

**С. Г. Орловская, В. В. Калинин, Т. В. Грызунова,
Ф. Ф. Каримова, О. Т. Мельник**

Одесский национальный университет им. И. И. Мечникова

Роль различных механизмов теплообмена при высокотемпературном окислении металлических проволок

Изучено влияние теплообмена излучением, теплопроводности на устойчивые и критические режимы зажигания и потухания вольфрамового проводника, нагреваемого электрическим током, с учетом испарения оксида на его поверхности. Установлено, что в случае пренебрежения теплотерями через концы проводника на зависимостях критических значений силы тока от диаметра появляются максимумы. Показано, что учет теплообмена излучением со стенками реакционной установки приводит к появлению интервала диаметров проводника, для которого невозможен переход из высокотемпературного состояния в низкотемпературное при уменьшении силы тока.

Практическое использование вольфрамовых проволок в качестве электродов в ионизационных фильтрах для очистки воздуха, в лабораторных методиках определения теплокинетических характеристик связано с изучением различных видов теплоты: теплопроводности, конвекции, излучения [1, 2]. В настоящей работе изучено влияние указанных механизмов теплообмена на критические режимы зажигания и потухания нагреваемого электрическим током вольфрамового проводника, находящегося в окислительной газовой среде.

В работе [3] рассмотрена физико-математическая модель нестационарного тепломассообмена и химического реагирования нагреваемой электрическим током вольфрамовой проволоки. Для стационарного режима тепломассообмена уравнение теплового баланса металлического проводника запишем в виде:

$$q_{ch} + q_j = q_c + q_r + q_L + q_{ev}, \quad (1)$$

$$q_{ch} = Q \cdot \frac{k}{h} \rho_g n_{O_2\infty} \left(1 + \frac{k}{h\beta} \right)^{-1}, \quad q_j = \frac{4I^2 \eta_0 (1 + \gamma(T - T_0))}{\pi^2 d^3}, \quad q_c = \alpha(T - T_g),$$

$$q_r = \varepsilon \sigma (T^4 - T_w^4), \quad q_L = \frac{12\lambda_m (T - T_g)}{L}, \quad q_{ev} = L_{ev} \beta \rho_g n_{WO_2s},$$

© С. Г. Орловская, В. В. Калинин, Т. В. Грызунова,
Ф. Ф. Каримова, О. Т. Мельник, 2004

где q_{ch} — плотность химического тепловыделения реакции окисления вольфрама, $\frac{Bm}{M^2}$; q_j — плотность джоулева тепловыделения, $\frac{Bm}{M^2}$; q_c — плотность теплового потока молекулярно-конвективным путем, $\frac{Bm}{M^2}$; q_r — плотность теплового потока излучением, $\frac{Bm}{M^2}$; q_L — плотность теплового потока теплопроводностью, $\frac{Bm}{M^2}$; q_{ev} — плотность теплового потока, затрачиваемого на испарение оксида, $\frac{Bm}{M^2}$; Q — тепловой эффект реакции, $\frac{Дж}{кгO_2}$; k — константа скорости химической реакции, $\frac{M^2}{с}$; ρ_g — плотность воздуха, $\frac{кг}{M^3}$; η_0 — удельное сопротивление вольфрама при температуре $T_0 = 273$ К, Ом·м; $n_{O_2\infty}$ — относительная массовая концентрация кислорода в среде; h — толщина оксидной пленки, м; I — сила тока, А; γ — температурный коэффициент сопротивления, K^{-1} ; L — длина проводника, м; α, β — коэффициенты теплообмена, $\frac{Bm}{M^2 \cdot K}$, $\frac{M}{с}$; T — стационарная температура проводника, К; T_g — температура газа, К; T_w — температура стенок реакционной установки, К; λ_m — теплопроводность металла, $\frac{Bm}{M^2 K}$; ε — степень черноты оксидной пленки; L_{ev} — удельная теплота испарения, $\frac{Дж}{кг}$; n_{WO_2s} — относительная массовая концентрация паров WO_2 в насыщенном состоянии на поверхности частицы.

Тогда выражение для зависимости силы тока от стационарной температуры проводника, которая определяет устойчивые и критические высоко- и низкотемпературные состояния, представим в следующем виде:

$$I^2 = \frac{\pi^2 d^3}{4\eta_0 (1 + \gamma(T - T_g))} [q_c + q_r + q_L - q_{ch} - q_{ev}]. \quad (2)$$

Здесь d — диаметр проводника, м.

Используя выражение (2), проанализируем влияние различных механизмов ТМО на критические режимы окисления вольфрамового проводника в зависимости от его диаметра.

На рис. 1 а представлены зависимости $I_{cr}(d)$, $T_{cr}(d)$ для вольфрамового проводника с учетом теплотерь теплопроводностью к токоподводящим контактам ($q_L \neq 0$), молекулярно-конвективным путем ($q_c \neq 0$), на испарение оксидной пленки ($q_{ev} \neq 0$) и без учета теплотерь излучением ($q_r = 0$) при $T_g = T_w = 288$ К.

Зажигание проводника и переход в высокотемпературное состояние возможно при силе тока $I > I_i$. Область, ограниченная кривыми I_i и I_c – область гистерезиса процессов теплообмена и кинетики окисления. Переход на высокотемпературный режим возможен при увеличении начальной температуры проводника в интервале $T_i < T_b < T_c$ для соответствующего значения силы тока из интервала $[I_i, I_c]$. Потухание проводника – переход в низкотемпературный режим окисления происходит при уменьшении силы тока ниже значения I_c . Точки γ_1 и γ_2 характеризуют вырождение критических режимов зажигания и потухания проводника. В отсутствие теплотерь излучением образуется интервал диаметров проводника $[d_1^*, d_2^*]$, для которого невозможен переход из высокотемпературного состояния в низкотемпературное при уменьшении силы тока.

С учетом теплообмена излучением такие режимы не наблюдаются. Переход в низкотемпературное состояние (потухание) происходит во всем интервале диаметров $d_{\gamma_1} < d < d_{\gamma_2}$ при уменьшении силы тока до значения I_c (рис.1 б). Нами были проведены экспериментальные исследования критических режимов зажигания вольфрамовых проводников различных диаметров электротермографическим методом. Для диаметров проводника $d=70, 210, 250$ мкм определены критические значения силы тока I_c , при которых происходит переход на режим высокотемпературного окисления. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с расчетными значениями (рис. 1 б).

Интересным является случай если при учете теплотерь излучением пренебречь теплотерями через концы проводника ($q_L=0$, рис.1 в). Это приводит к появлению максимумов на зависимости $I_{cr}(d)$, причём максимум на зависимости $I_i(d)$ приходится в область очень больших диаметров ($d \approx 0,9$ мм), в то время как максимум на зависимости $I_c(d)$ наблюдается при $d \approx 0,2$ мм. Затем I_c и I_i с ростом d резко уменьшаются. При этом пропадает вторая точка вырождения γ_2 .

Используя условие стационарности (1), проведем анализ зависимости $d(T)$ для различных значений силы тока. Проанализируем более подробно критические режимы зажигания и потухания вольфрамового проводника в отсутствие теплотерь излучением (рис. 1 а). При некоторых значениях силы тока (например, $I=0.8$ А) существуют 4 критических режима (т. i, e_1 , e_2 , e_3). Определим механизм их возникновения. Доказано, что точка i описывает зажигание, точки e_1 , e_2 , e_3 – потухание проводника. Область протекания хи-

мических реакций в точках i и e_1 — кинетическая, в точке e_2 — переходная, в точке e_3 — диффузионная (табл.). Из таблицы также следует, что при зажигании теплотерями на испарение можно пренебречь. Теплотерии к токоподводящим контактам малы. В точках e_1 и e_2 возрастает роль теплотерии на испарение оксида, т.к. увеличивается температура проводника. Теплотерии теплопроводностью через концы проводника малы. Видно, что определяющим механизмом в возникновении критических точек e_1 и e_2 являются теплотерии молекулярно-конвективным путем. В критическом режиме потухания e_3 сильно возрастает роль теплового потока к токоподводящим проводам. Определяющими механизмами при этом являются теплотерии молекулярно-конвективным путем и через концы проводника ($q_c \approx q_L$, табл.).

Таблица

Температуры и диаметры проводника, область протекания химической реакции, соотношение плотностей тепловых потоков в критических режимах зажигания и потухания при силе тока $I=0.8$ А.
 $L=10$ см, $T_g = T_w = 288$ К, $h_b = 0,4$ мкм, $q_r=0$, $q_L, q_c \neq 0$.

экстремумы	T, К	d, мкм	$k/h\beta$	q_c/q_{cv}	q_c/q_L	q_{cv}/q_L
T.i	1335	51.1	0.03	1140	249	0.22
T.e ₁	1858	62.4	0.3	10	231	23
T.e ₂	1913	127	0.7	7	57	8
T.e ₃	1762	993	3.6	19	0.88	0.05

Для некоторых значений силы тока, как уже отмечалось ранее, существуют 4 критических режима (рис. 2 а, т. i — зажигание, т. e_1, e_2, e_3 — потухание). При достижении силой тока значения $I=0.92$ А (рис. 2 б) происходит слияние критических режимов потухания e_1 и e_2 (точка максимума на зависимости $I_{cr}(d)$, рис. 1а). В дальнейшем, с увеличением силы тока для всех $I < I_{\gamma_2}$ наблюдаются 2 критических режима окисления: зажигание при $d = d_i$ и потухание при $d = d_{e_3}$ (рис.2 в, г).

С учетом теплообмена излучением на зависимостях $d(T)$ для всего интервала сил тока $I_{\gamma_1} < I < I_{\gamma_2}$ наблюдаются только 2 экстремума: максимум, характеризующий зажигание, и минимум, характеризующий потухание.

Таким образом, показано, что неучет теплотерии через концы проводника приводит к появлению максимумов на зависимостях $I_{cr}(d)$. Если пренебречь теплообменом излучением со стенками реакционной установки, появляется интервал диаметров проводника, в котором невозможно погасить проводник, уменьшая значение силы тока.

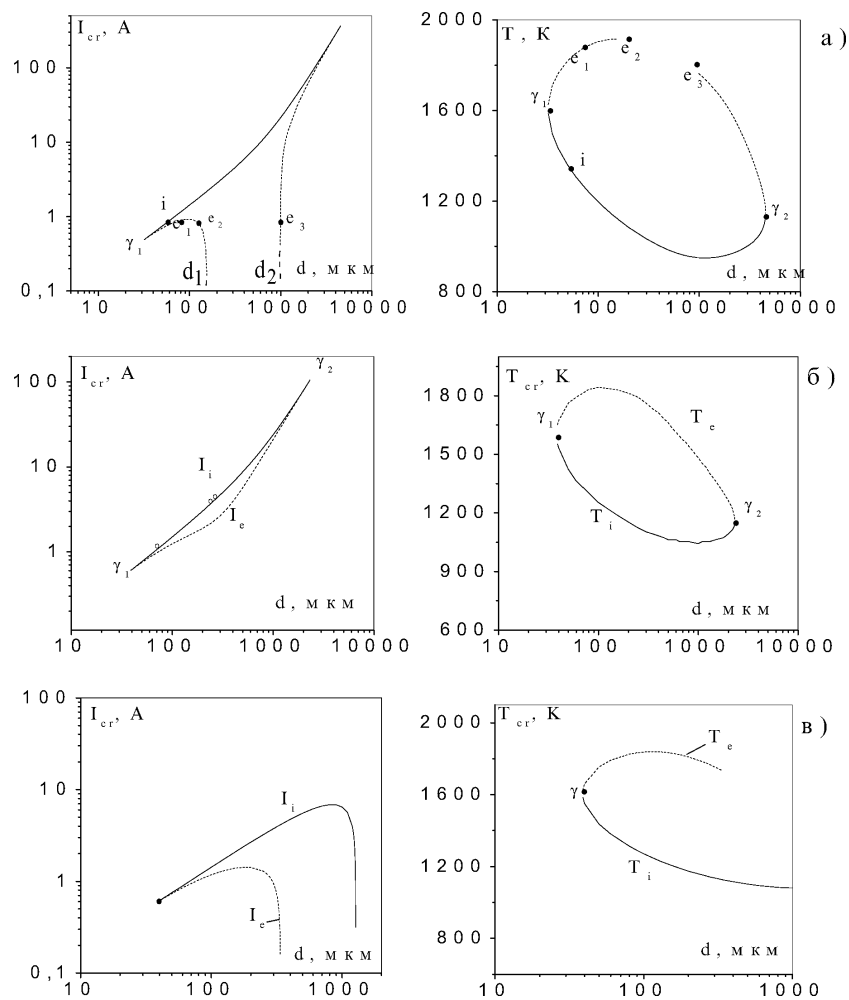


Рис. 1. Влияние различных механизмов теплообмена на критические зависимости силы тока и температуры вольфрамового проводника в зависимости от его диаметра. $L=10$ мкм, $T_g=T_w=288$ К,
а) $q_r = 0$; $q_L, q_{ev}, q_c \neq 0$; б) $q_r, q_L, q_{ev}, q_c \neq 0$;
в) $q_L = 0$; $q_{ev}, q_r, q_c \neq 0$.
ooo – наши экспериментальные данные

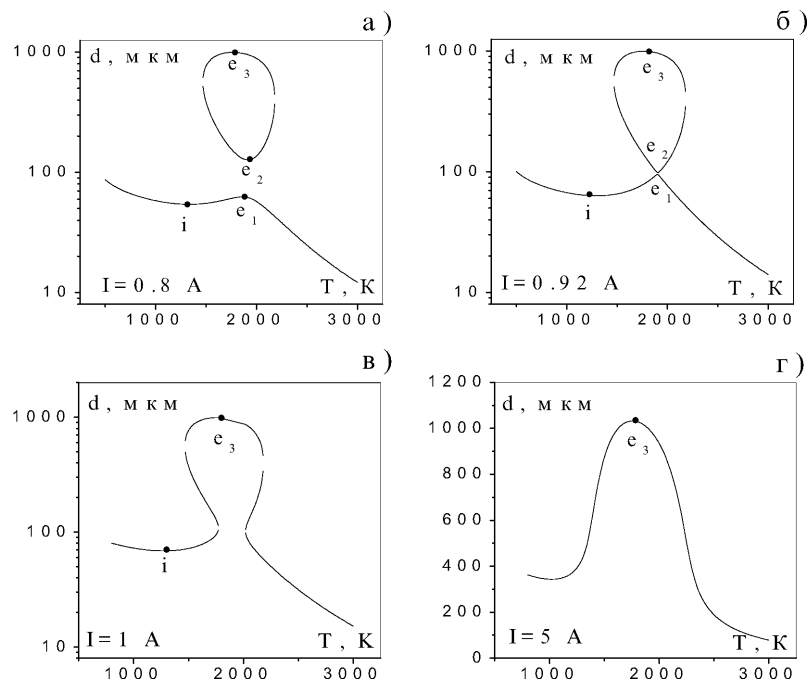


Рис. 2. Зависимость $d(T)$ для вольфрамового проводника. $L=10$ мкм, $T_g=T_w=288$ К, $h_b=0.4$ мкм, $q_L \neq 0$, $q_v \neq 0$, $q_c \neq 0$, $q_r=0$ при различных значениях силы тока, а) $I=0.8$ А, б) $I=0.92$ А, в) $I=1$ А, г) $I=5$ А.

Литература

1. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. Киев: Выща школа, 1990. — 256 с.
2. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. — 386 с.
3. Калинин В.В., Орловская С.Г., Грызунова Т.В. Устойчивые и критические режимы высокотемпературного окисления вольфрамового проводника в воздухе. //Теплофизика высоких температур. — 2003. — Т.41, №3. — С.465-469.

*С. Г. Орловська, В. В. Калінчак, Т. В. Гризунова,
Ф. Ф. Карімова, О. Т. Мельник*

**Роль різних механізмів теплообміну при високотемпературному
окисленні металевих дротиків**

АНОТАЦІЯ

Вивчено вплив теплообміну випромінюванням, теплопровідності на стійкі та критичні режими запалення та потухання вольфрамового дротику, який нагрівається електричним струмом, з урахуванням випаровування оксиду на його поверхні. Доказано, що у випадку зневажання тепловтратами через кінці провідника на залежності критичних значень сили струму від діаметру з'являється максимум. Показано, що необлік теплообміну випромінюванням зі стінками реакційної установки приводить до появи інтервалу діаметрів провідника, для якого неможливий перехід з високотемпературного стану до низькотемпературного при зменшенні сили струму.

*Orlovskaya S. G., Kalinchak V. V., Gryzunova T. V.,
Karimova F. F., Melnik O. T.*

**Influence of different heat transfer mechanisms
on high temperature metal filament oxidation**

SUMMARY

Influence of molecular and radiation heat transfer on stable and critical modes of tungsten filament ignition and extinction was studied with account of oxide evaporation. It was established that dependence of critical currents on diameters had maximums in case heat losses through filament ends were negligible. It was shown that if radiation heat transfer was not taken into account a range of filament diameters appeared for which a transition from high temperature state to low temperature one by current decreasing became impossible.