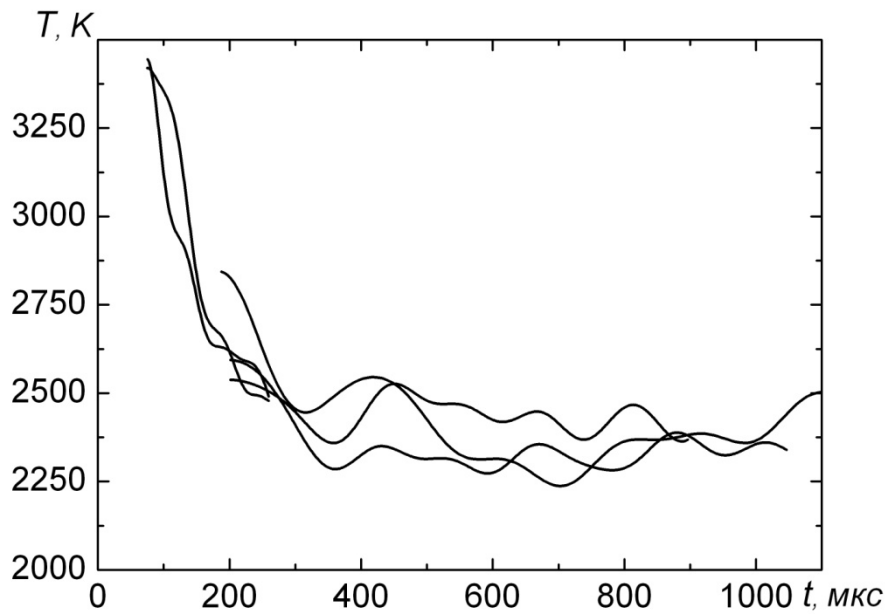
В результате выполненного исследования оказалась, что для всего рассмотренного диапазона температур пиролиза, температура частиц углеродной сажи ведет себя схожим образом. В начальный момент измерения она значительно превышает температуру пиролиза (в отдельных экспериментах до 900 К), а затем со скоростью $\sim 10^6$ К/с снижается и выходит на квазистационарный уровень, который ниже температуры пиролиза на ~ 500 К (рис. 5). Такое поведение температуры соответствует результатам работ [5, 6] и на наш взгляд связано с процессами фазового перехода, протекающих при росте частиц сажи. Сильный нагрев на начальной стадии обусловлен выделением скрытой теплоты фазового перехода при конденсации атомов углерода на первичных частицах сажи, а остывание вызвано радиационным теплообменом и взаимодействием с газовой средой.

Эксперименты, выполненные при одинаковых начальных условиях, свидетельствуют о хорошей воспроизводимости получаемых результатов (рис. 5). Погрешность измерения температуры с временным разрешением 1 мкс в данном случае составила ~ 150 К.



$$T_{\text{пиролиза}} = 2150 \text{ K}$$

Рис. 4. Модулированный сигнал интенсивности излучения сажи и рассчитанная по нему температура



$$T_{\text{пиролиза}} \sim 2870 \text{ K}$$

Рис. 5. Температура частиц сажи, измеренная в различных экспериментах с одинаковыми начальными условиями

Измерение температуры при горении насыпок микрочастиц железа в кислороде. С целью снижения пожаровзрывоопасности процессов, использующих газопылевые системы, необходимо определение условий воспламенения и горения в указанных системах, а также прогнозирование возможности переноса горения на элементы оборудования и магистралей. Инициировать горение в трубопроводе или энергетической установке может, например, скопление микрочастиц металлов [7, 8], при этом одним из важных критериев, определяющих возможность распространения процесса горения, возникающего в газопылевой системе является развиваемая при этом процессе температура. Эта информация актуальна для систем, в которых газовой фазой является кислород, особенно при повышенном давлении.

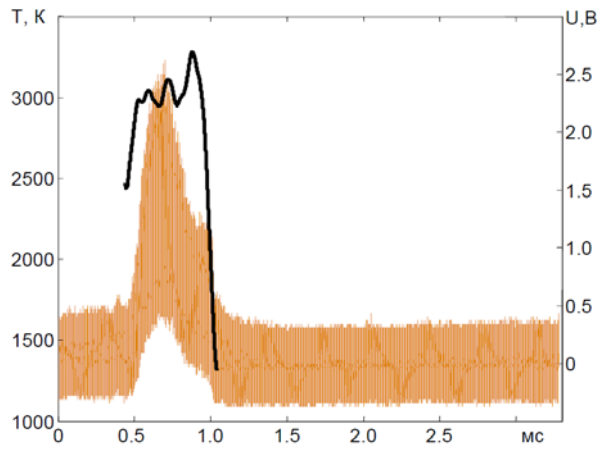
Исследовалось горение образцов в форме диска, моделирующих отложения частиц в углублениях технологических каналов. Образец частиц железа фракции 63 – 90 мкм располагался на подложке из нержавеющей стали вогнутой сферической формы, верхняя поверхность диска была плоской. Образец помещался в стальную камеру, в которую после предварительного вакуумирования подавался кислород (начальное давление от 3,0 до 17,5 бар). Процесс горения инициировался принудительным воспламенением частиц на периферии образца, излучение от исследуемого объекта через вертикально расположенный над образцом оптический канал (рис. 6), кварцевый штапик и световод поступало в фотоэмиссионный пирометр; временное разрешение пирометра в этих экспериментах составляло 5 мкс, а его поле зрения на поверхности насыпки имело диаметр от 2,2 до 3,1 мм (при диаметре образца 32 мм). Видеорегистрация процессов при горении частиц железа осуществлялась цифровой камерой Casio EX-F1 с частотой съемки 300 кадр/с.



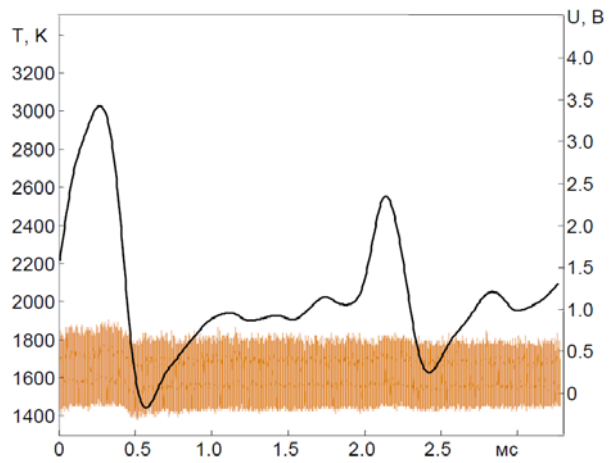
Рис. 6. Взаимное расположение дискового образца, поджигающего элемента (на правой границе образца), овального канала видео-регистрации (по центру) и оптического канала пирометра (трубка над образцом)

Измеренные фотоэмиссионным методом температуры процесса коррелируют с табличными данными по температурам плавления железа и его оксидов (1812 – 1856 К), а также с температурами кипения железа в интервале давлений кислорода от 3 до 11 бар, рассчитанными в приближении идеального газа и постоянной теплоты кипения.

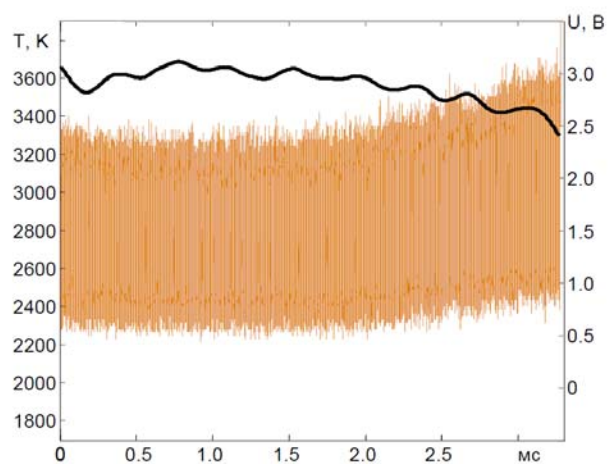
Благодаря высокой чувствительности фотоэмиссионного метода, позволяющей локализовать область наблюдения, зарегистрирована температура отдельных частиц, летящих со скоростью до 7 м/с и инициирующих поджиг поверхности порошка железа на начальных фазах процесса, которая равна 3000 – 3200 К (рис.7, а, б). Указанные частицы являются брызгами железа и его оксидов, вылетающими из кипящего расплава. Существенный разогрев расплава обусловлен



A



B



B

Рис. 7. Фотографии процесса горения частиц железа в кислороде (слева); осциллограммы и температуры (черные кривые) процесса (справа): *a* – $t = 1,20$ с, $P = 3$ бар; *b* – $t = 2,0$ с, $P = 3$ бар; *v* – $t = 4,0$ с, $P = 11$ бар

низкой теплопроводностью насыпки твердых частиц (из-за их точечного контакта), вследствие чего значительная часть тепла, выделяющегося при сгорании порошка, остается в расплаве.

Обнаружена сильная зависимость продолжительности и интенсивности стадий горения от давления газовой фазы, в частности интенсивность искрообразования с ростом давления уменьшается, разогрев центрального куполообразного образования ускоряется, а максимальная температура расплава возрастает. Полученные с помощью пирометра данные по интенсификации процесса горения с ростом давления кислорода подтверждены повышением полноты сгорания металла (при возрастании давления от 3 до 11 бар отношение Fe^{3+}/Fe^{2+} в оксиде увеличивается от 0,9 до 3).

Заключение. В работе представлен фотоэмиссионный метод измерения температуры, позволяющий с высоким временным разрешением (до 1 мкс) осуществлять регистрацию температуры в быстропротекающих тепловых процессах. С помощью описанного импульсного фотоэмиссионного пирометра исследована динамика изменения температуры наночастиц углеродной сажи, образующихся при пиролизе этилена за отраженной ударной волной, а также получена информация по температурам на различных стадиях гетерогенного горения микрочастиц железа в кислороде, позволившая описать закономерности и предположить возможные механизмы указанного процесса.

Литература

1. Каспаров К.Н. Фотоэмиссионные измерения температуры. Два подхода к определению методической погрешности / Измерительная техника. – 2004, № 8, с. 62.
2. Каспаров К.Н. Фотоэмиссионный анализ оптического излучения / Минск: Беларуская наука. – 2011, 178 с.
3. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах / М.: ГИФМЛ. – 1963, 175 с.
4. Gaydon A.G., Hurler I.R. The shock tube in high-temperature chemical physics / New York: Reinhold Pub. Corp. – 1963.
5. Жильцова И.В., Заслонко И.С., Карасевич Ю.К., Вагнер Х.Г. Неизотермические эффекты в процессе сажеобразования при пиролизе этилена за ударными волнами / Кинетика и Катализ. – 2000, Т. 41, № 1, с. 87.
6. Ishii K., Ohashi N., Teraji A., Kubo M. Soot formation in hydrocarbon pyrolysis behind reflected shock waves / 22nd international colloquium on the dynamics of explosions and reactive systems. [CD]. Minsk. 2009 July 27-31.
7. Leschevich V., Mironov V., Penyazkov O. Auto-ignition of metal particles in oxygen atmosphere // 22nd Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, July 27–31, Minsk, Belarus, 2009. – P. 69.
8. Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Rostaing J.-Ch. Autoignition domains of metal micro particles in oxygen atmosphere / Proc. 8th ISHPMIE. September 5–10, 2010, Yokohama, Japan.