УДК: 593.92
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-431-321

Жеенбаева А.Т., Татыбеков А.Т.
КР УИА Ж. Жеенбаев атындагы физика институту
Жеенбаева А.Т., Татыбеков А.Т.
Институт физики имени акад. Ж. Жеенбаева НАН КР
Zheenbaeva A., Tatybekov A.
J. Jeenbaev Institute of Physics, NAS KR

ЖЕРДЕ СЕЙРЕК КЕЗДЕШҮҮЧҮ ЭЛЕМЕНТТЕРДИН ОКСАЛАТТАРЫНЫН ПЛАЗМАДАГЫ ЖЫЛУУЛУК БӨЛҮНҮШҮНҮН ЖЫЛУУЛУК ТЕҢ САЛМАКТУУЛУГУ ПРОЦЕССИ
ТЕПЛОВЫЕ БАЛАНСЫ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ОКСАЛАТОВ РЗЭ В ПЛАЗМЕ
HEAT BALANCE OF THE THERMAL DECOMPOSITION PROCESS OF RARE-EARTH ELEMENT OXALATES IN PLASMA

Кыскача мүнөздөмө: Плазмадагы жерде сейрек кездешүүчү элементтердин оксалаттарынын термиялык ажыроо процессинин жылуулук баланстары каралды. Жылуулук плазмасынын көлөмү жана реактордун параметрлери дисперстүү материалдын бөлүкчөлөрүнүн бөлүштүрүлүшүнө кандай таасир этери көрсөтүлдү. Реактордун каналдары менен болгон жылуулук алмашууну эске алуу менен сандык эсептөө ыкмалары колдонулду. Изилдөөнүн натыйжалары жогорку температураларда башка кошулмалардын термиялык ажыроо процесстерин оптималдаштырууда пайдаланылышы мүмкүн. Иште реактордун геометриялык параметрлеринин, плазмалык агымдын режимдеринин жана материалдын ажыроосунун жылуулук баланстарынын өз ара байланышы чагылдырылган.

Аннотация: Приведены тепловые балансы процесса термического разложения оксалатов редкоземельных элементов в плазме. Показано, как количество тепловой плазмы и параметры реактора влияют на распределение частиц дисперсного материала. Использованы численные методы расчета с учетом теплообмена с каналами реактора. Результаты исследования могут быть применены при оптимизации процессов термического разложения других соединений при высоких температурах. Работа отражает взаимосвязь геометрических параметров реактора, режимов плазменного потока и тепловых балансов разложения материала.

Abstract: Heat balances of the thermal decomposition process of rare-earth element oxalates in plasma are presented. The study shows how the amount of thermal plasma and reactor parameters affect the distribution of dispersed material particles. Numerical calculation methods were used, taking into account heat transfer with reactor channels. The results can be applied to optimize the thermal decomposition processes of other compounds at high temperatures. The work demonstrates the relationship between reactor geometry, plasma flow regimes, and the heat balances of material decomposition.

Негизги сөздөр: плазма; оксалаттар; жылуулук балансы; дисперстүү материал; реактор; ажыроо.
Ключевые слова: плазма; оксалаты; тепловой баланс; дисперсный материал; реактор; разложение.
Keywords: plasma; oxalates; heat balance; dispersed material; reactor; decomposition.

Для исследования и оптимизации плазменных технологических процессов нашли широкое применение численные методы расчета с использованием компьютерной технологии. Целью таких расчетов является определение геометрических размеров реактора, режимов плазменного потока и обработки в нем дисперсного материала в их взаимосвязи, тепловые балансы разложения, то есть в конечном счете плазменного технологического процесса в целом.

Начальная скорость частиц дисперсного материала определялась по выражениям, полученным в работе [1], где исследовались скорости частиц дисперсного материала на выходе из патрубка ввода в зависимости от расхода транспортирующего газа, размера твердых частиц и пространственной ориентировки патрубка ввода:

$\vartheta_m = a' + b' \frac{4G_t}{\rho_t \pi d_t^2}$, (1)

где G_t и ρ_t- массовый расход и плотность транспортирующего газа;

d_t – внутренний диаметр патрубка ввода материала: a', b' постоянные коэффициенты.

Уравнение движение частиц материала записывается в виде:

$m \frac{d\vartheta_m}{d\tau} = \pm mg + C_d \rho_g S_d \frac{\Delta \vartheta_m^2}{2}$. (2)

Уравнение неразрывности газового потока в канале реакторе:

$\frac{d(\rho_g \vartheta_g}{dt} = 0$ (3)

Расстояние, которое пролетают частицы дисперсного материала в реакторе:

$x_t = \int_i^\tau \vartheta_{m_i} d\tau$ (4)

Диаметр конуса разлета частиц материала:

$D_{c_i} = D_{c_1} + 2tg(\frac{\varphi}{2}) x_i$, (5)

где D_{c_1}- диаметр конуса разлета частиц в начальном сечении реактора;

$\varphi -$ угол конуса разлета частиц.

Локальная объемная концентрация дисперсного материала в газовом потоке:

$\beta_i = \frac{G_m}{G_g} * \frac{\rho_{g_i}}{\rho_{m_i}} * \frac{\vartheta_{g_i}}{\vartheta_{m_i}} * \frac{D^2}{D_c^2}$, (6)

где ϑ_m – массовый расход дисперсного материала; D – диаметр канала реактора.

Средняя объемная концентрация дисперсного материала на расчетном участке реактора:

$\beta = \frac{\sum_0^{x_i} \beta_i \Delta x_i}{\sum_0^{x_i} \Delta x_i}$. (7)

Для расчета теплообмена плазменного потока со стенками канала в общем виде принимаем критериальное выражение:

$St = f(Re_{bx}, Pr^{-0,67})$ (8)

Плотность теплового потока в стенки канала:

$q_w = St_i * \rho_{g_i} * \vartheta_{g_1} (h_{g_1} - h_{q_w})$ (9)

Поправка на влияние расходной массовой концентрации определяется следующим образом:

$\varepsilon_\mu = 0,76 \mu_m^{-0,128}$ (10)

Плотность теплового потока в стенке канала с учетом влияния концентрации

$q_{w_m} = q_w * \varepsilon_{w_m}$. (11)

Критериальное выражение для расчета межкомпонентного теплообмена с учетом анализа, выполненного в [2] , может быть записано в виде:

$Nu_m = 2 \frac{\lambda_s}{\lambda_g} + BRe_m^{0,5} Pr^{0,33} (\frac{\rho_g \mu_g}{\rho_s * \mu_s})^{0,2}$, (12)

где коэффициент B задается в начале расчета.

Коэффициент межкомпонентного теплообмена с учетом коэффициента формы частиц материала[3]:

$\alpha = \frac{Nu_m \lambda_g}{d_m * f_m^{0,5}}$ (13)

Уравнение теплового баланса на стадии нагрева частиц материала:

$G_g dh_g = \alpha_m \frac{6G_m f_m}{\rho_m * d_m} (T_g - T_m) d\tau + q_w \pi D dx$ (14)

$\alpha_m \frac{6G_m f_m}{\rho_m * d_m} (T_g - T_m) d\tau = C_{pm} G_m dT$ (15)

Таким образом, используя выражения (2), (9), (10), (1) – (15) и задаваясь начальным базовым значением коэффициента В в (12), можно рассчитать величину количества тепла, переданного на экспериментальном участке от плазмы к стенкам канала и частицам дисперсного материала, и сравнить его с соответствующими значеничми, полученными из эксперимента.

В общем балансе тепла, передаваемого теплоносителем дисперсному материалу, кроме затрат тепла на него нагрев, определяемых как:

$$Q_m = \alpha_m \frac{6G_m f_m}{\rho_m d_m}\left(T_g - T_m\right)d\tau, \quad (16)$$

следует также учесть количество тепла, необходимое для испарения влаги:

$$Q_n = L_n I_n S \quad (17)$$

и количество тепла, затрачиваемое на нагрев образующегося количества пара до температуры реакции термического разложения оксалатов РЗЭ:

$$Q_{nt} = I_n C_{p_n}(T_R - T_m)S, \quad (18)$$

где L_n- теплота парообразования;

I_n - удельная плотность пара, образующегося с единицы поверхности влажной частицы;

S – площадь поверхности частиц; C_{p_n} – теплоемкость пара.

Тогда суммарное количество тепла, передаваемое дисперсному материалу на всех расчетных участвках т.е. по всей длине канала реактора будет

$$\sum Q_m = Q_m + Q_n + Q_{n_t} \quad (19)$$

Учет дополнительных стоков тепла должен быть сделан также при расчете среднемассовой температуры частиц как в конце каждого расчетного участка *i,* так и в конце канала реактора, т.е.

$$T_{m_{i+1}} = T_{m_i} + \frac{Q_{m_i}+Q_{n_i}+Q_{n_t}}{G_m C_{p_{mi}}} \quad (20)$$

$$T_m = T_m + \frac{Q_m+Q_n+Q_{n_t}}{G_m C_{p_m}} \quad (21)$$

То же следует учесть и при определении изменения энергии плазменного потока, т.е.

$$N_{i+1} = N_i - Q_{m_i} - Q_{w_{m_i}} - Q_{n_i} - Q_{n_{t_i}}, \quad (22)$$

$$N_2 = N_1 - Q_m - Q_{w_n} - Q_n - Q_{n_t} \quad (23)$$

Суммарное количество тепла, переданное от газа к стенкам реактора и дисперсному оксалату, может быть представлено как сумма отдельных составляющих, соответствующих стадиям нагрева с учетом испарения влаги и термического разложения:

$$Q_w = Q_{w_n} + Q_{w_R}, \quad (24)$$

$$Q_m = \left(Q_{m_1} + Q_n + Q_{n_t}\right) + Q_R \quad (25)$$

или разделяя стадии фазовых и химических превращений оксалата, из (25) получаем:

$$Q_m = Q_N + Q_R \quad (26)$$

Для случая равенства температуры газа на выходе из реактора температуре термического разложения оксалата T_R уравнение теплового баланса реактора запишем в виде:

$$N_1 = Q_w + Q_N + Q_R + Q_{g_2} \quad (27)$$

Поставляя (24) и (26) в (27), находим количество тепла, которое может быть израсходовано на разложение оксалата, нагретого за счет Q_N до температуры T_R:

$$Q_R = N_1 - \left(Q_{W_N} + Q_{W_R}\right) - Q_N - Q_{j_2}, \quad (28)$$

где

$$Q_{j_2} = h_{g_2} G_g; \;\; h_{g_2} = f(T_R)$$

Принимая, что соотношение затрат тепла на нагрев материала и потери тепла в стенки реактора за счет его охлаждения сохраняются постоянными по длине реактора, как и в [2], можем записать:

$$\frac{Q_{W_N}}{Q_N} = Q_{W_N} + Q_{W_R}/Q_N + Q_R. \quad (29)$$

А после преобразований из (28) и (29) получаем:

$$Q_R = \frac{N_1 - Q_{W_N} - Q_N - Q_{g_2}}{1 + Q_{W_N}/Q_N} \quad (30)$$

Результаты проведенного теплового баланса термических процессов оксалатов РЗЭ могут быть использованы при оптимизации процессов термического разложения других соединений при высоких температурах.

Список использованной литературы

1. Поляков С. П., Солопов Н. Д., Твердохлебов В. И. К вопросу распределения частиц порошка в плазменной струе // Исследования плазмохимических процессов и плазменных устройств. – Минск: ИТМО АН БССР, 1975. – С. 79–91.
2. Моссэ А. Л., Буров И. С. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. – Минск: Наука и техника, 1980. – 208 с.
3. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. – М.: Энергия, 1970. – 423 с.

Рецензент: кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Доржуева Г.Дж.

УДК 530
DOI 10.58649/1694-9099-2026-2-434-439

Кайрыев Н.Ж., Сүйүнбаева А.Н.
Жусуп Баласагын атындагы КУУ
Кайрыев Н.Ж., Сүйүнбаева А.Н.
КНУ имени Жусупа Баласагына
Kairyev N.Z., Suiunbaeva A.N.
KNU Jusup Balasagyn

ТАЗА АЗОТ ЧӨЙРӨСҮНДӨ КРЕМНИЙ ПОРОШОК БУЮМДАРЫН РЕАКЦИЯЛЫК БЫШЫРУУ ПРОЦЕССИН САНДЫК МОДЕЛДӨӨ
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИОННОГО СПЕКАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ В АТМОСФЕРЕ ЧИСТОГО АЗОТА
NUMERICAL SIMULATION OF REACTION SINTERING OF SILICON POWDER PRODUCTS IN A PURE NITROGEN ATMOSPHERE

Кыскача мүнөздөмө: Бул иште таза азот чөйрөсүндө ар кандай конфигурациядагы кремний порошок буюмдарын реакциялык бышыруунун стационардык эмес математикалык модели сунушталды. Моделдөө COMSOL Multiphysics программалык комплексинде аткарылып, цилиндр формасындагы буюмдун геометриялык параметрлеринин жылуулук-масса алмашуу процесстеринин сызыктуу эмес мүнөзүнө жана азоттошуу кинетикасына тийгизген таасирин деталдуу изилдөөгө мүмкүндүк берди. Бышыруу убактысынын буюмдардын радиусуна жана бийиктигине болгон көз карандылыгы аныкталды.

Аннотация: В работе представлена нестационарная неизотермическая математическая модель реакционного спекания кремниевых порошковых изделий различной конфигурации в атмосфере чистого азота. Моделирование выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics, что позволило детально исследовать влияние геометрических параметров цилиндрического изделия на нелинейный характер процессов тепломассопереноса и кинетику азотирования. Установлены зависимости времени спекания от радиуса и высоты изделий.

Abstract: The paper presents a non-stationary non-isothermal mathematical model of reaction sintering of silicon powder products of various configurations in a pure nitrogen atmosphere. The simulation was