



## Określenie termicznej stałej czasowej żelbetowego stropu schronu

STEFAN OWCZAREK, MARIUSZ OWCZAREK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, mariusz.owczarek@wat.edu.pl

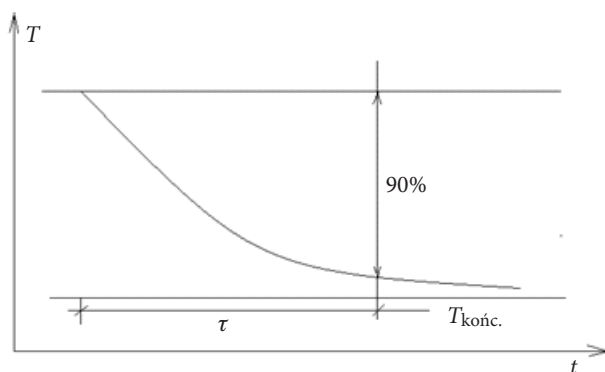
**Streszczenie.** Na skutek zmiany warunków brzegowych wymiana ciepła w przegrodach budowlanych nie zawsze ma charakter stanu ustalonego. Strumienie ciepła przenikające przez taką przegrodę mogą być kilkukrotnie większe niż w stanie ustalonym. Zatem budynek może mieć o wiele wyższe zapotrzebowanie na energię i wymaga zastosowania większej mocy grzejników, niż to wynika z obliczeń normowych. W tym artykule zajmowano się szacowaniem długości trwania stanu nieustalonego po zmianie warunków brzegowych. Analizowano fragment płyty stropu schronu o wymiarach  $35 \times 1$  m i grubości 0,5 m. Płyta z jednej strony jest chłodzona w powietrzu o temperaturze  $8,6^{\circ}\text{C}$ , z drugiej strony znajduje się wewnątrz schronu o temperaturze  $20^{\circ}\text{C}$ . Wyznaczono czas ostygnięcia z zależności teoretycznej oraz obliczeń numerycznych, przedyskutowano różnice i wyciągnięto wnioski.

**Słowa kluczowe:** budownictwo, fizyka budowli, strumienie ciepła w przegrodach budowlanych  
DOI: 10.5604/01.3001.0010.1891

### 1. Charakterystyka chłodzenia i nagrzewania przegród budowlanych

Stosowana teoria chłodzenia [1, 2, 3, 4] elementów konstrukcyjnych zakłada ich prostopadłościenny kształt i stałą temperaturę na ich brzegach. Teoria ta zajmuje się zagadnieniem chłodzenia i ogrzewania ciał przy dużych różnicach pomiędzy początkowym a końcowym stanem pola temperatury. Przejście pomiędzy ustalonymi stanami, początkowym i końcowym, należy do rozważań dynamiki cieplnej procesu termicznego. Istotą opisu procesu przejścia jest dynamiczny stan uporządkowany. Ważnymi parametrami opisu stanu uporządkowanego są: szybkość chłodzenia i stała czasowa przejścia ze stanu ustalonego początkowego w ustalony stan końcowy.

W budownictwie występują elementy, których kształt odbiega od prostopadłościanu. Chłodzenie tych elementów występuje ze zmiennymi wartościami na ich wyróżnionych brzegach. Wychładzanie w elementach budowlanych przeważnie ma charakter jednostronnego oddziaływania niskiej temperatury. Procesy ogrzewania i chłodzenia są związane z cyklami dzień–noc i lato–zima, które mają szczególne znaczenie w określaniu zapotrzebowania ciepła w budynkach w okresach włączania i wyłączenia instalacji ogrzewania. Szybkie zmiany temperatury są stosunkowo niewielkie w budynkach i wahają się w granicach od 15° do 30°C. Z punktu widzenia teoretycznego jest to zagadnienie bardziej skomplikowane niż chłodzenie w rozległym zakresie temperatury elementów o dużym współczynniku przewodzenia ciepła i małym współczynniku wnikania. W opisie jest to zagadnienie przejścia z jednego poziomu temperatury w stanie ustalonym do drugiego stanu ustalonego.



Rys. 1. Interpretacja graficzna stałej czasowej

Przyjęta w artykule definicja stałej czasowej  $\tau$  jest to czas, dla którego odchyłka temperatury aktualnej od końcowej jest mniejsza niż 10% różnicy pomiędzy temperaturą końcową a początkową. W postaci graficznej zaprezentowano to pojęcie na rysunku 1.

Mając to na uwadze, podjęto próby analizy dotyczącej struktur warstwowych elementów budowlanych chłodzonych przy różnych wartościach temperatur na ich brzegach. W sposób naturalny stajemy przed alternatywą — albo uśrednienie założenia stanu uporządkowanego, wyzyskując liczby podobieństwa takie jak Fouriera, Biota, Kondratiewa, albo użycie metody objętości skończonych przez podział na elementy, w których zastosowano możliwie wszystkie wymagania teorii przewodnictwa cieplnego. Zadanie rozwiązano dwiema metodami, stosując teorię stanu uporządkowanego oraz za pomocą numerycznego rozwiązania równania Fouriera. W przypadku teorii stanu uporządkowanego otrzymujemy rozwiązanie zerowymiarowe, to znaczy jedną stałą czasową dla całego ciała. Teoria ta opiera się na założeniu, że po pewnym czasie od rozpoczęcia chłodzenia ciało wchodzi w stan uporządkowany. W tym stanie prędkość wychładzania jest stała w czasie, a zmiana

temperatury może być opisana równaniem wykładniczym. W drugiej metodzie poprzez numeryczne rozwiązanie pola temperatury w ciele możemy otrzymać stałą czasową dla każdego elementu objętości skończonej ciała. Ponieważ zmiana temperatury odbywa się według funkcji czasu różnych dla każdego elementu, zadanie sprowadza się do ustalenia ich prędkości chłodzenia i czasu przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego.

## 2. Założenia teorii stanu uporządkowanego

W teorii stanu uporządkowanego rozróżniamy dwa przypadki:

- I — wyznaczania stałej czasowej i tempa chłodzenia przy założeniu niezmienności w danym czasie temperatury ciała od zmiennych przestrzennych.
- II — wyznaczania stałej czasowej i tempa chłodzenia przy założeniu zmienności w danym czasie temperatury ciała od zmiennych przestrzennych.

W pierwszym przypadku zakłada się, że proces stygnięcia przebiega w ten sposób, że:

- stała jest temperatura płynu otaczającego stygnące ciało, stałe  $T_p$ ,
- temperatura stygnącego ciała stałego jest jedynie funkcją czasu,  $T = T(t)$ ,
- w przypadku  $t = \tau_o$  jest  $T_o = T(\tau_o)$ .

Przyjmując współczynnik przejmowania ciepła od płynu do ciała równy  $\alpha$ , równanie bilansu ciepła objętościowego i powierzchniowego w czasie  $dt$  zapisano w postaci

$$V \rho c_p dT = -A\alpha(T - T_p)dt. \quad (2.1)$$

Określając nadwyżkę temperatury ciała stałego nad temperaturą otaczającego płynu

$$\vartheta = T - T_p, \quad T > T_p, \quad \vartheta > 0, \quad (2.2)$$

równanie (2.1) zapisano w postaci

$$\frac{d\vartheta}{\vartheta} = -\frac{A\alpha}{V\rho c_p} dt. \quad (2.3)$$

Po scałkowaniu równania (2.3) przy warunku początkowym

$$t = 0, \quad T = T_1, \quad \vartheta_1 = T_1 - T_p, \quad (2.4)$$

$$\ln \vartheta = -\frac{A\alpha}{V\rho c_p}t + C, \quad C = \log \vartheta_1, \quad (2.5)$$

$$\ln \vartheta - \ln \vartheta_1 = -\frac{A\alpha}{V\rho c_p}t, \quad \ln\left(\frac{\vartheta}{\vartheta_1}\right) = -\frac{A\alpha}{V\rho c_p}t.$$

Skąd jest:

$$\frac{\partial}{\partial t} \ln\left(\frac{T - T_p}{T_1 - T_p}\right) = -\frac{A\alpha}{V\rho c_p} = m. \quad (2.6)$$

Przedstawiając pierwszy wyraz w postaci różnicy skończonej, można napisać

$$m = \frac{\ln(T_2 - T_p) - \ln(T_1 - T_p)}{t_2 - t_1}. \quad (2.7)$$

Wyrażenie po prawej stronie równania (2.5) jest następujące:

$$m = -\frac{A\alpha}{V\rho c_p}. \quad (2.8)$$

Stała czasowa  $\tau$  charakteryzuje bezwładność cieplną ciała. Odwrotność tej stałej jest tempem chłodzenia (nagrzewania) i oznaczana przez  $m$  ma postać (2.8):

$$\tau = \frac{V\rho c_p}{A\alpha}, \quad m = \frac{A\alpha}{V\rho c_p}. \quad (2.9)$$

W powyższych rozważaniach założono, że temperatura ciała stałego ochładzanego jest tylko funkcją czasu i nie zależy od zmiennych przestrzennych. Jest to przypadek występujący w chłodzeniu ciał przy dużym współczynniku wyrównania temperatury  $a = \frac{\lambda}{c\rho}$  i małym współczynniku wnikania  $B_i = \frac{\alpha l}{\lambda}$  (małej wartości liczby Biota).

W drugim przypadku przyjmujemy założenie o zmienności w danym czasie temperatury ciała od zmiennych przestrzennych.

W opisie tego procesu chłodzenia przyjmuje się następujące założenia:

- stała jest temperatura płynu otaczającego stygnące ciało stałe  $T_p$ ,
- temperatura stygnącego ciała stałego na brzegu jest jedynie funkcją czasu  $T_b = T_b(\tau)$ ,
- dla  $\tau = \tau_o$ ,  $T_{ob} = T_b(\tau_o)$ ,

- temperatura stygnącego ciała stałego jest zmienna w obszarze i reprezentowana przez średnią temperaturę w obszarze,  $T_b(\tau) < T_{sr}(\tau)$ .

Jeżeli temperatura w objętości ciała zmienia się w zależności od zmiennych przestrzennych, to równanie wyjściowe bilansu cieplnego w czasie  $dt$  można zapisać, zakładając temperaturę uśrednioną ciała stałego. Równanie to zapisano w postaci (2.10):

$$V \rho c_p \partial_{sr} m = -A \alpha (T_b - T_p). \quad (2.10)$$

Z równania (2.10) otrzymano:

$$m = \frac{\alpha A (T_b - T_p)}{V \rho c_p (T_{sr} - T_p)} = \frac{a}{l^2} Bi \psi; \quad \psi = \frac{(T_b - T_p)}{(T_{sr} - T_p)}, \quad (2.11)$$

$\psi$  — nierównomierność rozkładu temperatury w ciele w stanie uporządkowanym.

Iloczyn wielkości bezwymiarowych  $Bi$  oraz  $\psi$  nazywa się liczbą Kondratiewa:

$$Kn = Bi \psi, \quad \psi = \frac{1}{\sqrt{Bi^2 + 1,437Bi + 1}}. \quad (2.12)$$

Tę liczbę można przyjąć w postaci:

$$Kn = \frac{Bi}{\sqrt{Bi^2 + 1,437Bi + 1}}. \quad (2.13)$$

W przypadku małych wartości liczby Biota liczba Kondratiewa jest bliska liczbie Biota, a więc jest:

$$m = \frac{a}{l^2} Bi = \frac{\alpha}{c_p \rho l}. \quad (2.14)$$

Wyrażenie (2.14) jest identyczne z (2.9) prezentowanym w przypadku małego współczynnika Biota.

Przypadek (2.9) zachodzi przy szybkim oziębianiu ciała ( $\lambda$ ) i stosunkowo małym wnikaniu temperatury na brzegu ciała.

W przypadku dużych wartości liczby Biota ( $Bi > 100$ ) liczba podobieństwa Kondratiewa  $Kn$  staje się wielkością stałą i bliską jedności. Tempo ostygnięcia  $m$  staje się wówczas proporcjonalne do współczynnika wyrównania temperatur  $\alpha$  wewnątrz ciała.

$$m = \frac{a}{l^2}. \quad (2.15)$$

Przyjmując dla przegrody o grubości  $d$ ,  $l = \frac{d}{2}$ ,  $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ ,  $C = \frac{d \rho c_p}{2}$ ,  $R = \frac{d}{\lambda}$

wzór (2.15) można przekształcić do postaci:

$$m = \frac{2}{CR}, \quad \tau = \frac{1}{2}CR. \quad (2.16)$$

### 3. Własności fizyczne i geometryczne rozważanego stropu schronu

Celem jest wyznaczenie czasu osiągnięcia stanu ustalonego wymiany ciepła w masywnej przegrodzie schronu przy założeniu, że proces jej wychładzania jest opisany równaniem (2.5). Brano pod uwagę odcinek płyty betonowej stanowiącej strop schronu o grubości 0,5 m, długości 35 m i głębokości 1 m.

Założono następujące właściwości płyty: współczynnik przewodzenia ciepła  $l = 2,5 \text{ W/(mK)}$ , ciepło właściwe  $c_p = 1000 \text{ J/(kgK)}$  i gęstość  $r = 2400 \text{ kg/m}^3$ . Płyta była chłodzona z jednej strony poprzez konwekcję swobodną w powietrzu o temperaturze  $T_c = 8,6^\circ\text{C}$ , a z drugiej strony założono stałą temperaturę wewnętrzną  $T_{\text{wew}} = 20^\circ\text{C}$ . Początkowa temperatura całej płyty jest równa  $T_{\text{wew}}$ . Współczynnik przejmowania ciepła na zewnętrznej powierzchni płyty wynosi  $h = 25 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Dyfuzyjność cieplna wyniesie:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} = \frac{2,5}{1000 * 2400} = 1,042e - 6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}. \quad (3.1)$$

Wymiar charakterystyczny fragmentu płyty wynosi

$$l = \frac{V}{S} = \frac{1 * 0,5 * 35}{(2 * 1 + 2 * 0,5) * 35} = 0,16667 \text{ m}. \quad (3.2)$$

Przy obliczaniu pola płyty nie wzięto pod uwagę powierzchni czołowej i tylnej, ponieważ są one małe w porównaniu z całą powierzchnią.

### 4. Wyznaczenie tempa chłodzenia z zależności dla stanu uporządkowanego

Równanie (2.5) dotyczy przebiegu temperatury przy chłodzeniu na całej zewnętrznej powierzchni. Ponieważ w konfiguracji analizowanej w pracy chłodzenie zachodzi tylko na powierzchni zewnętrznej, założono dwa razy mniejszy współczynnik przejmowania ciepła  $h = 12,5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ . Obliczamy liczbę Biota:

$$Bi = \frac{hl}{\lambda} = 0,8333, \quad (4.1)$$

liczba Kondratiewa:

$$K_n = \frac{Bi}{\sqrt{Bi^2 + 1,437Bi + 1}} = 0,49, \quad (4.2)$$

tempo chłodzenia

$$m = \frac{a}{l^2} K_n = 1,838e - 5 \frac{1}{s}. \quad (4.3)$$

Mając tempo chłodzenia, można wyznaczyć czas osiągnięcia stanu ustalonego z równania (2.3), z warunku, że w chwili początkowej stanu uporządkowanego całe ciało ma temperaturę  $t_1$ , temperaturę końcową  $t_{kon}$  można zaś ustalić z rozwiązania dla stanu ustalonego.

W literaturze można spotkać warunek, że stan uporządkowany zachodzi, jeśli liczba Fouriera  $Fo > 0,55$ . Dla tego przypadku zachodzi to po około czterech godzinach od rozpoczęcia chłodzenia:

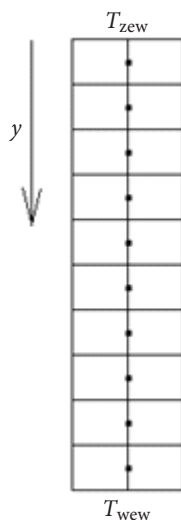
$$Fo = \frac{at}{l^2} = \frac{1,042e - 6 * 14400}{0,16667^2} = 0,54. \quad (4.4)$$

Zakładamy, że stan uporządkowany zachodzi od początku trwania procesu. Zatem korzystając z równania (2.5),  $T_1$  podstawiamy dla czasu  $t = 0$  i jest to temperatura  $T_{wew} = 20^\circ\text{C}$ , ponieważ czas wynosi 0, to temperatura  $T(0)$  równa jest też  $T_{wew}$ . Korzystając z równania (2.5), jest:

$$\frac{T(0) - T_p}{T_1 - T_p} = Ae^{-m0}. \quad (4.5)$$

Z równania otrzymujemy wartość stałej  $A = 1$ . W celu wyznaczenia czasu dojścia do stanu ustalonego wyznaczamy rozkład temperatury w stanie ustalonym. Rozkład taki można łatwo wyznaczyć, posługując się zależnościami z [2, 3]. Obliczamy temperatury powierzchni ściany oraz punktów na wybranych głębokościach — jak pokazano na rysunku 2. Punkty te odpowiadają podziałowi na węzły w obliczeniach metodą objętości skończonych.

Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Rozmieszczenie węzłów w płycie

TABELA 1

Rozkład temperatury w stropie dla stanu ustalonego

$Y$	Zew.	0,475	0,425	0,375	0,325	0,275	0,225
$T_{ust}$ [°C]	8,6	10,14	10,76	11,37	11,99	12,6	13,22
$Y$	0,175	0,125	0,075	0,025	wew.		
$T_{ust}$ [°C]	13,84	14,45	15,07	15,69	20		

Ponieważ obliczone tempo chłodzenia jest średnie dla całej geometrii, obliczamy też średnią temperaturę stanu ustalonego  $T_{ust, sr} = 12,9^{\circ}\text{C}$ .

Uwzględniając (4.3) w równaniu (2.5), otrzymano równanie opisujące zmienność temperatury w czasie dla płyty:

$$\frac{T(t) - T_p}{T_1 - T_p} = e^{-1,838 \cdot 10^{-5} t} \quad (4.6)$$

Podstawiając za  $T(t)$  temperaturę  $T_{ust, sr}$ , wyznaczmy średni czas dojścia do końcowego stanu ustalonego

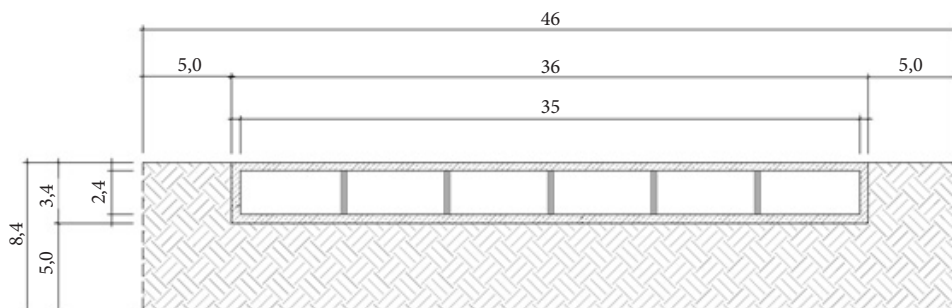
$$t = \frac{\ln\left(\frac{T(t) - T_p}{T_1 - T_p}\right)}{1,838e - 5}, \quad (4.7)$$

otrzymano czas  $t = 14,69$  h.



## 5. Obliczenia za pomocą metody objętości skończonych

Symulowano temperatury w przekroju schronu zagłębionego w gruncie do poziomu stropu. Schemat schronu przedstawia rysunek 3.



Rys. 3. Schemat analizowanego schronu [4]

Oprócz samej konstrukcji schronu w obliczaniu pola temperatury uwzględniono grunt według wymiarów na rysunku 3. Powietrze zewnętrzne jest modelowane przez konwekcje o stałym współczynniku  $h = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  na górnej powierzchni stropu. Konstrukcja schronu ma właściwości cieplne identyczne jak w modelowaniu za pomocą teorii stanu uporządkowanego. Grunt posiada współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda = 2,0 \text{ W}/(\text{mK})$ , ciepło właściwe  $c_p = 1000 \text{ J}/(\text{kgK})$  i gęstość  $\rho = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Całą geometrię podzielono, używając siatki o węzłach w odstępach  $0,05 \text{ m}$ . Rysunek 2 przedstawia pojedynczą warstwę pionową podziału na objętości skończone stropu. W stanie początkowym powietrze w schronie i jego konstrukcja miały temperaturę  $20^\circ\text{C}$ , a grunt oraz powietrze zewnętrzne  $8,6^\circ\text{C}$ . W pracy [5] obliczono temperaturę w węzłach siatki w ciągu 360 dni. W niniejszym artykule przedstawiona jest tylko wymiana ciepła w stropie, ma on wymiary jak na rysunku 3. Punktem odniesienia jest stan ustalony obliczony w tabeli 1. Obliczono procent dojścia do stanu ustalonego według wzoru

$$1 - \frac{T(t) - T_{ust}}{T_{pocz} - T_{ust}} \quad (5.1)$$

Założono, że stan ustalony jest osiągnięty, jeśli temperatura będzie miała 90% wartości charakterystycznej dla tego stanu. Otrzymane wyniki przedstawia tabela 2. W celu porównania rozwiązań i wyjaśnienia powodów rozbieżności w wartościach otrzymanych stałych czasowych wykreślono zmienność średniej temperatury płyty uzyskaną za pomocą teorii stanu uporządkowanego, a następnie całkowania numerycznego dla jednostronnego i dwustronnego chłodzenia płyty. Wariant z dwustronnym chłodzeniem zakładał temperaturę wewnętrzną w schronie równą

temperaturze zewnętrznej. Był to wariant zakładający zbliżenie warunków brzegowych w obliczeniach numerycznych do teoretycznych ze stanu uporządkowanego. Otrzymane przebiegi przedstawia rysunek 4.

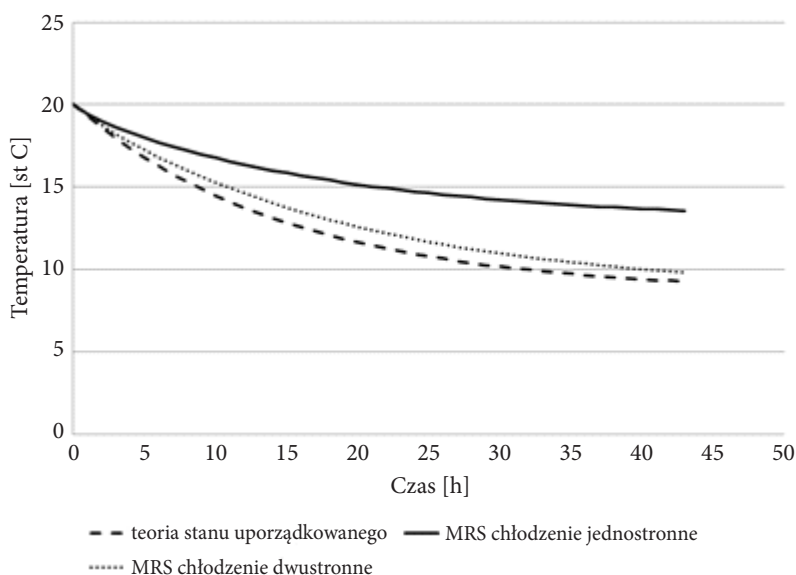
TABELA 2

Stałe czasowe na różnych głębokościach z obliczeń MRS

Y	0,475	0,425	0,375	0,325	0,275	0,225
t [h]	32	34	37	41	44	46

Y	0,175	0,125	0,075	0,025
t [h]	48	50	51	51



Rys. 4. Średnie temperatury płyty z obliczeń numerycznych i teoretycznych stanu uporządkowanego

Wyniki dla chłodzenia jednostronnego odbiegają od teorii stanu uporządkowanego, co wyjaśnia otrzymanie różnych wartości stałych czasowych. Jednocześnie wartości dla chłodzenia dwustronnego otrzymane numerycznie są zbliżone do rozwiązania analitycznego, co potwierdza, że to ostatnie rozwiązanie jest prawidłowe.

## 6. Wnioski

Czas dojścia do stanu ustalonego końcowego obliczony za pomocą numerycznego rozwiązania równania jest dłuższy niż za pomocą teorii stanu uporządkowanego.

Powodem tej różnicy może być fakt jednostronnego chłodzenia płyty. Mimo uwzględnienia tego faktu przez zmniejszenie zastępczego współczynnika przejmowania ciepła pozostaje kwestia innej konfiguracji warunków chłodzenia. Pewien błąd metody stanu uporządkowanego pochodzi też z faktu, że nie zachodzi on od początku procesu chłodzenia, ale dopiero po około czterech godzinach, co powoduje, że równanie (4.6) może być wykorzystane do opisu procesu dopiero po tym czasie. Charakterystyczne jest to, że od strony zewnętrznej spadek temperatury jest największy, a jednak stan ustalony osiągany jest szybciej niż od strony wewnętrznej. Szybkość chłodzenia jest więc większa od strony zewnętrznej. Z analizy wynika, że stan nieustalony wymiany ciepła zachodzi w badanej przegrodzie w ciągu co najmniej kilkunastu godzin od chwili zmiany warunków zewnętrznych. Obliczenia zapotrzebowania na ciepło i strumieni ciepła w ścianach w takim stanie są więc ważne dla uzyskania pełnego obrazu przepływu ciepła w przegrodzie. Jest to szczególnie ważne dla przegród masywnych, a takie zwykle występują w budynkach schronowych. W przypadku schronów dla ludności, które zwykle nie są utrzymywane w gotowości termicznej, zapotrzebowanie na ogrzewanie w ciągu kilku pierwszych dni po rozpoczęciu użytkowania może być kilkukrotnie wyższe niż po ustaleniu się temperatury. Skala czasu kilku dni jest zbliżona do czasu użytkowania schronu ustalonego przez Obronę Cywilną. W związku z operacyjnymi ustaleniami OC praktycznie cały czas użytkowania schronu planowany jest w okresie niestacjonarnego stanu termicznego przegród schronu. Należy to uwzględnić przy projektowaniu systemów ogrzewania i wentylacji schronów. Przy określeniu koniecznej nadwyżki mocy dla schronu można skorzystać z wyników prac takich jak [4, 5, 6] lub przeprowadzić obliczenia indywidualnie.

Praca powstała w wyniku realizacji zadań badawczych w ramach pracy badawczej statutowej nr 934, prowadzonej w Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 18.10.2016 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 27.04.2017 r.

#### LITERATURA

- [1] WIŚNIEWSKI J., WIŚNIEWSKI T.M., *Wymiana ciepła*, WNT, 2000.
- [2] POGORZELSKI J.A., *Fizyka ciepła budowli*, PWN, 1976.
- [3] *Budownictwo ogólne*, t. 2. *Fizyka budowli*, Arkady, 2007.
- [4] OW CZAREK S., OW CZAREK M., *Wpływ pojemności cieplnej przegród na zapotrzebowanie ciepła w budynku*, *Inżynieria i Budownictwo*, 5, 2012, s. 249-253.
- [5] SIEROCIUK R., *Analiza możliwości zmniejszenia zużycia energii przez schron z koncepcją modernizacji*, praca dyplomowa, WIG WAT, 2016.
- [6] WASILCZUK J., *Analiza strat ciepła podziemnych obiektów fortyfikacyjnych*, rozprawa doktorska, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 1973.
- [7] STRZELCZYK A., *Zasady projektowania konstrukcji obiektów obronnych. Poradnik projektowania schronów*, [red.]: Z. Szcześniak, Biuro Studiów i Projektów Budowlanych w Warszawie, Warszawa, 1990.

- [8] *Budowa i eksploatacja obiektów schronowych oraz ukryć dla ludności*, [red.]: Z. Szcześniak, Wyd. WAT, Warszawa, 2016.
- [9] FURMAŃSKI P., DOMAŃSKI R., *Wymiana ciepła. Przykłady obliczeń i zadania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.

S. OWCZAREK, M. OWCZAREK

**Determination of the thermal time constant of the reinforced concrete building component**

**Abstract.** As a result of changes in the boundary conditions, a heat exchange in the building envelope is not always in a steady state. Heat fluxes penetrating through the wall may be several times greater than the steady state. Thus, the building can have a much higher demand for energy and requires the use of more powerful heater than it results from the standard calculation. This article dealt with estimating the length of the transient state after changing the boundary conditions. The protective ceiling plate of dimensions  $35\text{ m} \times 1\text{ m}$  and a thickness of  $0.5\text{ m}$  has been analysed. The plate, on the one hand, is cooled in air at a temperature of  $8.6^\circ\text{C}$ , on the other hand is inside the shelter at  $20^\circ\text{C}$ . A period of cooling, based on the theoretical and numerical calculations, was obtained, then the differences were discussed and the conclusions drawn.

**Keywords:** building, building physics, heat flows in building envelopes

**DOI:** 10.5604/01.3001.0010.1891