

Dr hab. inż. Stefan OWCZAREK
Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa
Dr inż. Mariusz OWCZAREK
Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa

OKREŚLENIE TERMICZNEJ STAŁEJ CZASOWEJ ŻELBETOWEJ PRZEGRODY BUDOWLANEJ W ZALEŻNOŚCI OD WARUNKÓW ZEWNĘTRZNYCH I JEJ STRUKTURY

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 stopu schronu o wymiarach 35x1 m i grubości 0,5 m. Płyta z jednej strony jest chłodzona w powietrzu o temperaturze 8,6 °C z drugiej strony znajduje się wewnątrz schronu o temperaturze 20 °C. Wyznaczono czas ostygnięcia z zależności teoretycznej oraz obliczeń numerycznych, przedyskutowano różnice i wyciągnięto wnioski.

DETERMINATION OF THE THERMAL TIME CONSTANT OF REINFORCED CONCRETE BARRIER CONSTRUCTION ACCORDING TO THE TERMS OF EXTERNAL CONDITIONS AND ITS STRUCTURE

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 boundary conditions. The analysis portion of the protective ceiling plate measuring 35x1 m and a thickness of 0,5 m. The plate on the one hand, is cooled in air at a temperature of 8.6 °C, on the other hand is inside the shelter at 20 °C. Period of cooling based on the theoretical and numerical calculations, was obtained then the differences were discussed and conclusions drawn.

1. Charakterystyka chłodzenia i nagrzewania przegród budowlanych

Chłodzenie i nagrzewanie przegród łączy się z zagadnieniem chłodzenia i ogrzewania ciał przy dużych różnicach pomiędzy początkowym a końcowym stanem pola temperatury. W budownictwie interesujące są warunki wychładzania z temperaturami zmieniającymi się w granicach 20 °C. Wychładzanie w elementach budowlanych przeważnie ma charakter jednostronnego oddziaływania niskiej temperatury. Z punktu widzenia teoretycznego jest to zagadnienie dużo bardziej skomplikowane niż chłodzenie w dużym zakresie temperatury elementów o dużym współczynniku przewodzenia ciepła. W opisie jest to zagadnienie przejścia z jednego poziomu temperatury w stanie ustalonym do drugiego stanu ustalonego relatywnie mało różniącego się od stanu początkowego. Zadanie wymaga rozwiązania niestacjonarnego równania wymiany ciepła z odpowiednimi warunkami brzegowymi.

Ponieważ zmiana temperatury w każdym punkcie ciała odbywa się według funkcji czasu różnych dla każdego punktu zadanie sprowadza się do ustalenia prędkości chłodzenia w każdym punkcie i czasu przejścia z jednego stanu ustalonego do drugiego. Przed osiągnięciem docelowego stanu ustalonego ciało wchodzi w stan uporządkowany. W tym stanie prędkość wychładzania jest stała w czasie. Zmiana temperatury może być opisana równaniem wykładniczym. Otrzymane wartości tempa chłodzenia i stałej czasowej porównano z wynikami ochładzania ciała o takich samych wymiarach otrzymanych z numerycznego rozwiązania równania Fouriera.

2. Wyznaczanie tempa chłodzenia

Przewodzenie ciepła w jednowymiarowym ciele w stanie nieustalonym opisuje równania Fouriera-Kirchoffa [1]

(2.1)

Gdzie

Jeśli ciało jest chłodzone lub ogrzewane w ośrodku o temperaturze T_c ze współczynnikiem wnikania ciepła h to po pewnym czasie wymiana ciepła w ciele wchodzi w tzw. stan uporządkowany. W tym stanie prędkość zmian temperatury w dowolnym punkcie ciała jest stała i wyrażona zależnością wykładniczą która jest pierwszym wyrazem rozwiązania równania (2.1)

(2.2)

Gdzie m zwane jest tempem chłodzenia

(2.3)

Mając dane w postaci dyskretnej można obliczyć tempo chłodzenia jako

(2.4)

T_1, T_2 – temperatura w wybranym punkcie ciała w chwilach odpowiednio 1 i 2

t_1, t_2 – chwile czasowe 1 i 2 [s]

Dla opisywanych warunków chłodzenia jego tempo można też przedstawić w postaci

(2.5)

Gdzie K_n – liczba Kondratiewa, można ją obliczyć za pomocą wzoru [2]

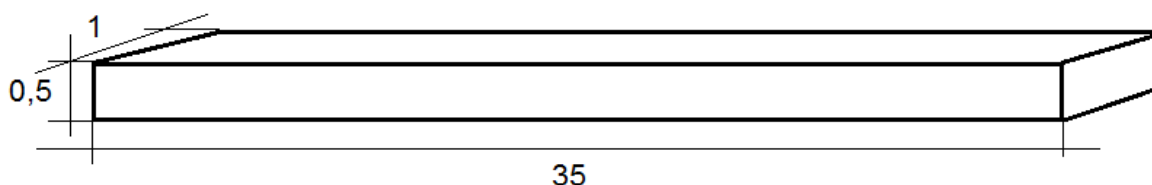
(2.6)

– liczba Biota

- uogólniony wymiar charakterystyczny ciała

3. Opis badanej geometrii i wyznaczenie stałej czasowej

Celem jest wyznaczenie czasu osiągnięcia stanu ustalonego wymiany ciepła w masywnej przegrodzie schronu przy założeniu że proces jej wychładzania jest opisany równaniem (2.2). Brano pod uwagę odcinek płyty betonowej stanowiącej strop schronu o wymiarach jak na rysunku 1.



Rys 1. Rozważany fragment płyty stropowej schronu

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

ciepła na zewnętrznej powierzchni płyty wynosi $h = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.
Dyfuzyjność cieplna wyniesie:

(3.1)

Wymiar charakterystyczny fragmentu płyty wynosi

(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 teoretycznych

Rozwiązanie (2.2) opisuje przebieg temperatury przy chłodzeniu na całej zewnętrznej powierzchni. Ponieważ w konfiguracji analizowanej w pracy chłodzenie zachodzi tylko na powierzchni zewnętrznej założono dwa razy mniejszy współczynnik przyjmowania ciepła $h = 12,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Obliczamy liczbę Biota

(4.1)

Liczba Kondratiewa

(4.2)

Tempo chłodzenia

(4.3)

Mając tempo chłodzenia można wyznaczyć czas osiągnięcia stanu ustalonego z równania (2.2) z warunku że w chwili początkowej stanu uporządkowanego całe ciało ma temp t_{pocz} , temperaturę końcową t_{kon} można zaś ustalić z rozwiązania dla stanu ustalonego.

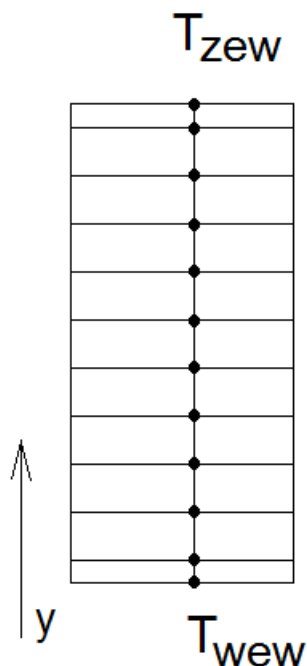
W literaturze można spotkać warunek że stan uporządkowany zachodzi jeśli liczba Fouriera $Fo > 0,55$. Dla tego przypadku zachodzi to po około 4 godzinach od rozpoczęcia chłodzenia

(4.4)

Zakładam że stan uporządkowany zachodzi od początku trwania procesu, ponieważ spodziewana stała czasowa jest co najmniej trzykrotnie dłuższa od tego czasu. Zatem w równaniu (2.2) T_{pocz} podstawiam dla czasu $t=0$ i jest to temperatura $T_{\text{wew}} = 20^\circ\text{C}$, ponieważ czas wynosi 0 to temperatura $T(0)$ równa jest też T_{wew} .

(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]. Obliczam temperatury powierzchni ściany oraz punktów na wybranych głębokościach jak pokazano na rysunku 2. Punkty te odpowiadają podziałowi na węzły w obliczeniach metodą różnic skończonych.



Rys 2. Rozmieszczenie węzłów w płycie
Otrzymane wyniki zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Rozkład temperatury w stropie dla stanu ustalonego

Y	zew	0,475	0,425	0,375	0,325	0,275	0,225
$T_{ust}[^{\circ}C]$	8,6	10,14	10,76	11,37	11,99	12,6	13,22

Y	0,175	0,125	0,075	0,025	wew
$T_{ust}[^{\circ}C]$	13,84	14,45	15,07	15,69	20

Ponieważ obliczone tempo chłodzenia jest średnim dla całej geometrii obliczam też średnią temperaturę stanu ustalonego $T_{ust_{sr}}=12,9^{\circ}C$.

Równanie opisujące zmienność temperatury w czasie dla płyty będzie ostatecznie w postaci:

$$(4.6)$$

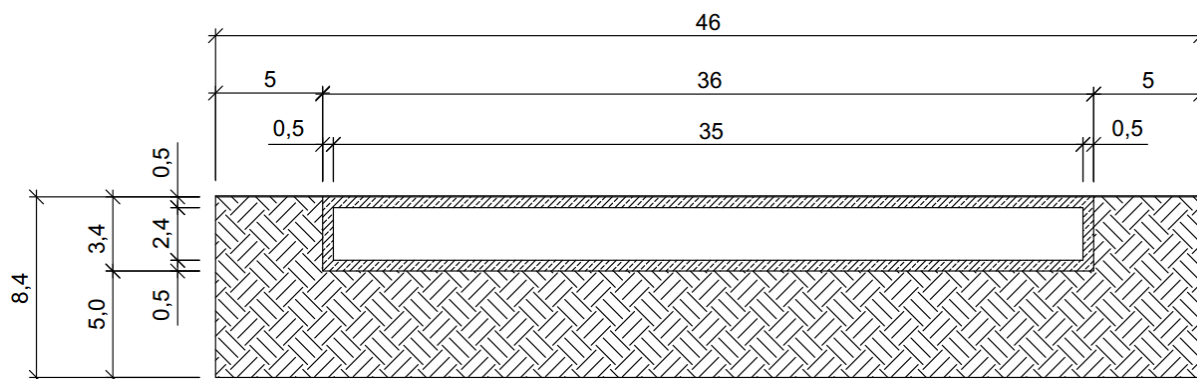
Podstawiając za $T(t)$ temperaturę $T_{ust_{sr}}$ wyznaczymy średni czas dojścia do stanu ustalonego.

$$(4.7)$$

Otrzymano czas $t=14,69$ h.

5. Obliczenia za pomocą metody różnic skończonych

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



Rys 3. Schemat analizowanego schronu [4]

Całą geometrie podzielono używając siatki o węzłach w odstępnie 0,05m. W stanie początkowym powietrze w schronie i jego konstrukcja miało temperaturę 20°C a grunt oraz powietrze zewnętrzne 8,6 °C. W pracy [4] obliczono temperaturę w węzłach siatki w ciągu 360 dni. W niniejszym artykule zajmuje się tylko wymianą ciepła w stropie, ma on wymiary jak na rysunku 1. Punktem odniesienia jest stan ustalony obliczony w tabeli 1. Obliczono procent dojścia do stanu ustalonego według wzoru

$$(5.1)$$

Założono że stan ustalony jest osiągnięty jeśli temperatura osiągnie 90% wartości charakterystycznej dla tego stanu. Otrzymane wyniki przedstawia tabela 3

Tabela 2. Stałe czasowe na różnych głębokościach z obliczeń MRS

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

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

6. Wnioski

Czas dojścia do stanu ustalonego obliczony za pomocą numerycznego rozwiązania równania jest dłuższy niż za pomocą teorii stanu ustalonego. 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 teoretycznej pochodzi też z faktu że stan uporządkowany nie zachodzi od początku procesu chłodzenia ale dopiero po około 4 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 i niesymetryczna jak to było by w przypadku płyty zanurzonej całkowicie w ośrodku. 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 ukryć dla ludności, które zwykle nie są utrzymywane w gotowości termicznej kiedy są nie używane, zapotrzebowanie na ogrzewanie w ciągu kilku pierwszych dni po rozpoczęciu użytkowania może być kilkakrotnie wyższe niż po ustaleniu się temperatury. 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] lub przeprowadzić obliczenia indywidualnie.

Literatura

1. Wiśniewski J., Wiśniewski T.,M., Wymiana ciepła WNT 2000.
2. Pogorzelski J.,A., Fizyka cieplna budowli, PWN 1976.
3. Praca zbiorowa, Budownictwo ogólne Tom 2, Fizyka budowli , Arkady 2007
4. Sierociuk R., Analiza możliwości zmniejszenia zużycia energii przez schron z koncepcją modernizacji, Praca dyplomowa, WIG WAT 2016
5. Wasilczuk J., *Analiza strat ciepła podziemnych obiektów fortyfikacyjnych, rozprawa doktorska*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1973.