

УДК 621.762

**Копыт Н.Х., Семенов К.И., Копыт Н.Н.**

Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова,

Проблемная лаборатория физики аэродисперсных систем

E-mail: nikkopyt@onu.edu.ua

## **Электрообмен в системе конденсированная дисперсная фаза и нагретая частица титана**

*Представлены результаты исследований частиц титана с размером 10 – 100 мкм, нагретых выше температуры плавления. Приведена схема и фотографии экспериментальной установки, которая состоит из генератора нагретых частиц титана, блока температурных измерений, включающего в себя фотоэлектрический датчик температуры движущихся частиц, блока измерения электрического заряда, состоящего из вертикальных плоских параллельных заряженных металлических пластин, блока измерения скорости движения частиц. Экспериментально показано, что вокруг таких частиц образуется конденсированная дисперсная фаза, к-фаза, которая при движении частиц в воздушной среде состоит из наночастиц окислов титана. Результаты электронномикроскопического исследования конденсированной дисперсной фазы показали, что размер частиц конденсированной дисперсной фазы лежит в пределах 5 - 100 нм и зависит от начальных условий. Приведены теоретические расчеты, определяющие электрообмен в системе нагретая сферическая частица и окружающая ее конденсированная дисперсная фаза, которые показали совпадение с экспериментальными данными в пределах ошибки измерений, а заряд частиц оказался порядка сотен тысяч - миллиона зарядов электрона. Теоретическое исследование кинетики термоэмиссионной зарядки частиц титана показало, что время накопления 95% равновесного заряда частицы при температурах 3000 – 2200 К соответственно составило 14 нс – 33 мкс. При температуре 2000 К время накопления 85 % равновесного заряда составило 240 мкс. При температуре 1400 К время накопления 91% равновесного заряда той же частицы составляет 610 мкс. Проведенные оценки показали, что за время релаксации заряда для частицы титана при температуре большей 1400 К последнее практически не меняется. Это позволяет считать процесс термоэмиссионной зарядки частиц в данных условиях квазистационарным. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях процессов электрообмена в аэродисперсных системах при высоких температурах. Развитая модель термоэлектронной зарядки частиц позволяет в дальнейшем использовать её для моделирования поведения к-фазы вблизи нагретых частиц, а также для других целей. Полученные результаты показывают удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными значениями заряда.*

**Ключевые слова:** слова: титан, оксид титана, горение, обмен зарядов, наночастицы

**Введение.** По распространённости в конструкционных материалах титан находится на четвёртом месте после Al, Fe и Mg. Во -первых, Ti – лёгкий, высокопрочный и коррозионностойкий конструкционный материал, применяемый в экстремальных условиях [1], в химических реакторах, и т. п.). Во-вторых, Ti – пирофорное металлическое горючее. Таким образом Ti используется в составе пиротехнических композиций [2] и в композициях технологического горения [3]. Исследуются возможности использования Ti в ракетном топливе [4] и во

взрывчатых смесях промышленного или технологического назначения [5]. Вследствие многообразного применения  $Ti$ , исследования его воспламенения и горения весьма актуальны. В том числе, актуальны исследования образование конденсированной дисперсной фазы (к-фазы) вокруг частиц металлической частицы. В частности, важны исследования электрообмена вблизи частицы с размером 10 – 100 микрон [6, 7], нагретой до температуры в тысячи градусов, именно это было целью данной работы, что способствует развитию и оптимизации одного из путей производства наночастиц. В зависимости от химического состава окружающей среды, можно получить как наночастицы чистого металла, так и наночастицы металлических оксидов. Мы проводим исследования на примере изучения характеристик наночастиц рутила, которые широко используются в легких защитных структурах, влияют на бактериальные эндоспоры, в полупроводниках для создания запрещенной зоны шириной 3.23 и 3.06 эВ. Частицы расплавленного титана с диаметром около ста микрон производились электрической дугой из проволоки титана. После образования и движения в воздухе, частица и к-фаза улавливались на подложку. Результаты химического анализа показали формирование 7 различных фаз гомологического ряда рутила. В чистом кислороде и давлении 101 кПа формировались наночастицы рутила. Наличие электрического заряда на частице влияет на процесс массообмена при горении металлизированных топлив, а также на процесс коагуляции в высокотемпературных дисперсных системах [8, 9], что, в свою очередь, влияет на полноту сгорания частиц топлива. Исследование электрообмена таких систем ведется интенсивно, тем не менее, достаточно полного представления об электрофизических процессах, протекающих в них нет, что послужило целью данной работы. В данной работе проведение анализа влияния теплообмена поверхности частиц титана с К-фазой, двухфотонные процессы, вопросы коагуляции частиц К-фазы и многие прочие эффекты было решено не затрагивать, в основном, по причине ограничения редакцией объема статьи, но авторами планируется затронуть обозначенные вопросы в следующих статьях.

**Результаты.** Экспериментальная установка, описанная в [4], приведена на рис. 1. Установка содержала: 1 – генератор нагретых частиц; 2 – блок питания; 3 – разделительный трансформатор; 4 – сосуд, в котором происходит движение частиц; 5 – электростатический вольтметр; 6 – высоковольтный генератор; 7 – блок питания; 8 – баллон с азотом; 9 – кран; 10 – ротаметр; 11 – водяной затвор; 12 – разделительная перегородка; 13 – подъёмный механизм; 14 – упоры; 15 – открывающиеся приспособления; 16 – крышка; 17 – микроскоп; 18 – фотоаппарат; 19 – обтюратор; 20 – блок питания; 21 – лампа; 22 – фотодиод; 23 – компаратор; 24 – частотомер; 25 – пирометр; 26 – запоминающий осциллограф типа С8-17; 27 – фотоаппарат; 28 – подложка для улавливания частиц.

Исследование параметров к-фазы проводилось на рентгеновском дифрактометре ДРОН - 3.0, который позволил определить фазы и параметры их решётки. Фотографирование показало, что облако наночастиц, окружающих сферическую нагретую частицу, имеет цилиндрическую симметрию. Осаждение частиц на подложку в электростатическом поле выявил различия в знаках заря-

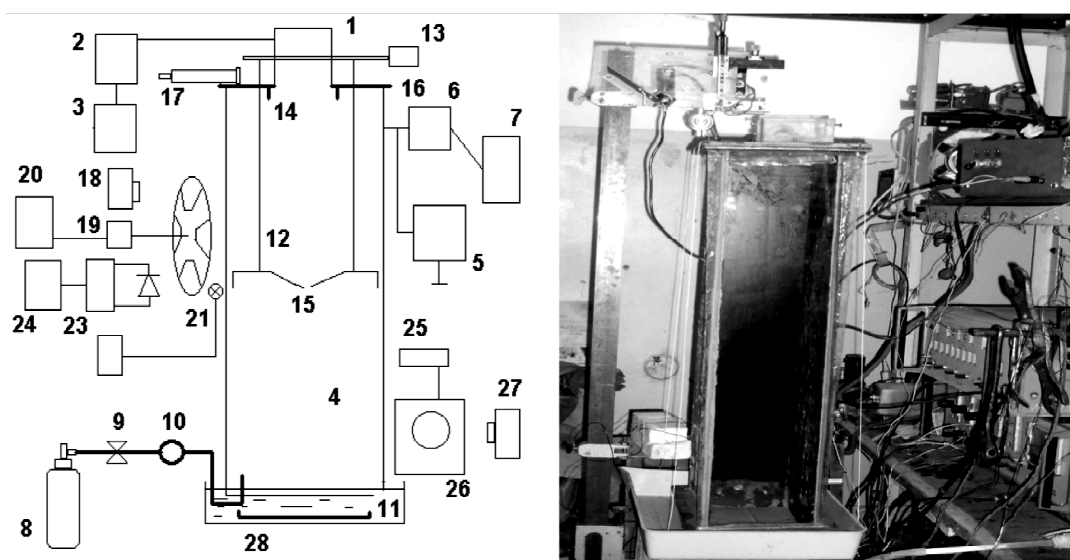


Рис.1. Схема (слева) и фотография (справа) экспериментальной установки

да наночастиц к-фазы в зависимости от их расстояния от центральной частицы. Плотность наночастиц в "хвосте" к-фазы падает в 3-6 раз, а концентрация наночастиц зависит от начальной температуры центральной частицы. Исследования наночастиц, осажденных на подложку, показали, что их размер лежит в пределах 5 - 100 нм и зависит от начальных условий, см. рис. 2. Результаты измерений заряда нагретой частицы титана приведены на рис. 3 (экспериментальные значения обозначены кружками). Для расчета заряда необходимы были данные о температуре частицы, экспериментальная зависимость которой от времени движения приведена на рис. 4 и определялась методом, предложенным в [10, 11].

Процесс термоэмиссионной зарядки сферической металлической частицы идет при высокой температуре получаемой в дуге частицы, которую в дальнейшем будем обозначать как  $T_1$ .

Экспериментальные данные термоэмиссионной зарядки частиц титана с радиусом  $r = 125$  мкм показывают, что при температуре частицы порядка

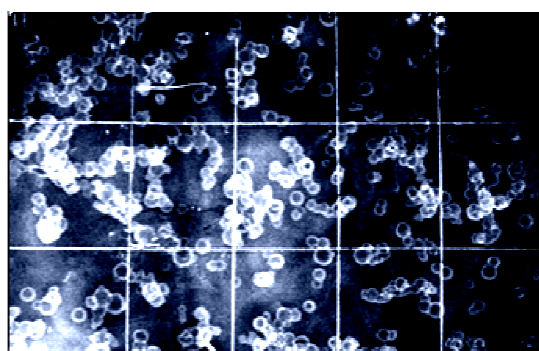


Рис. 2. Фотография участка к-фазы, осажденной на подложку (получена с использованием электронного просвечивающего микроскопа при увеличении 20000).

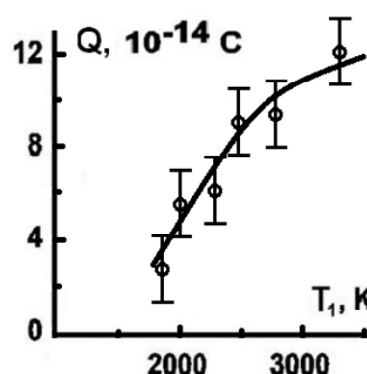


Рис. 3. Экспериментальные (черные прямоугольники) и расчетные (сплошная линия) зависимости равновесного заряда на сферической частице титана

1000 К их заряду составляет  $Q \sim 10^{-13}$  Кл, т.е. величину того же порядка, что и для частиц меди с  $r = 117$  мкм, тантала с  $r = 185$  мкм, представленные в работах [5, 7], данные по свойствам титана брались в [12, 13]. Результаты согласуются с данными в [14 - 16]. При таких условиях выполняется соотношение  $e\phi > kT_1$ , где

$$\phi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad e - \text{заряд электрона, } k -$$

постоянная Больцмана,  $T_1$  – температура поверхности частицы  $Q$  – заряд частицы,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $r$  – радиус частицы. Это позволяет считать электростатическое поле частицы в процессе ее термоэмиссионной зарядки доминирующим.

Уравнение термоэмиссионной зарядки сферической частицы радиусом  $r$ , окруженной к-фазой в области ее отрицательного заряда имеет вид [17 - 19]

$$\frac{dQ}{dt} = \pi r^2 n_e \bar{v}_e \left[ 1 - \frac{e l_1}{4\pi k T_2 \epsilon_0 r^2} \left( Q^{1/2} - \frac{r e^{1/2}}{2 l_1} \right)^2 \right] - 4\pi r^2 A T_1^2 \exp\left( \frac{\Delta A_1 - A_1}{k T_1} \right). \quad (1)$$

Здесь:  $n_e$  – концентрацию электронов у поверхности частицы,  $A$  постоянная Ричардсона Дешмана,  $\bar{v}_e = (8kT_2 / \pi m_e)^{1/2}$  – средняя скорость теплового движения электронов,  $l_1 = (l_0 / T_0) T_1$  – ширина кинетической зоны частицы (где электроны движутся практически без столкновений),  $l_0$  – ширина кинетической зоны при  $T_0 = 300$  К,  $n_e$  – концентрация электронов на границе образования к-фазы,  $A_1$  – работа выхода электрона с поверхности частицы. Если предположить, что электростатическое поле в непосредственной близости от поверхности частицы однородно, то в соответствии с данными работы [14]

$$\Delta A_1 = 2 E x_m. \quad (2)$$

Здесь  $E = Q / 4\pi\epsilon_0 r^2$  – напряжённость электростатического поля на поверхности частицы,  $x_m$  – координата максимума потенциального барьера, обусловленного суперпозицией электростатического поля частицы и поля зеркального отображения заряда электрона

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_0 E}}. \quad (3)$$

Подставляя  $e$  и  $x_m$  в выражение (2), получим значение  $\Delta A_1$  в явном виде

$$\Delta A_1 = \frac{Q^{1/2} e^{3/2}}{4\pi\epsilon_0 r}. \quad (4)$$

Уравнение зарядового равновесия частицы с окружающей её нанодисперсной к-фазой можно получить из (1), полагая  $dQ/dt = 0$

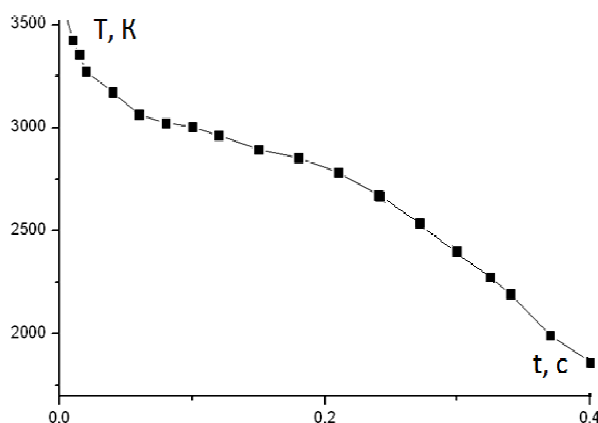


Рис. 4. Экспериментальные зависимости температуры получаемой в дуге частицы титана

$$\pi r^2 en_e \bar{v}_e \left[ 1 - \frac{el_1}{4\pi k T_2 \varepsilon_0 r^2} \left( Q^{1/2} - \frac{re^{1/2}}{2l_1} \right)^2 \right] = 4\pi r^2 AT_1^2 \exp \left( \frac{Q^{1/2} e^{3/2}}{4\pi k T_1 \varepsilon_0 r} - \frac{A_1}{kT_1} \right). \quad (5)$$

Для отрицательного заряда частицы, величина которого удовлетворяет неравенству  $0 \leq Q \leq er^2/4l_1^2$  потенциальный барьер внутри кинетической зоны отсутствует и уравнение (5) упрощается

$$\pi r^2 en_e \bar{v}_e = 4\pi r^2 AT_1^2 \exp \left( \frac{Q^{1/2} e^{3/2}}{4\pi k T_1 \varepsilon_0 r} - \frac{A_1}{kT_1} \right). \quad (6)$$

Из уравнения (6) получим зависимость величины равновесного отрицательного заряда частицы от ее температуры  $T_1$ .

$$Q = \left[ \frac{4\pi \varepsilon_0 r k T_1 \ln \frac{en_e \bar{v}_e \exp(A_1 / kT_1)}{4AT_1}}{e^{3/2}} \right]^2. \quad (7)$$

После того, как температура частицы  $T_1$  опустится до значения  $T_2$ , к-фаза образуется непосредственно у поверхности частицы. В уравнении (5) вместо  $T_2$  будет фигурировать  $T_1$ .

$$\pi r^2 en_e \bar{v}_e \left[ 1 - \frac{el_1}{4\pi k T_1 \varepsilon_0 r^2} \left( Q^{1/2} - \frac{re^{1/2}}{2l_1} \right)^2 \right] = 4\pi r^2 AT_1^2 \exp \left( \frac{Q^{1/2} e^{3/2}}{4\pi k T_1 \varepsilon_0 r} - \frac{A_1}{kT_1} \right), \quad (8)$$

где  $\bar{v}_e = (8kT_1 / \pi m_e)^{1/2}$ .

Уравнение термоэмиссионной зарядки частицы в положительной области имеет вид

$$\frac{dQ}{dt} = 4\pi r^2 AT_1^2 \exp \left( \frac{A_1 + \frac{Qe}{4\pi \varepsilon_0 r}}{kT_1} \right) - \pi r^2 n_e e \bar{v}_e. \quad (9)$$

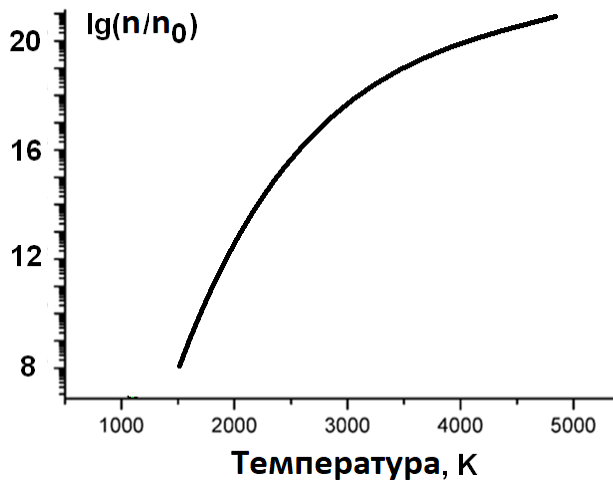
Уравнение зарядового равновесия частицы с к-фазы получим из (9), полагая  $\frac{dQ}{dt} = 0$ :

$$4\pi r^2 AT_1^2 \exp \left( \frac{A_1 + \frac{Qe}{4\pi \varepsilon_0 r}}{kT_1} \right) = \pi r^2 n_e e \bar{v}_e. \quad (10)$$

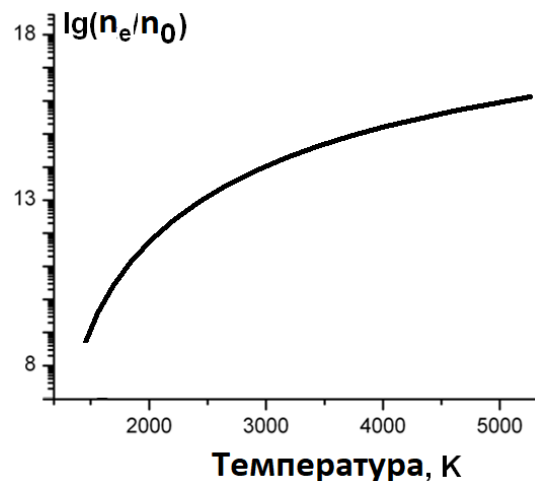
Из уравнения (10) получим зависимость величины положительного заряда частицы от ее температуры  $T_1$

$$Q = \frac{4\pi \varepsilon_0 r k T_1 \ln \frac{4AT_1^2}{n_e e \bar{v}_e} - \frac{4\pi \varepsilon_0 r A_1}{e}}{e}. \quad (11)$$

Интегрируя уравнение (9), получаем зависимость величины положительного заряда частицы от времени



**Рис 5.** Зависимость логарифма относительной концентрации к-фазы от температуры.



**Рис 6.** Зависимость логарифма относительной концентрации электронов в к-фазе от температуры частицы.

$$t = \frac{4kT_1\varepsilon_0}{re^2n_e\bar{v}_e} \ln \frac{4AT_1^2 \exp\left(-\frac{A_1}{kT_1}\right) - en_e\bar{v}_e}{4AT_1^2 \exp\left(-\frac{A_1}{kT_1}\right) - en_e\bar{v}_e \exp\left(\frac{Qe}{4\pi kT_1\varepsilon_0 r}\right)} \quad (12)$$

Характерный размер частиц определяется радиусом равновеликого по массе шара  $r_{кф}=r_w N^{1/3}$ . Здесь  $r_w=(3\mu/4\pi\rho)^{1/3}$  радиус Вигнера-Зейтца,  $\mu$  – масса молекулы оксида,  $\rho$  – макроскопическая плотность оксида. Расчеты показывают, что характерный размер частиц к-фазы  $TiO_5$  составляют  $2,12 \cdot 10^{-9}$  м.

Зависимость концентрации частиц к-фазы у поверхности частицы от ее температуры  $T_1$  в интервале  $T_{кун} \geq T_1 \geq T_{плав}$  найдем с использованием уравнения Клапейрона-Клаузиуса

$$n_{kf} = \frac{P_{atm}}{kZNT_1} \exp \frac{L}{R} \left( \frac{1}{T_{kip}} - \frac{1}{T_1} \right). \quad (13)$$

При температуре частицы  $T_1 < T_{плав}$  аналогичная зависимость имеет вид

$$n_{kf} = \frac{P_{плав}}{kZNT_1} \exp \frac{L + \Delta L}{R} \left( \frac{1}{T_{плав}} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (14)$$

Здесь  $T_{плав}$  и  $T_{кун}$  – соответственно температура плавления и кипения металла,  $P_{atm}$  и  $P_{плав}$  – соответственно нормальное атмосферное давление и давление насыщенных паров металла при температуре плавления,  $L$  и  $\Delta L$  – соответственно молярная теплота парообразования при температуре кипения и молярная теплота плавления металла,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $Z$  – количество атомов металла в одной молекуле оксида металла. Расчётная зависимость концентрации к-фазы от температуры частицы приведена на рис. 5. Соотношение между концентрациями заряженных и нейтральных частиц в к-фазе определяется уравнением Саха

$$n_e n_i / n_n = 2 \left( 2\pi m_e kT / h^2 \right)^{3/2} \exp(-A_2 / kT), \quad (15)$$

где  $n_e$ ,  $n_i$ ,  $n_n$  – соответственно концентрации электронов, положительно заряженных и нейтральных частиц в к-фазе,  $m_e$  – масса электрона,  $h$  – постоянная Планка,  $A_2$  – работа выхода электрона с частицы к-фазы. Зависимость концентрации электронов в к-фазе от температуры

$$n_e = -\frac{f(T)}{2} + \left[ \frac{f^2(T)}{4} + f(T)n_{kf} \right]^{1/2}. \quad (16)$$

Здесь

$$f(T) = 2 \left( 2\pi m_e kT / h^2 \right)^{3/2} \exp(-A_2 / kT). \quad (17)$$

Уравнение для концентрации электронов с учетом (16) примет вид

$$n_e = -\frac{f(T_2)}{2} + \left[ \frac{f^2(T_2)}{4} + f(T_2)n_{kf} \right]^{1/2}. \quad (18)$$

Расчетная зависимость приведена на рис. 6. Уравнение, определяющее концентрацию электронов у поверхности частицы примет вид

$$n_e = -\frac{f(T_1)}{2} + \left[ \frac{f^2(T_1)}{4} + f(T_1)n_{kf} \right]^{1/2}. \quad (19)$$

На рис. 3 представлены расчетные (сплошная линия) зависимость равновесного заряда на сферической частице расплава титана радиусом 125 мкм, окруженной к-фазой состоящей из  $\text{TiO}_2$   $r_{kf} = 2.12 \cdot 10^{-9}$  м от ее температуры  $T_1$ .  $A_1 = 3.95$  эВ,  $A_2 = 6.21$  эВ.

Решение системы уравнений (1), (20), (13), (14), (18) и (19) определяет расчетную зависимость величины отрицательного заряда частицы от времени при постоянной температуре частицы.

**Выводы.** Теоретическое исследование кинетики термоэмиссионной зарядки частиц титана показало, что время  $\tau$  накопления 95% равновесного заряда частицы при температурах  $T_1$  3000 К, 2500 К, 2200 К соответственно составило  $1.4 \cdot 10^{-8}$  с,  $4.2 \cdot 10^{-7}$  с,  $3.3 \cdot 10^{-5}$  с. При температуре 2000 К время накопления 85 % равновесного заряда составило  $2,4 \cdot 10^{-4}$  с. При температуре  $T_1 = 1400$  К время  $\tau$  накопления 91% равновесного заряда той же частицы составляет  $6 \cdot 10^{-4}$  с.

Понижение температуры частицы за время релаксации заряда  $\tau$  можно найти исходя из темпа охлаждения частицы  $\Delta T_1 = |(dT_1/dt)| \cdot \tau$ . Для частицы титана при  $T_1$  3000 К, 2500 К, 2200 К, 2000 К –  $\Delta T_1$ , соответственно, составляет  $1.8 \cdot 10^{-4}$  К,  $1.2 \cdot 10^{-3}$  К, 0.26 К, 1.8 К.

Проведённые оценки показывают, что за время релаксации заряда  $\tau$  для частицы титана при  $T_1 > 1400$  К и тантала при  $T_1 > 2000$  К их температура практически не меняется. Это позволяет считать процесс термоэмиссионной зарядки частиц в данных условиях квазистационарным. Полученные результаты могут быть использованы в исследованиях процессов электрообмена в аеродисперсных системах при высоких температурах.

Развитая модель термоэлектронной зарядки частиц позволяет в дальнейшем использовать её для моделирования поведения к-фазы вблизи нагретых частиц, а также для других целей. Полученные результаты показывают удовлетворительное соответствие между экспериментальными и расчетными значениями заряда.

### Литература:

1. *Зубков Л. Б.* Космический металл. Все о титане. – М. : Наука, 1987. – 129 с.
2. *Шидловский А. А.* Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973. – 280 с.
3. *Мержанов, А. Г., Сычев, А. Е.* О самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. [Электронный ресурс] URL: <http://www.ism.ac.ru/handbook/shsfr.htm> (дата обращения: 19.05.2020).
4. *Weiqiang Pang, Xuezhong Fan, Fengqi Zhao, Huixiang Xu, Wei Zhang, Hongjian Yu, Yonghong Li, Fangli Liu, Wuxi Xie, Ning Yan.* Effects of Different Metal Fuels on the Characteristics for HTPB-based Fuel Rich Solid Propellants // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2013. – Vol. 38. – P. 852-859.
5. *Matias T., Duraes L., Andrade-Campos A., Mendes R.* Prediction and experimental Al, Mg, Ti and Zr derived oxides and spinel formation by detonation // 41st Int. Annual Conference of ICT. Energetic Materials for High Performance, Insensitive Munitions and Zero Pollution. Germany, Karlsruhe, June 29 - July 2, 2010. – P. 95-1 – 95-16.
6. *Белюсова Н. С., Глотов О. Г., Гуськов А. В.* Исследование горения частиц титана с целью генерации наночастиц  $TiO_2$ . // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2018. – Вып. 11. – С. 90-99.
7. *Семенов К. И., Копыт Н. Н., Копыт Н. Х., Ханчич Е. Ю.* Образование и ионизация нанодисперсной конденсированной фазы вокруг нагретой металлической частицы и электроперенос в такой системе. // Тез. докл. XXVIII-ой науч. конф. стран СНГ «Дисперсные системы», 18-22 сент. 2006г., Одесса, Украина-Одесса: Астропринт. – 2006. – С. 294.
8. *Smirnov M.* Cluster plasma. // *Advances of Physical Sciences*. – 2000. – Vol. 170. – P. 495-534.
9. *Rudjak V.Y., Krasnolutsky S.L.* On the thermal diffusion of nanoparticles in gases // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 80. – P. 49-52.
10. *Lyalin L.A., Semenov K.I., Semenov A.K., Kalinchak V.V. and Kopyt N.Kh.* The temperature dependence of an equilibrium thermoemitting charge of a metallic particle surrounded with a nanodisperse condensed phase // *Ukrainian journal of physics*. – 2011. – №11. – P.1295-1299.
11. *Семенов К.И.* Метод производства шариков. Патент Украины, № 51578 15.06.2013.
12. *Латышев Л.Н., Петров В.А., Чеховский В.Я., Шестаков Е.Н.* Излучательные свойства твердых материалов: Справочник / Под общ. ред А.Е. Шейдлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.
13. *Куликов И.С.* Термодинамика оксидов: Справочник. – М.: Металлургия. 1986. – 344 с.

14. *Vishnyakov V.I. and Dragan G.S.* Thermoemission (dust-electron) plasmas. Theory of neutralizing charging// *Physical Review E.* – 2006. – Vol. 74. – 036404. – P. 1-4.
15. *Fortov V.E., Khrapak A.G., Khrapak S.A., Hammers V.I., Petrov O.F.* Dusty plasma // *Advances of Physical Sciences.* – 2004. – Vol. 174. – P. 495-544.
16. *Смирнов Б.М.* Кластерная плазма // *Успехи физических наук.* – 2000. – Т. 170. – №5. – С. 495-534.
17. *Лялин Л.А., Семенов К.И., Копит Н.Х.* Образование ионизированной конденсированной дисперсной фазы вокруг высокотемпературной металлической частицы // *Космический вызов 21 века. Химическая и радиационная физика.* Москва. – С. 89-98.
18. *Петров Ю.М.* Кластеры и малые частицы. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
19. *Lyalin L.A., Semenov K.I., Kopyt N.KH.* The electromass-exchange of the central warmed nucleus with a nanodisperse phase surrounding it. // *Dusty plasmas and applications. 3rd International Conference on the Physics of Dusty plasmas and applications. Proceedings.* Odessa. Ukraine. – 2010. – P. 84-87.

***Копит М.Х., Семенов К.И., Копит М.М.***

**Електрообмін в системі конденсована дисперсна фаза і нагріта частка титану**

**АНОТАЦІЯ**

*Представлені результати досліджень частинок титану з розміром 10 - 100 мкм, нагрітих вище температури плавлення, у повітрі. Наведено схему і фотографії експериментальної установки, яка складається з генератора нагрітих частинок титану, блоку температурних вимірювань, що включає в себе фотоелектричний датчик температури рухомих частинок, блоку вимірювання електричного заряду, що складається з вертикальних плоских паралельних заряджених металевих пластин, блоку вимірювання швидкості руху частинок. Експериментально показано, що навколо таких частинок утворюється конденсована дисперсна фаза - к-фаза - яка при русі частинок в повітряному середовищі складається з наночастинок оксидів титану. Результати дослідження конденсованої дисперсної фази методом електронної мікроскопії показали, що розмір часток конденсованої дисперсної фази знаходиться в межах 5 - 100 нм і залежить від початкових умов. Наведено теоретичні розрахунки, що визначають електрообмін в системі нагріта сферична частка і оточуюча її конденсована дисперсна фаза, які показали збіг з експериментальними даними в межах похибки вимірювань, а заряд частинок виявився порядку сотень тисяч - мільйону зарядів електрона. Теоретичне дослідження кінетики термодіелектричної зарядки частинок титану показало, що час накопичення 95% рівноважного заряду частинки при температурах 3000 - 2200 К відповідно складав 14 нс - 33 мкс. При температурі 2000 К час накопичення 85% рівноважного заряду складав 240 мкс. При температурі 1400 К час накопичення 91% рівноважного заряду тієї ж частинки становив 610 мкс. Проведені оцінки показали, що за час релаксації заряду для частки титану при температурі більшій, ніж 1400 К, час зарядки практично не змінюється. Це дозволяє вважати процес термодіелектричної зарядки частинок у даних умовах квазістаціонарним. Отримані результати можуть бути використані в дослідженнях процесів електрообміну в аеродисперсних системах при високих температурах. Розвинена модель термоелектронної зарядки частинок дозволяє в подальшому використовувати її для моделювання поведінки к-фази поблизу нагрітих*

частинок, а також для інших цілей. Отримані результати показують задовільну відповідність між експериментальними і розрахованими значеннями заряду.

**Ключові слова:** титан, оксид титану, горіння, обмін зарядів, наночастинки.

***Kopyt N.Kh., Semenov K.I., Kopyt N. N.***

## **Electro-exchange in the system of the condensed dispersed phase and a heated titanium particle**

### SUMMARY

*The results of studies of titanium particles with diameters from 10 to 100 microns heated above the melting point in air are presented. A diagram and photographs of an experimental facility are shown. It consists of a generator of heated titanium particles, a temperature measurement unit, which includes a photoelectric temperature sensor for moving particles, an electric charge measurement unit, consisting of vertical flat parallel charged metal plates, and a unit for measuring particle velocity. It has been experimentally established that around such particles when they move in air a condensed dispersed phase – c-phase – consisting of titanium oxides nanoparticles is formed. The results of electron microscopy studies of the condensed dispersed phase has shown that the particle size of the condensed dispersed phase lies in the range of 5 - 100 nm and depends on the initial conditions. Theoretical calculations that determine the electro-exchange in the system of a heated spherical particle and the condensed dispersed phase surrounding it has shown the agreement with the experimental data within the measurement error, and the particle charge was on the order of hundreds of thousands – a million of electron charges. A theoretical study of the kinetics of thermionic charging of titanium particles has shown that the accumulation time of 95% of the equilibrium particle charge at temperatures of 3000–2200 K was 14 ns – 33 μs, respectively. At the temperature of 2000 K, the accumulation time of 85% of the equilibrium charge was 240 μs. At the temperature of 1400 K, the accumulation time of 91% of the equilibrium charge of the same particle was 610 μs. Estimates have shown that during a charge relaxation time for a titanium particle at temperatures greater than 1400 K the time of charging practically does not change. This allows us to consider the process of thermionic charging of particles under these conditions as quasistationary. The results can be used in studies of the processes of electro-exchange in aerodispersive systems at high temperatures. The developed model of thermionic charging of particles allows its further use to simulate the behavior of the c-phase around heated particles, as well as for other purposes. The obtained results show a satisfactory agreement between the experimental and calculated values of the charge.*

**Key words:** titanium, titanium oxide, combustion, charge exchange, nanoparticles.