УДК 621.355.9 https://doi.org/10.15407/itm2026.03.082

В. І. ЄЛІСЄЄВ[1,2], https://orcid.org/0000-0003-4999-8142
В. Ю. СКОСАР[2], https://orcid.org/0000-0002-2151-3417
М. О. КАТРЕНКО[3], https://orcid.org/0000-0003-1015-5746

ЧИСЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗРЯДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ТИПУ AGM

[1]Інститут геотехнічної механіки Національної академії наук України ім. М. А. Полякова,
2а, вул. Сімферопольська, Дніпро, 49005, Україна; e-mail:Yelisieiev@nas.gov.ua
[2]Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України,
5, вул. Писаржевського, Дніпро, 49005, Україна;
[3]Інститут технічної механіки Національної академії наук України і
Державного космічного агентства України,
15, вул. Ляшко-Попеля, Дніпро, 49005, Україна, https://ror.org/003ed9546

Наявність хімічних джерел струму у складі транспортних засобів, багатьох видів літальних апаратів та стаціонарних енергетичних систем є характерною та реальною необхідністю. Сучасний стан хімічних джерел струму охоплює широке коло проблем, вирішення яких базується на багатьох галузях знань. При цьому вкрай трудомісткими залишаються експериментальні дослідження. Різноманітність апаратів і сучасних технологій вимагає адекватних кваліфікованих рішень. Одним із наукових напрямів, що забезпечують розвиток і контроль роботи акумуляторів, є побудова еквівалентних електричних схем, які дозволяють отримати достатньо точні відповіді. Іншим є класичний підхід, заснований на електрохімічних законах поведінки гетерогенних систем в активній іонізованій середі.

У цій роботі на основі відомих у літературі рівнянь іонообміну в електролітах за наявності електрохімічних реакцій на поверхнях електродів проводиться математичне моделювання процесу розряду тягового акумулятора типу AGM (Absorbent Glass Mat).

У математичній моделі враховуються основні конструктивні та фізико-хімічні особливості цього типу акумуляторів. Для виписаних рівнянь використовується явна кінцево-різницева схема. Розрахунки проводяться в рамках двовимірної моделі. У результаті чисельного розв'язання отримано розрядні залежності, що характеризують процес розряду за різних величин струму та товщин пластин сепаратора. Відзначається сильний вплив величини струму на характер розрядної залежності. На базі відомих експериментальних даних і теоретичних залежностей проводиться оцінка отриманих величин. Показано, що за порівняно невеликих струмів для знайдених значень часу процесу розряду та величин струму виконується відома залежність. Сучасна теорія еквівалентних схем дозволяє отримати криву розряду з гарним ступенем точності, внаслідок чого порівняння з такою залежністю видається цілком коректним.

Таким чином, оцінка часу розряду, отримана чисельним розв'язанням повної системи рівнянь, що описує масообмін в електрохімічній комірці акумулятора, є доволі близькою до теоретичної залежності. Крім того, в певній області значень вона близька і до опублікованих даних інших авторів, для реальних акумуляторів цього типу, що працюють. Це вказує на перспективність подальшого поглиблення та розвитку математичної моделі на основі фізико-хімічних законів, оскільки це дає повніше уявлення про процес і про поведінку тих чи інших параметрів та компонентів, пов'язаних із ним.

Отже, наукова новизна цієї роботи полягає в математичному оформленні роботи складної електрохімічної системи з певними технологічними та конструктивними особливостями.

Практична цінність полягає в можливості моделювання та розрахунку параметрів сучасних джерел струму. Це важливо як для нових типів хімічних джерел струму, що створюються, так і для контролю роботи та визначення стану акумуляторів, для акумуляторів цього типу, що перебувають в експлуатації.

Ключові слова: *електрохімічний осередок, електричний струм, потенціал, пористі електроди, розрядні залежності, концентрація, порізність.*

Chemical current sources are an integral part of vehicles, many types of aircraft, and stationary power systems. The current state of chemical current sources encompasses a wide range of problems, whose solution is based on many fields of knowledge. At the same time, experimental studies remain extremely labor-intensive. The diversity of devices and modern technologies requires adequate, qualified solutions. One of the research lines ensuring the development and performance control of batteries is the construction of equivalent electrical circuits, which make it possible to obtain sufficiently accurate answers. Another, classical, approach is based on the electrochemical laws governing the behavior of heterogeneous systems in an active ionized medium.

In this work, based on familiar equations of ion exchange in electrolytes in the presence of electrochemical reactions on the electrode surfaces, the AGM-type traction battery discharge process is simulated mathematically.

The mathematical model takes into account the main design and physicochemical features of this battery type. The equations are solved numerically using an explicit 2D finite-difference scheme. As a result, discharge characteristics are obtained at various current values and separator plate thicknesses. A strong effect of the current

© В. І. Єлісєєв, В. Ю. Скосар, М. О. Катренко, 2026

The article is an open access article distributed underthe terms and conditions of the Creative Commons Attributions (CC BY) license (https/creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

magnitude on the behavior of the discharge characteristic is noted. The obtained values are evaluated based on known experimental data and theoretical relationships. It is shown that at relatively small currents, the found values of the discharge process time and the current magnitudes obey the known relationship. The modern equivalent circuit theory allows a discharge curve to be obtained to a good of accuracy, thus making a comparison with it quite correct.

Thus, the estimated discharge time obtained by numerically solving the complete system of equations describing mass transfer in an electrochemical cell of the battery is quite close to the theoretical relationship. Furthermore, in a certain range of values, it is also close to the published data of other authors for real operating batteries of this type. This indicates the promisingness of further deepening and developing the mathematical model based on physicochemical laws to provide a deeper insight into the process and the behavior of various parameters and components associated with it.

Hence, the scientific novelty of this work lies in the mathematical formalization of the operation of a complex electrochemical system with certain technological and design features.

Its practical value lies in the possibility of simulating and calculating the parameters of modern current sources. This is important both for newly created types of chemical current sources and for controlling the operation and determining the state of batteries of this type currently in operation.

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

Вступ. Сучасний автотранспорт із системою «старт – стоп», розгалуженою бортовою електронікою, а також гібриди та електромобілі все частіше комплектуються свинцево-кислотними AGM-акумуляторами (Absorbent Glass Mat). Особливістю таких батарей є повне поглинання електроліту скловолоконним сепаратором. Це забезпечує стійкість до вібрацій, захист від витікання й корозії пластин, а також мінімальний внутрішній опір і герметичність корпусу з майже нульовим газовиділенням [1].

Конструктивно сепаратор у таких елементах щільно прилягає як до позитивного, так і до негативного електродів. Попри певні нюанси, ця особливість не змінює базових принципів математичної моделі, описаної в [2, 3], проте потребує її певної адаптації та доопрацювання.

Сьогодні діагностика й дослідження акумуляторів розвиваються у двох головних напрямах. Перший спирається на побудову еквівалентних електричних схем [4 – 6], що дозволяє оперативно контролювати параметри і стан пристрою [7]. Хоча цей метод дуже ефективний, деякі внутрішні процеси при цьому залишаються «в тіні» [8]. Другий напрямок базується на прямому моделюванні електрохімічних процесів: він детальніше відображає всю сутність явища, але набагато складніший у математичному плані.

Спираючись на розширену модель із праць [2, 3], у дослідженні [9] вже виконувалися розрахунки розрядних характеристик для стартерних акумуляторів.

Мета роботи. Проведення математичного моделювання процесу розряду тягового акумулятора типу AGM (Absorbent Glass Mat) при наявності електрохімічних реакцій на поверхнях електродів на основі рівнянь іонообміну.

Математична модель і граничні умови. Випишемо основні рівняння масообміну в пористих електродах [2, 3, 9]. Для негативного електрода можна записати:

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

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

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_E^-}{\partial t}+\frac{\partial \varepsilon_E^- v_{RE}^-}{\partial y}\right)=-\frac{j^- m_{H2SO4}}{2F\rho_R}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_E^-\left(\frac{\partial c_E^-}{\partial t}+v_{RE}^-\frac{\partial c_{RE}^-}{\partial r}\right)=-\frac{j^- m_{H2SO4}}{2F\rho_R}\left(1-c_E^-\right)+D_{REef}\left(\frac{\partial^2 c_{RE}^-}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 c_{RE}^-}{\partial y^2}\right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_E^-}{\partial t}=-\frac{j^-}{2F}\left(\frac{m_{PbSO4}}{\rho_{PbSO4}}-\frac{m_{Pb}}{\rho_{Pb}}\right), \quad (5)$$

$$j^-=s^- j_0^-\left(\frac{c_{RE}^-}{c_{RE0}}\right)^{1.5}\left[\exp\left(\frac{\alpha_A F}{RT}\eta^-\right)-\exp\left(-\frac{\alpha_C F}{RT}\eta^-\right)\right],\ \eta^-=\varphi_E^--\varphi_{RE}^--U^-. \quad (6)$$

У цих рівняннях: *x, y* – координати, м; φ_E – потенціал електрода, В; φ_{RE} - потенціал електроліту, *B;* σ_E – коефіцієнт електропровідності електрода, С/м; σ_{RE} – коефіцієнт електропровідності розчину, С/м; *s* – питома внутрішня поверхня електрода, м^2/м^3; *j* – внутрішні струми на поверхні електрода, А/м^3; j_0 – густина струму обміну, А/м^2; η – перенапруга, В; *U* – стандартний рівноважний потенціал між електродом та розчином (для негативного електрода він був прийнятий рівним – 0,3 В); $c_{RE,}$ c_{RE0} – поточна та початкова концентрація кислоти; v_{RE} – масова швидкість електроліту в поровому просторі електрода, м/с; ε_E – порізність електрода; *R* – універсальна газова стала, Дж/моль К; *T* – температура, К; *F* – число Фарадея, Кул/моль; $\rho_{R,}$ $\rho_{Pb,}$ ρ_{PbSO4} – густини, відповідно, розчину, свинцю, осаду, кг/м^3; $m_{H2SO4,}$ $m_{Pb\,,}$ m_{PbSO4} – мольні маси сірчаної кислоти, свинцю та осаду, кг/моль; D_{REef} – ефективний коефіцієнт дифузії, м^2/с.

Індекс "–" зверху вказує на негативний електрод. Наступна система рівнянь відноситься до позитивного електрода (зверху використовується індекс "+"):

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

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

$$\left(\frac{\partial \varepsilon_E^+}{\partial t}+\frac{\partial \varepsilon_E^+ v_{RE}^+}{\partial y}\right)=\frac{j^+}{2F\rho_R}\left(m_{H2SO4}-2m_{H2O}\right), \quad (9)$$

$$\varepsilon_E^+\left(\frac{\partial c_E^+}{\partial t}+v_{RE}^+\frac{\partial c_{RE}^+}{\partial r}\right)=\frac{j^+}{2F\rho_R}\left[m_{H2SO4}\left(1-c_{RE}^+\right)+2m_{H2O}c_{RE}^+\right]+D_{REef}\left(\frac{\partial^2 c_{RE}^+}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 c_{RE}^+}{\partial y^2}\right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_E^+}{\partial t}=\frac{j^+}{2F}\left(\frac{m_{PbSO4}}{\rho_{PbSO4}}-\frac{m_{PbO2}}{\rho_{PbO2}}\right), \quad (11)$$

$$j^+ = s^+ j_0^+ \left(\frac{c_{RE}^+}{c_{RE0}} \right)^{1.5} \left[\exp\left(\frac{\alpha_A F}{RT} \eta^+ \right) - \exp\left(-\frac{\alpha_C F}{RT} \eta^+ \right) \right], \; \eta^+ = \varphi_E^+ - \varphi_{RE}^+ - U^+, \quad (12)$$

де: ρ_{PbO2}, m_{PbO2} – відповідно густина та мольна маса PbO_2; m_{H2O} – мольна маса води; $\alpha_A = \alpha_C = 0{,}5$ – коефіцієнти перенесення.

Стандартний потенціал U для позитивного електрода було взято рівним 1,7 В [10]. У поровому просторі сепаратора немає внутрішніх струмів між поверхнею сепаратора та електролітом і порізність постійна, тому 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 умови тут аналогічні [11], тобто, це рівність масових та електричних потоків на межах областей. Математичною особливістю цієї задачі в порівнянні з [9, 11] є те, що сепаратор щільно притиснутий до електродів, і електроліт вважається нерухомим. Внаслідок цього приймемо, що v_{RE}^- і v_{RE}^+ дорівнюють нулю. З іншого боку, оскільки завдання у нас плоске, то, внаслідок двомірності наших рівнянь, для c_S приймемо два граничні варіанти. У першому – на нижній та верхній межах сепаратора $c_S = c_0$ (c_0 – початкова концентрація електроліту), і у другому – дифузійні потоки маси електроліту на цих межах дорівнюють нулю. Перший випадок вказує на те, що за межами електрохімічного осередку є достатня кількість електроліту, другий вказує на повну його відсутність за межами осередку.

Результати розрахунків. Для розрахунків процесу розряду електрохімічного осередку фізичні параметри були взяті з робіт [2, 3, 10], початкову концентрацію сірчаної кислоти c_0 приймемо 0,4. У першій серії розрахунків було розглянуто вплив ширини сепаратора (h_S) на розрядні криві при заданих струмах розряду і постійної концентрації електроліту на верхній і нижній межах сепаратора. На рис. 1 для першого варіанту показано залежності ΔU (різниця у напругах на струмозбірниках двох електродів) від безрозмірного часу $\tau = t/T$ при трьох різних значеннях струму (I = 9; 18; 27 А) та трьох різних значеннях товщини пластини сепаратора (h_S = 2; 3; 4 мм). Величина $T = h_E^{\,2} / D_G$ – масштаб часу, тут і далі дорівнює 10^3 с (h_E = 0,001 м – напівширина негативного електрода; $D_G = 10^{-9}$ – масштабний коефіцієнт дифузії, м^2/с).

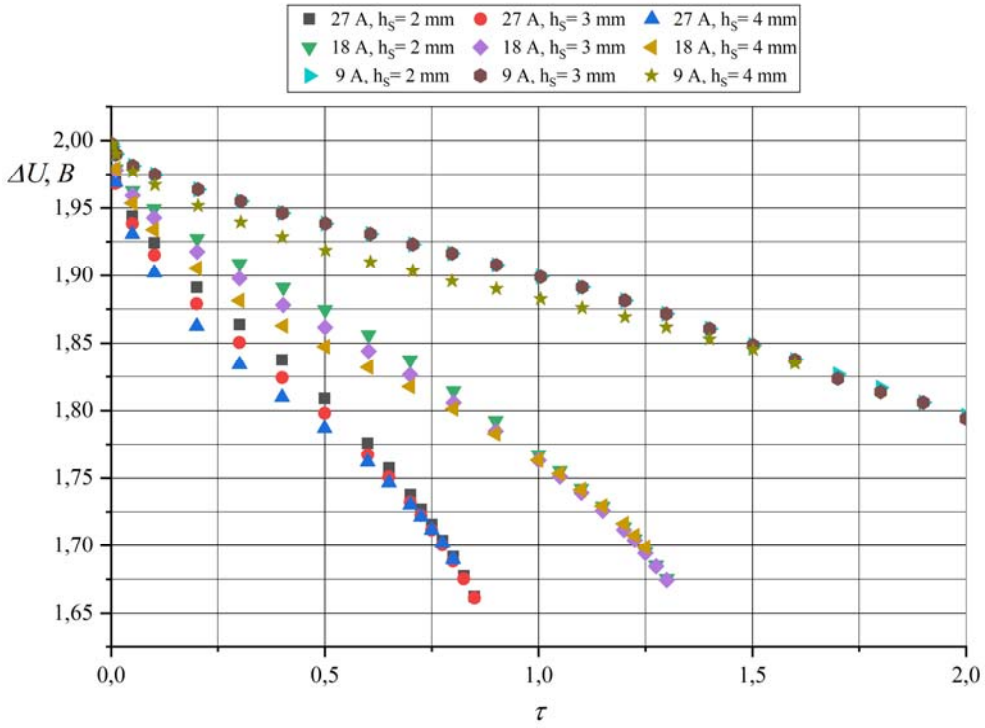


Рис. 1 – Залежності розряду електрохімічного осередку

На рис. 2 наведено результати розрахунків для другого варіанту, коли дифузійні потоки на зазначених вище межах дорівнюють нулю.

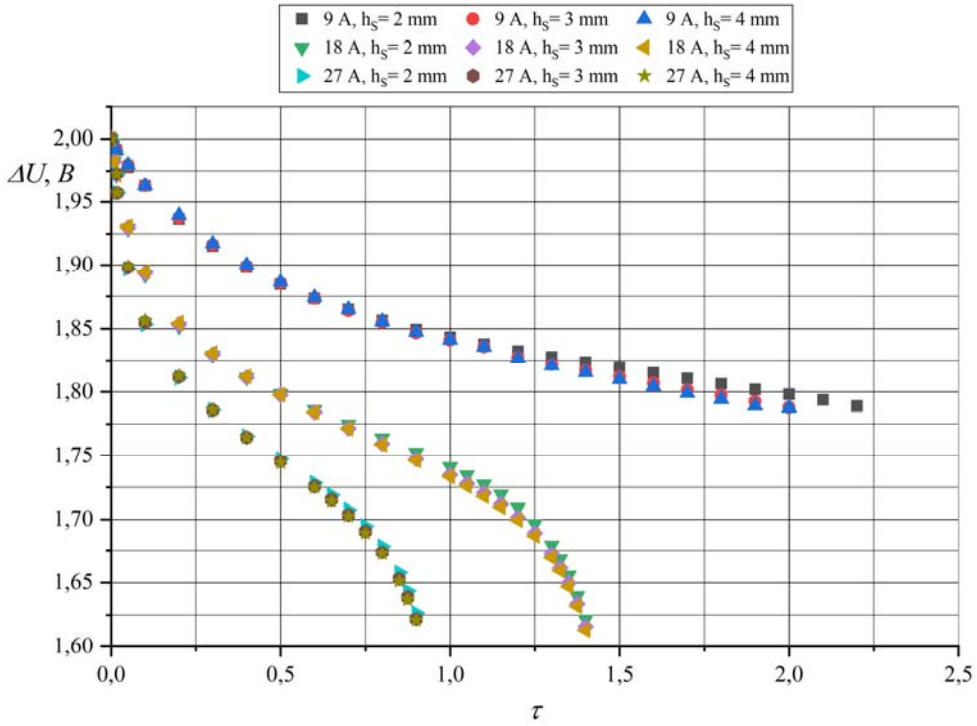


Рис. 2 – Залежності розряду електрохімічного осередку

З цих рисунків 1 і 2 випливає, що напруга на електродах поступово знижується. При цьому зі зростанням величини струму швидкість падіння кривої розряджання збільшується. Як на першому, так і на другому рисунках видно, що товщини пластин сепараторів мало впливають на характер кривих. Це вказує на те, що електроліту вистачає на весь час роботи для всіх розглянутих пластин. Порівнюючи відповідні криві обох рисунків, видно, що у другому варіанті залежності розряду йдуть трохи нижче, ніж на першому рисунку. При цьому зі збільшенням сили струму різниця помітніша. Однак на момент крутого зменшення величин відповідні залежності зближуються. Для розрядного струму залежності при силі струму у 9 А в районі точки $\tau \sim 2$ близько підходять один до одного. Для залежностей при силі струму у 18 А та 27 А – це точки 1,2 і 0,8, відповідно. Наведені залежності якісно відповідають розряду акумуляторів, показаним, наприклад, в [8, 12 – 15]. Проведемо тепер оцінку одержаного результату. У роботах [5, 8, 12] на основі підбору елементів еквівалентних електричних схем пропонується формула для розрахунку напруги акумулятора при розряді постійним струмом:

$$\Delta U = A\exp\left(-t/t_*\right)+\frac{It}{C}-\left(R_S+R_C\right)I\,, \qquad (15)$$

де: A – коефіцієнт; t_* – постійна часу системи; C – величина, що характеризує ємність акумулятора; R_S – активний опір; R_C – опір, що є складовою частиною RC-контура електричної схеми.

В [8] показано, що на основі експериментальних даних конкретного акумулятора та підібраних параметрів можна за формулою (15) отримати теоретичну криву, що добре збігається з експериментальною залежністю розряду. При малих величинах опорів порівняно з C^{-1} і за глибокого розряду з формули (15) випливає простий висновок, що при нехтуванні першим і третім членами час глибокого розряду пропорційний I^{-1}, що певною мірою підтверджується рисунками 25, 27 роботи [8]. На цих рисунках видно, що криві ΔU падають з 13 В до 10,5 В. При струмі 18,25 А це займає 14500 с, а при струмі 9,8 А – 31000 с.

Відповідні відношення дають величини: для струмів – 1,86, для часу – 2,14. У нашому випадку із рис. 2 отримуємо: для струмів (27 А и 18 А) – 1,5, для часу (~14 и ~9) – 1,56.

Підкреслимо, що ступінь розряду в цих випадках приблизно однаковий: в [8] – 0,808, в нашому випадку – 0,8. Такі ж співвідношення випливають із кривих [13] для порівняно невеликих струмів 9,5 А и 5,25 А (глибина розрядження також 0,808): для струмів – 1,809, для часу – 2, а також із залежностей, наведених в [14] (5,9 А и 3 А), відповідно для струмів – 1,97, для часу – 2. Зі збільшенням струму розряду відношення в часі далі зростає швидше.

Наведемо ще кілька значень, взятих із [15] для реальних акумуляторів. Для низьких величин струмів розряду з наведеної в цій статті таблиці випливає, що на 10 і 20 годинному розряді (відношення часів 2), значення відношення струмів становлять (згори донизу за таблицею) – 1,86; 1,87; 1,84; 1,85; 1,86. Далі часові відношення зі зростанням струмів, як і в інших роботах, зростають. Всі ці значення свідчать, що проведені розрахунки близькі до реальних процесів.

Зі збільшенням струмів розряду зростає внесок релаксаційних складових, що робить таке порівняння розрахунків і подібних експериментальних кривих скрутним (потрібні точніші значення багатьох параметрів). Таким чином,

наведені результати розрахунків показують, що фізико-хімічні уявлення та математична модель, що розвивається, якісно правильно відображають електрохімічні процеси в акумуляторах AGM, що розглядаються.

Висновки. Проведені розрахунки дозволили отримати залежності розряду для акумуляторів типу AGM, які застосовуються у новітніх транспортних засобах в особливих режимах роботи. Результати розрахунків показали слабку залежність від товщин пластин сепараторів, але яскраво виражену залежність падіння напруги від величини струму розряду, що добре спостерігається в реальних акумуляторах.

Були проведені оцінки величин часів розряду та величин струмів для розрахованих варіантів та для відомих опублікованих даних інших авторів. Ці оцінки для порівняно невеликих струмів розряду показали близькі величини до відомих теоретичних залежностей та експериментально виміряних параметрів реальних акумуляторів.

1. AGM Battery: Definition, Significance and Key Features (2026). URL: https://www.varta-automotive.com/en/knowledge/technology/agm (дата звернення 15.07.2026).
2. *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/ftorabi/Resources/Publications/An%20Improved%20Mathematical%20Model%20of%20Lead%E2%80%93Acid%20Batteries%20for%20Simulation%20of%20VRLA%20Batteries.pdf (дата звернення 15.09.2026).
3. *Vahid Esfahanian, Pooyan Kheirhan, Hassan Bahramian, Amir Babac Ansori, Goodarz Ahmadi.* The Effects of Electrode Parameters on Lead-Acid Battery Performance. Advanced Materials Research. 2013. Vol. 651. P. 492–498. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.651.492
4. *Хрусталев Д. А.* Аккумуляторы. М. Изумруд.: 2003. 224 с.
5. *Дзензерский В. А., Плаксин С. В., Житник Н. Е., Ширман О. И.* Контроль состояния химических источников тока. Киев. Наук.: Думка. 2014. 132 с.
6. *Ruxin Yu, et.al.* Review of Degradation Mechanism and Health Estimation Method of VRLA Battery Used for Standby Power Supply in Power System. Coatings. 2023. 13(3). 485. https://doi.org/10.3390/coatings13030485
7. *Schwimmbeck St., Schröer Ph. A., Buchner Qu., Herzog H-G.* Modeling the Dynamic Behavior of 12V AGM Batteries and Its Degradation. 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Hanoi.: 2019. https://doi.org/10.1109/VPPC46532.2019.8952242
8. *Peng Wenxin.* Accurate circuit model for predicting the performance of lead-acid AGM batteries. 2011. UNLV Theses, Dissertations, Professional Papers, and Capstones. 1244. http://dx.doi.org/10.34917/2821019
9. *Єлісєєв В. І., Скосар В. Ю., Катренко М. О.* Чисельний аналіз впливу конструктивних і технологічних параметрів на розрядні характеристики стартерних свинцево-кислотних акумуляторів. Техн. механіка. 2025. № 4. С. 93–101. https://doi.org/10.15407/itm2025.04.093
10. *Dasoyan M. A., Aguf I. A.* Current theory of lead acid batteries. Stonechouse Glos. Technicopy Limited. 1979. 371 p.
11. *Єлісєєв В. І., Совіт 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
12. *Bence Csomos, Denes Fodor, Gabor Kohlrusz.* Initial electrical parameter validation in lead-acid battery model used for state estimation. Hungarian journal of industry and chemistry. 2017. Vol. 45(1). P. 67–71. https://doi.org/10.1515/hjic-2017-0010
13. 12V lead acid battery discharge curve (2026). URL: https://thegreynomads.activeboard.com/t65042484/12v-lead-acid-battery-discharge-curve (дата звернення 15.07.2026).
14. Designing a battery capacity monitoring system for AGM lead acid battery. Electrical Engineering (2026). URL: https://electronics.stackexchange.com/questions/351352/designing-a-battery-capacity-monitoring-system-for-agm-lead-acid-battery (дата звернення 15.07.2026).
15. Tensite. AGM DEEP CYCLE BATTERY (2026). 12V 250 AH. URL: https://www.slideshare.net/slideshow/datasheet-tensitebatteriesagm12250/247346562 (дата звернення 15.07.2026).

Стаття надійшла до редакції 06.09.2026;
прийнято до друку після рецензування 21.09.2026;
дата публікації 28.09.2026