

Семенов К.И.

*Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,
Проблемная научно-исследовательская лаборатория №1*

Исследование температуры и заряда частиц меди, получаемых в газоплазменном генераторе. Часть I. Эксперимент.

Экспериментально исследованы температура и заряд частиц меди, получаемых в газоплазменном генераторе: приведены описание экспериментальной установки, методов расчёта температуры и заряда, а также результаты измерений. Дан предварительный анализ полученных результатов.

Проблемы горения дисперсных топлив (в том числе, металлизированных), химическое реагирование в дисперсных системах и др. технологии тесно связаны с процессами электрообмена, которые активно изучаются уже длительное время как отечественными учёными [1], так и зарубежными [2]. Тем не менее, многие, в частности, экспериментальные, аспекты проблемы остаются не исследованными, например, наличие (величина и знак) заряда на нагретых частицах металла, исследование которого и было целью данной работы. Измерялась температура и заряд нагретых до температуры плавления частиц меди. Предварительные результаты были опубликованы в [3], где, например, при измерении температуры не была учтена теплоёмкость микрокалориметра [3, стр. 201], и сделана ошибка в знаке заряда, более корректные данные приведены в [4].

Нагретые частицы меди получались в газоплазменном генераторе [5], позволяющем получать частицы с большой частотой, до 100 в секунду, и начальной температурой до 1400К. Генератор состоял (см. рис. 1) из горелки (или плазматрона) 1, устройства подачи 2 диспергируемого материала 3. При непрерывной подаче стержневого материала в зону газоплазменного факела 4 происходит плавление разогретой части стержня и его диспергирование на отдельные частицы 5 в результате действия аэродинамической силы и силы тяжести. Температура получаемых частиц вычислялась, а также измерялась при помощи микрокалориметра, состоящего из наружного теплоизолирующего корпуса 6, внутреннего, выполненного из тонкой медной фольги, конуса 7, куда заливалось минеральное масло 8, и вставлялась термopара 9, присоединяемая к измерительному прибору 10. Заряд измерялся по стекающему через образцовое сопротивление току, при этом использовались цилиндр Фарадея, состоящий из внешнего 11 и внутреннего 12 проводящих оболочек, и измеритель малых токов (В2-16) 13. Поскольку микрокалориметр невозможно было поднести близко к пламени с целью измерения температуры частицы сразу после выхода их из пламени (это привело бы к большой ошибке из-за нагрева микрокалориметра вблизи пламени), то указанная температура вычислялась следующим образом. Оторвавшаяся капля металла (после отрыва уже - частица), массой m и тепло-

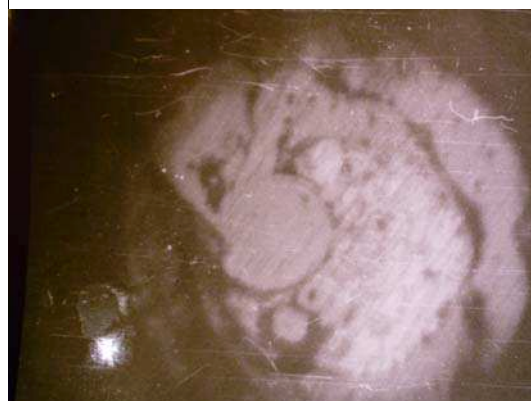
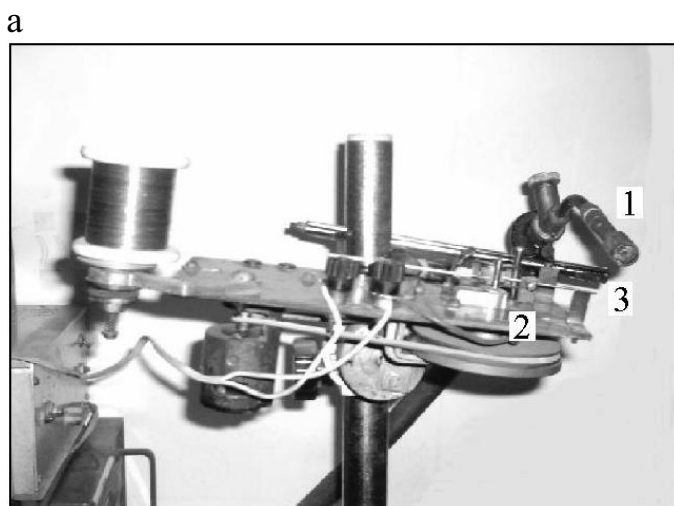
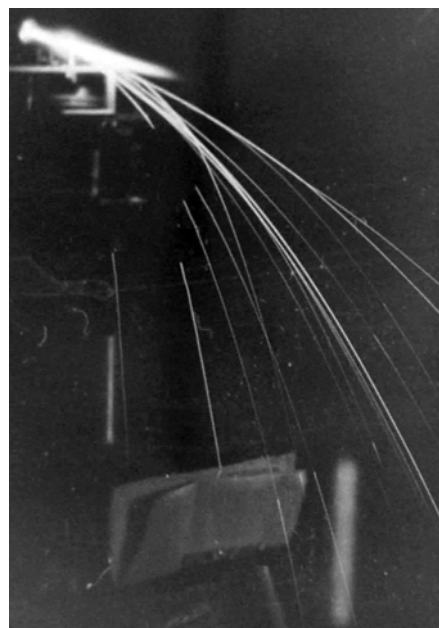
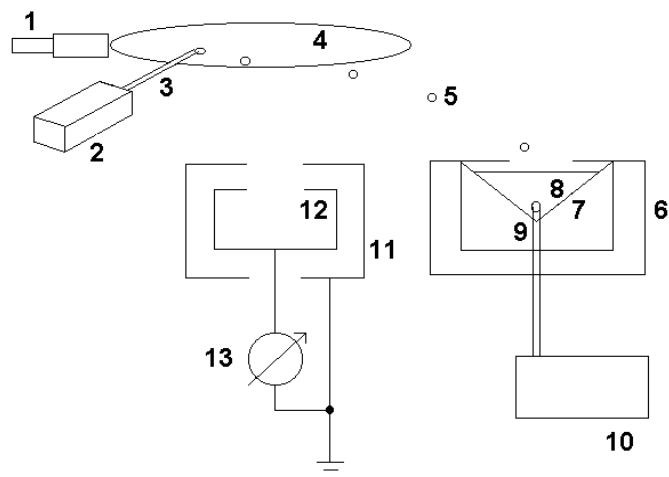


Рис. 1. а - схема установки по определению температуры и заряда МЧ, получаемых в газоплазменном генераторе; б, в, г – фотографии работающего генератора и треков частиц, генератора и микрошлифа частицы соответственно.

ёмкостью c , имеет температуру $T_{\text{ч}}$, которая сразу после отрыва практически равна температуре плавления. После отрыва частица движется ещё некоторое время в зоне факела, температура которого $T=1350^{\circ}\text{C}$. Профиль температур и скоростей факела считался П-образным. При этом радиационный поток тепла от факела к частице, с площадью поверхности S и температурой $T_{\text{ч}}$, можно считать несущественным, что справедливо для прозрачного пламени (использовалось слабо светящееся пламя пропана в кислороде). Излучение $dQ_{\text{э}}/dt$ частицы на стенки оценим на основании закона Стефана-Больцмана:

$$\frac{dQ_{\text{э}}}{dt} = \varepsilon_{\text{пр}} S \sigma (T_{\text{ч}}^4 - T_{\text{ст}}^4), \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент лучеиспускания, здесь равный коэффициенту излучательной способности частицы $\varepsilon_{\text{ч}}$.

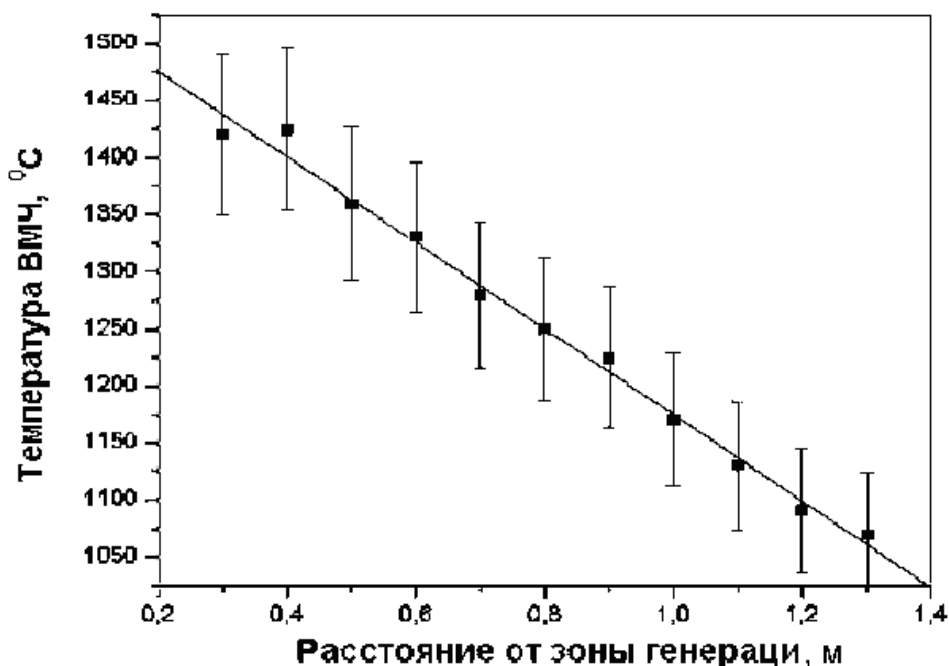


Рис.2. Зависимость температуры ВМЧ из меди со средним диаметром 200 мкм, полученные в горизонтальном пропано-воздушном факеле.

Конвективный тепловой поток $\frac{dQ_{\kappa}}{dt}$ определим в предположении изотропности температуры пламени на основании закона Ньютона

$$\frac{dQ_2}{dt} = \alpha S (T - T_q) \quad (2)$$

где α – коэффициент теплопередачи, который найдем, используя критерий Nu , $\alpha = \frac{\lambda \cdot Nu}{d}$ (λ и d – теплопроводность пламени и диаметр частицы, соответственно). $Nu = 2 + 0.6 Re^{1/2} Pr^{1/3} \approx 2$. Учитывая (1) и (2) запишем уравнение, описывающее изменение температуры частицы со временем

$$mc \frac{dT_q}{dt} = \alpha S (T - T_q) - \varepsilon_q \sigma S (T_q^4 - T_{cm}^4). \quad (3)$$

Для решения уравнение (3) дополнялось его начальными условиями $T(t=0)=T_0$. Для медных частиц диаметром 250-350 мкм расчётная температура при выходе из используемого факела, смеси пропана и воздуха, составила 1200°C. Решения уравнения (3) использовались при построении зависимости заряда частиц от их температуры.

Средняя температура получаемых частиц при дальнейшем их движении в воздухе измерялась экспериментально при их накоплении в микрокалориметре по изменению температуры масла. Расчёт производился на основании уравнения теплового баланса

$$m_m c_m (T_{m2} - T_{m1}) + C_k (T_{m2} - T_{m1}) = m_q c_c (T_q - T_{m2}), \quad (4)$$

где m_m – масса масла, используемого в калориметре; c_m – теплоёмкость масла; T_{m1} и T_{m2} – температура масла до и после сбора частиц соответственно; T_q –

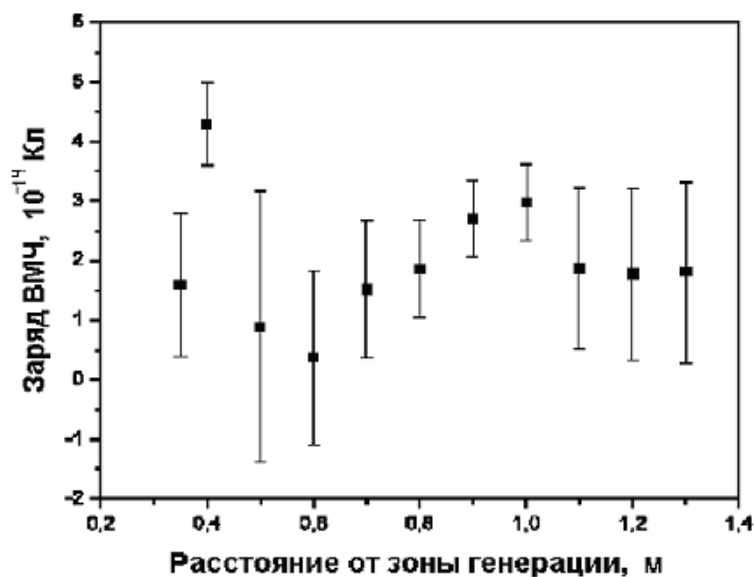


Рис. 3. Экспериментальная зависимость заряда ВМЧ из меди со средним диаметром 200 мкм от расстояния до зоны генерации.

средняя температура частиц перед попаданием в калориметр; C_k – теплоёмкость микрокалориметра (определялась опытным путём); $m_{\text{ч}}$ – масса частиц, остывших в калориметре; $c_{\text{ч}}$ – теплоёмкость частиц.

Так как ВМЧ имели высокую начальную температуру, то использование легкокипящей жидкости в качестве калориметрической за счёт испарения её части привело бы к повышению ошибки определения температуры. Микрокалориметр, как уже было сказано, был изготовлен из тонкой медной фольги, образующей конус, который наполнялся маслом, и помещался в корпус из пенопласта. Теплоёмкость калориметра составляла 8,7% от теплоёмкости масла, поэтому при расчёте учитывались обе теплоёмкости.

После измерений температуры частицы промывались в растворителе, взвешивались, затем проводился дисперсный анализ.

Заряд частиц определялся при помощи цилиндра Фарадея, состоящего из собирающей и экранирующей ёмкостей 11 и 12 рис. 1, с использованием электрометрического вольтметра постоянного тока ВК2-16. Погрешность прибора при измерении заряда составляла $6 \cdot 10^{-15}$ Кл.

Результаты измерения температуры частиц приведены на рис.2.

На рис. 3 и рис. 4 приведены результаты измерений заряда частиц от расстояния до зоны генерации и температуры. Таким образом, эксперимент показал, что частицы меди имеют положительный заряд, который слабо изменяется в процессе движения вне факела.

Очевидно, что электрообмен между поверхностью частицы (на рис. 1г приведена фотография микрошлифа, видно, что поверхность окисленная и неровная), эмитирующей электроны, и нагретым газом, происходит уже в пламени, содержащем радикалы. В холодном пламени пропана в начале горения обнаружены [6] соединения CH_2O , CH_3CHO , H_2O_2 , органические пероксиды CH_3OH ,

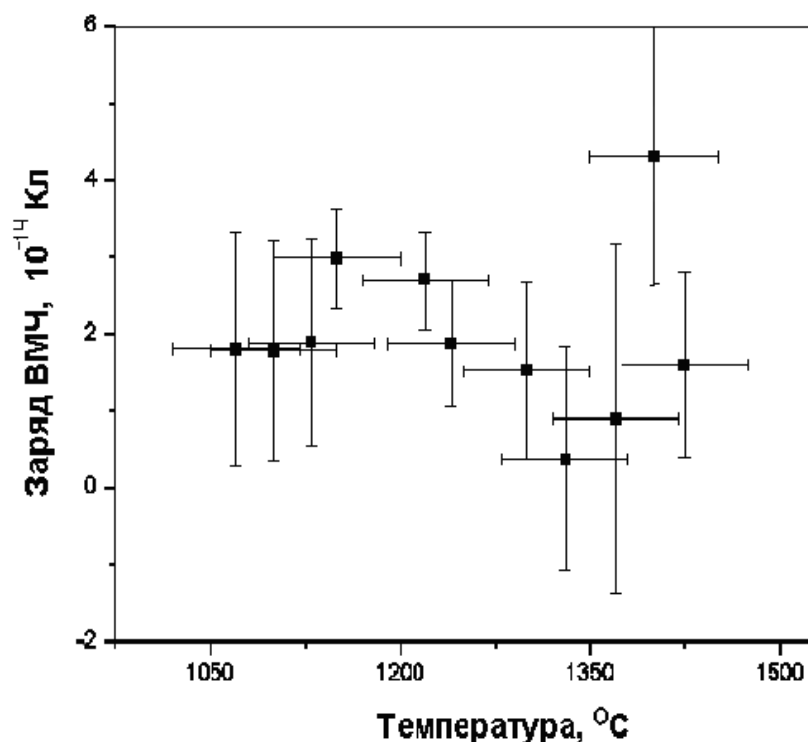


Рис. 4. Зависимость заряда от температуры для VMЧ из меди со средним диаметром 200 мкм, после генерации в воздушно-пропановом пламени.

C_3H_6 , C_2H_4 , H_2 , CO и HO_2 , а на дальнейших этапах окисления концентрация альдегидов растёт, а пероксидов падает. Процесс идёт при 550 К с накоплением в продуктах реакции CO_2 и CO . В горячем пламени происходит следующая цепочка реакций $C_3H_8 - C_3H_7 - (C_3H_6 + H) + C_2H_4 + CH_3 - CH_2O - HCO + CO$. Но, этот материал не даёт надёжного представления о всех звеньях превращений пропана, т.к. в нём отсутствуют данные о концентрациях атомов и радикалов. Приведенная схема описывает лишь последовательность превращений молекулы с тремя атомами углерода, при этом практически не затрагиваются реакции с участием кислорода. Концентрация молекул водорода в пламени доходит до 3%, и очень большой является концентрация паров воды. Таким образом, рассмотрение зарядки частиц в пламени наталкивается на трудности, связанные со сложными физико-химическими процессами, происходящими в нём. После выхода из пламени происходит электрообмен в холодном воздухе, расчёт которого в случае более горячих частиц приведен в [7], и который в применении к исследованным частицам будет применён в следующей части статьи.

Литература:

1. Флорко А.В. Оптические и электрические аспекты процесса горения дисперсных систем: Дис. ... д-ра. физ.-мат. наук: Одесса. – 1994. – 359 с.
2. Лаутон Дж., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

3. Суслов А.В. Тепло-электрофизические аспекты монодиспергирования металлов повышенной тугоплавкости: Дис. ... д-ра. физ.-мат.наук: Одесса. – 1998. – 322 с.
4. Семенов К.И. Тепло-электрофизические факторы эволюции высокотемпературных частиц в газе: Дис. ... к-та. физ.-мат.наук: Одесса. – 2005. – 149 с.
5. Суслов А.В., Лялин Л.А., Семенов К.И. Газоплазменное монодиспергирование металлов умеренной и повышенной тугоплавкости // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т.60., №4. – С.571-576.
6. Свойства неорганических соединений. Справочник // Ефимов А.И. и др. – Л.: Химия, 1983. – 392 с.
7. Semenov K.I., Lyalin L.A., Kalinchak V.V., Kopyt N.Kh., Chernenko A.S. Experimental research of thermoemission charging of metal particles// Ukrainian journal of physics. – 2008. – №11. – С. 1075-1079.

Семенов К.И.

Дослідження температури та заряду часток міді, що отримувалися в газоплазменому генераторі. Частина I. Експеримент.

АНОТАЦІЯ

Експериментально досліджено температуру та заряд часток міді, що отримані в газоплазменому генераторі: приведено опис експериментальної установці, методів розрахунку температури та заряду, а також результати вимірювань. Дано попередній аналіз отриманих результатів.

Semenov K.I.

Research of temperature and charge of particles of the copper received in gas-plasmas the generator. Part I. Experiment.

SUMMARY

The temperature and charge of particles of the copper received in gas-plasmas generator are experimentally investigated: the description of experimental installation, methods of calculation of temperature and a charge as well as results of measurements are resulted. The preliminary analysis of the received results is given.