



Metodyka szacowania wartości współczynnika wyrównania temperatury obsypki gruntowej schronu w warunkach pożaru

ADAM BARYŁKA¹, GRZEGORZ BĄK

¹Centrum Rzeczoznawstwa Budowlanego Sp z o.o.,
01-355 Warszawa, ul. Powstańców Śląskich 106, lok. 9, biuro@crb.com.pl
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji, Instytut Inżynierii,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, grzegorz.bak2@neostrada.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodykę poszukiwania średniej wartości współczynnika wyrównania temperatur „ α ”, który charakteryzowałby właściwości osłonowe gruntowej obsypki stropu schronu wykopowego i umożliwiał prognozę skutków oddziaływania temperatur właściwych pożarowi zewnętrznemu. Za podstawę tej metodyki przyjęto wyniki modelowego badania doświadczalnego i zaproponowano dwie procedury ich interpretacji na podstawie prawa Fouriera. Podstawą pierwszej procedury jest bezpośrednie wykorzystanie różnicowej formy prawa przewodzenia ciepła. Umożliwia ona uzyskanie wartości średniej współczynnika charakteryzującej cały niestacjonarny proces nagrzewu pożarem i stygnięcia obsypki i stropu, ale na pewnym poziomie zagłębienia. Druga procedura wykorzystuje wieloparametryczne podejście identyfikacyjne i umożliwia oszacowanie współczynnika uśrednionego nie tylko w sensie czasowym, lecz także w odniesieniu do całej grubości obsypki.

Słowa kluczowe: budownictwo, fizyka budowli, współczynnik wyrównania temperatury, oddziaływanie pożarem, schron wykopowy

DOI: 10.5604/12345865.1168729

1. Wprowadzenie

Jednym z oddziaływań rozważanych przy projektowaniu schronu jest wysoka temperatura spowodowana pożarem zewnętrznym, o którym zakłada się, że występuje w założonym okresie pełnej izolacji obiektu od środowiska zewnętrznego. Pożary są konsekwencją promieniowania świetlnego i niszczącego działania powietrznej

fali uderzeniowej. W przypadkach lokalizacji schronów na obszarach zurbanizowanych mogą powstawać burze ogniowe. Ich oddziaływanie termiczne może być bardzo intensywne i niekorzystnie wpływać na obudowę schronu. Funkcją ochronną spełnia wówczas obsypka schronu wykopowego i jego obudowa. Grubość obsypki decyduje o tym, czy wnikająca energia cieplna będzie znacząco oddziaływać na żelbetową obudowę obiektu i czy podniesie istotnie temperaturę wnętrza schronu. W obudowie nadmiernie rozgrzanej mogą pojawić się rozszczelnienia. W pracy przedstawiono sposoby wnioskowania o możliwości modelowania obsypki grunтовой schronu ośrodkiem ciągłym z mechanizmem transportu energii cieplnej od pożaru zewnętrznego według równania przewodnictwa Fouriera

$$\nabla^2 t = \frac{1}{\bar{a}_z} \frac{\partial t}{\partial \tau}. \quad (1.1)$$

W równaniu (1.1) wprowadzono zastępczą wartość współczynnika wyrównania temperatur \bar{a}_z charakteryzującą własności termodynamiczne obsypki. Wartość ta zostanie określona bezpośrednio na podstawie badań laboratoryjnych, bez odniesienia się do jej definicji, to jest

$$\bar{a}_z = \frac{\lambda}{\rho c_w} \Big|_{\text{obs. gr.}} \quad (1.2)$$

W (1.2) λ jest współczynnikiem przewodzenia ciepła, ρ gęstością gruntu, a c_w ciepłem właściwym. Definicja (1.2) odpowiada przypadkowi, gdy wymienione wielkości mogą być traktowane jako stałe, niezależne od temperatury. Formułujemy pytanie, czy jest możliwy opis zachowania obsypki pod wpływem temperatur pożarowych na podstawie równania Fouriera, skoro grunt jest ośrodkiem trzyczastym, a nie ciałem stałym, i jego właściwości termodynamiczne zależą od temperatury i innych czynników, które nie są uwzględnione w formule prawa przewodzenia (1.1). Odpowiedź na tak postawione pytanie może być użyteczna z uwagi na potrzebę wprowadzenia oddziaływania pożarem zewnętrznym do procedury projektowania schronów. Dotychczas stosowano postępowanie, według którego uważano, że warunki ochrony przed pożarami zewnętrznymi spełnienia schron, który zapewnia właściwą osłonę przed promieniowaniem przenikliwym. Współczesne środki militarne podlegają jednak ciągłej modyfikacji, co sprawia, że wzrasta zagrożenie czynnikiem termicznym. Pojawiają się silnie energetyczne substancje wybuchowe osiągające w zapłonie bardzo wysokie temperatury. Konieczne jest więc prognozowanie osłony przeciwpożarowej na podstawie oddzielnej procedury. Z tego powodu rozważymy, czy wykorzystanie równania (1.1) do prognozowania wartości osłonowej obsypki na pożar zewnętrzny w projektowaniu schronów jest możliwe, jeżeli współczynnik wyrównania temperatur określimy jako uśrednioną wielkość zastępczą, właściwą

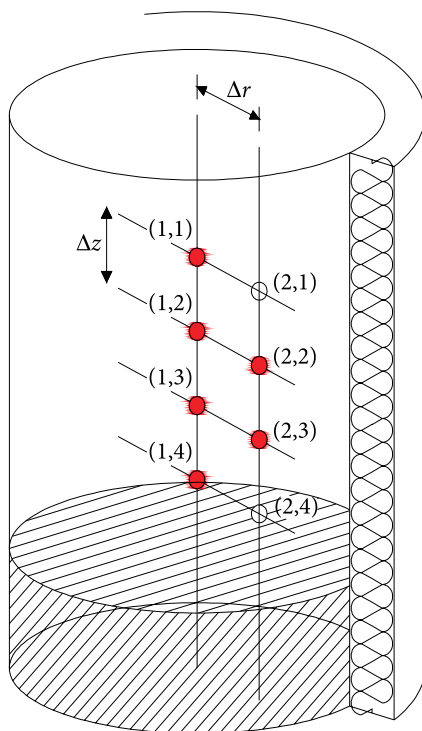
określonej obsypce i oddziaływaniu pożarowemu. W pojęciu tego współczynnika zawiera się aproksymacja rozważanego zagadnienia.

Przedstawimy metodykę badania doświadczalnego z dwiema procedurami interpretacji wyników, której celem jest oszacowanie wartości zastępczego współczynnika wyrównania temperatur \bar{a}_z . W pierwszej procedurze wykorzystujemy wyniki badania eksperymentalnego w różnicowej formule równania (1.1)₁, którą odniesiemy do wybranego węzła pomiarowego temperatury przy znanych wynikach z jego otoczenia. Określimy tę procedurę jako bezpośrednią. Wykorzystamy w niej zasadę najmniejszego błędu średniokwadratowego względem czasu. Otrzymana wartość będzie miała cechę wartości uśrednionej w czasie, ale lokalnej w sensie przestrzennym. Nie będzie miała cechy uśrednienia w odniesieniu do całej obsypki stanowiącej warstwę o określonej grubości. W drugiej procedurze wykorzystamy podejście identyfikacji wieloparametrycznej, które umożliwi uzyskanie wartości zastępczego współczynnika \bar{a}_z w pełni uśrednionego, tzn. dla całego procesu zmienności temperatury pożaru w czasie i odniesionego do obsypki o określonej grubości.

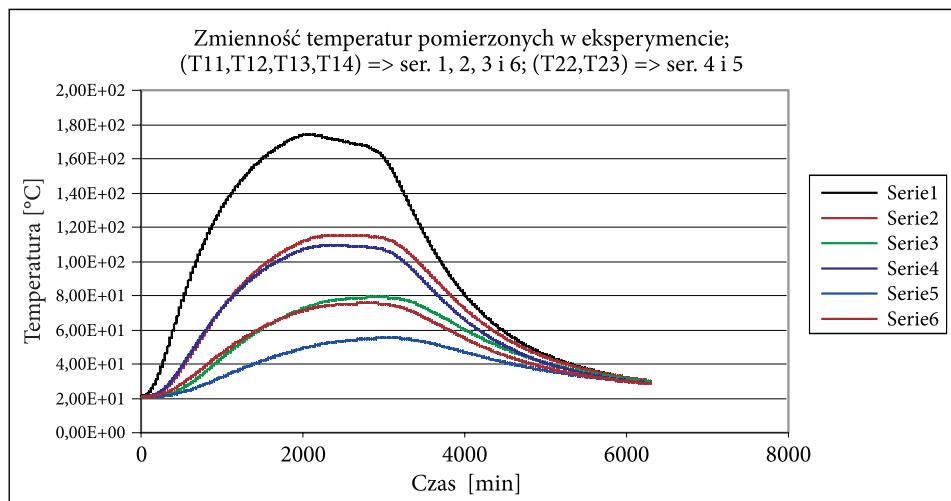
2. Badania doświadczalne

Próbkę gruntu piaszczystego umieszczono w otulinie walcowej z wełny mineralnej o grubości 0,05 m. Średnica wewnętrzna otuliny to 0,25 m. Grubość modelowej obsypki wynosiła 0,34 m. Energię ciepłą przekazywano na próbkę gruntu w warunkach laboratoryjnych za pomocą elektrycznej płyty grzejnej. Płytę położono na powierzchni gruntu i nie była izolowana od powietrza w pomieszczeniu. Rozgrzewała się do temperatury określonej temperaturą czerwonego żaru i trwała w niej przez około 1,25 doby. Następnie temperatura płyty była sukcesywnie zmniejszana poprzez opornik włączony w układ zasilania elektrycznego. Czas nagrzewania i stygnięcia próbki regulowano w taki sposób, aby temperatury końcowe gruntu — poniżej 30°C — uzyskiwać po okresie 6400 min, czyli po około 4,5 doby. Taki program nagrzewu i stygnięcia uważano za odpowiadający warunkom realnego pożaru zewnętrznego.

W próbce umieszczono na czterech poziomach sześć termometrów o zakresie pomiarowym do 200°K. Rozmieszczenie termometrów podano na rysunku 1. Poziom usytuowania pierwszego termometru był o 0,10 m poniżej powierzchni gruntu. Kolejne poziomy pomiarowe były co $\Delta z = 0,075$ m. Na trzecim i czwartym poziomie mierzono ponadto temperatury w odległości $\Delta r = 0,10$ m od osi próbki. Poniżej dolnego termometru, w odległości 0,015 m, znajdował się korek betonowy o grubości typowej jak dla stropu schronu, tzn. 0,40 m. W dalszej części pracy poziomom pomiarowym przypiszemy indeksy $IP = 1, 2, 3, 4$. Wartości temperatur szczytywano do pamięci komputera z czasem próbkowania 1 min.



Rys. 1. Rozmieszczenie poziomów i punktów pomiaru temperatury w próbce gruntu osłoniętej WM



Rys. 2. Wykresy temperatur pomierzonych w funkcji czasu

Wyniki pomiaru temperatur dla próbki gruntu piaszczystego i wilgotności około 12% zamieszczono na rysunku 2.

Z przedstawionych wykresów wynika, że przewodzenie ciepła odbywało się głównie na kierunku pionowym. Termometry umieszczone w poziomie 2. i 3. wskazywały na pewną tendencję przewodzenia ciepła na kierunku poziomym, z uwagi na występujące straty poprzez zewnętrzną otulinę z wełny mineralnej.

3. Procedury wyznaczenia wartości współczynnika wyrównania temperatur

3.1. Procedura bezpośrednia wyznaczenia chwilowej wartości a_z lokalnej w węźle (1,2)

Pomierzone temperatury umożliwiają wyznaczenie współczynnika wyrównania temperatur na podstawie różnicowej formuły prawa Fouriera odniesionej do węzłów (1,2) oraz (1,3). Każdy z wymienionych węzłów ma otoczenie pomiarowe. Możliwe jest również wykorzystanie symetrii obrotowej. Jeżeli równanie (1.1) odnieść do węzła pomiarowego (1,2), to podstawowe składniki tego równania — chwilowe wartości laplasjanu $\nabla^2 t|_{(1,2)}$ oraz pochodnej temperatury $\frac{\partial t}{\partial \tau}|_{(1,2)}$ względem czasu w tym węźle — można oszacować na podstawie schematów różnicowych, wykorzystując pomierzone temperatury.

$$a_{z,(1,2)}(\tau) \approx \frac{\frac{\Delta t}{\Delta \tau}}{\nabla^2 t}|_{(1,2)} \quad (3.1)$$

Wartość laplasjanu w warunkach symetrii osiowej we współrzędnych walcowych jest dana wzorem

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (3.2)$$

Po wykorzystaniu do drugiego składnika prawej strony reguły d'Hospitala uzyskamy wzór na wartość laplasjanu w punkcie (1,2)

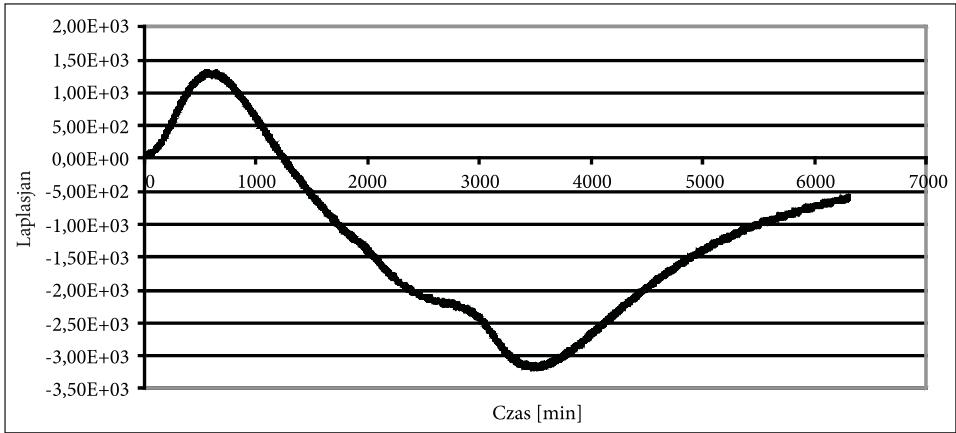
$$\nabla^2 t|_{(1,2)} = 2 \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}|_{(1,2)} \quad (3.3)$$

i jego różnicową formułę w postaci

$$\nabla^2 t_{(1,2)}^N = 2 \frac{t^N(2,2) - 2 \cdot t^N(1,2) + t^N(3,2)}{\Delta r^2} + \frac{t^N(1,1) - 2 \cdot t^N(1,2) + t^N(1,3)}{\Delta z^2}. \quad (3.4)$$

W (3.4) należy wykorzystać warunek symetrii osiowej: $t^N(3,2) = t^N(2,2)$.

Na podstawie pomierzonych temperatur uzyskujemy wykres $\nabla^2 t_{(1,2)}^N$ jako funkcję czasu (rys. 3).



Rys. 3. Zmienność w czasie wartości laplasjanu według (3.4) w punkcie (1,2)

Wykorzystanie wzoru (3.1) na chwilowe wartości $a_{Z,(1,2)}(\tau)$ jest możliwe, ale z wyłączeniem okresu bezpośrednio poprzedzającego i następującego po chwili $\tau^N = 1241$ min, w której występujący w mianowniku laplasjan $\nabla^2 t$ zeruje się. W otoczeniu tej chwili wartości $a_{Z,(1,2)}(\tau)$ ulegają zaburzeniom. Można natomiast poszukiwać uśrednionej w czasie lokalnej wartości $\bar{a}_{Z,(1,2)}$, z wyłączeniem tego okresu zaburzeń (τ^{N1}, τ^{N2}), na podstawie funkcji $\aleph(\bar{a}_{Z,(1,2)})$ błędu średniokwadratowego w badanym przedziale czasu

$$\aleph(\bar{a}_{Z,(1,2)}) = \left\{ \sum_1^{N_1} [\varepsilon(\tau^N)]^2 + \sum_{N_2}^{N_K} [\varepsilon(\tau^N)]^2 \right\} \Delta \tau. \quad (3.5)$$

W (3.5) błąd chwilowy $\varepsilon(\tau^N)$ określamy na podstawie różnicowej struktury równania Fouriera odniesionej do węzła (1,2),

$$\varepsilon(\tau^N) = \left(\nabla^2 t - \frac{1}{\bar{a}_{Z,(1,2)}} \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_{(1,2)}^N. \quad (3.6)$$

Taki sposób interpretacji umożliwia wyznaczenie wartości współczynnika $\bar{a}_{z,(1,2)}$ wyrównania temperatur w rozważanym węźle z warunku minimum funkcji $\mathfrak{K}(\bar{a}_{z,(1,2)})$, z którego otrzymujemy

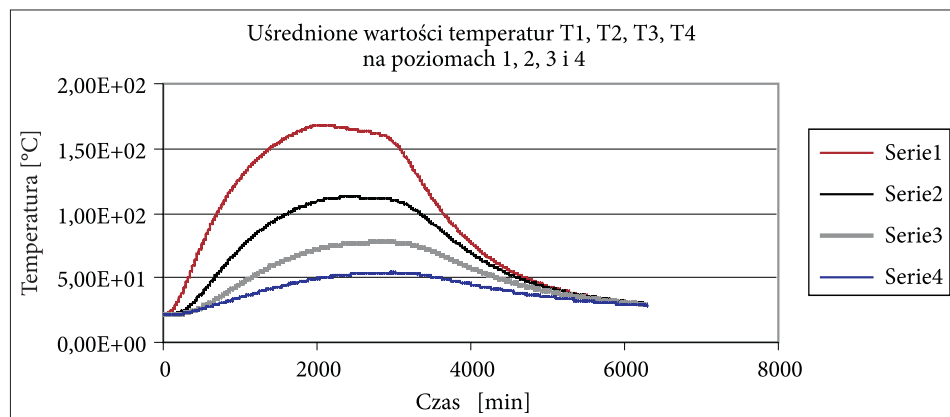
$$\bar{a}_{z,(1,2)} = 5,67 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}. \quad (3.7)$$

Wyznaczona wartość jest obarczona błędami określenia składników $\varepsilon(\tau^N)$ według (3.6) na podstawie ilorazów różnicowych przy wykorzystaniu dużych wartości kroków przestrzennych, $\Delta r = 0,10 \text{ m}$ i $\Delta z = 0,075 \text{ m}$. Błąd określenia ilorazu $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}_{(1,2)}^N$ występującego w (3.6) zminimalizowano przez symetryczne powiększenie przedziału wokół chwili τ^N o $\pm m \cdot \Delta \tau$. Stosowano $m \geq 5$.

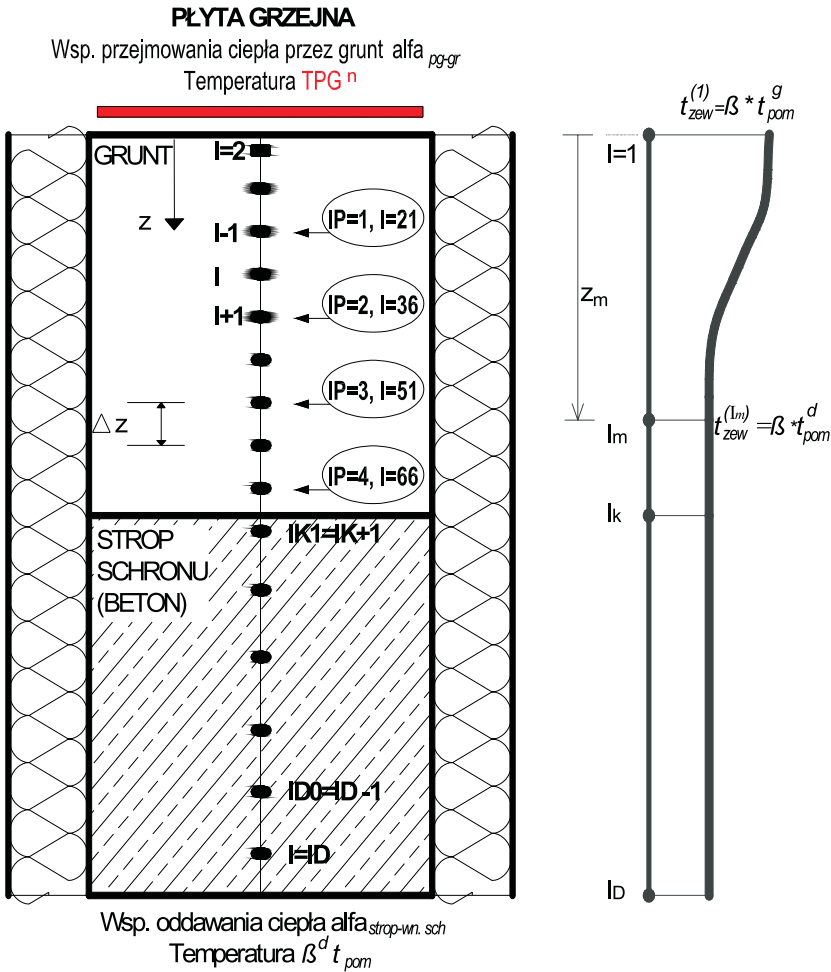
Podkreślimy, że przedstawioną procedurą bezpośrednią wyznaczmy uśrednioną w czasie wartość lokalną współczynnika wyrównania temperatury, $\bar{a}_{z,(1,2)}$.

3.2. Procedura według teorii identyfikacji wieloparametrycznej

Rozważamy procedurę interpretacji wyników doświadczalnych, która umożliwi wyznaczenie średniej wartości współczynnika wyrównania temperatury całej obsypki i całego okresu nagrzewu i stygnięcia próbki poddanej badaniu. Analizy szczegółowe przeprowadzimy dla zmodyfikowanego procesu przewodzenia ciepła przez próbkę. Zaniedbujemy przestrzenny charakter procesu przewodzenia ciepła w warunkach symetrii obrotowej. Założymy, że może być on aproksymowany jednowymiarowym przewodzeniem ciepła w pręcie z otuliną z wełny mineralnej. Otulina ma określony



Rys. 4. Zmienność w czasie uśrednionych temperatur w modelu jednowymiarowym w kolejnych poziomach pomiarowych $IP = 1, 2, 3, 4$



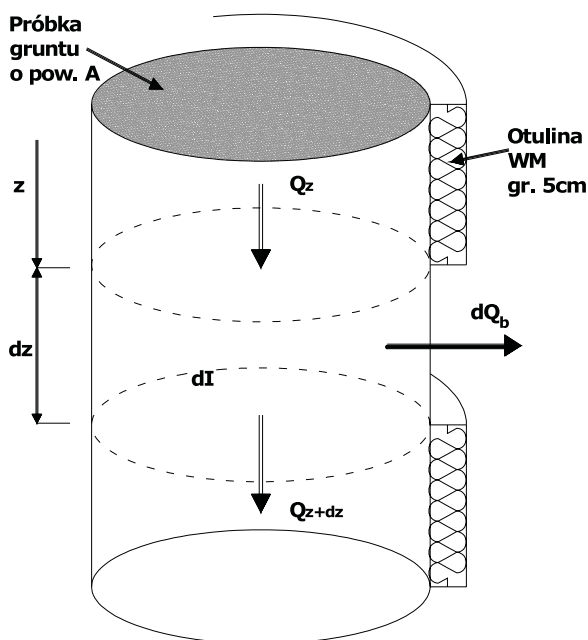
Rys. 5. Model pręta z otuliną z WM; hipotetyczny rozkład temperatury zewnętrznej

opór cieplny. W poziomach pomiaru temperatury (rys. 1) uśredniamy pomierzone wartości. Są one przedstawione na rysunku 4.

Model pręta przyjęty do dalszej analizy podano na rysunku 5. Krok podziału przestrzennego przyjęto $\Delta z = 0,005$ m. Zaznaczono poziomy pomiarowe $IP = 1$ do $IP = 4$, w których dokonano uśrednienia przebiegu temperatur pomierzonych. Odpowiadały one indeksom podziału przestrzennego równym odpowiednio $I = (21, 36, 51, 66)$.

Koncepcja omawianego sposobu wyznaczenia średniej wartości współczynnika wyrównania temperatur na podstawie identyfikacji będzie polegała na wyznaczeniu krzywych numerycznych zmian temperatur w poziomach ($IP = 1, \dots, IP = 4$)

i zminimalizowaniu ich różnic w stosunku do uśrednionych krzywych uznanych za eksperymentalne (rys. 3).



Rys. 6. Jednowymiarowy model obsypki do celów analizy identyfikacyjnej

W opisie przewodzenia ciepła w przyjętym modelu uwzględnimy, że na wysokości próbki występuje strata energii cieplnej poprzez osłonę, ale w każdym przekroju poprzecznym rozkład temperatury jest równomierny. Do charakterystyki oporu cieplnego wykorzystano pojęcie rurowego współczynnika przenikania ciepła przez ściankę rury grzejnej U_b , odniesionego do 1 m długości rury. W naszym przypadku rurą jest otulina z wełny mineralnej wypełniona gruntem, który przewodzi ciepło z płyty grzejnej. Współczynnik przenikania ciepła przez osłonę będzie równy:

$$\bar{U}_b = \frac{1}{R_b}, \quad (3.8)$$

gdzie opór przenikania wyraża się wzorem:

$$R_b = \frac{1}{\pi \cdot D_w \cdot \alpha_w} + \frac{\ln \frac{D_z}{D_w}}{2 \cdot \pi \cdot \bar{\lambda}_{w.m.}} + \frac{1}{\pi \cdot D_z \cdot \alpha_r}, \quad (3.9)$$

a więc jest zależny od geometrii otuliny rurowej (D_w, D_z), średnich wartości współczynników przejmowania i oddawania ciepła ($\bar{\alpha}_w, \bar{\alpha}_r$) oraz przewodności cieplnej wełny mineralnej $\bar{\lambda}_{w.m.}$. Mianem \bar{U}_b jest więc $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$. Na rysunku 6 wielkość Q_z oznacza strumień ciepła, którego źródłem jest płyta grzejna; wielkości dI oraz dQ_b są różniczkami odpowiednio entalpii oraz strat bocznych ciepła.

Równanie (1.1)₁ dyskretyzujemy względem zmiennych (z, τ) w odniesieniu do węzła i znajdującego się na odcinku próbki gruntu. Stosując ujęcie różnicowe przy jawnym schemacie całkowania w czasie, wyznaczmy wzór rekurencyjny na ewolucję temperatury w węźle i

$$t_i^{n+1} = \frac{1}{M_{GR}} \left[t_{i-1}^n - \left(2 + \frac{\vartheta_{GR} \cdot \Delta z^2}{A} - M_{GR} \right) t_i^n + t_{i+1}^n + \frac{\vartheta_{GR} \cdot \Delta z^2}{A} t_{zew}^n \right]. \quad (3.10)$$

We wzorze (3.10) oznaczono:

$$M_{GR} = \frac{\Delta z^2}{\bar{\alpha}_{GR} \cdot \Delta \tau}, \quad (3.10)_1$$

współczynnik wyrażający średni opór rurowy otuliny

$$\vartheta_{GR} = \frac{\bar{U}_b}{\bar{\lambda}_{GR}} \quad (3.10)_2$$

temperaturę zewnętrzną w bezpośrednim otoczeniu badanej próbki

$$t_{zew}(z) = \beta(z) t_{pom}. \quad (3.10)_3$$

We wzorze (3.10)₃ funkcję rozkładu podwyższonej temperatury w otoczeniu badanej próbki przyjęto w postaci

$$\beta(z) = \begin{cases} \left\{ 0,5 \left[(\beta^g + \beta^d) + (\beta^g - \beta^d) \cos \varphi \right], & \text{gdy } z \leq z_m \\ \beta^d, & \text{gdy } z_m < z \leq h_{obs}, \end{cases} \quad (3.10)_4$$

gdzie bezwymiarowe parametry $\beta^g = \frac{t(z)}{t_{pom}} \Big|_{z=0}$ i $\beta^d = \frac{t(z)}{t_{pom}} \Big|_{z=z_m}$ określające temperaturę na zewnątrz otuliny z WM w poziomie płyty grzejnej $z = 0$ i poniżej — w odległości z_m , argument φ funkcji kosinus zdefiniowano jako

$$\varphi = \frac{\pi \cdot z}{z_m}. \quad (3.10)_5$$

Zasięg podwyższonych temperatur poniżej poziomu umieszczenia płyty grzejnej z_m był również parametrem identyfikacji.

4. Program komputerowy i kryterium identyfikacji

Przyjęty prętowy model próbki według rysunku 5, który cechował się fizycznie odcinkową niejednorodnością, był podstawą do skonstruowania rozwiązania numerycznego niestacjonarnego przewodzenia ciepła w warunkach strat bocznych przy założonym jakościowo przestrzennym rozkładzie temperatur zewnętrznych. W tym celu opracowano program komputerowy do opisu przepływu ciepła z płyty grzejnej poprzez obsypkę i korek betonowy na podstawie równania Fouriera (1.1). Założono krok przestrzenny $\Delta z = 0,005$ m i stosowny krok czasowy $\Delta \tau = 4$ s, nienaruszający warunku stabilności procedury różnicowej. Program zbudowano z zastosowaniem różnicowej, trzypunktowej aproksymacji różniczkowego równania przewodzenia. Obejmował on podstawowy segment z pętlą zewnętrzną „całkowanie w czasie” przy kroku czasowym $\Delta \tau$ i pętlą wewnętrzną całkowania względem zmiennej przestrzennej z krokiem Δz . Powyższy segment programu został obudowany pętlami zmienności parametrów podlegających identyfikacji.

Wartości parametrów decydujących o nagrzewie obsypki wyznaczono sposobem iteracyjnym, wykorzystując kryterium zgodności prognozy numerycznej z wynikami uzyskanymi z pomiarów eksperymentalnych odniesionych do poziomów $IP = 1, 2, 3$ i 4 . Podstawą tego kryterium są rozwiązania numeryczne $t_{IP}^{num}(N)$ i odpowiadające im uśrednione krzywe eksperymentalne $\bar{t}_{IP}^{exp}(N)$. Postulując zgodność tych funkcji w sensie najmniejszych kwadratów albo innego kryterium, można wyznaczyć wartości poszukiwanych parametrów. Wykorzystano do tego relatywną miarę odchyłki tych funkcji, określając stosunek bezwzględnej różnicy pól, które tworzą krzywe numeryczne i uśrednione krzywe eksperymentalne względem osi odciętych — bezwymiarowej współrzędnej czasu N — do pola zawartego pod krzywą eksperymentalną $t_{IP}^{num}(N)$. Wartości pól liczono numerycznie metodą prostokątów.

Postać tak sformułowanej relatywnej odchyłki jest funkcją parametrów identyfikacji i może być określona wzorem:

$$\delta_{IP} = \frac{\sum_N |t_{IP}^{num}(N) - \bar{t}_{IP}^{exp}(N)|}{\sum_N \bar{t}_{IP}^{num}(N)} \cdot 100 [\%], \quad (4.1)$$

gdzie wskaźnik N jest numerem chwili czasowej, w której szczytowano temperatury — w eksperymencie co 1 minutę, $N = 1 \div 6400$. Funkcja $t_{IP}^{num}(N)$ jest zbiorem wartości wybranych z „gęstego” rozwiązania numerycznego, wyznaczonego przy znacznie mniejszym $\Delta\tau^{num}$.

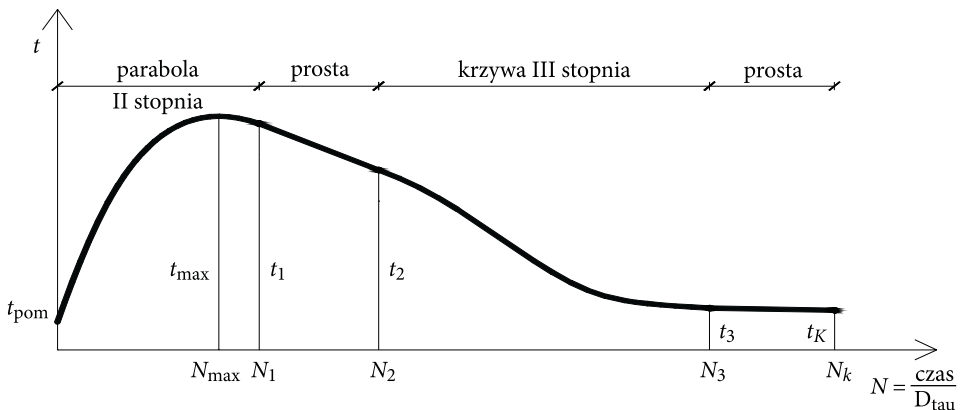
Stosowano kryteria cząstkowe — oddzielnie do każdego z poziomów pomiarowych IP — oraz badano globalne kryterium najlepszej zgodności w sensie sumy odchyłek cząstkowych

$$\mathfrak{R} = \sum_{IP=1}^{IP=4} \delta_{IP}. \quad (4.2)$$

Poszukiwano infimum odchyłek cząstkowych (4.1) i błędu globalnego (4.2).

5. Parametry identyfikacji

Parametry podlegające identyfikacji zostały ujęte w trzy grupy. **Grupa pierwsza** określa rozkład czasowy temperatury płyty grzejnej. Pomiaru tej temperatury nie prowadzono, pozostawiono ją do wnioskowania identyfikacyjnego. Zmiany temperatury wprowadzono poprzez okresową regulację oporności płyty, do wyłączenia nagrzewu włącznie. Przyjęto, że temperatura płyty grzejnej zmieniała się podczas eksperymentu zgodnie z czteroodcinkową krzywą — jak na rysunku 7.



Rys. 7. Odcinkowa, hipotetyczna zmienność temperatury płyty grzejnej podczas eksperymentu

Parametrami identyfikacji są odcięte i rzędne punktów granicznych poszczególnych odcinków:

- współrzędne wierzchołka paraboli początkowej (N_{max} , t_{max});
- odcięta punktu końcowego paraboli, (N_1 , t_1), przy czym $N_1 > N_{max}$;

- współrzędne punktu końcowego odcinka prostego, stycznego do paraboli początkowej, (N_2, t_2) ;
- współrzędne punktu końcowego (N_3, t_3) paraboli trzeciego stopnia, stycznej do odcinka prostego w punkcie (N_2, t_2) ,
- przyjmowano, że rzędna $t_3 = \mu t_{\text{pom}}$;
- rzędna punktu końcowego (N_k, t_k) odcinka prostego, opisującego zmiany temperatury w przedziale czasu $(N_3, N_k = 6400)$.

Wartości $N_{\text{max}}, N_1, N_2, N_3$ określają chwile czasu mierzone od początku doświadczenia w minutach. Są one wartościami szacującymi z nadmiarem chwile, w których regulowano oporność płyty grzejnej, celem zmniejszenia mocy nagrzewu.

Grupa druga ujmuje parametry definiujące bezpośrednią temperaturę otoczenia próbki w związku z lokalnym oddziaływaniem płyty grzejnej na otoczenie badanej próbki. Parametry te występują we wzorze (3.10)₄ definiującym zmienność temperatury w bezpośrednim otoczeniu badanej próbki (rys. 4), w relacji do temperatury pomieszczenia t_{pom} :

$$\beta_g, \beta_d, z_m.$$

Grupa trzecia zawiera stałe substancjonalne gruntu i otuliny z wełny mineralnej, w tym współczynnik przejmowania ciepła z płyty grzejnej do gruntu:

- $\bar{\lambda}_{gr}$ — średnia wartość współczynnika przewodzenia ciepła w gruncie,
- α_{PG-GR} — współczynnik przejmowania ciepła przez grunt z płyty grzejnej,
- \bar{a}_{gr}^{pg-gr} — średnia wartość współczynnika wyrównania temperatur w gruncie,
- U_b — liniowy współczynnik bocznych strat ciepła przez otulinę z WM.

Wartości tych parametrów ustalono na podstawie metody systematycznego przeszukiwania przy założonych przedziałach wartości spodziewanych. Przedziały na zasadnicze parametry przyjęto jak niżej:

$$\begin{aligned} t_{MAX} &\in (500, \dots, 720)^\circ C, & \lambda_{GR} &\in (0, 3, \dots, 1, 0), & a_{GR} &\in (4, 0, \dots, 11, 0) \cdot 10^{-7}, \\ \alpha_{PG-GR} &\in (2, 5, \dots, 3, 5), & U_b &\in (0, 7, \dots, 1, 3), & \beta^s &\in (1, 1, \dots, 1, 4), \\ \beta^d &\in (0, 9, \dots, 1, 0), & I_m &\in (15, \dots, 30), & \mu &\in (1, 2, \dots, 1, 8). \end{aligned} \quad (5.1)$$

W polu tym poszukiwano wartości parametrów dla gruntu na podstawie przyjętych kryteriów poprawności rozwiązań numerycznych. Uznano, że parametry termodynamiczne betonu mogą być ustalone na podstawie danych literaturowych i nie będą podlegały identyfikacji.

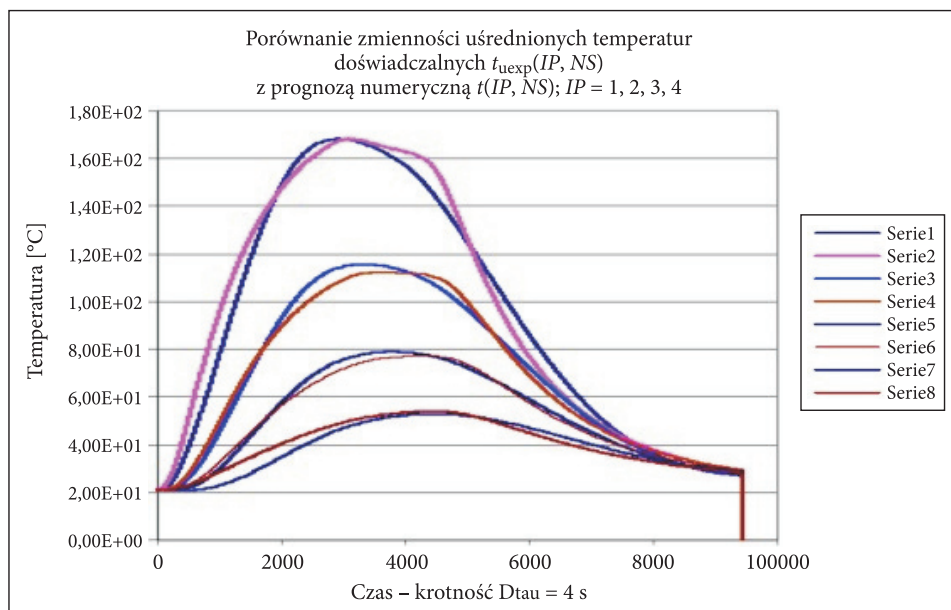
$$\lambda_c = 1,7 \frac{\text{W}}{\text{mK}}, \quad c_{wc} = 0,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}, \quad \rho_c = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3},$$

$$a_c = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_w} = 8,1 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}. \quad (5.2)$$

Za dodatkowe kryterium zgodności wyników numerycznych i eksperymentalnych przyjmowano również temperatury końcowe, eksperymentalną i prognozowaną numerycznie w poziomie pomiarowym $IP = 4$. Temperatura ta świadczyła o stanie zbliżonym do stacjonarnego po zakończeniu eksperymentu bezpośrednio na powierzchni stropu schronu.

6. Wyniki analiz numerycznych

Wybrane wyniki analizy numerycznej do wnioskowania o akceptowalnych wartościach parametrów identyfikacyjnych według kryterium (4.2) zamieszczono w tabeli 1.



Rys. 8. Porównanie graficzne wyników doświadczenia i prognozy numerycznej

TABELA 1

Wybrane wyniki identyfikacji

Nr iteracji	Wskazniki określające hipotetyczną krzywą nagrzewu płyty grzejnej						TPC _{MAX} [°C]	$\delta_{IP=1}$ [%]	$\delta_{IP=2}$ [%]	$\delta_{IP=3}$ [%]	$\delta_{IP=4}$ [%]	$\mathfrak{R} = \sum_{IP=1}^{IP=4} \delta_{IP}$ [%]	λ_{GR} $\left[\frac{W}{mK} \right]$	a_{GR} $\left[\frac{m^2}{s} \right]$	$\alpha_{PG-GRUNT}$ $\left[\frac{W}{m^2K} \right]$	U_B $\left[\frac{W}{mK} \right]$	$t(I=66)$ [°K]	$t_{EXP}(IP=4)$ [°K]
	N_{max}	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5												
1	1	1	2	2	2	3	605	0,60	3,93	3,14	5,67	18,0	0,60	5,20E-07	3,0	0,8	28,8	
2	1	1	2	2	2	4	605	0,60	3,84	3,19	5,82	18,1	0,60	5,20E-07	3,0	0,8	28,8	
3	1	1	2	2	2	3	605	0,69	3,81	3,11	4,85	17,16	0,69	5,20E-07	3,05	0,8	28,0	
4	1	1	2	2	2	3	605	0,69	4,04	3,41	4,39	17,08	0,69	5,35E-07	3,05	0,8	27,85	
5	1	1	2	2	2	3	605	0,69	3,88	3,20	4,70	17,10	0,69	5,25E-07	3,05	0,8	27,95	28,15
6	2	1	4	1	1	3	580	0,65	5,90	4,57	3,97	20,5	0,65	5,20E-07	3,20	0,75	28,8	
7	2	1	4	1	1	4	580	0,65	4,74	3,63	4,49	18,2	0,65	5,20E-07	3,20	0,75	29,0	
8	2	1	4	1	2	2	585	0,65	7,41	5,81	3,29	24,2	0,65	5,20E-07	3,20	0,75	28,7	
9	2	1	4	1	2	3	585	0,65	5,97	4,66	4,12	20,8	0,65	5,20E-07	3,20	0,75	28,9	
10	2	1	4	1	3	2	590	0,65	7,49	5,89	3,44	24,5	0,65	5,20E-07	3,20	0,75	28,7	

Przedstawione wyniki numeryczne wskazują, że przyjęte kryterium (4.2) jest wrażliwe na parametry identyfikacji w stopniu zadowalającym. Można wnioskować, że poszukiwane parametry identyfikacji najlepiej odpowiadają iteracji nr 4. Za racjonalne wartości parametrów można więc uznać:

$$t_{PG\max} = 605^{\circ}\text{C}, \quad \bar{a}_z = 5,35 \cdot 10^{-7} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}, \quad \alpha_{PG-GRUNT} = 3,05 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}. \quad (6.1)$$

Zauważymy, że wynikom tej iteracji odpowiada również relatywnie mały błąd $\delta_{IP=4} = 4,39\%$. Wskazuje on na ufną ocenę prognozy numerycznej o przejmowaniu energii cieplnej pożaru zewnętrznego przez strop schronu symulowany korkiem betonowym. Bliskie sobie są też wartości temperatur końcowych w warstwie przyległej do korka betonowego: wartość wyznaczona procedurą numeryczną — $t(66) = 27,85^{\circ}\text{C}$ i pomierzona — $t_{IP=4} = 28,15^{\circ}\text{C}$. Ilustracją poprawności uzyskanego wyniku są doświadczalne i numeryczne krzywe rozkładów temperatur w czasie na poziomach pomiarowych $IP = 1, 2, 3, 4$ podane na rysunku 8.

7. Zakończenie

W pracy przedstawiono metodykę szacowania zastępczej wartości współczynnika wyrównania temperatury obsypki gruntowej schronu wykopowego przy rozkładzie temperatury odpowiadającej sytuacji pożaru zewnętrznego. Współczynnik ten może być wykorzystany do numerycznej prognozy właściwości osłonowych gruntu przy pożarze zewnętrznym z wykorzystaniem prawa Fouriera przewodzenia ciepła w ośrodku stałym, przy zaniedbaniu zależności stałych termodynamicznych od temperatury i trzyczasowej struktury gruntu implikującej złożone mechanizmy transportu energii cieplnej. Metodyka obejmuje sposób przeprowadzenia badania doświadczalnego w warunkach laboratoryjnych oraz procedury interpretacji otrzymanych wyników. Zaproponowano procedurę bezpośredniego wyzyskania wyników doświadczalnych w różnicowej formule prawa Fouriera na przewodzenie ciepła w ośrodku stałym. Wskazano na pewną osobliwość wynikającą z nieoznaczoności wzoru otrzymanego z formuły różnicowej tego prawa na poszukiwany współczynnik o charakterze wielkości lokalnej. Zupełne uśrednienie wartości współczynnika z uwagi na zmienność temperatury pożarowej w czasie, przy uwzględnieniu całej grubości obsypki, uzyskano procedurą identyfikacyjną. Umożliwiła ona wyznaczenie innych parametrów, które były trudne do bezpośredniego pomiaru w doświadczeniu. Do parametrów tych należy zaliczyć te, które określały rozkład czasowy temperatury generowanej płytą grzejącą oraz średnią wartość współczynnika wnikania ciepła do obsypki. W opisie numerycznym niestacjonarnego procesu przewodzenia ciepła

stosowano metodę różnicową z jawnym schematem całkowania względem czasu przy zachowaniu warunku stabilności procedury numerycznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.01.2015 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 27.01.2015 r.

LITERATURA

- [1] SZCZEŚNIAK Z., *Wybrane problemy oceny odporności budowli obronnych na działanie współczesnych środków rażenia*, Konferencja Naukowo-Techniczna nt. „Problemy badawcze i techniczne związane z projektowaniem, wykonawstwem i eksploatacją budowli obronnych”, Bystra Śląska, czerwiec 1996.
- [2] BĄK G., SZCZEŚNIAK Z., *Schrony OC w budynkach użyteczności publicznej*, Referat problemowy na konferencji, „Krynica 2003”.
- [3] GIERGIEL J., UHL T., *Identyfikacja układów mechanicznych*, PWN, Warszawa, 1990.
- [4] KOSTOWSKI E., *Przepływ ciepła*, Politechnika Śląska, Gliwice, 1995.
- [5] WIŚNIEWSKI S., WIŚNIEWSKI T.S., *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa, 2000.
- [6] KOSIOREK M., POGORZELSKI J.A., LASKOWSKA Z., PILICH K., *Odporność ogniowa konstrukcji budowlanych*, Arkady, Warszawa, 1988.

A. BARYŁKA, G. BĄK

Methods for estimation of temperature compensation factor of shelter ground cover under fire

Abstract. The paper presents the methods of searching for the average value of the temperature compensation coefficient „a” which would characterize shielding properties of the ground ceiling ballast of the shelter and would allow for prediction of the effects of temperature effects relevant to an external fire. The methods are based on the results of an appropriate laboratory experiment. Two numerical procedures are proposed for interpretation of these results exploiting the Fourier’s law of the heat conduction. The first procedure consists in the direct use of the differential form of this law. It allows us to obtain the value of the average coefficient of non-stationary process characterized by heating with fire and by cooling the ground ceiling ballast but at a certain deep level. The second procedure uses a multiparameter approach enabling the identification and estimation of the averaged ratio not only in time but for the entire thickness of the backfill.

Keywords: civil engineering, physics of building, the temperature compensation coefficient, fire action, underground shelter

DOI: 10.5604/12345865.1168729

