

KARAKTERISTIČNI PROCESI U AKUMULATORIMA ENERGIJE SA PROMJENOM FAZE

Nenad Kažić¹

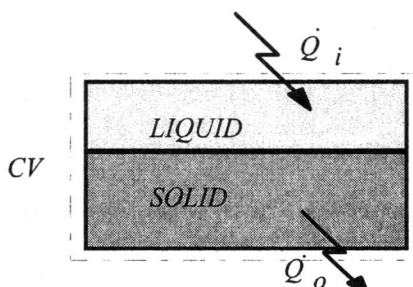
Ključne riječi: Akumulatori energije, promjena faze, trajektorija stanja, koeficijent konvekcije

SAŽETAK:

Predmet ovoga rada su neki karakteristični režimi rada akumulatora energije (Latent Heat Storage Device -LHSD) sa radnom materijom koja mijenja fazu (Phase Change Material, PCM). U radu je primijenjen jedan relativno jednostavan analitički prilaz koji ne samo da vodi boljem razumijevanje samih, inače veoma složenih fenomena u ovim uređajima, već omogućava i njihovu kvantitativnu analizu. Izloženi prilaz se odnosi i na stacionarne i na nestacionarne probleme. Pokazano je da, u zavisnosti od početnog stanja i načina razmjene toplote, karakteristični režimi, kao "čisto" topljenje, očvršćavanje ili njihova kombinacija, igraju dominantnu ulogu. Pored toga, rad se bavi analizom tri problema: trajektorije stanja, stacionarnog stanja sistema i koeficijenta prelaza toplote na površini faznog prelaza.

1. UVOD

Procese u akumulatorima energije, koji su bazirani na promjeni faze radne materije, karakteriše simultani transfer mase i energije između faza praćen faznim prelazom. Ova vrsta problema pripada klasi tzv. "sistema sa promjenljivom granicom". Mada nam za rješavanje ovoga problema danas stoje na raspolaganju raznovrsni numerički postupci, analitička rješenja, dobijena čak i primjenom pojednostavljenih modela, su uvijek dobrodošla. Jedan od takvih modela je i "konvektivni metod" (KM) [2]. Mada dovoljno jednostavan za analitički tretman, on je istovremeno dovoljno složen da može obuhvatiti probleme o kojima je riječ.



Slika 1: Shema transfera energije u LHSD

¹ Profesor na Mašinskom fakultetu u Podgorici, Cetinjski put bb, Podgorica, E-mail: nenadk@cg.ac.yu

Ovaj rad je fokusiran na tri elementa problematike LHSD: trajektoriju stanja, stacionarno stanje sistema i koeficijent prelaza toplote na površini faznog prelaza.

2. MATEMATIČKI OPIS LHSD

Pretpostavljamo da je stanje PCM u LHSD definisano Stefanovim brojem (Ste) i masom (M) tečne faze. Implicitno time je uvedena pretpostavka da su pritisak u sistemu, masa sistema i temperatura čvrste faze konstantni. Osnovna shema transfera energije je prikazana na Sl.1: toplotni fluks \dot{Q}_i je usmjeren ka tečnoj fazi, dok fluks \dot{Q}_o predstavlja fluks koji odlazi od fazne površine i kroz čvrstu fazu napušta sistem. U daljoj analizi zanemaruju se sve vrste energije osim unutrašnje.

Uvodeći Stefanov broj $Ste=(h-h_c)/L$, energetske bilans sistema dobija oblik [2]

$$MdSte + (Ste + 1)dM = \frac{\dot{Q}}{L} d\tau, \text{ gdje je } \dot{Q} = \dot{Q}_i - \dot{Q}_o. \quad (1)$$

Energetski bilans na medjufaznoj površini u slučaju topljenja čvrste faze se može opisati

sljedećim relacijama: $(h_s - h_c)dM = (\dot{Q}_h - \dot{Q}_o)d\tau$, or $dM = \frac{h_q A}{c}(Ste - \omega_0) d\tau$,

$$\dot{Q}_h = \frac{h_q A}{c}(h - h_c) = \dot{Q}_L Ste,$$

$$\omega_0 = \frac{\dot{Q}_o}{\dot{Q}_L}, \quad \dot{Q}_L = \frac{h_q AL}{c}. \quad (2a)$$

gdje su ω_0 "odlazeći" toplotni faktor, h entalpija, c specifična toplota, L toplota promjene faze, A površina, τ vrijeme, h_q koeficijent prelaza toplote na medjufaznoj površini.

Analogno procesu topljenja, proces očvršćavanja na medjufaznoj površini se opisuje relacijom

$$(h - h_s) dM = (\dot{Q}_h - \dot{Q}_o)d\tau \text{ or } dM = \frac{h_q A}{c} \frac{Ste - \omega_0}{Ste + 1} d\tau. \quad (2b)$$

Jednačine (1) i (2a, 2b) predstavljaju sistem jednačina

$$\frac{h_q A}{c} \begin{bmatrix} (\omega_i - \omega_0) \\ (Ste - \omega_0) \\ [Ste]_f + 1 \end{bmatrix} d\tau = \begin{bmatrix} M & (1 + Ste) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} d \begin{bmatrix} Ste \\ M \end{bmatrix}, \quad (3)$$

gdje Stefan number sa indeksom "f" označava proces očvršćavanja. "Dolazeći" toplotni faktor je označen kao $\omega_i = \frac{\dot{Q}_i}{\dot{Q}_L}$.

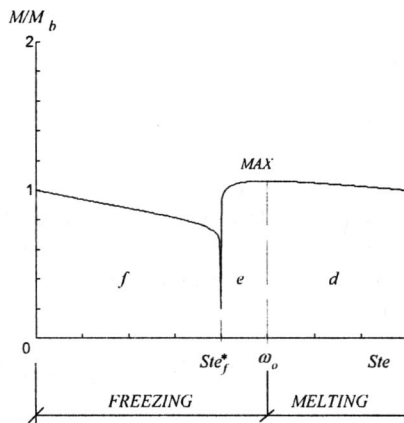
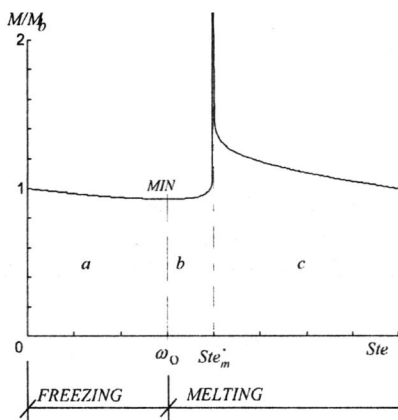
3. TRAJEKTORIJE STANJA

Nakon eliminacije $d\tau$ iz (3) i sredjivanja, dobija se izraz za masu tečne faze u funkciji Ste

$$\frac{M}{M_b} = \left(\frac{Ste_b - Ste^*}{Ste - Ste^*} \right)^X \left(\frac{Ste_b - Ste^{**}}{Ste - Ste^{**}} \right)^{1-X},$$

$$X_m = \frac{Ste_m^* - \omega_0}{2Ste_m^* + (1 - \omega_0)}, \quad X_f = \frac{Ste_f^* - \omega_0}{\omega_i + 1}, \quad (4)$$

gdje su X_m i X_f vrijednosti eksponenta X za procese topljenja i očvršćavanja, respektivno.



Slika 2: Masa tečne faze za slučaj $\omega_0 < \omega_i$ Slika 3: Masa tečne faze za slučaj $\omega_0 > \omega_i$

Izraz (4) predstavlja masu tečne faze u funkciji Stefanovog broja. Sa druge strane Stefanov broj je funkcija vremena, tako da i M/M_b zavisi od vremena. Kombinujući (1) i (4) može se odrediti Stefanov broj u funkciji vremena [3].

4. STACIONARNO STANJE SISTEMA

Po definiciji, sistem je u stacionarnom stanju ako se stanje ne mijenja sa vremenom. Katkada nas ne interesuje "pravo" stacionarno stanje, već "specijalno" kod koga su samo neke od termodinamičkih koordinata u stacionarnom stanju. Sa druge strane, u slučaju tretiranja LHSD uprošćenim modelom KV, stanje sistema je definisano masom i Stefanovim brojem tečne faze.

Poznato je da ako diferencijalna forma ima oblik

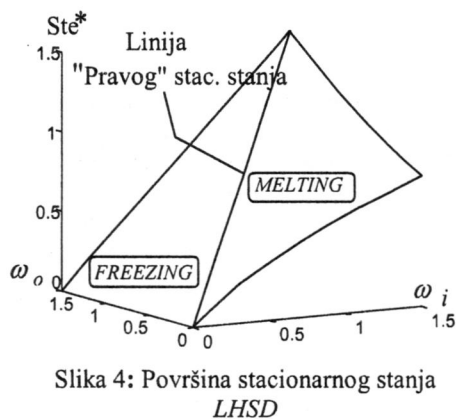
$$\varphi d\tau = \psi dx, \tag{5}$$

gdje je τ vrijeme a x vektor stanja sistema, tada je stacionarno stanje sistema definisano uslovima

$$d\tau > 0, dx = 0, \text{ i.e. } \varphi = 0. \tag{6}$$

Primjenjujući ovaj kriterijum na (3), slijedi

$$\varphi = \frac{h_q A}{c} \left[\begin{array}{c} (\omega_i - \omega_0) \\ (Ste - \omega_0) \\ \frac{[Ste]_f + 1}{dM} \end{array} \right] = 0, \text{ or } \left[\begin{array}{c} (\omega_i - \omega_0) \\ dM \end{array} \right] = 0 \tag{7}$$

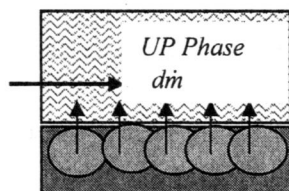


Slika 4: Površina stacionarnog stanja LHSD

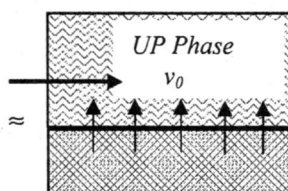
Na Sl. 4 je prikazana površ stacionarnog stanja sistema.

5. KOEFICIJENAT PRELAZA TOPLOTE NA MEDJUFAZNU POVRŠ

Madjufazna površ dijeli UP fazu (faza sa većim potencijalom) od DOWN faze (faza sa nižim potencijalom). Označimo režim strujanja UP faze duž izotermnog zida bez promjene faze sa T1 (ili indeks T, koeficijent prelaza toplote h_{qT}), odnosno sa T2 (koeficijent prelaza toplote h_q) označimo režim sa faznim prelazom. Uvedimo pretpostavku da se režim T2 može aproksimirati kombinacijom režima T1 i transpiracije



Sl. 6a: T2 case flow



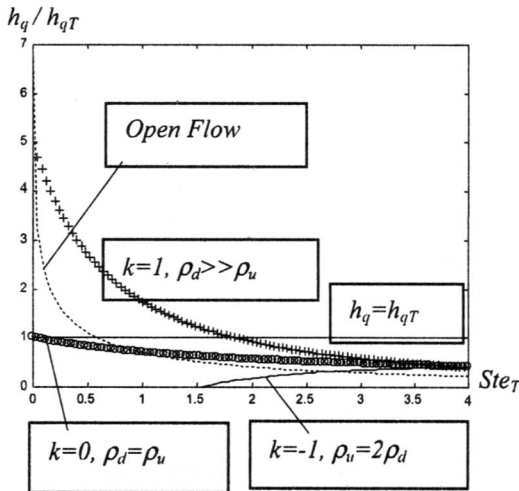
Sl. 6b: T1 case + Transpiration flow

kroz izotermni zid (Sl. 6), [3]. Sada se može primijeniti Couette aproksimacija za termalni sloj u fluidu [1]

$$v_0 \frac{dt}{dy} - \frac{d}{dy} \left[(\alpha + \varepsilon_T) \frac{dt}{dy} \right] = 0, \quad (8)$$

sa graničnim uslovima $y=0, t=t_c, y=\delta, t=t_\infty$, gdje je $\alpha + \varepsilon_T$ totalni koeficijent prenosa toplote. Nakon integracije, dobija se odnos Stantonovih brojeva za režime strujanja sa (St) i bez (St_T) transpiracije [1]

$$\frac{St}{St_T} = \frac{\ln(1+B)}{B}, \quad B = \frac{v_0 \rho c (t_\infty - t_c)}{q_0}, \quad (9)$$



Slika 7: Odnos koeficijenata prelaza toplote sa (h_q) i bez promjene faze (h_{qT}).

gdje je B tkzv. "blowing factor"; indeks 0 i ∞ označavaju uslove na zidu i daleko od njega.

Na Sl. 7 je prikazan odnos h_q/h_{qT} za razne vrijednosti faktora gustine k .

5. ZAKLJUČAK

- Dobijeni analitički izrazi onogućavaju bolji pogled "unutar" procesa u LHSD.
- Sistem u bilo kojoj kombinaciji "dolazećih" i "odlazećih" flukseva teži da zauzme stacionarno stanje definisano uslovom $Ste=Ste^*$.
- Koeficijent prelaza toplote snažno zavisi od Stefanovog broja tečne faze (Ste) i faktora gustine (k).

LITERATURA

- [1] Kays & Crawford M. E., 1980, *Convective Heat and Mass Transfer*, McGraw-Hill Book Co, N.Y., 420 p.
- [2] Kazic N., 1996, *Analysis of Latent Heat Energy Storage Devices by Convective Model*, Thermal Science, vol. 22, no. 4: p. 297-306.
- [3] Kazic, N., 2000, *On the Fluid Flow with and without Phase Change near the Isothermal Wall*, ZAMM, vol. 4.

CHARACTERISTIC PROCESSES IN LATENT HEAT STORAGE DEVICE

ABSTRACT:

This paper is focused on processes in the Latent Heat Storage Device (*LHSD*). In this paper, the analytical approach based on *CVSM* (Convective Simple Model) provides not better understanding of the process only, but also could be applied for quantitative analysis, also. This model could be useful for steady, as well as transient state analysis of *LHSD*. It is shown that, depending on the initial state of liquid phase and the heat exchange regime, a few characteristic regimes appear: "pure" melting or freezing mode, and combination of both of them. Using the similarity between the flow with phase change and flow of the mono phase fluid along isothermal wall, their convective coefficients are compared.