

## ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА РОЗРЯДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАРТЕРНИХ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКУМУЛЯТОРІВ

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки Національної академії наук України  
ім. М. А. Полякова,

2а, вул. Сімферопольська, Дніпро, 49005, Україна;  
e-mail: Yeliseiev@nas.gov.ua

<sup>2</sup>Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України,  
5, вул. Писаржевського, Дніпро, 49005, Україна;

<sup>3</sup>Інститут технічної механіки  
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,  
15, вул. Ляшко-Попеля, Дніпро, 49005, Україна

З огляду на те, що в акумуляторі використовуються хімічно активні середовища, контроль за його роботою і станом є актуальним. Внаслідок цього актуальним є і вивчення електрохімічних процесів, що проходять під час його роботи. У цій роботі, на основі відомих рівнянь проводиться математичне моделювання масообміну в електрохімічному осередку стартерного акумулятора при його розряді. З'ясування впливу чинників на розрядні характеристики акумулятора є важливою складовою з огляду на області його можливого використання.

У математичній моделі враховуються конструктивні особливості електродів, що складаються з пористої активної маси та електропровідної каркасної решітки.

В результаті розв'язання показано вплив конструктивних та технологічних параметрів на розрядні криві. Як видно з рішення, найбільш яскраво виражено вплив величини електричного струму, що є відомим фактом. Представляють інтерес і результати розрахунків, в яких визначаються зміни кривих розряду в результаті, наприклад, зменшення електропровідності каркасної решітки.

Розглянуті аспекти впливу формування конструктивних параметрів електродів, які позначаються на розрядних властивостях акумулятора. Виявлені їх особливості та чисельна оцінка впливу і характер показників розряду акумулятора. Показано, також, що зменшення пористості порового простору за рахунок можливих газових утворень, що виділяються при заряді і залишаються в порах, може також надати помітний вплив на процес розряду. Також відзначена залежність розрядних кривих від діаметра кульок, що утворюють активну пористу масу електродів.

Наукова новизна полягає у доповненні математичної моделі залежностями, що містять конструктивні параметри електродів акумулятора.

Практична цінність отриманих результатів полягає у можливості врахування впливу пористості матеріалу електроду та діаметрів часточок на характеристики акумулятора на етапі його створення.

**Ключові слова:** електрохімічний осередок, електричний струм, потенціал, пористі електроди, розрядні криві, концентрація, пористість.

Because the battery uses chemically active substances, monitoring its operation and condition is important. Therefore, of importance is also the study of electrochemical processes that take place during its operation. This paper presents the results of a mathematical simulation of the mass exchange in an electrochemical cell of a starter battery during its discharge. The simulation is based on known equations. The elucidation of the effect of different factors on the battery's discharge characteristics is of importance in terms of areas of its possible application.

The mathematical model accounts for the design features of the electrodes, which consist of a porous active mass and a conductive grid.

The solution shows the effect of the design and manufacturing parameters on the discharge curves. As can be seen from the solution, the effect of the electric current magnitude is most pronounced. Of interest are also calculated results that show how the discharge curves vary, for example, with decreasing grid conductivity.

The effect of the electrode design parameters on the discharge properties is considered. Their features are elucidated, and a numerical estimate of their effect on the battery discharge indices is given. It is shown that a decrease in the porosity of the porous space due to gas bubbles that form when charging the battery and remain in pores may also markedly affect the discharge process. It is shown that the discharge curves also depend on the diameter of the cells that form the active porous mass of the electrodes.

The scientific novelty lies in complementing the mathematical model with relationships that include the design parameters of the battery electrodes.

The practical value of the obtained results lies in the possibility of accounting for the effect of the electrode material porosity and particle diameter on the battery performance at the battery design stage.

**Keywords:** electrochemical cell, electric current, potential, porous electrodes, discharge curves, concentration, porosity.

**Вступ.** Одним із нагальних питань сучасної техніки є контроль ро-

© В. І. Єлісєєв, В. Ю. Скосар, М. О. Катренко, 2025

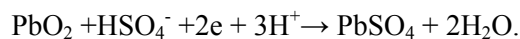
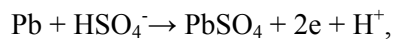
боти та стану деякого технічного об'єкта. Великою мірою це стосується і хімічних джерел струму, у яких використовуються хімічно активні середовища. У монографії [1], в якій основну увагу приділено свинцево-кислотним акумуляторам, було визначено необхідні умови та параметри контролю, що забезпечують безпеку їхньої роботи, однак у ній наголошується, що для контролю необхідно мати чітке уявлення про принцип роботи об'єкта.

Для вивчення роботи акумуляторів нині є два напрямки. Перший пов'язано із створенням еквівалентних електричних схем та підбором окремих елементів для більш точного опису електричного стану апарата [1, 2]. Другий, заснований на електрохімічних законах, спрямований на висвітлення кінетичного боку процесу. Цьому напрямку присвячено значну кількість робіт, наприклад [3 – 5].

Найбільш повно рівняння масообміну в свинцево-кислотних акумуляторах представлені в роботах [6 – 9], де і наведені одновимірні рішення. У [10] показані чисельні рішення для двовимірних модельних задач з однорідними електродами. У даній роботі враховуються провідності решіток, що служать каркасом для електродів і додатковим електропровідником, які беруть участь в загальному перенесенні електричних зарядів. Такі особливості електродів безсумнівно позначаються на розрядних характеристиках акумулятора, внаслідок цього представляє великий інтерес виявлення їх і чисельна оцінка впливу того чи іншого характерного параметра.

**Мета роботи.** Мета роботи полягає у визначенні впливу конструктивних і технологічних параметрів на розрядні характеристики стартерних акумуляторів за результатами чисельного моделювання та аналізу.

**Математична модель та граничні умови.** Відомо з літератури, що свинцево-кислотний акумулятор при розряді працює за наступною електрохімічною схемою [3 – 5]:



Перша реакція йде на негативному електроді, друга на позитивному. З цих рівнянь видно, що два електрони йдуть у негативний електрод і два електрони повертаються в електроліт з позитивного електрода. Цим визначаються напрями внутрішніх струмів між твердим матеріалом електрода та рідким розчином сірчаної кислоти, що заповнює поровий простір того чи іншого електрода.

Випишемо основні рівняння масообміну в пористих електродах [10]. Для негативного електрода можна записати:

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi_E^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_E^-}{\partial y^2} \right) = - \frac{j^-}{\sigma_E^-}, \quad (1)$$

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi_{RE}^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{RE}^-}{\partial y^2} \right) = + \frac{j^-}{\sigma_{RE}} + \frac{RT}{F} \left( \frac{\partial^2 \ln c_{RE}^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ln c_{RE}^-}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

$$\left( \frac{\partial \varepsilon_E^-}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_E^- v_{RE}^-}{\partial y} \right) = - \frac{j^- m_{H_2SO_4}}{2F \rho_R}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_E^- \left( \frac{\partial c_E^-}{\partial t} + v_{RE}^- \frac{\partial c_{RE}^-}{\partial r} \right) = - \frac{j^- m_{H_2SO_4}}{2F \rho_R} (1 - c_E^-) + D_{REf} \left( \frac{\partial^2 c_{RE}^-}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_{RE}^-}{\partial y^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_E^-}{\partial t} = - \frac{j^-}{2F} \left( \frac{m_{PbSO_4}}{\rho_{PbSO_4}} - \frac{m_{Pb}}{\rho_{Pb}} \right), \quad (5)$$

$$j^- = s^- j_0^- \left( \frac{c_{RE}^-}{c_{RE0}} \right)^{1.5} \left[ \exp \left( \frac{\alpha_A F}{RT} \eta^- \right) - \exp \left( - \frac{\alpha_C F}{RT} \eta^- \right) \right],$$

$$\eta^- = \varphi_E^- - \varphi_{RE}^- - U^-. \quad (6)$$

В цій системі перше рівняння (1) описує зміну потенціалу ( $\varphi_E, B$ ) у твердій частині електрода. Друге рівняння описує зміну потенціалу ( $\varphi_{RE}, B$ ) у розчині, що знаходиться в порах електрода. Третє рівняння служить для узгодження масових потоків у пористому тілі. Рівняння (4) служить для розрахунку концентрації електроліту ( $c_{RE}$ , сірчана кислота) у поровому об'ємі електрода. П'яте рівняння визначає перебудову порізності ( $\varepsilon$ ) у порових каналах, пов'язану зі зменшенням маси твердої частини електрода та утворенням плівки, що пасивує. Останнє рівняння визначає величини внутрішніх струмів ( $j$ , А/м<sup>3</sup>), що виникають на поверхні електродів. У цій моделі, заснованій, як вказується вище, на роботах [6 – 9], процес утворення плівки практично безпосередньо пов'язаний з основною хімічною реакцією. Далі необхідно зазначити, що у рівняннях (1) – (6):  $x, y$  – координати, м;  $\sigma_E$  – коефіцієнт електропровідності електрода, С/м;  $\sigma_{RE}$  – коефіцієнт електропровідності розчину, С/м;  $s$  – питома внутрішня поверхня електрода, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $j_0$  – густина струму обміну, А/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – перенапряга, В;  $U$  – стандартний рівноважний потенціал між електродом та розчином (для негативного електрода він був прийнятий рівним  $-0,3$  В);  $c_{RE0}$  – початкова концентрація кислоти;  $v_{RE}$  – масова швидкість електроліту в поровому просторі електрода, м/с;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/моль;  $T$  – температура, К;  $F$  – число Фарадея, Кл/моль;  $\rho_R, \rho_{Pb}, \rho_{PbSO_4}$  – густини, відповідно, розчину, свинцю, осаду, кг/м<sup>3</sup>;  $m_{H_2SO_4}, m_{Pb}, m_{PbSO_4}$  – мольні маси сірчаної кислоти, свинцю та осаду, кг/моль;  $D_{REf}$  – ефективний коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с. Індекс “–” зверху вказує на негативний електрод.

До позитивного електрода відноситься така система рівнянь (згори використовується індекс “+”):

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi_E^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_E^+}{\partial y^2} \right) = - \frac{j^+}{\sigma_E^+}, \quad (7)$$

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi_{RE}^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{RE}^+}{\partial y^2} \right) = \frac{j^+}{\sigma_{RE}} + \frac{RT}{F} \left( \frac{\partial^2 \ln c_{RE}^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ln c_{RE}^+}{\partial y^2} \right), \quad (8)$$

$$\left( \frac{\partial \varepsilon_E^+}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon_E^+ v_{RE}^+}{\partial y} \right) = \frac{j^+}{2F\rho_R} (m_{H_2SO_4} - 2m_{H_2O}), \quad (9)$$

$$\varepsilon_E^+ \left( \frac{\partial c_{RE}^+}{\partial t} + v_{RE}^+ \frac{\partial c_{RE}^+}{\partial r} \right) = \frac{j^+}{2F\rho_R} [m_{H_2SO_4} (1 - c_{RE}^+) + 2m_{H_2O} c_{RE}^+] + \\ + D_{Ref} \left( \frac{\partial^2 c_{RE}^+}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_{RE}^+}{\partial y^2} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_E^+}{\partial t} = \frac{j^+}{2F} \left( \frac{m_{PbSO_4}}{\rho_{PbSO_4}} - \frac{m_{PbO_2}}{\rho_{PbO_2}} \right), \quad (11)$$

$$j^+ = s^+ j_0^+ \left( \frac{c_{RE}^+}{c_{RE0}^+} \right)^{1.5} \left[ \exp \left( \frac{\alpha_A F}{RT} \eta^+ \right) - \exp \left( -\frac{\alpha_C F}{RT} \eta^+ \right) \right],$$

$$\eta^+ = \varphi_E^+ - \varphi_{RE}^+ - U^+, \quad (12)$$

де:  $\rho_{PbO_2}$ ,  $m_{PbO_2}$  – відповідно густина та мольна маса  $PbO_2$ ;  $m_{H_2O}$  – мольна маса води. Стандартний потенціал  $U$  для позитивного електрода був взятий у [3]. Враховуючи, що в поровому просторі сепаратора немає внутрішніх струмів і постійність рівняння тут значно спрощуються і мають вигляд (у параметрів забирається верхній індекс і додається внизу індекс «s»):

$$\left( \frac{\partial^2 \varphi_{RS}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_{RS}}{\partial y^2} \right) = \frac{RT}{F} \left( \frac{\partial^2 \ln c_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ln c_s}{\partial y^2} \right), \quad (13)$$

$$\varepsilon_s \left( \frac{\partial c_s}{\partial t} + v_s \frac{\partial c_s}{\partial r} \right) = D_{sef} \left( \frac{\partial^2 c_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c_s}{\partial y^2} \right). \quad (14)$$

Граничні та початкові умови тут такі самі, що в [10]. Як і там, вважаємо, що потенціал у центральній відкритій зоні між негативним електродом та сепаратором дорівнює нулю. Концентрація сірчаної кислоти зменшується в міру її витрати в електродах

$$c_* = \frac{M_{H_2SO_4} - \rho_R \int_0^t g_{H_2SO_4} dt}{M_{H_2SO_4} - \rho_R \int_0^t g_{H_2SO_4} dt + M_{H_2O}} \quad (15)$$

де:  $c_*$  – концентрація електроліту у центральній зоні осередку;  $M_{H_2O}$ ,  $M_{H_2SO_4}$  – відповідно маса води та маса кислоти в центральній зоні осередку.

У цих рівняннях з метою спрощення рахунку електропровідність розчину приймаємо незалежною від координат, але лінійно пов'язаною з концентрацією  $c_*$ , що є грубою апроксимацією кривих, показаних у

[3]. Густина розчину вважаємо також постійною у просторі, але згодом вона корелюється за наближеною залежністю

$$\rho_R = \frac{\rho_{H_2O} \rho_{H_2SO_4}}{c_* \rho_{H_2O} + (1 - c_*) \rho_{H_2SO_4}}. \quad (16)$$

Тепер, враховуючи, що електрод складається з металевої решітки (свинець і невелика частка сурми) і відповідного порошку (свинець для анода і двоокис свинцю для катода) представимо величини ефективної електропровідності у вигляді:

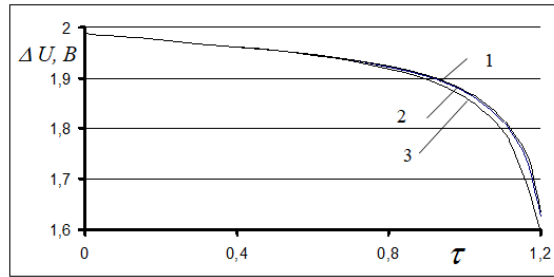
$$\sigma_E^{\mp} = \sigma_N^{\mp} L \frac{Sc1^{\mp} \cdot Sc2^{\mp}}{h^{\mp}} \left[ 4 \cdot Sc1^{\mp} \cdot Sc2^{\mp} + \right. \\ \left. + \sigma_N^{\mp} \left[ (N_G^{\mp} - 2) \cdot h_N^{\mp} Sc2^{\mp} + (N_G^{\mp} - 1) \cdot H \cdot l_S^{\mp} \cdot Sc1^{\mp} \right] \right]^{-1}, \quad (17)$$

де:  $\sigma_N^{\mp}, \sigma_N^{+}$  – коефіцієнти електропровідності матеріалу каркасної решітки в електродах;  $h^{\mp}, h^{+}$  – напівширина кожного з електродів;  $L = N_G^{\mp} h_N^{\mp} + (N_G - 1) l_S^{\mp}$  – висота електродів (вважаємо її однаковою);  $N_G^{\mp}, N_G^{+}$  – кількість горизонтальних ниток в решітках;  $H = N_W^{\mp} h_N^{\mp} + (N_W - 1) h_S^{\mp}$  – довжина;  $N_W^{\mp}, N_W^{+}$  – кількість вертикальних ниток в решітці;  $\sigma_A^{\mp}$  – електропровідність активних мас електродів,  $Sc1^{\mp} = \sigma_A^{\mp} (h^{\mp} - h_N^{\mp} / 2) + \sigma_N^{\mp} h_N^{\mp} / 2$ ;  $Sc2^{\mp} = N_G^{\mp} h_N^{\mp} Sc1^{\mp} + (N_G^{\mp} - 1) \sigma_A^{\mp} h \cdot h_S^{\mp}$ .

Як правило, каркасна решітка зроблена з металевих ниток радіуса  $R_N^{\mp}$ , внаслідок цього  $h_N^{\mp} = \pi^{1/2} R_N^{\mp}$  – ширина межі квадрата поперечного перерізу нитки. Нарешті,  $h_S^{\mp}$  і  $l_S^{\mp}$  – це ширина і висота осередку між нитками каркасної решітки, які визначаються з  $L$  та  $H$ .

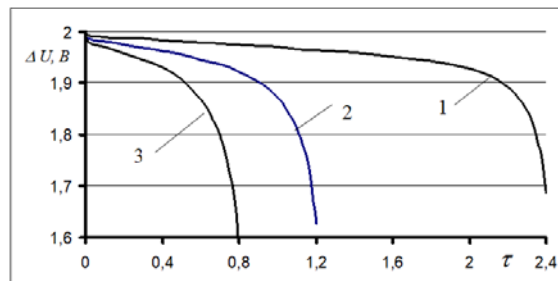
**Результати та обговорення.** Для розрахунків процесів розряду електрохімічного осередку фізичні параметри були взяті з робіт [4, 5, 7 – 10], початкову концентрацію сірчаної кислоти прийmemo рівною 0,4. У першій серії розрахунків було розглянуто вплив ширини центральної щілини електрохімічного осередку ( $h$ ) на розрядні криві. На рис. 1 показані залежності  $\Delta U$  – різниця у напругах на струмозбірниках двох електродів від безрозмірного часу  $\tau = t/T$  при трьох різних її значеннях. Величина  $T = h_E^2 / D_G$  – масштаб часу, тут і далі дорівнює  $10^3$  с ( $h_E = 0,001$  м – напівширина електрода;  $D = 10^{-9}$  – масштабний коефіцієнт дифузії, м<sup>2</sup>/с).

Як видно з рис. 1 зміни ширини щілини в межах, про які йде мова, не суттєво впливають на розрядні характеристики, хоча крива 3, що відповідає вужчій щілині, показує більш активне падіння напруги.



Залежності: 1 –  $h = 1,5$  мм; 2 – 1 мм; 3 – 0,5 мм. Струм  $I = 9$  А  
Рис. 1 – Вплив ширини зазору на розрядні характеристики в осередку

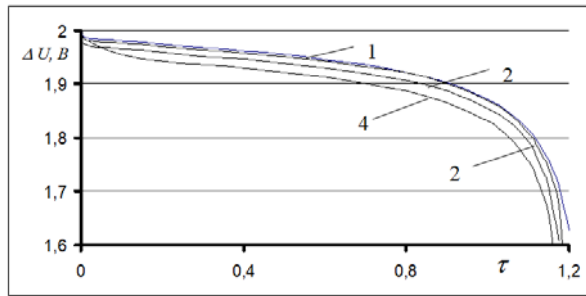
Це вказує на те, що кількості електроліту в пористих просторах електродів і в центральній зоні цілком достатньо для нормальної роботи акумулятора, принаймні, в межах розглянутого інтервалу часу. У подальших розрахунках вважатимемо величину  $h = 1$  мм, що досить близько до реального розміру. Величина  $I$  – це струм, який проходить в електрохімічному осередку, що розглядається, обмеженому осями симетрії електродів. Друга серія розрахунків була зроблена для ілюстрування впливу величини робочого струму  $I$ , А на падіння напруги між електродами. Ця важлива характеристика показана на рис. 2



Залежності: 1 –  $I = 13,5$  А; 2 – 9 А; 3 – 4,5 А  
Рис. 2 – Розрядні характеристики акумулятора для різних струмів

З цього рисунка видно, що за характером отримані з наших розрахунків розрядні криві досить близькі до відомих кривих, наведених в [11 – 12]. Однією з важливих особливостей позитивного електрода є те, що питома електропровідність його активної маси є порівняно низькою [4, 7], а питома електропровідність каркасної решітки значно вищою. Внаслідок цього еквівалентна електропровідність позитивного електрода у великій мірі залежить від контакту цих елементів. У [4] відзначається сильний вплив решітки на електричні характеристики акумулятора, тому представляє інтерес визначити ці залежності. З формули (17) видно, що при  $\sigma_N^{\mp} = 0$  ефективна електропровідність електродів теж дорівнює нулю, це фактично і обумовлює сильну залежність роботи електродів від електропровідності решіток. У серії розрахунків було розглянуто вплив зміни провідності решітки на зменшення  $\Delta U$ . Були розглянуті цілком помірні режими. У формулі (17) був введений коефіцієнт, який характеризував зменшення електропровідності решітки,

тобто  $\sigma_N^{\mp} = \beta \sigma_{N0}^{\mp}$ , де  $\sigma_{N0}^{\mp}$  – стандартна величина електропровідності. На рис. 3 показані криві з різними значеннями  $\beta$ .

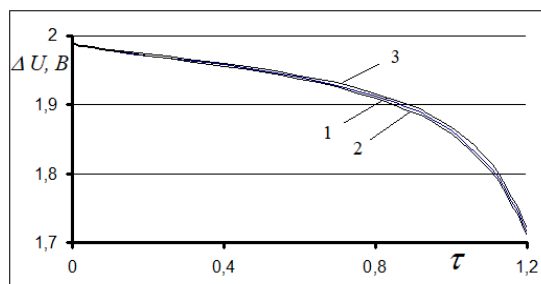


Залежності: 1 –  $\beta = 1$ ; 2 – 0,5; 3 – 0,2; 4 – 0,1. Струм  $I = 9$  А

Рис. 3 – Вплив провідності решітки позитивного електрода на розрядні характеристики акумулятора

З розрахунків випливає, що зменшення цього коефіцієнта (наприклад, збільшення контактного опору) призводить до більш швидкого і помітного падіння напруги, що в якійсь мірі узгоджується з [4]. Коефіцієнт  $\beta$  вводився як для негативного електрода, так і для позитивного. Як показують розрахунки, введення такого коефіцієнта для негативного електрода практично не змінює його стан. Це зрозуміло, тому що електропровідність активної маси негативного електрода збігається з електропровідністю каркасної решітки, об'ємна частка якої значно менше об'ємної частки активної маси. Таким чином, помітне падіння кривих пов'язане з роботою позитивного електрода. Наступні серії розрахунків відносяться до визначення впливу порізності електродів.

У першому варіанті розглянемо питання про щільність пасивуючих кристалів з  $PbSO_4$ . Ясно, що, чим щільніше це утворення, тим менший обсяг він займає в поровому просторі електрода. Попередні результати були отримані при щільності  $6323 \text{ кг/м}^3$ . На рис. 4 наведені криві зміни перепаду потенціалу ще для двох можливих варіантів цієї величини.



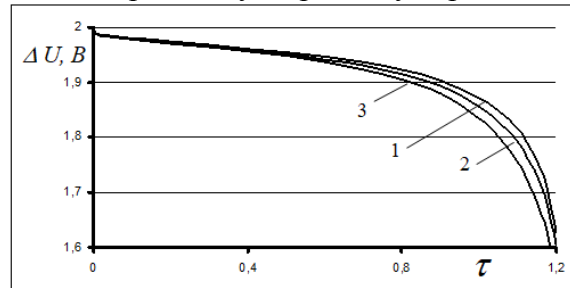
Залежності: 1 –  $\rho_{PbSO_4} = 6323 \text{ кг/м}^3$ ; 2 –  $7587 \text{ кг/м}^3$ ; 3 –  $5058,4 \text{ кг/м}^3$ . Струм  $I = 9$  А

Рис. 4 – Зміна поведінки розрядних характеристик в залежності від щільності осаду

З рисунка видно, що зміна щільності осаду в наведених межах слабо позначається на кривих розряду. Іншим цікавим прикладом зміни порізності активної маси є можлива поява газових утворень в поровому просторі електродів. Згідно [3] вони виникають там при зарядці

акумулятора і можуть там залишатися тривалий час, займаючи близько 15 % – 20 % від порізності.

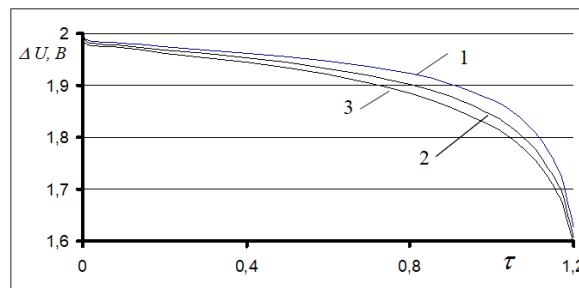
Наведемо результати розрахунків для декількох випадків, приймаючи рівномірний розподіл газової фази по об'єму позитивного електрода. Рис. 5 показує, що в цьому випадку падіння розрядних кривих відбувається швидше, при цьому в третьому варіанті воно істотніше.



Залежності: 1 –  $\varepsilon = 0,503$ ; 2 –  $0,4527$ ; 3 –  $0,4024$ . Струм  $I = 9$  А

Рис. 5 – Розрядні характеристики акумулятора

Розрахунки, пов'язані з лінійними розподілами газової фази по висоті електрода з підтриманням сталості середньої порізності, практично не привели до якихось помітних змін кривих, внаслідок чого вони тут не наведені. Остання серія розрахунків показує вплив розмірів частинок, які служать елементами пористого тіла електродів, і кількості їх в активних масах. На рис. 6 наведені криві розряду з електродами, що складаються з кульок діаметром  $d = 10$  мкм; 20 мкм; 30 мкм.



Залежності: 1 – 10 мкм; 2 – 20 мкм; 3 – 30 мкм. Струм  $I = 9$  А

Рис. 6 – Розрядні характеристики акумулятора

Зміна діаметра кульок проводилася одночасно в обох електродах. Для збереження повного об'єму електрода і його порізності необхідно було зменшувати кількість кульок у відповідну кількість разів. Тут, як впливає з рис. 6, вплив діаметра частинок досить істотний, причому зі збільшенням діаметра частинок активної маси їх криві розряду зменшуються швидше. Така поведінка процесу пов'язана з тим, що зі збільшенням діаметра частинок при постійній початковій об'ємній частці твердої частини електрода, відносна об'ємна внутрішня поверхня зменшується.

Тому величина струму на одиницю внутрішньої поверхні зростає, що призводить до більш швидкого зменшення активної маси і збільшення опору.

**Висновки.** Проведені розрахунки показали, що розрядні характеристики змінюються при зміні досліджуваних параметрів. У ряді випадків ці зміни незначні, але в деяких випадках цілком істотні.

Найбільш чутлива зміна розрядних характеристик при зміні величини розрядного струму, а саме: чим більше струм, тим крутіше зменшується величина напруги. Це добре відповідає всім відомим експериментальним розрядним характеристикам.

Розрядні характеристики також помітно залежать від наявності газових утворень в поровому просторі електродів, а також від розміру частинок активної маси. Зокрема, при збільшенні кількості газових утворень і при збільшенні розмірів часток в активних масах розрядні характеристики зменшуються істотніше.

В цілому зазначені результати задовільно відповідають відомим експериментальним фактам та зміні розрядних характеристик.

1. Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Житник Н. Е., Ширман О. И. Контроль состояния химических источников тока. Київ. Наук. Думка. 2014. 132 с.
2. Хрусталева Д. А. Аккумуляторы. М.: Изумруд. 2003. 224с.
3. Dasoyan M. A., Aguf I. A. Current theory of lead acid batteries. Stonehouse Glos. Technicopy Limited. 1979. 371 p.
4. Багоцкий Д. А., Скундин А. М. Химические источники тока. М.: Энергоиздат. 1981. 360 с.
5. Кошель М. Д. Теоретичні основи електрохімічної енергетики. Дніпро: УДХТУ. 2002. 430 с.
6. Vahid Esfahanian, Torabi Farschad, Mosahebi Ali An Improved Model of Lead-Acid Batteries for Simulation of VRLA Batteries. Journal of Power Sources Symposium. England. 2007. p. 9. <https://wp.kntu.ac.ir/forabi/Resources/Publications/An%20Improved%20Mathematical%20Model%20of%20Lead%20E2%80%93Acid%20Batteries%20for%20Simulation%20of%20VRLA%20Batteries.pdf> (дата звернення 21.10.2025).
7. Vahid Esfahanian, PooyanKheirhan, Hassan Bahramian, Amir Babac Ansori, Goodarz Ahmadi. The Effects of Electrode Parameters on Lead-Acid Battery Perfomance. Anvanged Materials Research. 2013. Vol. 651. Pp. 492–498. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.651.492>
8. Hiram Gu, Nguyen T. V., White R. E. A mathematical Model of a Lead-Acid Cell. Discharge, Rest and Sarge. J. Electrochem. Soc. Electrochemical science and technology. 1987. Vol. 134, No. 12. Pp. 2953–2960. <https://doi.org/10.1149/1.2100322>
9. Shah A. A., Li X., Wills R.G.A., Walsh F.C. A mathematical Model for the Soluble Lead-Acid Flow Battery. J. of the Electrochemical Society. 2010. V. 157, No. 5. A589 – A599.
10. Єлісєєв В. І., Совін Ю. П., Катренко М. О. Масоперенос у пористих електродах свинцево-кислотного акумулятора при розряді. Технічна механіка: 2024. № 2. С. 124–136. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.124>
11. Як розрахувати час роботи джерела безперебійного живлення. Системи гарантованого електроживлення: URL: <https://dbz.systems/2023/07/06/tozrahunok-chasu-roboti-dbzh/>. (дата звернення 06.10.2025).
12. Кислотні акумулятори. МЕДІА-ЦЕНТР: URL: <https://real-el.ua/ua/media/useful/e1798/> (06.11.25) (дата звернення 06.10.2025).

Отримано 31.10.2025,  
в остаточному варіанті 01.12.2025