

Bartosz SAŁACIŃSKI
Vyacheslav PISAREV
Politechnika Rzeszowska

RÓŻNICOWY SCHEMAT DO OKREŚLANIA TEMPERATUR W CIENKOWARSTWOWYM AKUMULATORZE BETONOWYM

W artykule opisano metodę wyznaczania jednowymiarowego wewnętrznego rozkładu temperatur w cienkowarstwowych, betonowych akumulatorach ciepła ochładzanych wewnątrz i poddawanych jednoczesnemu działaniu zewnętrznego promieniowania słonecznego oraz konwekcyjnej wymiany ciepła.

1. Wstęp

Zagadnienia, które są przedmiotem zainteresowania autorów, skupiają się m.in. na wykorzystaniu konstrukcyjnych cienkowarstwowych elementów betonowych jako akumulatorów energii niskotemperaturowej, która dzięki pompom ciepła może być efektywnie wykorzystana w instalacjach sanitarnych. Określenie rozkładu temperatur, a co za tym idzie oszacowanie ilości gromadzonego i oddawanego przez wspomniane elementy ciepła, jest zagadnieniem złożonym, wymagającym uwzględnienia wielu zmiennych czynników. Do najważniejszych można niewątpliwie zaliczyć fakt, że praca tego typu akumulatorów wiąże się z przewodzeniem ciepła przy jednoczesnym oddziaływaniu promieniowania słonecznego i konwekcyjnej wymianie ciepła z otoczeniem, które to zjawiska mogą być opisane przez równanie Fouriera uwzględniające połączone warunki brzegowe rodzaju II (opisujące oddziaływania promieniowania słonecznego) i III (opisujące konwekcyjną wymianę ciepła). Szczegółowe analizowanie omawianej problematyki wymagało stworzenia programu obliczeniowego symulującego zachowania rozpatrywanych elementów w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Celem tego opracowania było przybliżenie numerycznych rozwiązań równania Fouriera i towarzyszących mu warunków brzegowych dla praktycznych przypadków związanych z omawianą tematyką. Zostały one następnie wykorzystane w napisanej przez autorów aplikacji „Akumulator” [1, 2], która może m.in. służyć do określania rozkładu temperatur w cienkowarstwowych, betonowych akumulatorach ciepła.

2. Metoda określania rozkładu temperatur w cienkowarstwowym elemencie betonowym niewyposażonym w system odbierania ciepła

Rozwiązywanie zagadnień natury inżynierskiej metodami analitycznymi jest często niewykonalne z uwagi na brak możliwości ich zastosowania w problematyce występującej w praktyce oraz trudności obliczeniowe, których następczą. Z uwagi na wspomnianą nietypowość omawianego zagadnienia polegającą na konieczności rozwiązania równania Fouriera:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = d_{CM} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad \text{dla } \tau \geq 0, \quad L \geq x \geq 0 \quad (1)$$

gdzie: d_{CM} – dyfuzyjność cieplna materiału [m^2/s],

T – temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

τ – czas [s],

x – odległość [m],

L – połowa szerokości elementu [m],

metody analityczne nie znajdują praktycznego zastosowania również w tym przypadku. Otrzymane na drodze analitycznej rozwiązania mogą się bowiem odnosić jedynie do ciał półnieskończonych oraz do przypadków, w których po obydwu stronach akumulatora cienkowarstwowego panują takie same warunki (np. temperatura), co nie zawsze odpowiada rzeczywistości. Do rozwiązania omawianej problematyki autorzy posłużyli się numeryczną metodą różnic skończonych, którą zastosowano w środowisku MS Excel. Wygląd programu idealnie imitować może bowiem siatkę punktów dyskretnych (jedna z podstaw obliczeniowych MRS), posiadając przy tym wiele innych użytecznych w omawianej problematyce narzędzi [3].

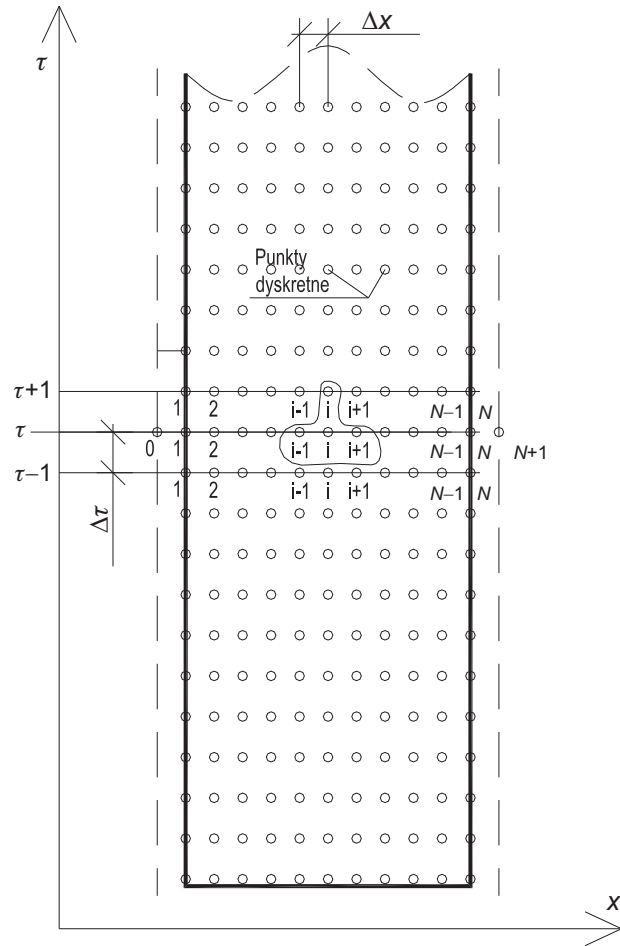
Metoda obliczeniowa opiera się na wyznaczeniu odpowiednich równań opisujących zmienne w czasie wartości temperatur w charakterystycznych punktach dyskretnych akumulatora. Ich postać zależeć będzie od poszczególnych przypadków, wśród których wyróżnić można sytuację, gdy:

- akumulator nie jest wyposażony w system odbierania ciepła (nie umieszczono w jego wnętrzu rury z czynnikiem ochładzającym),
- akumulator jest wyposażony w system odbierania ciepła (umieszczono w jego wnętrzu rury z czynnikiem ochładzającym),

oraz następujących warunków brzegowych na każdym z boków:

- III rodzaju (konwekcyjna wymiana ciepła – występuje zawsze),
- II rodzaju (wymiana ciepła spowodowana pochłanianiem promieniowania słonecznego, przy stałej dla określonego czasu wartości q),
- jednocześnie II + III rodzaj.

Pierwszy z wymienionych przypadków dotyczy cienkowarstwowego akumulatora niewyposażonego w system chłodzenia, tj. np. fragmentu betonowej ściany garażu, gdy chce się oszacować ilość gromadzonej przez nią energii. Jest to przypadek podstawowy (akumulator nie posiada wówczas wewnętrznych węzłów granicznych), na którym opierają się pozostałe warianty. Na rysunku 1. przedstawiono model siatki punktów dyskretnych tego typu akumulatora. Każdy z punktów może być reprezentowany przez osobną komórkę obliczeniową w MS Excel.



Rys. 1. Model akumulatora niewyposażonego w system chłodzenia (bez wewnętrznych węzłów granicznych) podzielony na siatkę punktów dyskretnych: Δx – odstęp między węzłami [m], $\Delta \tau$ – krok czasowy [s]; punkty 1, $N + 1$ – brzegowe punkty graniczne, punkty 0, $N + 1$ – punkty pozorne spoza przedziału dyskretyzowanego

Zgodnie z teorią szeregu Taylora lewą stronę równania (1) można zapisać w postaci [4]:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} \right)_i^\tau \approx \frac{T_i^{\tau+1} - T_i^\tau}{\Delta \tau} + O(\Delta \tau) \quad (2)$$

gdzie: $\frac{T_i^{\tau+1} - T_i^\tau}{\Delta \tau}$ – iloraz różnicowy w przód,

$$O(\Delta \tau) = -\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^\tau \cdot \frac{\Delta x}{2} - \left(\frac{\partial^3 T}{\partial x^3}\right)_i^\tau \cdot \frac{(\Delta x)^2}{6} + \dots - \text{błąd obcięcia szeregu Taylo-}$$

ra dla ilorazu różnicowego w przód.

Postępując się analogicznymi założeniami dla prawej strony równania (1), otrzymuje się:

$$\begin{aligned} d_{CM} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right)_i^\tau &= d_{CM} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_i^\tau \approx \\ &\approx d_{CM} \frac{\frac{T_{i+1}^\tau - T_i^\tau}{\Delta x} - \frac{T_i^\tau - T_{i-1}^\tau}{\Delta x}}{\Delta x} = d_{CM} \frac{T_{i+1}^\tau - 2T_i^\tau + T_{i-1}^\tau}{\Delta x^2} + O[(\Delta x)^2] \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie: $\frac{T_{i+1}^\tau - 2T_i^\tau + T_{i-1}^\tau}{\Delta x^2}$ – iloraz różnicowy centralny,

$$O[(\Delta x)^2] = -\left(\frac{\partial^3 T}{\partial x^3}\right)_i^\tau \cdot \frac{(\Delta x)^2}{6} + \dots - \text{błąd obcięcia szeregu Taylora dla ilora-}$$

zu różnicowego centralnego.

Gdy wykorzystamy powyższe zapisy i pominie błędy obcięć szeregu Taylora, równanie Fouriera przyjmie postać:

$$\frac{T_{i+1}^{\tau+1} - T_i^\tau}{\Delta \tau} = d_{CM} \frac{T_{i+1}^\tau - 2T_i^\tau + T_{i-1}^\tau}{\Delta x^2} \quad (4)$$

Po wprowadzeniu stałej $\Delta Fo = \frac{d_{CM} \cdot (\Delta \tau)}{\Delta x^2}$ – dyskretnej liczby Fouriera, z równania (4) oblicza się interesującą nas wartość $T_i^{\tau+1}$:

$$T_i^{\tau+1} = T_{i+1}^\tau \cdot (\Delta Fo) + [1 - 2(\Delta Fo)] \cdot T_i^\tau + T_{i-1}^\tau \cdot (\Delta Fo) \quad (5)$$

Równanie (5) służy do wyznaczania temperatur między punktami „2” i „N – 1” (włącznie z nimi, rys. 1.). Punkty 1 oraz N są punktami brzegowymi, w których temperatury opisane są odpowiednimi dla danego przypadku warunkami brzegowymi.

Warunki brzegowe II rodzaju mogą być dla wszystkich wymienionych wcześniej przypadków zapisane jako (indeksy 1 oraz N odnoszą się do rys. 1.):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=1} = q_1(\tau) \quad \text{– dla punktu brzegowego 1} \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=N} = -q_N(\tau) \quad \text{– dla punktu brzegowego } N \quad (7)$$

gdzie: $q_1(\tau)$ – natężenie promieniowania oddziałujące na frontową część akumulatora [W/m^2],

$q_N(\tau)$ – natężenie promieniowania oddziałujące na tylną część akumulatora [W/m^2].

Znak „–” przed wartością $q_N(\tau)$ wskazuje, że ciepło oddziałuje na akumulator w kierunku przeciwnym do osi x .

Posługując się ilorazem różnicowym centralnym, warunek (6) można zapisać w postaci:

$$-\lambda \frac{T_2^\tau - T_0^\tau}{2\Delta x} \Big|_{x=1} = q_1^\tau \quad (8)$$

Z powyższego równania wyznacza się wartość T_0^τ leżącą poza rozpatrywanym obszarem:

$$T_0^\tau = T_2^\tau + \frac{2q_1^\tau \cdot \Delta x}{\lambda} \quad (9)$$

Następnie zapisuje się równanie (5) dla punktu $x = 1$:

$$T_1^{\tau+1} = T_2^\tau \cdot (\Delta Fo) + [1 - 2(\Delta Fo)] \cdot T_1^\tau + T_0^\tau \cdot (\Delta Fo) \quad (10)$$

Wielkość T_0^τ z równania (9) wstawia się następnie do równania (10), otrzymując tym samym poszukiwaną zależność opisującą zmiany temperatur w punkcie brzegowym 1 dla rozpatrywanego akumulatora:

$$T_1^{\tau+1} = T_1^\tau \cdot [1 - 2(\Delta Fo)] + 2(\Delta Fo) \cdot T_2^\tau + \frac{2(\Delta Fo) \cdot q_1^\tau \cdot \Delta x}{\lambda}; \quad \tau = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

W sposób analogiczny do powyższego rozwiązuje się warunek brzegowy (7) i otrzymuje równanie w postaci:

$$T_N^{\tau+1} = T_N^{\tau} \cdot [1 - 2(\Delta Fo)] + 2(\Delta Fo) \cdot T_{N-1}^{\tau} + \frac{2(\Delta Fo) \cdot q_N^{\tau} \cdot \Delta x}{\lambda}; \tau = 0, 1, 2 \dots \quad (12)$$

Równania (5), (11), (12) są kluczowe dla określania wewnętrznego rozkładu temperatur akumulatora niewyposażonego w system odbierania ciepła, przy warunkach brzegowych II rodzaju. Warunkiem stabilności obliczeń przy posługiwaniu się metodą różnic skończonych jest każdorazowa konieczność spełnienia warunku mówiącego, że wartość stojąca przy wielkości T_i^{τ} musi być ≥ 0 . Obowiązuje on dla wszystkich przedstawionych w tym artykule równań.

Warunki brzegowe III rodzaju mogą być dla wszystkich wymienionych wcześniej przypadków zapisane jako (indeksy 1 oraz N odnoszą się do rys. 1.):

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=1} = \alpha_1 \cdot (T_{cz1} - T \Big|_{x=1}) \quad \text{– dla punktu brzegowego 1} \quad (13)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=N} = -\alpha_N \cdot (T_{cz2} - T \Big|_{x=N}) \quad \text{– dla punktu brzegowego } N \quad (14)$$

gdzie: α_1 – współczynnik wnikania ciepła z otoczenia do akumulatora od strony frontowej [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$],

α_N – współczynnik wnikania ciepła z otoczenia do akumulatora od strony tylnej [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$],

T_{cz1} – temperatura otoczenia po stronie frontowej akumulatora [$^{\circ}\text{C}$],

T_{cz2} – temperatura otoczenia po stronie tylnej akumulatora [$^{\circ}\text{C}$].

Posługując się ilorazem różnicowym centralnym, warunek (13) można zapisać w postaci:

$$-\lambda \frac{T_2^{\tau} - T_0^{\tau}}{2\Delta x} \Big|_{x=1} = \alpha_1 \cdot (T_{cz1} - T \Big|_{x=1}) \quad (15)$$

Z równania (15) wyznacza się punkt pozorny (spoza zakresu siatki punktów dyskretnych, rys. 1.) T_0^{τ} :

$$T_0^{\tau} = T_2^{\tau} + \frac{2 \cdot \alpha_1 \cdot (T_{cz1} - T_1^{\tau}) \cdot \Delta x}{\lambda} \quad (16)$$

Podobnie jak we wcześniejszym przypadku, z układu równań (5) i (16) wyznacza się poszukiwaną wartość T_1^{n+1} :

$$T_1^{\tau+1} = 2(\Delta Fo) \cdot [T_2^\tau + (\Delta Bi_1)T_{cz1}] + T_1^\tau [1 - 2(\Delta Fo) - 2(\Delta Bi_1)(\Delta Fo)] \quad (17)$$

gdzie: $\Delta Bi_1 = \frac{\alpha_1 \cdot \Delta x}{\lambda}$ – dyskretna liczba Biota (dla strony frontowej).

W analogiczny sposób rozwiązuje się warunek brzegowy (14) i otrzymuje się równanie w postaci:

$$T_N^{\tau+1} = 2(\Delta Fo) \cdot [T_{N-1}^\tau + (\Delta Bi_2)T_{cz2}] + T_N^\tau [1 - 2(\Delta Fo) - 2(\Delta Bi_2)(\Delta Fo)] \quad (18)$$

gdzie: $\Delta Bi_2 = \frac{\alpha_N \cdot \Delta x}{\lambda}$ – dyskretna liczba Biota (dla strony tylnej).

Równania (5), (17), (18) są kluczowe dla określania wewnętrznego rozkładu temperatur akumulatora niewyposażonego w system odbierania ciepła przy warunkach brzegowych III rodzaju.

Poprawność obliczeń wykonywanych tymi równaniami pozwoliła autorom na zastosowanie metodyki analogicznej do wcześniej przedstawionej, przy wyznaczaniu równań odnoszących się do przypadków uwzględniających określanie wewnętrznego rozkładu temperatur w rozpatrywanych elementach, przy połączonych warunkach brzegowych II i III rodzaju. Równania te będą wyglądały następująco:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=1} = \alpha_1 \cdot (T_{cz1} - T \Big|_{x=1}) + q_1(\tau) \text{ – dla punktu brzegowego 1} \quad (19)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=N} = -\alpha_N \cdot (T_{cz2} - T \Big|_{x=N}) + q_N(\tau) \text{ – dla punktu brzegowego } N \quad (20)$$

gdzie przyjęto oznaczenia jak dla wzorów (6), (7), (13), (14).

Równanie (19) zapisujemy za pomocą ilorazu różnicowego centralnego:

$$-\lambda \frac{T_2^\tau - T_0^\tau}{2\Delta x} \Big|_{x=1} = \alpha_1 \cdot (T_{cz1} - T_1^\tau) + q_1^\tau \quad (21)$$

Z równania (21) wyznaczamy punkt pozorny:

$$T_0^\tau = T_2^\tau + \frac{2\Delta x \cdot [\alpha_1 \cdot (T_{cz1} - T_1^\tau) + q_1^\tau]}{\lambda} \quad (22)$$

Wartość tę wstawiamy do równania (5) w celu obliczenia wartości $T_1^{\tau+1}$, która ostatecznie przyjmie postać:

$$T_1^{\tau+1} = 2(\Delta Fo) \cdot [T_2^\tau + (\Delta Bi_1)T_{cz1}] + T_1^\tau \cdot [1 - 2(\Delta Fo) - 2(\Delta Fo)(\Delta Bi_1)] + \frac{2d_{CM} \cdot \Delta \tau \cdot q_1^\tau}{\Delta x \cdot \lambda} \quad (23)$$

W sposób analogiczny do przedstawionego rozwiązuje się warunek brzegowy (20), a otrzymane równanie ma postać:

$$T_N^{\tau+1} = 2(\Delta Fo) \cdot [T_{N-1}^\tau + (\Delta Bi_2)T_{cz2}] + T_N^\tau \cdot [1 - 2(\Delta Fo) - 2(\Delta Fo)(\Delta Bi_2)] + \frac{2d_{CM} \cdot \Delta \tau \cdot q_N^\tau}{\Delta x \cdot \lambda} \quad (24)$$

Równania (5), (23), (24) są kluczowe dla określania wewnętrznego rozkładu temperatur akumulatora niewyposażonego w system odbierania ciepła przy połączonych warunkach brzegowych II i III rodzaju. Niezależnie od przeanalizowanych dotychczas przypadków wyznaczenie wewnętrznego pola temperatury dla opisanych wcześniej elementów opierać się będzie na trzech typach równań: (5), (23), (24).

3. Metoda określania rozkładu temperatur w cienkowarstwowym akumulatorze betonowym wyposażonym w system ochładzania

W przypadku rozpatrywania omawianego zagadnienia dla cienkowarstwowych akumulatorów betonowych wyposażonych w system ochładzania, opisanie rozkładu temperatur w ich wnętrzu wymaga zapisania dodatkowych warunków wynikających z obecności wewnątrz nich rur z czynnikiem ochładzającym. Pociąga to za sobą konieczność niewielkiego zmodyfikowania modelu obliczeniowego w stosunku do przedstawionego na rys. 1. Dzieje się tak m.in. dlatego, że miejsce zajmowane przez czynnik, którego wielkość zależy od ilości i średnicy rur charakteryzuje się innymi właściwościami fizycznymi niż beton. Ponieważ wykonywane obliczenia dotyczą jednowymiarowego rozkładu temperatur, autorzy przyjęli, że wyznaczanie szerokości zajmowanej przez czynnik w warunkach długotrwałych procesów zmiany temperatury betonu zostanie określone na podstawie tzw. szerokości zastępczej przewodów opisanej następującym wzorem:

$$b_{zas} = n \cdot \frac{\pi \cdot d_{wev}^2}{4 \cdot H} \text{ [m]} \quad (25)$$

gdzie: n – zakładana liczba przewodów w akumulatorze (rozumiana jako liczba rur o długości równej długości akumulatora),

d_{wew} – średnica wewnętrzna przewodów [m],
 H – wysokość akumulatora [m].

Liczba punktów dyskretnych, które są zawarte w przestrzeni b_{zas} zależy od wielkości tej przestrzeni oraz od przyjętego odstepu między węzłami Δx . Zmiany temperatur w obszarze czynnika, w przypadku gdy stoi on nieruchomo w rurach, co jest równoznaczne z zatrzymaniem obiegu chłodzącego, opisuje równanie (5), do którego podstawić należy wartość liczby Fouriera obliczonej z uwzględnieniem właściwości fizycznych czynnika zgodnie ze wzorem:

$$\Delta Fo_{cz} = \frac{\lambda_{cz} \cdot (\Delta \tau)}{c_{p_cz} \cdot \rho_{cz} \cdot \Delta x^2} \quad (26)$$

gdzie: λ_{cz} – współczynnik przewodzenia ciepła czynnika [W/m · K],
 ρ_{cz} – gęstość czynnika [kg/m³],
 c_{p_cz} – pojemność cieplna właściwa czynnika [kJ/kg · K],
 $\Delta \tau$ – krok czasowy [s],
 Δx – odstęp między węzłami [m].

W przypadku symulowania ochładzania, tj. gdy czynnik porusza się w przewodach, przyjmuje się, że jego temperatura w obszarze b_{zas} jest wielkością stałą (średnią z wartości na wejściu i wyjściu z akumulatora).

Biorąc pod uwagę obecność w modelu obliczeniowym wielkości b_{zas} , należy zauważyć, że wewnątrz akumulatora pojawi się strefa graniczna powstała na styku betonu i czynnika ochładzającego (z uwagi na znikomą wielkość grubość ścianki przewodu jest pomijana) (rys. 2.), dla której należy zapisać dodatkowe warunki brzegowe. Będą one wyglądać następująco:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=A} = \alpha_{cz} \cdot (T_{x=A} - T_{cz}) \quad (27)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=B} = -\alpha_{cz} \cdot (T_{x=B} - T_{cz}) \quad (28)$$

gdzie: α_{cz} – współczynnik wnikania ciepła do czynnika ochładzającego [W/m² · K],

T_{cz} – temperatura czynnika ochładzającego [°C],

$T_{x=A}$ – temperatura elementu w punkcie A [°C],

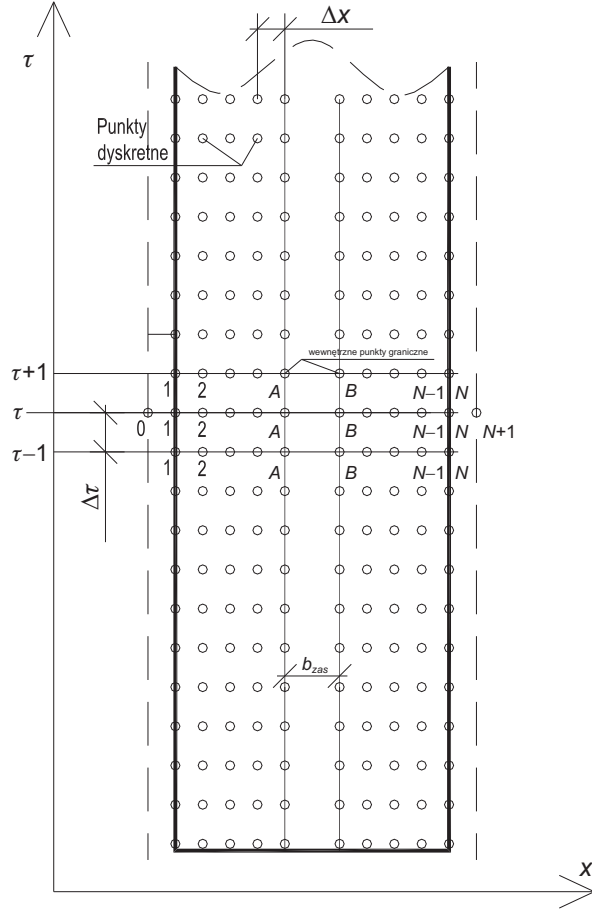
$T_{x=B}$ – temperatura elementu w punkcie B [°C].

Zapisując równanie (27) za pomocą ilorazu różnicowego centralnego, otrzymuje się:

$$-\lambda \frac{T_{A+1}^{\tau} - T_{A-1}^{\tau}}{2\Delta x} = \alpha_{cz} \cdot (T_A^{\tau} - T_{cz}) \quad (29)$$

Z zależności tej wyznacza się punkt pozorny T_{A+1}^{τ} :

$$T_{A+1}^{\tau} = T_{A-1}^{\tau} - \frac{2\Delta x \cdot \alpha_{cz} \cdot (T_A^{\tau} - T_{cz})}{\lambda} \quad (30)$$



Rys. 2. Model akumulatora wyposażonego w przewody z czynnikiem ochładzającym podzielony na siatkę punktów dyskretnych: Δx – odstęp między węzłami [m], $\Delta \tau$ – krok czasowy [s]; punkty 1, $N + 1$ – brzegowe punkty graniczne, punkty 0 i $N + 1$ – punkty pozorne spoza przedziału zdyskretyzowanego, punkty A, B – wewnętrzne węzły graniczne

Po wstawieniu wyrażenia (30) do równania (5) otrzymuje się ostatecznie:

$$T_A^{\tau+1} = 2(\Delta Fo) \cdot [T_{A-1}^{\tau} + \frac{\Delta x \cdot \alpha_{cz}}{\lambda} \cdot T_{cz}] + T_A^{\tau} \cdot [1 - 2(\Delta Fo) - \frac{2\Delta x \cdot \alpha_{cz}}{\lambda} (\Delta Fo)] \quad (31)$$

W taki sam sposób rozwiązuje się warunek brzegowy (28), otrzymując równanie w postaci:

$$T_B^{\tau+1} = 2(\Delta Fo) \cdot [T_{B+1}^{\tau} + \frac{\Delta x \cdot \alpha_{cz}}{\lambda} \cdot T_{cz}^{\tau}] + T_B^{\tau} \cdot [1 - 2(\Delta Fo) - \frac{2\Delta x \cdot \alpha_{cz}}{\lambda} (\Delta Fo)] \quad (32)$$

Równania (31) i (32) opisują zmiany temperatur w wewnętrznych punktach granicznych akumulatora wyposażonego w system ochładzania w postaci rur z czynnikiem ochładzającym. W takim przypadku różnica między sytuacją, w której przepływa on bądź stoi nieruchomo w przewodach, dotyczyć będzie wartości współczynnika wnikania ciepła α_{cz} występującego w równaniach (31) i (32), który:

- w przypadku czynnika przepływającego zależy od:
 - rodzaju ruchu czynnika ochładzającego – dla przepływu przejściowego i turbulentnego,
 - różnicy temperatur między czynnikiem a wewnętrznymi węzłami granicznymi A, B – dla przepływu laminarnego,
- w przypadku czynnika stojącego nieruchomo w rurach:
 - znajduje się w przedziale $\alpha_{cz} = 300\text{--}20000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ [5]. Obszar charakteryzowany przez szerokość zastępczą b_{zas} stanowi wówczas fragment akumulatora o innym oporze cieplnym, a temperatura czynnika zmienia się zgodnie ze wzorem (5), przy czym należy pamiętać o wyznaczeniu dla niego indywidualnej, zależnej od właściwości fizycznych, dyskretniej liczby Fouriera ΔFo .

Wyznaczenie wewnętrznego pola temperatury dla cienkowarstwowych akumulatorów betonowych wyposażonych w wewnętrzny system chłodzenia opierać się będzie zatem na pięciu typach równań: (5), (23), (24), (31) i (32).

4. Podsumowanie

Wykorzystanie wyprowadzonych zaprezentowanymi metodami równań w połączeniu z możliwościami MS Excel oraz językiem programowania VBA może umożliwić autorom rozwiązywanie zagadnień z dziedziny określania pól temperatur w cienkowarstwowych, betonowych akumulatorach ciepła. Wybór odpowiednich równań opisujących przewodzenie ciepła jest oczywiście uzależniony od konkretnego przypadku, tj. od rodzaju rozpatrywanego akumulatora. Przedstawione rozwiązania sporządzono dla przypadków pozyskiwania energii z otoczenia przez akumulator (z którymi można spotkać się w rzeczywistości):

- akumulator wolno stojący, np. mur – obustronne pochłanianie energii z otoczenia drogą konwekcyjnej wymiany ciepła i absorbowania promieniowania słonecznego (niejednocześnie z obu stron) w lecie, jednostronne pochłanianie energii drogą konwekcyjnej wymiany ciepła i absorbo-

wania promieniowania słonecznego jedną ze stron oraz jednostronne pochłanianie energii drogą konwekcyjnej wymiany ciepła drugą ze stron w zimie,

- akumulator występujący w formie ściany – jednostronne pochłanianie energii z otoczenia drogą konwekcyjnej wymiany ciepła i absorbowania promieniowania słonecznego stroną zewnętrzną oraz jednostronne pochłanianie ciepła na drodze konwekcyjnej wymiany ciepła stroną wewnętrzną.

Dodatkowo niezależnie od wymienionych przypadków pozyskiwania energii możliwe jest uwzględnienie w obliczeniach wewnętrznego ochładzania badanego elementu.

Literatura

- [1] Sałaciński B., Pisarev V.: *Program do określania charakterystyk cieplnych cienkowarstwowych konstrukcji betonowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej (w druku).
- [2] Sałaciński B., Pisarev V.: *Porównanie komputerowo symulowanego i rzeczywistego trybu pracy cienkowarstwowego, betonowego akumulatora ciepła*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej (w druku).
- [3] Nagórski Z.: *Modelowanie przewodzenia ciepła za pomocą arkusza kalkulacyjnego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
- [4] Taler J., Duda P.: *Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2003.
- [5] Materiały wykładowe (niepublikowane) prof. dr. hab. inż. Ryszarda Białeckiego z Instytutu Techniki Ciepłej Politechniki Śląskiej.

DIFFERENCE SCHEME FOR DETERMINING TEMPERATURE FIELDS IN THIN CONCRETE ACCUMULATOR OF ENERGY

Summary

The paper describes a method of determining one dimensional temperature field in plain (without inner placed pipes with flowing refrigerant) and interior cooled, thin, concrete accumulator of energy which simultaneously receives energy from the solar radiation and convection.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w czerwcu 2008 r.