

**Семенов К.И.**

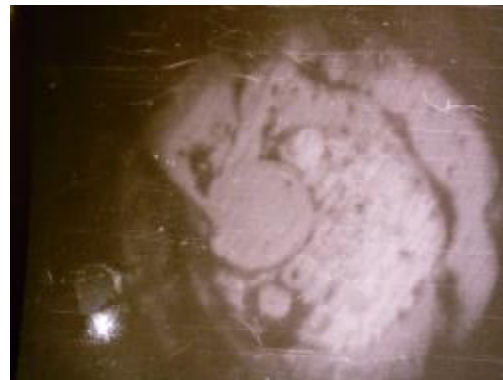
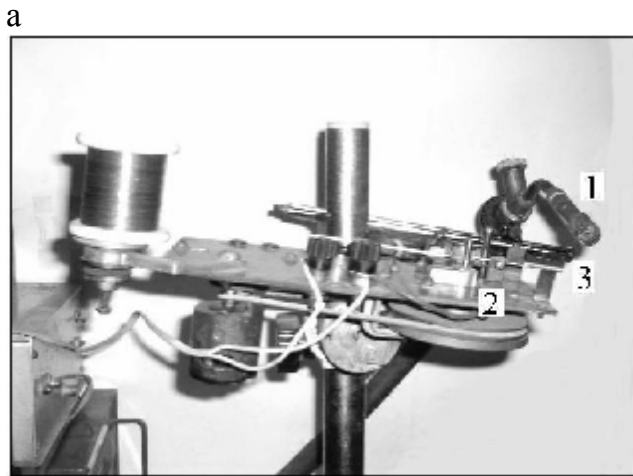
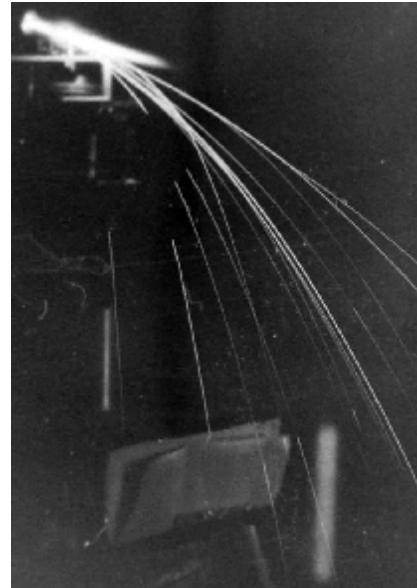
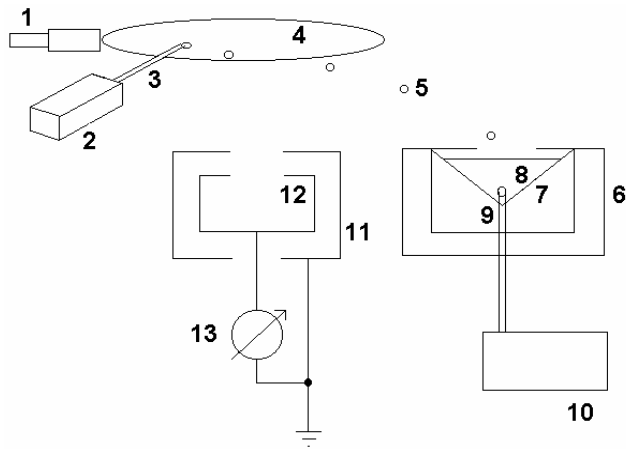
*Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова,  
Проблемная научно-исследовательская лаборатория №1*

### **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 термопара 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-



а

б

в

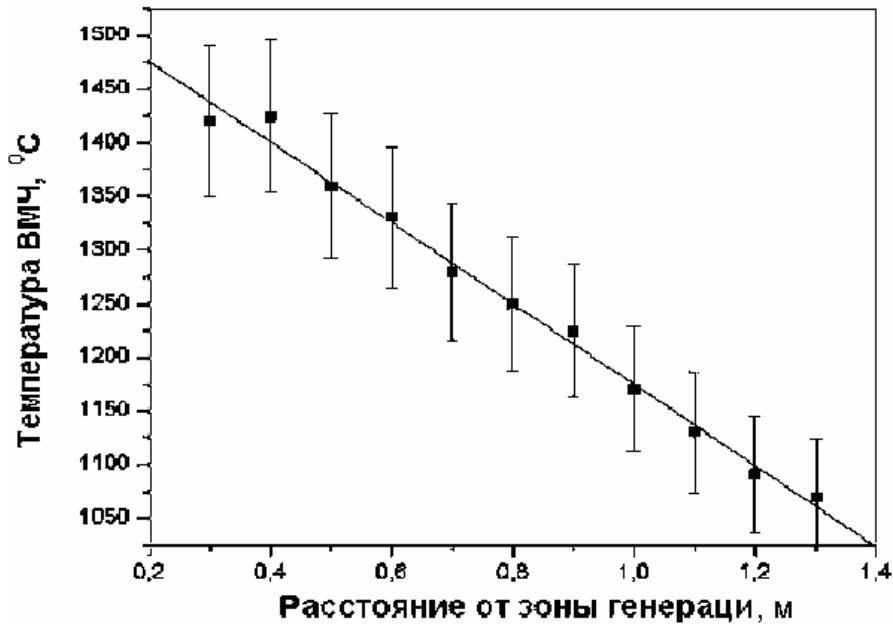
г

**Рис. 1.** а - схема установки по определению температуры и заряда ММЧ, 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  $dQ_c/dt$  частицы на стенки оценим на основании закона Стефана-Больцмана:

$$\frac{dQ_c}{dt} = \epsilon_{\text{пр}} S \sigma (T_{\text{ч}}^4 - T_{\text{см}}^4), \quad (1)$$

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



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

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

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

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

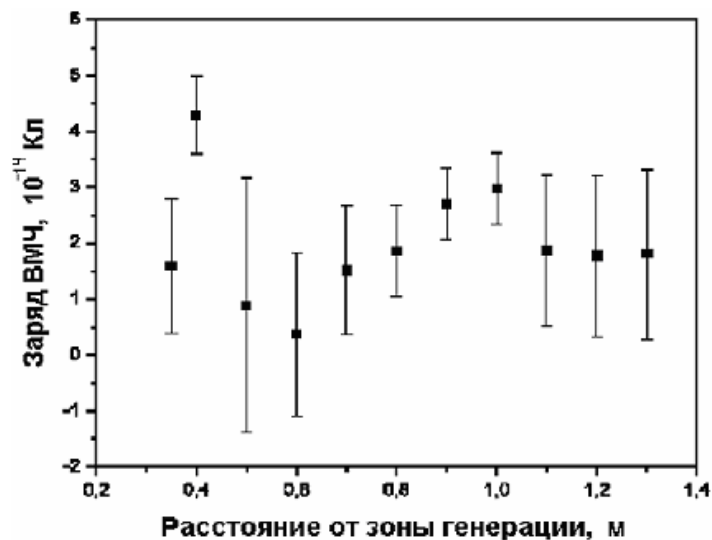
$$mc \frac{dT_q}{dt} = \alpha S (T - T_q) - \epsilon_q \sigma S (T_q^4 - T_{cm}^4). \quad (3)$$

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.

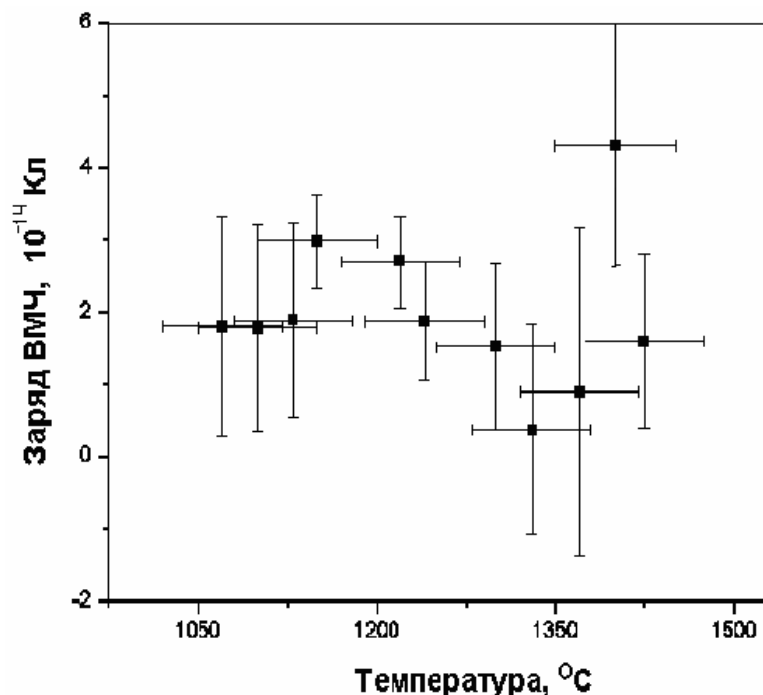
После измерений температуры частицы промывались в растворителе, взвешивались, затем проводился дисперсный анализ.

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  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_3\text{CHO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , органические пероксиды  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,



**Рис. 4.** Зависимость заряда от температуры для ВМЧ 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 концентрации 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 газоплазменом 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.*