

и так далее. Уравнения (21), (22) и последующие являются обыкновенными дифференциальными уравнениями, интегралы которых легко получаются в аналитическом виде. Определив интегралы рассматриваемых уравнений, легко можно получить связь тепловых потоков с температурами, то есть, свести случай неасимптотически тонкого включения к случаю, аналогичному асимптотически тонкому включению.

Выводы и анализ перспектив дальнейших исследований. Таким образом, в настоящей работе предложен основанный на методах теории потенциала подход к расчету стационарных температурных полей в телах с включениями. Данный подход малочувствителен к форме области решения, к количеству, размерам и взаимному расположению включений, что является одним из основных его преимуществ. Проведенный асимптотический анализ предельных случаев позволяет охватить предложенным подходом практически весь спектр возможных значений физических параметров.

Дальнейшие перспективы развития и использования полученных результатов совершенно очевидны – это их численная реализация и применение в прикладных теплофизических расчетах.

Библиографические ссылки

1. Беляев Н. М. Методы теории теплопроводности: учебник / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. – М., 1982. – Т. 1. – 327 с., Т. 2. – 304 с.
2. Саломатов В. В. Методы нелинейных процессов переноса тепла / В. В. Саломатов. Ч.1. – Томск, 1976. – 245 с., Ч.2. – Томск, 1978. – 181 с.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М., 1967. – 600 с.
4. Карслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Карслоу, Д. Егер. – М., 1964. – 487 с.
5. Бенерджи П. Метод граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М., 1984. – 494 с.
6. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вробел. – М., 1987. – 524 с.

Надійшла до редакції 28.02.2012.

УДК 532.516

В. И. Елисеев

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

МАССООБМЕН В ПАССИВИРУЮЩЕЙ ПРИЭЛЕКТРОДНОЙ ПОРИСТОЙ ПЛЕНКЕ

У рамках теорії іонообміну розглянуто задачу про осадження нейтральної компоненти (солі) на поверхні електроду при розряді акумулятора з утворенням твердої пористої плівки. Проведені розрахунки показали, що концентрації компонент у пористій плівці слабо змінюються по її ширині. При досягненні малих порізностей починають зростати градієнти як концентрацій, так і електричного потенціалу.

Ключові слова: іонообмін, осадження на поверхні електроду, тверда пориста плівка.

В рамках теории ионообмена рассмотрена задача об осаждении нейтральной компоненты (соли) на поверхности электрода при разряде аккумулятора с образованием твердой пористой пленки. Проведенные расчеты показали, что концентрации компонент в пористой пленке слабо изменяются по ее ширине. При достиже-

жении малых разностей начинают возрастать градиенты как концентраций, так и электрического потенциала.

Ключевые слова: ионообмен, осаждение на поверхности электрода, твердая пористая пленка.

Within the ion exchange theory it is considered a task about neutral component (salt) deposition on electrode surface at accumulator discharge with hard porous film formation. As it follows from calculations, the components concentrations in porous film weakly change along its depth. However, when porosities get small both the concentration and electric potential gradients begin to grow.

Key words: ion exchange, deposition on electrode surface, hard porous film formation.

Введение. При разряде свинцово-кислотного аккумулятора в результате гетерогенных химических реакций образуется компонент $PbSO_4$, который быстро осаждается на поверхности. Осаждение это происходит в виде пористой пленки (солевая пассивация электрода) [1], которая постепенно утолщается и застывает. В результате такого процесса доступ ионов из окружающего электролита затрудняется и, в конечном итоге, прекращается. Конечная стадия пассивации электрода связана уже с образованием сплошной пленки (оксидная пассивация) [1; 2], которая образуется внутри пористого слоя при непосредственном контакте с металлом электрода. Образование оксидной пленки полностью прекращает доступ ионов к металлу, и аккумулятор выходит из строя, после чего он, практически, не подлежит восстановлению. Солевая пассивация обратима в том смысле, что при заряде аккумулятора пористая пленка растворяется, хотя этот процесс связан с некоторыми потерями осадка в результате его осыпания. Физико-химическим основам образования оксидных пленок посвящено, в настоящее время, значительное количество работ, например [1; 3], но практически нет работ по образованию пористых пленок. В [4; 5] даны основные положения коллоидной химии, раскрывающие процесс образования пористых осадков, в [6] приведены некоторые морфологические характеристики осадка, в [2] дан примерный состав пленки. В [7] при рассмотрении электродных процессов принята упрощенная модель пассивации в виде сплошной пленки. Учитывая, что основные физико-химические процессы идут в поровом пространстве электродов и многие технологические операции связаны с пассивацией поверхности, представляет большой теоретический и практический интерес рассмотреть кинетику роста пористой пленки. В данной работе на основе известных уравнений ионпереноса в электролитах [8] и массообмена в пористых средах [9] рассматриваются массообменные процессы в порах отрицательного электрода с образованием пористой пленки.

Математическая постановка задачи. Будем рассматривать плоскую щель (пора шириной $2H_p$), на стенках которой происходит осаждение $PbSO_4$. В качестве основных уравнений используем уравнения ионообмена в пористых средах. Примем, что компонентами жидкой среды являются: 1 – HSO_4^- , 2 – H_3O^+ , 3 – Pb^{2+} , 4 – $PbSO_4$, 5 – H_2O , тогда уравнения для соответствующих компонент примут вид:

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_1 u_G)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_G \left(D_1^{ef} \frac{\partial c_1}{\partial x} - w_1^{ef} c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] - M_1 s j_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_2)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_2 u_G)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_G \left(D_2^{ef} \frac{\partial c_2}{\partial x} + w_2^{ef} c_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] + M_2 s j_2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_3)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_3 u_G)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_G \left(D_3^{ef} \frac{\partial c_3}{\partial x} + 2w_3^{ef} c_3 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right] - M_3 s j_3, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_4 u_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_4 u_G)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_G D_4^{ef} \frac{\partial c_4}{\partial x} \right) + M_4 s j_4 - M_4 s j_{ads}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_5)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_G \rho_G c_5 u_G)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_G D_5^{ef} \frac{\partial c_5}{\partial x} \right) - M_5 s j_5, \quad (5)$$

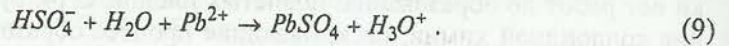
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha_G \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = F \rho_G \left(\frac{c_1}{M_1} - \frac{c_2}{M_2} - 2 \frac{c_3}{M_3} \right) - \alpha_G \varepsilon_0 \varepsilon H_P^{-1} E_n, \quad (6)$$

где t – время, с; x – координата, м; u_G – массовая скорость, м/с; c_k – массовая концентрация k -го компонента; α_G – порозность; ρ_G – плотность электролита, кг/м³; D_k^{ef} – эффективный коэффициент диффузии, м²/с; w_k^{ef} – эффективная подвижность компоненты, м²/с·В; ϕ – осредненный по ширине поры электрический потенциал, В; M_k – масса моля k -го компонента, кг/моль; s – удельная внутренняя поверхность пористой пленки, м⁻¹; j_i – источники и стоки, связанные с гетерогенными реакциями, моль/с·м²; E_n – напряженность на стенках поры. Вся полуширина поры H_P делится на две области: однородную ($0 \leq x < H_S$), для которой $\alpha_G = 1$ и, соответственно, $s = 0$, и пористую шириной h с некоторой порозностью α_G ($H_S = H_P - h$). Далее положим:

$$j_1 = j_2 = j_3 = j_4 = j_5 = j = k \frac{\rho_G^3}{M_1 M_2 M_5} c_1 c_3 c_5, \quad (7)$$

$$j_{ads} = k_{ads} \frac{\rho_G}{M_4} (c_4 - c_*), \quad (8)$$

где k, k_{ads} – коэффициенты, характеризующие скорости реакций. Соотношение (7) выражает мольный поток компонентов, возникающий в результате прохождения гетерогенной реакции на отрицательном электроде [2; 10]



Уравнение (8) [10] определяет адсорбционный мольный поток инертного компонента $PbSO_4$. Складывая уравнения (1–5), получим уравнение неразрывности для электролита

$$\frac{\partial(\alpha_G \rho_G)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_G \rho_G u_G)}{\partial x} = -s g_\Sigma - s M_4 j_{ads}, \quad (10)$$

где $g_\Sigma = (M_1 + M_3 + M_5 - M_2 - M_4) j = 0$, из которого следует, что изменение массы электролита происходит только из-за осаждения $PbSO_4$. Кроме этого необходимо учесть изменение объемной доли твердого материала, которое выражается следующим уравнением

$$\frac{\partial \alpha_T}{\partial t} = \frac{M_4}{\rho_T} s j_{ads}, \quad (11)$$

где $\alpha_T = 1 - \alpha_G$; ρ_T – плотность твердого осадка $PbSO_4$. Складывая (10) с (11) получим уравнение для определения массовой скорости в пористом теле, если известно изменение плотности от концентрации

$$\frac{\alpha_G}{\rho_G} \frac{\partial \rho_G}{\partial t} = s M_4 \frac{\rho_G - \rho_T}{\rho_G \rho_T} j_{ads} - \frac{\partial(\alpha_G \rho_G u_G)}{\rho_G \partial x}. \quad (12)$$

К этим уравнениям теперь необходимо добавить структуризационное уравнение для пористой пленки, то есть необходимо связать пористость с внутренней объемной поверхностью. Это соотношение представим в виде

$$s = A_S \varepsilon^m (1 - \varepsilon)^n, \quad (13)$$

где A_S, m, n – некоторые коэффициенты. К сожалению, никаких данных о внутренней структуре рассматриваемой пленки автору не известны. Общие зависи-

мости внутренней поверхности от порозности на основе статистического анализа даны в [11], однако эти результаты еще далеки от практического использования. Для электродов в [12; 13] используются также простые степенные зависимости, близкие к (13).

Выпишем теперь граничные условия для концентраций:

$$\text{на } x = 0 \quad \frac{\partial c_j}{\partial x} = 0; \quad (14)$$

$$\text{на } x = H_P: \alpha_G \rho_G u_G c_1 - \rho_G \left(D_1^{ef} \frac{\partial c_1}{\partial x} - w_1^{ef} c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0, \quad (15)$$

$$\alpha_G \rho_G u_G c_2 - \rho_G \left(D_2^{ef} \frac{\partial c_2}{\partial x} + w_2^{ef} c_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = 0, \quad (16)$$

$$\alpha_G \rho_G u_G c_3 - \rho_G \left(D_3^{ef} \frac{\partial c_3}{\partial x} + 2w_3^{ef} c_3 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = -\alpha_G^{-1} \rho_E U_E, \quad (17)$$

$$\alpha_G \rho_G u_G c_4 - \rho_G D_4^{ef} \frac{\partial c_4}{\partial x} = 0, \quad (18)$$

$$\alpha_G \rho_G u_G c_5 - \rho_G D_5^{ef} \frac{\partial c_5}{\partial x} = 0; \quad (19)$$

$$\text{на } x = H_S: U_S = \frac{dH_S}{dt} = -\frac{dh}{dt}, \quad (20)$$

$$c_j|_{H_S-0} = c_j|_{H_S+0}; \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \left[\rho_G (u_G - U_S) c_1 - \rho_G \left(D_1 \frac{\partial c_1}{\partial x} - w_1 c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{H_S-0} = \\ & = \left[\alpha_G \rho_G (u_G - U_S) c_1 - \rho_G \left(D_1^{ef} \frac{\partial c_1}{\partial x} - w_1^{ef} c_1 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{H_S+0} + M_1 (\alpha_T j)_{H_S+0}, \end{aligned} \quad (22)$$

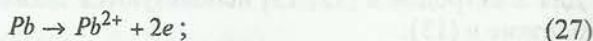
$$\begin{aligned} & \left[\rho_G (u_G - U_S) c_2 - \rho_G \left(D_2 \frac{\partial c_2}{\partial x} - w_2 c_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{H_S-0} = \\ & = \left[\alpha_G \rho_G (u_G - U_S) c_2 - \rho_G \left(D_2^{ef} \frac{\partial c_2}{\partial x} - w_2^{ef} c_2 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{H_S+0} - M_2 (\alpha_T j)_{H_S+0}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} & \left[\rho_G (u_G - U_S) c_3 - \rho_G \left(D_3 \frac{\partial c_3}{\partial x} - w_3 c_3 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{H_S-0} = \\ & = \left[\alpha_G \rho_G (u_G - U_S) c_3 - \rho_G \left(D_3^{ef} \frac{\partial c_3}{\partial x} - w_3^{ef} c_3 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \right]_{H_S+0} + M_3 (\alpha_T j)_{H_S+0}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \left[\rho_G (u_G - U_S) c_4 - \rho_G D_4 \frac{\partial c_4}{\partial x} \right]_{H_S-0} = \\ & = \left[\alpha_G \rho_G (u_G - U_S) c_4 - \rho_G D_4^{ef} \frac{\partial c_4}{\partial x} \right]_{H_S+0} - M_4 [\alpha_T (j - j_{ads})]_{H_S+0}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \left[\rho_G (u_G - U_S) c_5 - \rho_G D_5 \frac{\partial c_5}{\partial x} \right]_{H_S-0} = \\ & = \left[\alpha_G \rho_G (u_G - U_S) c_5 - \rho_G D_5^{ef} \frac{\partial c_5}{\partial x} \right]_{H_S+0} + M_5 (\alpha_T j)_{H_S+0} \end{aligned} \quad (26)$$

В этих выражениях U_E – осредненная по пластине электрода скорость растворения металла в электролите по принятой схеме [10]



ρ_E – плотность металла.

Соотношение (20) определяет связь скорости движения внешней поверхности пленки с ее толщиной; (21) – связь между концентрациями компонентов; соотношения (15) – (19) и (22) – (26) определяют потоки соответственно на внешней и внутренней границах пористой пленки. На внутренней границе постановка граничных условий крайне сложна, поэтому будем предполагать, что ток обусловлен только потоком Pb^{2+} , вследствие чего скорость U_E будем считать задаваемой, так как она связана с хорошо определяемой величиной – током в аккумуляторе. Скорость роста толщины пленки U_S определяется условиями адсорбции на фронтальной поверхности, поэтому с учетом (8) будем иметь

$$U_S = -k_{ads}^* \frac{\rho_G}{\rho_T} (c_4 - c_4^*), \quad (28)$$

где k_{ads}^* – некоторый коэффициент, близкий к k_{ads} (примем, что они равны); ρ_T – плотность $PbSO_4$. При сложении потоков всех компонентов, получим следующие равенства для массовых скоростей электролита на соответствующих границах

$$(\alpha_G \rho_G u_G)_{H_S-0} = -\alpha_G^{-1} \rho_E U_E, \quad (29)$$

$$(\rho_G u_G)_{H_S-0} - (\alpha_G \rho_G u_G)_{H_S+0} = -\alpha_T (\rho_T - \rho_G) U_S. \quad (30)$$

Сложность решения системы уравнений (1–6) состоит в том, что в шестом уравнении при обезразмеривании появляется громадное число, которое при численной реализации, вследствие соответствующего шага интегрирования по времени, не дает возможности выходить на реальное время. Поэтому в настоящее время используются приближенные методы, которые основываются на условии электронейтральности электролита в основном объеме, а также на замене уравнения (6) законом Ома. В нашем случае, так как рассматривается поровое пространство, примем условие независимости электрического тока от координаты, которое запишем в виде

$$F \rho_G \left(\frac{w_1^{ef} c_1}{M_1} + \frac{w_2^{ef} c_2}{M_2} + 4 \frac{w_3^{ef} c_3}{M_3} \right) \frac{\partial \phi}{\partial x} = i(t). \quad (31)$$

Постоянство электрического тока в поровом пространстве пленки обусловлено тем обстоятельством, что, согласно выписанным уравнениям (1–5), химической схеме (9), а также граничным условиям (15)–(19) суммарный электрический ток не проходит через поверхность солевого отложения, поскольку он равен нулю.

Для решения выписанных уравнений они предварительно обезразмериваются, с помощью определяющих масштабов и введением соответствующих переменных: $\tau = t/T$; $n = x/H_S$ – для однородной области; $N = (x - H_S)/h$ – для пористой пленки; $T = h_0^2/D_S$ – масштаб времени. Введенные переменные переводят область интегрирования в интервал $[0, 1]$, как в однородной части, так и в пористой, после чего с помощью явного численного метода решается задача.

Результаты решения. Проведенные решения носят качественный характер. При получении численных значений исследуемых параметров было принято: $D_j^{ef} = \alpha_G^{3/2} D_j$ [13, 14]; $w_j^{ef} = \frac{F}{RT} D_j^{ef}$; начальная ширина щели $H_0 = 10^{-4}$ м; начальная толщина пленки $h = 10^{-6}$ м; начальная порозность $\alpha_{G,0} = 0.8$; плотность электролита $\rho_G = 1300$ кг/м³; плотность осадка $PbSO_4$ $\rho_T = 6200$ кг/м³; плотность металла $\rho_E = 11000$ кг/м³; коэффициенты $m = n = 1$, $A_S = 10^7$.

На рис. 1 – 4 показаны кривые изменения исследуемых параметров по координате внутри пористой пленки для одного варианта расчета $U_E = 2.5 \cdot 10^{-8}$ м/с. (это значение соответствует довольно большому току, оно было принято для сокращения времени счета) На рис. 1, 2 показано изменение концентраций HSO_4^- и H_3O^+ для различных времен при разряде аккумулятора.

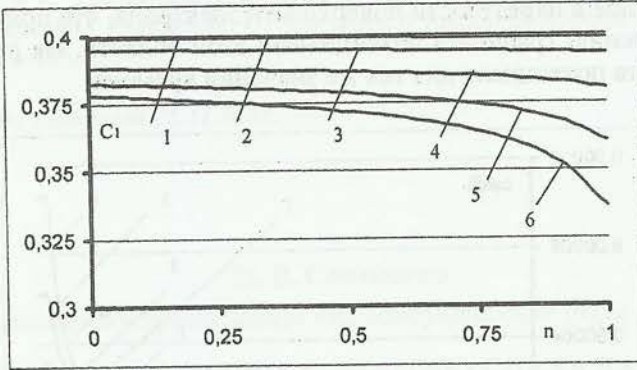


Рис. 1. Изменение концентраций HSO_4^- :
1 – t (с)=0,002; 2 – 0,500; 3 – 0,656; 4 – 0,671; 5 – 0,673; 6 – 0,674

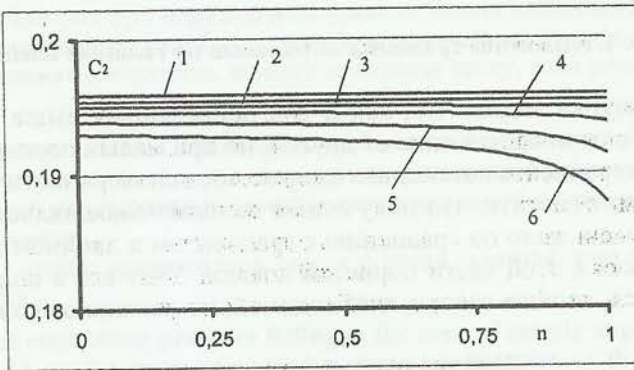


Рис. 2. Изменение концентрации H_3O^+ для тех же времен, что и на рис. 1

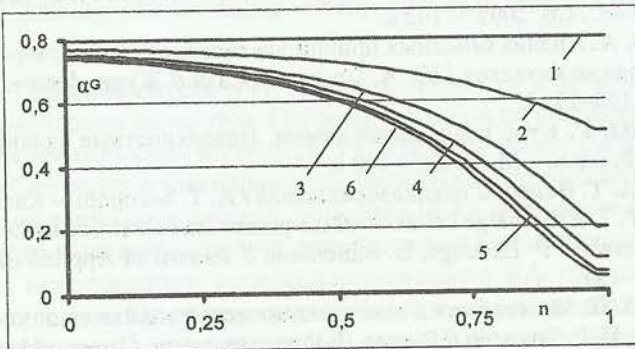


Рис. 3. Изменение порозности по толщине пленки для тех же времен

Из рисунков видно, что кривые 1, 2, 3 в рассматриваемом масштабе практически постоянны и слабо отличаются друг от друга, то есть изменения концентраций, как HSO_4^- так и H_3O^+ , по времени здесь незначительны. Основное изменение кривых начинается тогда, когда уменьшение порозности в пористом слое пассивирующей пленки старовится существенным. На рис. 3 приведены кривые зна-

чений порозности в пленке. Из него следует, что при зарастании пор пористость значительно уменьшается у поверхности электрода (внутренняя поверхность) и значительно слабее на внешней, однако это изменение практически слабо влияет на изменение концентрации компонентов. Основное влияние начинается при малых порозностях ~ 0.1 .

Существенное уменьшение порозности приводит к резкому возрастанию сопротивления в слое в окрестности поверхности электрода, что приводит к существенному изменению градиента потенциала в этой области. На рис. 4 показаны кривые градиента потенциала для тех же значений времени.

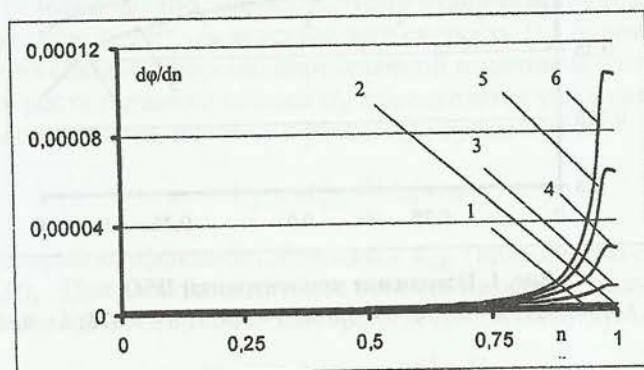


Рис. 4. Изменение градиента потенциала по толщине пленки

Из этого рисунка видно, что, как и для приведенных выше концентраций, кривые 1–3 слабо отличаются одна от другой, но при малых порозностях начинается резкий рост градиента потенциала в окрестности поверхности электрода. Однако, необходимо отметить, что полученное максимальное значение $d\phi/dn$ (на кривой 6) еще очень мало по сравнению с градиентом в двойном электрическом слое, находящемся в этой части пористой пленки. Учет его в полной постановке представляется, вообще говоря, необходимой, но довольно сложной задачей.

Библиографические ссылки

1. Феттер К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М., 1967. – 856 с.
2. Русин А. И. Свинцовые аккумуляторы и батареи (справочное пособие) / А. И. Русин, Л. Д. Хегай. – С. Пб, 2003. – 102 с.
3. Попов Ю. А. Анализ основных принципов систематизации современных моделей пассивного состояния металлов / Ю. А. Попов, С. Саха // Журн. физич. химии. – 2001. – Т. 75, № 6. – С. 1105–1114.
4. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы / Ю. Г. Фролов. – М., 1982. – 400 с.
5. Богорош А. Т. Вопросы накипобразования / А. Т. Богорош. – Киев, 1990. – 179 с.
6. Ekdunge P. The discharge behavior of the porous lead electrode in the lead-acid battery. II. Mathematical model / P. Ekdunge, D. Simonsson // Journal of Applied Electrochemistry. – 1989, 19. – P. 136–141.
7. Елисеев В. И. Массообмен в электрохимической ячейке свинцового аккумулятора / В. И. Елисеев, И. Р. Томасон // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія: «Механіка». – 2010. – Вип. 14, т. 1. – С. 126–134.
8. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. – М., 1984. – 519 с.
9. Хейфец Л. И. Многофазные процессы в пористых средах / Л. И. Хейфец, А. В. Неймарк. – М., 1982. – 456 с.
10. Дасоян М. А. Современная теория свинцового аккумулятора / М. А. Дасоян, И. А. Агуф. – Л., 1975. – 200 с.
11. Попов Ю. А. Квазигомогенная модель переноса в хаотической среде / Ю. А. Попов // Журн. физич. химии. – 2001. – Т. 75, № 12. – С. 2266–2272.

12. Семененко М. Г. Влияние распределения зерен активного материала по размерам на протекание разряда положительного электрода свинцового аккумулятора / М. Г. Семененко // Электрохимия. – 2004. – Т. 40, № 1. – С. 28–33.

13. Семененко М. Г. Моделирование процесса разряда в зернистом слое активного материала на отрицательном электроде свинцового аккумулятора / М. Г. Семененко // Электрохимия. – 2004. – Т. 40, № 1. – С. 115–118.

14. Ekdunge P. The discharge behavior of the porous lead electrode in the lead-acid battery. I. Experimental / P. Ekdunge, D. Simonsson // Journal of Applied Electrochemistry. – 1989, 19. – P. 127–135.

Надійшла до редколегії 25.11.2011.

УДК 629.764.02

П. В. Семененко

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»

СПОСОБ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ СПАДА ДАВЛЕНИЯ ПОДГОЛОВНЫМ ОБТЕКАТЕЛЕМ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «ДНЕПР»

На основі аналізу деяких особливостей перебудови зовнішнього обтікання ракети-носія «Дніпро» при переході ним трансзвукових швидкостей визначено спосіб керування швидкістю падіння тиску у зоні розміщення космічного апарата.

Ключові слова: дренавання, швидкість падіння тиску, зона розміщення космічного апарата.

На основании анализа некоторых особенностей перестройки внешнего обтекания ракеты-носителя «Днепр» при прохождении им трансзвуковых скоростей определен способ управления скоростью спада давления в зоне расположения космического аппарата.

Ключевые слова: дренирование, скорость спада давления, зона размещения космического аппарата.

The way of controlling pressure falling in the area of cosmic apparatus location has been determined on the basis of analyzing some peculiarities of the reconstruction of the external streamlining «Dnepr» rocket carrier while it's passing through the zone of transonic speed.

Key words: draining, pressure falling velocity, the area of cosmic apparatus location.

Введение. Ракета-носитель (РН) «Днепр» относится к лёгкому классу средств выведения космических аппаратов. Первоначально он не разрабатывался как средство выведения космических аппаратов. РН «Днепр» имеет свои конструктивные особенности и баллистические параметры, несколько отличающиеся от традиционных средств выведения космических аппаратов (КА), поэтому использование его в качестве средства выведения требует дополнительных исследований.

В связи с непрерывным усовершенствованием КА растут эксплуатационные требования к ним. Прежние – ужесточаются, новые появляются. Некоторые элементы конструкции современных КА могут быть чувствительны не только к определённым зависимостям изменений давления в районе его размещения, но и к скорости спада давления (ССД). Для многих КА данный эксплуатационный параметр является критерием работоспособности.

Для расширения области применения РН «Днепр», как средства выведения КА, необходима организация способов управления величиной ССД. Актуальным