

УДК 536.244

Бурка А.Л.<sup>1</sup>, Емельянов А.А.<sup>1</sup>,  
Полубояров В.А.<sup>2</sup>, Сеницын В.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН

## ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Экспериментально досліджено калориметричним методом динамічний процес накопичення теплоти порошками оксидів ванадія у температурному інтервалі 50...140 °С. Показано, що величина поглинутої теплоти порошками при їх нагріванні залежить від маси виділеного адсорбованого слабозв'язаного кисню. Одержано порошки оксидів ванадія, при нагріві яких відбувається поглинання теплової енергії з високою питомою об'ємною густиною. Подано постановку задачі, яка враховує радіаційно-конвективний теплоперенос в матеріалі, і описано метод розв'язку. Одержано результати розрахунку нестационарного температурного поля у газопоглинаючій речовині для різних значень масової швидкості газовиділення.

Экспериментально исследован калориметрическим методом динамический процесс накопления теплоты порошками оксидов ванадия в температурном интервале 50...140 °С. Показано, что величина поглощаемой теплоты порошками при их нагреве зависит от массы выделяемого адсорбированного слабосвязанного кислорода. Получены порошки оксидов ванадия, при нагреве которых происходит поглощение тепловой энергии с высокой удельной объемной плотностью. Представлена постановка задачи, учитывающая радиационно-конвективный теплоперенос в материале и описан метод решения. Получены результаты расчета нестационарного температурного поля в газопроницаемом материале для различных значений массовой скорости газовой выделенной.

The dynamic process of heat accumulation by powders of vanadium oxides was studied by the calorimeter method within the temperature range of 50-140 °C. It is shown that the heat absorbed by heated powders depends on the mass of extracted weakly bound oxygen, absorbed previously. powders of vanadium oxides were obtained. While heating these powders, heat energy is absorbed with a high specific volumetric density. Problem statement, considering radiation-convective heat transfer in a material is presented, and the method of solution is described. Calculation results on nonstationary temperature field in a gas-permeable material were obtained for different values of the mass rate of gas extraction.

$c_T$  – теплоемкость газа;  
 $G$  – изменение массы образца;  
 $g$  – расход газа в порах;  
 $E$  – плотность потока излучения;  
 $I_{pv}$  – функция Планка;  
 $k$  – волновое число;  
 $L$  – длина;  
 $m_V$  – массовая скорость газовой выделенной в порах;  
 $N$  – счетная концентрация частиц;  
 $N_1, N_2$  – безразмерные коэффициенты теплоотдачи;  
 $P$  – пористость;  
 $q$  – объемная плотность источников тепловыделенной;  
 $T, t$  – температура;  
 $T^*$  – характерная температура;

$U$  – сигнал ДСК;  
 $x$  – координата;  
 $\alpha$  – поляризуемость материала;  
 $\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная материала;  
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – степени черноты границ;  
 $\theta_1^*, \theta_2^*$  – температуры внешних источников тепловыделенной;  
 $\chi$  – объемный коэффициент поглощения;  
 $\lambda$  – эффективная теплопроводность;  
 $\lambda_p$  – теплопроводность газа;  
 $\lambda_E$  – теплопроводность частиц;  
 $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  
 $\sigma_s$  – спектральные коэффициент и рассеяния системы частиц.

Предлагаемая работа посвящена изучению процесса переноса теплоты и массы в пористых

средах в условиях, когда теплообмен излучением является сопоставимым с теплопроводностью в

твердом веществе и конвекцией газа в порах. Твердая фаза является оптически неоднородной из-за присутствия здесь частиц, поэтому возникает необходимость учета рассеяния излучения на частицах. К настоящему времени накоплен достаточно большой научный материал по расчету переноса излучения в пористых средах [1-3]. Однако в этих статьях не учитывается конвективный перенос теплоты в порах, который весьма существенен в газопроницаемых материалах. Для эффективного использования тепловой энергии нашли широкое применение тепловые аккумуляторы. Накопление теплоты может осуществляться в аккумуляторе с использованием скрытой теплоты фазовых переходов в его рабочем теле. К более перспективным материалам, позволяющим осуществлять накопление тепловой энергии с высокой объемной плотностью без изменения агрегатного состояния, можно отнести активированные газопроницаемые материалы из плотноупакованных частиц. Характерными особенностями таких материалов является развитая поверхность пор и, как следствие, их высокая газовая реакционная способность. Состав и количество адсорбированных порошками газов определяется, в первую очередь, природой материала, дисперсностью и условиями его приготовления. Ультрадисперсные порошки обладают высокой активностью к поглощению газов (адсорбцией) и в первую очередь кислорода. При этом кислород может находиться на поверхности частиц как в адсорбированном молекулярном состоянии, так и в хемосорбированном виде (в фазах переменной валентности, так называемый слабосвязанный кислород) или в составе молекул воды. Увеличение содержания кислорода в газопроницаемых материалах, полученных из высокодисперсных порошков, происходит за счет диффузии атомов кислорода в объем дефектов частицы и по внутренним границам раздела фаз. Теплообмен здесь осложняется наличием фазового перехода в частицах, процессами десорбции-адсорбции газа на поверхности пор, а также его хемосорбцией с фазами переменной валентности [4]. Структурные изменения с образованием новых капилляров, внутренних границ раздела фаз и новых фаз переменной валентности (структур кристаллического сдвига) в части-

цах могут быть достигнуты с помощью механической активации материала [5]. Известно, что теплота адсорбции на адсорбентах с сильно развитой пористой поверхностью значительно больше, чем для ровной поверхности. При низких значениях энергии активации молекулы газа могут вступать в химическую реакцию с фазами переменной валентности, которые являются поверхностью пор, т.е. происходит хемосорбция, которая сопровождается дополнительным поглощением теплоты при нагреве материала [6].

Представляет интерес с точки зрения применения в качестве накопителя теплоты система упакованных малых частиц, вещество которых может совершать обратимый фазовый переход “диэлектрик-металл” при изменении температуры, не изменяя при этом своего агрегатного состояния. К настоящему времени известно довольно много соединений, обладающих такими свойствами [7]. Особый интерес представляют системы частиц с преобладанием двуокиси ванадия, т.к. фазовый переход “металл-диэлектрик” в этом соединении происходит в области умеренных температур при наличии заметной величины удельной теплоты превращения [8]. В работе [9] исследовано накопление теплоты, поглощаемой в процессе нагрева дисперсного материала из оксидов ванадия в области температуры фазового перехода “диэлектрик-металл” диоксида ванадия. Основная часть этой теплоты поглощается в скрытой форме за счет перестройки структуры вещества частиц и хемосорбции кислорода с фазами переменной валентности, находящихся в поверхностных слоях частиц после механохимической активации. Исследования процесса накопления теплоты с одновременным измерением веса образца выполнены в атмосфере аргона на дифференциальном сканирующем калориметре фирмы “Netzsch”. Массив данных о сигнале дифференциального сканирующего калориметра (ДСК) в зависимости от времени, накопленный в каждом эксперименте, пересчитывался в температурную зависимость. Величина поглощаемой (выделяемой) теплоты образцом при нагреве (охлаждении) в определенном температурном интервале рассчитывалась путем интегрирования кривой сигнала ДСК, полученного в сравнительном эксперименте при плавлении химически чи-

Таблица.

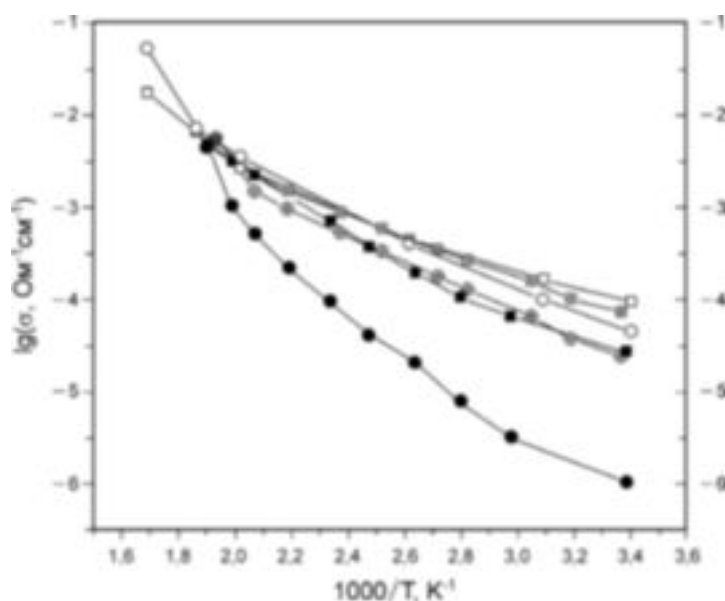
Образец	Энергия активации, кДж/г	Удельная поверхность частиц, м <sup>2</sup> /г	Диапазон температур, °С	Температура максимума тепловой энергии, °С	Изменение массы, %	Тепловая энергия, Дж/г
1	0	11,19	50...130	85,6	4,03	70,17
2	180	1,85	50...130	115,4	9,77	103,9
3	135	0,94	50...130	107,9	10,77	205
4	45	7,61	50...130	97,9	6,0	113,9

стого индия. Исследование накопленной теплоты осуществлялось на порошках из чистой двуокиси ванадия производства фирмы «Aldrich», не содержащих в своей структуре слабосвязанный кислород, в отсутствие фаз переменной валентности и на рентгеноаморфных порошках оксидов ванадия с большим содержанием фаз переменной валентности, в которых находится слабосвязанный кислород.

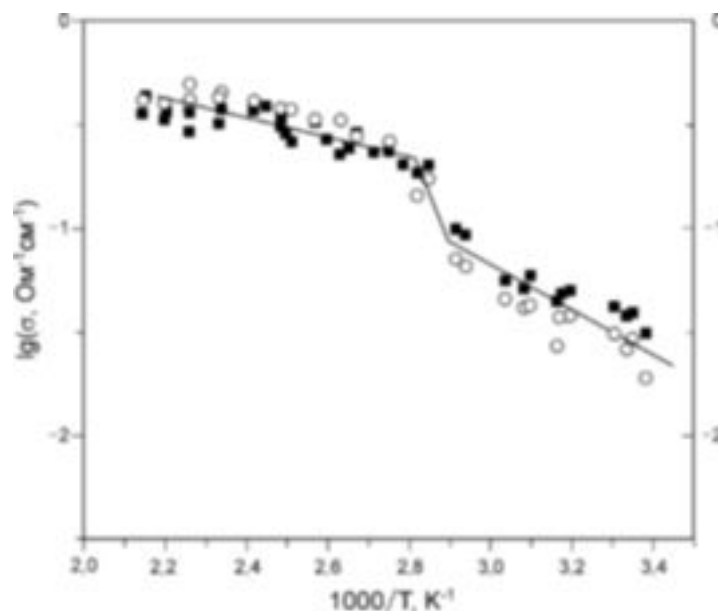
Удельная поверхность чистой двуокиси ванадия была измерена методом тепловой десорбции аргона и составляла 1,62 м<sup>2</sup>/г. Рентгенофазовый анализ показал, что образец содержит 75% двуокиси ванадия, которая состоит из фаз, находящихся в пределах гомогенности (VO<sub>2</sub> и V<sub>6</sub>O<sub>13</sub>), и 25% фазы (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Из анализа данных ДСК, полученных при нагреве образца из этого материала в температурном интервале 20...200 °С в атмосфере аргона, следует, что при температуре ~70,6 °С отмечается максимум поглощения тепловой энергии, которая затрачивается на фазовый переход «диэлектрик-металл». На перестройку структуры измеряемого образца при фазовом переходе «диэлектрик-металл» затрачивается 19,3 Дж/г, что соответствует ~75% удельной теплоты превращения αVO<sub>2</sub> → βVO<sub>2</sub> [6]. С ростом температуры образца не наблюдается изменение веса, что свидетельствует об отсутствии десорбции кислорода с его поверхности. В этом случае накопление теплоты в образце зависит только от тепловых затрат на фазовый переход «диэлектрик-металл». Влияние процессов адсорбции кислорода на накопление теплоты было исследовано на рентгеноаморфных порошках оксидов ванадия. В качестве исходного образца был выбран порошок двуокиси ванадия производства фирмы «Aldrich»,

не содержащий фаз переменной валентности со слабосвязанным кислородом. Этот порошок в течение десяти месяцев был выдержан на воздухе при комнатной температуре, что привело к окислению значительной части от четырехвалентного до пятивалентного ванадия. Это, в свою очередь, привело к появлению значительного количества фаз переменной валентности в рентгеноаморфном состоянии. Механоактивация оксидов ванадия приводит к восстановлению пятивалентного ванадия до четырехвалентного состояния [10], что способствует увеличению фаз с переменной валентностью. Количество слабосвязанного кислорода, сосредоточенного в фазах с переменной валентностью, изменялось путем обработки порошка на планетарно-центробежных мельницах с вводимой шарами механической энергией при мощности порядка 100 Вт/г [5,10]. Рентгенофазовый анализ исходного и подвергнутого механической активации порошков оксидов ванадия показал, что они имеют рентгеноаморфную структуру.

Основные характеристики образцов и результаты анализа сигнала ДСК представлены в таблице. Из таблицы видно, что при определенной величине введенной механической энергии (135 кДж/г) удельная поверхность частиц имеет минимальное значение. С увеличением энергии активации происходит смещение максимума сигнала ДСК в область более высоких температур, при этом наибольшее накопление тепловой энергии наблюдается в образцах с минимальной удельной поверхностью частиц. В работах [5,10] показано, что механическая активация оксидов ванадия в высоконапряженных активаторах с мощностью активации порядка 100 Вт/г приво-



**Рис. 1.** Влияние циклического нагрева на электропроводимость активированных рентгеноаморфных порошков оксидов ванадия.  
 1-й цикл нагрева: ■ – образец № 1; ● – образец № 3;  
 2-й цикл нагрева: ▣ – образец № 1; ⊕ – образец № 3;  
 3-й цикл нагрева: □ – образец № 1; ○ – образец № 3.

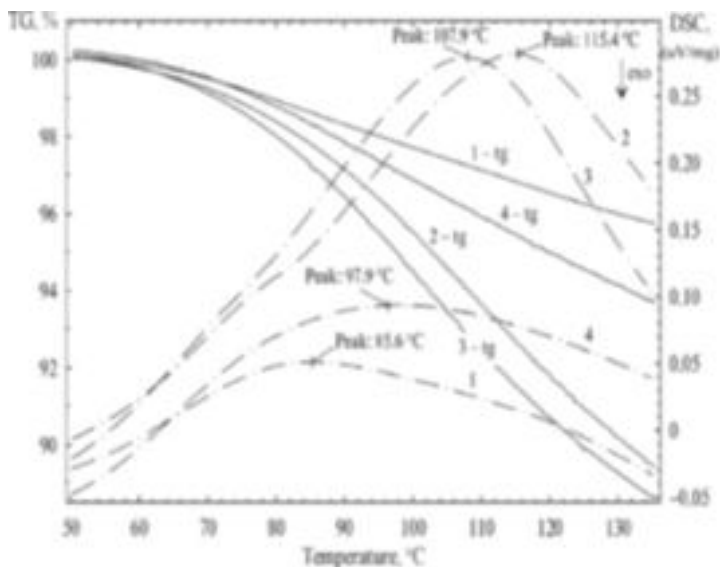


**Рис. 2.** Влияние циклического нагрева на электропроводимость порошка из чистой двуокиси ванадия производства фирмы «Aldrich»: ○ – 1-й цикл нагрева; ■ – 2-й цикл нагрева.

дит к синтезу оксидных фаз с переменной валентностью (фазы Магнелли). При нагреве таких образцов происходит выделение слабосвязанного кислорода с поглощением тепловой энергии. Наличие слабосвязанного кислорода в образцах, прошедших механическую активацию, подтверждается также исследованием влияния циклического нагрева на проводимость. Исследования электропроводимости образцов проведены с помощью прибора Precision LCR-meter 4284A в атмосфере азота в температурном интервале 270...625K. На рис. 1 представлены результаты измерения проводимости образцов с различным содержанием слабосвязанного кислорода. Наибольшие изменения проводимости наблюдаются в образце №3 после первого цикла нагрева. Это связано с тем, что в этом образце происходят наибольшие структурно-фазовые преобразования с удержанием большого количества слабосвязанного кислорода, выделение которого при нагреве приводит к существенному изменению проводимости. При следующих циклах нагрева оставшийся кислород выделяется, что приводит к приближению проводимости к стационарному

состоянию. Воздействие циклического нагрева на неактивированный образец №1 приводит к существенно меньшим изменениям проводимости. На рис. 2 показано, что при циклическом нагреве образца, в структуре которого отсутствует слабосвязанный кислород, практически не происходит изменение проводимости.

На рис. 3 представлены температурные зависимости изменения массы и сигналов ДСК для образцов рентгеноаморфных порошков оксидов ванадия. В результате обработки сигнала ДСК для образца №1 установлено, что при его нагреве происходит накопление тепловой энергии с плотностью 70,17 Дж/г (кривая 1), что превышает величину поглощаемой тепловой энергии чистой двуокиси ванадия. Возрастание величины поглощенной теплоты у неактивированного образца объясняется выделением из образца слабосвязанного кислорода. Изменение массы этого образца за счет десорбции кислорода в рассматриваемом интервале температур 50...130 °C составляет около 4% (кривая 1-G). Наибольшая объемная плотность поглощенной тепловой энергии (205 Дж/г) в температурном интервале 50...130 °C достигается в образце №3 (кривая 3). При нагреве этого образца происходит выделе-



**Рис. 3. Влияние энергии активации рентгеноаморфных порошков оксидов ванадия на величину накопления теплоты и изменения массы: 1, 2, 3, 4 – сигналы ДСК; 1-tg, 2-tg, 3-tg, 4-tg – изменение массы образцов.**

ние слабосвязанного кислорода, масса которого составляет 10,77% массы образца (кривая 3-tg). Полученные данные позволяют сделать вывод, что при нагреве активированных рентгеноаморфных порошков оксидов ванадия в условиях десорбции кислорода наблюдается существенное увеличение объемной плотности накапливаемой тепловой энергии, и это обстоятельство позволяет рассматривать такие материалы в качестве перспективных для использования в твердотельных аккумуляторах теплоты.

Полученные экспериментальные результаты позволяют получить объемную плотность источников тепловыделения и массовую скорость газовой выделенной в газопроницаемом материале. Эти результаты использованы при исследовании тепло- и массообмена в такой среде. Ниже представлена постановка задачи о тепло- и массообмене в рассматриваемых материалах.

Плоский слой газопроницаемого полупрозрачного материала, полученного путем спекания и последующего прессования смеси порошков, облучается внешним источником. Теплообмен слоя с окружающей средой на границах осуществляется излучением и конвекцией. В условиях нагрева или охлаждения частицы двуокиси вана-

дия испытывают фазовый переход второго рода “металл-диэлектрик”, что приводит к появлению в области фазового перехода источника тепловыделения, который перемещается в объеме твердого материала.

При нагреве и охлаждении слоя на поверхности пор происходит десорбция или адсорбция молекул газа соответственно, эти процессы сопровождаются отводом или подводом теплоты к материалу, что приводит к появлению объемных источников или стоков массы и теплоты в слое. Из полученных экспериментальных результатов следует, что в системах активированных порошков оксидов ванадия мощность тепловыделения за счет хемосорбции кислорода значительно превышает мощность тепловыделения при фазовом переходе.

Перенос теплоты в твердом теле осуществляется теплопроводностью и излучением. Из-за малости коэффициента теплопроводности газа в порах учитывается только конвективный теплообмен. Предполагается, что скорость течения газа в порах достаточно мала, поэтому устанавливается тепловое равновесие между газом и твердым телом.

При моделировании радиационного переноса учитываются процессы поглощения, испускания и рассеяния на частицах окислов ванадия. Оптические свойства материала предполагаются зависящими от температуры и длины волны. Излучение внешнего источника имеет произвольный спектральный состав.

Теплоемкость и теплопроводность твердого материала предполагаются зависящими от температуры. Решение задачи проводится в приближении сплошной среды с эффективными теплофизическими и оптическими свойствами.

Температурные поля и тепловые потоки в слое материала определяются из решения краевой задачи для уравнения теплопроводности и системы уравнений переноса излучения.

Уравнение теплопроводности с граничными условиями в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) - \omega(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - \frac{L}{T^*} \frac{\partial E}{\partial \xi} + L^2 q(\theta), \quad (1)$$

$$0 < \xi < 1, \quad \tau > 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} - N_1(\theta - \theta_1) = \frac{\sigma L}{\lambda}(\theta_1^{*4} - \theta^4), \quad \xi = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} - N_2(\theta - \theta_2) = \frac{\sigma L}{\lambda}(\theta^4 - \theta_2^{*4}), \quad \xi = 1 \quad (3)$$

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0(\xi), \quad (4)$$

где

$$\omega(\theta) = \frac{Lgc_r}{1-P}; \quad \theta = \frac{T}{T^*}; \quad \xi = \frac{x}{L}; \quad \tau = \frac{t}{\rho c_p L^2}.$$

Расход газа в порах рассчитывается из уравнения неразрывности

$$P \frac{dg}{d\xi} = Lm_v(\theta). \quad (5)$$

Дивергенция спектральной плотности радиационного потока  $\frac{dE}{d\xi}$ , которая находится в уравнении (1), определяется из решения системы интегродифференциальных уравнений переноса энергии излучения [9] относительно интенсивностей  $I_v^+(\xi, \mu)$ ,  $I_v^-(\xi, \mu)$  имеет вид

$$\frac{dE}{d\xi} = \chi \left[ 4\pi I_{pv} - 2\pi \int_0^1 (I^+(\xi, \mu) + I^-(\xi, \mu)) d\mu \right]$$

С помощью функции Грина

$$G(\xi, z) = -\frac{e^{F(\xi)}}{\lambda \Delta} \begin{cases} (1 + N_1 \int_0^z e^{-F(z)} dz)(e^{-F(1)} + N_2 \int_{\xi}^1 e^{-F(z)} dz) & z \leq \xi \\ (1 + N_1 \int_0^{\xi} e^{-F(z)} dz)(e^{-F(1)} + N_2 \int_z^1 e^{-F(z)} dz) & z \geq \xi \end{cases}$$

$$\Delta = N_2 + N_1(e^{-F(1)} + N_2 \int_0^1 e^{-F(z)} dz),$$

являющейся решением однородной краевой задачи  $\lambda(\xi) \frac{\partial^2 G}{\partial \xi^2} + (\frac{\partial \lambda}{\partial \xi} - \omega(\xi)) \frac{\partial G}{\partial \xi} = 0$

$$\frac{\partial G}{\partial \xi} - N_1 G = 0, \quad \xi = 0; \quad \frac{\partial G}{\partial \xi} - N_2 G = 0, \quad \xi = 1,$$

начально-краевая задача (1) – (4) сводится к нелинейному интегральному уравнению относительно безразмерной температуры, которое записывается в виде

$$\theta(\xi, \tau) = G(\xi, 0)W_1(\tau) - G(\xi, 1)W_2(\tau) + \int_0^1 W(z, \tau)G(\xi, z)dz. \quad (6)$$

Здесь

$$W(z, \tau) = \frac{\partial \theta}{\partial \tau} + \frac{L}{T^*} \frac{\partial E}{\partial z} - L^2 q(\theta); \quad F(z) = \int_0^z (\frac{d\lambda}{dz} - \omega) \frac{dz}{\lambda};$$

$$W_1(\tau) = \frac{\sigma L}{\lambda}(\theta_1^{*4} - \theta^4) - N_1 \theta_1;$$

$$W_2(\tau) = \frac{\sigma L}{\lambda}(\theta^4 - \theta_2^{*4}) - N_2 \theta_2^{*4}.$$

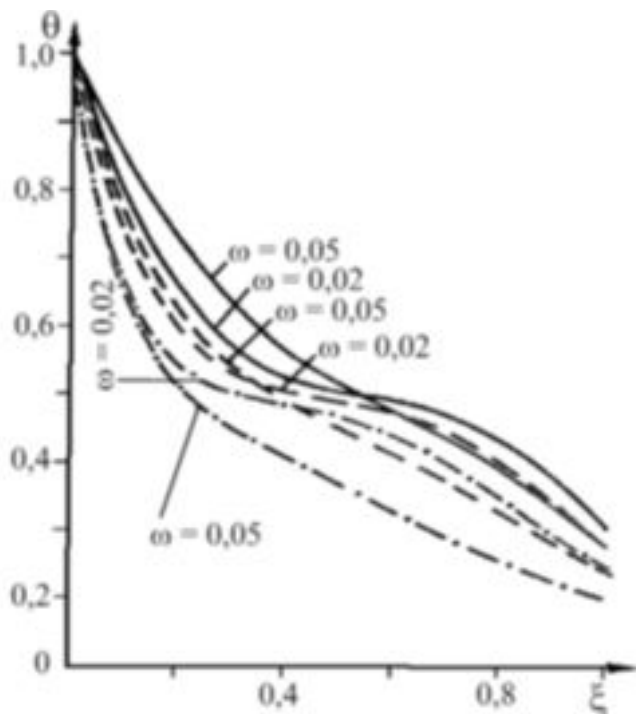
Таким образом, краевая задача (1) – (6) о совместном переносе теплоты теплопроводностью, конвекцией и радиацией в полупрозрачной газопроницаемой среде свелась к нелинейному интегральному уравнению относительно безразмерной температуры  $\theta(\xi, \tau)$ , которое на каждом временном шаге решается итерационным методом Ньютона-Канторовича [11].

Для нахождения эффективных значений коэффициента теплопроводности газопроницаемого материала использована формула

$$\lambda = \frac{\lambda_p \lambda_E}{(1-P)\lambda_E + P\lambda_p}.$$

Оптические свойства системы частиц рассчитываются по формуле Максвелла-Гарнетта [4].

Результат расчета нестационарного температурного распределения для случая постоянных теплофизических параметров и отсутствия радиации представлены на рис. 1 при следующих значениях теплофизических и оптических параметров  $\lambda = 0,64 \text{ Вт/мК}$ ,  $\theta_1^* = 1$ ,  $\theta_2^* = 0,1$ ,  $L = 0,03 \text{ м}$ ,  $N_1 = N_2 = 0,94$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,95$ . Шаг по безразмерному времени принимался  $\Delta\tau = 10^{-4}$ , что соответствует  $\Delta t = 0,1 \text{ с}$ . Расчет соответствует условиям,



**Рис. 4.** Зависимость температуры  $\theta$  от безразмерной координаты для различных скоростей газа  $\omega$ .

когда через горячую поверхность газопроницаемой пластины подается газ, имеющий температуру этой поверхности.

На рис. 4 представлена зависимость температуры  $\theta(\xi, \tau)$  от безразмерной координаты для различных значений  $\omega$  при двух значениях времени ( $\tau = 0,02, 0,05$ ). Здесь сплошная кривая соответствует  $\omega = 1$ , штриховая  $\omega = 5$ , штрихпунктирная —  $\omega = 10$ .

Отмечается наличие малых градиентов температуры в средней части пластины в начальный период нагрева. Этот эффект ярче проявляется при больших значениях скорости газа ( $\omega = 10$ ), что объясняется влиянием конвективного теплообмена на формирование температурного поля. По мере разогрева происходит выравнивание температурных градиентов в слое. Наиболее низкий уровень температуры в слое устанавливается при большой скорости газа, так как происходит возрастание отбора тепла от пористого материала на нагрев холодного газа (рост означает увеличение расхода газа). Видно также слабое изменение температуры горячей поверхности, что объясняется

интенсивным теплообменом с окружающей средой.

### Выводы

1. Получены механоактивированные рентгеноаморфные порошки оксидов ванадия, при нагреве которых в процессе хемосорбции кислорода происходит поглощение тепловой энергии с высокой объемной плотностью.

2. Экспериментально исследовано накопление теплоты порошками оксидов ванадия в температурном интервале  $50 \dots 140$  °С и показано, что величина поглощаемой теплоты такими порошками при нагреве зависит от массы выделяемого адсорбированного слабосвязанного кислорода.

3. Экспериментальные результаты для объемной плотности энергии источников тепловыделения и массовой скорости газовыделения в газопроницаемом материале использованы при расчете тепло- и массообмена в рабочем веществе теплового аккумулятора.

4. Результаты, полученные при исследовании накопления теплоты активированными ультрадисперсными порошками, могут быть использованы при создании тепловых аккумуляторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Берковский М.А., Петров В.А., Степанов С.В. Прохождение светового пучка через цилиндрический слой слабопоглощающей сильно рассеивающей среды с произвольным характером отражения на границах // Материалы VII-й Всесоюз. конф. по тепломассообмену "Тепломассообмен—VII". Минск, 1984. — Т. 2. — С. 30–34.
2. Галактионов А.В., Степанов С.В. Воздействие излучения на сильно рассеивающие керамики // Теплофизика высоких температур. — 1990. — Т.28, №1. — С.124-130.
3. Dombrowsky L.A. Quartz-fiber thermal insulation infrared radiative properties and calculation of radiative conductive heat transfer // J. of Heat Transfer. — 1996. — V.118, №5. — P. 408–419.
4. Mandelcorn L. Non-stoichiometric compounds. — New York and London Academic Press, 1964.
5. Полубояров В.А., Коротяева З.А., Андриускова О.В. Получение ультрамикроретерогенных

частиц путем механической обработки // Неорганические материалы. – 2001. – Т. 37, №5. – С. 592-595.

6. Я.Де Бур. Динамический характер адсорбции. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1962. – 290с.

7. Бугаев А.А., Захарченя Б.П., Чудновский Ф.А. Фазовый переход металл-полупроводник и его применение. – Л.: Наука, 1979. – 183 с.

8. Кржижановский Р.Е., Штерн З.Ю. Теплофизические свойства неметаллических материалов. – Л.: Энергия, 1973. – 336с.

9. Емельянов А.А., Полубояров В.А., Бурка А.Л., Кортаева З.А., Великанов Е.В., Лапин А.Е., Бан Бонг-Чан. Теплообмен при фазовом переходе и адсорбции-десорбции кислорода в дисперсном

материале // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т.28, №1. – С. 22-30.

10. Аввакумов Е.Г., Ануфриенко В.Ф., Восель С.В., Калинина Н.Г., Полубояров В.А. Исследование структурных изменений в механически активированных оксидах титана и ванадия методом ЭПР // Известия СО АН СССР, Сер.хим. – 1987. – Вып.1. – С.41- 48.

11. Канторович Л.В. О методе Ньютона // Труды Математического института АН СССР. – 1949. – Т.28. – С. 135-139.

Работа проводилась при поддержке РФФИ по проекту № 06-08-00361-а.

Получено 20.04.2007 г.

УДК 621.78.084:004.424

МОСКАЛЕНКО А.А.<sup>1</sup>, ЗОТОВ Е.Н.<sup>1</sup>, ПРОЦЕНКО Л.Н.<sup>1</sup>,  
РАЗУМЦЕВА О.В.<sup>1</sup>, ДЕЙНЕКО Л.Н.<sup>2</sup>, ДОБРИВЕЧЕР В.В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Национальная металлургическая академия

<sup>3</sup>ТОВ “Интенсивные технологии ЛТД”

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ И АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТУПЕНЧАТОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЗАКАЛКЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Запропоновано нову технологію ступінчастого гартувального охолодження сталевих виробів, яка забезпечує оптимально високі характеристики міцності металу. Режими охолодження при зміні інтенсивності тепловіддачі отримано за допомогою моделювання процесу за даними, розрахованими за допомогою програми IQLab.

Предложена новая технология ступенчатого закалочного охлаждения стальных изделий, обеспечивающая оптимально высокие прочностные характеристики металла. Режимы охлаждения с изменением интенсивности теплоотдачи получены с помощью моделирования процесса по данным расчета по программе IQLab.

The new technology of step hardening cooling of the steel products, providing optimum high strength characteristics of metal is offered. Modes of cooling with change of intensity heat exchange are received with the help of modeling of process according to calculation under program IQLab.

$T$  – температура;

$V$  – скорость;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;

$\tau$  – время;

$\Phi$  – феррит;

Б – бейнит.

**Индексы:**

центр – центральная часть изделия;

пов – поверхность изделия.