

AGNIESZKA LECHOWSKA, ARTUR GUZIK\*

ANALIZA ROZKŁADÓW TEMPERATUR  
W PRZEGRODACH ZEWNĘTRZNYCH  
POMIESZCZEŃ OGRZEWANYCH Z PRZERWAMI

---

TRANSIENT TEMPERATURE FIELDS IN WALLS  
OF ROOMS WITH INTERMITTENT HEATING

Streszczenie

W pomieszczeniach ogrzewanych z przerwami zachodzi niestabilna wymiana ciepła przegród budowlanych z powietrzem w pomieszczeniu. W artykule wyznaczano pola temperatury w węzłach przegród oraz temperaturę powietrza w pomieszczeniu za pomocą metody bilansów elementarnych.

*Słowa kluczowe: ogrzewanie niestacjonarne, pola temperatury*

Abstract

This paper deals with the transient heat transfer in the room with the intermittent heating system. The results of numerical analysis were transient temperature fields and internal air temperatures for several wall types.

*Keywords: intermittent heating, transient temperature fields*

---

\* Dr inż. Agnieszka Lechowska, dr inż. Artur Guzik, Instytut Inżynierii Ciepłej i Ochrony Powietrza, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

### Oznaczenia

$a$	– współczynnik przenikania powietrza przez szczeliny [ $\text{m}^3/(\text{mhPa}^{2/3})$ ]
$A$	– powierzchnia [ $\text{m}^2$ ]
$c$	– ciepło właściwe [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ]
$C$	– macierz współczynników
$d$	– stały współczynnik dla danego typu grzejnika
$e$	– stały współczynnik dla danego typu grzejnika
$f$	– stały współczynnik dla danego typu grzejnika
$H$	– charakterystyka budynku [ $\text{WhPa}^{2/3}/(\text{m}^3\text{K})$ ]
$I$	– entalpia [ $\text{J}$ ]
$K$	– przewodność cieplna [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
$l$	– długość szczelin [ $\text{m}$ ]
$m$	– stały współczynnik dla danego typu grzejnika
$\dot{m}$	– masowy strumień przepływu [ $\text{kg}/\text{s}$ ]
$q$	– wektor wyrazów wolnych
$\dot{Q}$	– strumień ciepła [ $\text{W}$ ]
$r$	– liczba równań
$R$	– opór cieplny [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ]
$s$	– liczba znamionowa pomieszczenia
$T$	– temperatura [ $\text{K}$ ]
$U$	– współczynnik przenikania ciepła [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
$V$	– objętość [ $\text{m}^3$ ]
$\alpha$	– współczynnik wnikania ciepła [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ]
$\varepsilon$	– współczynnik korekcyjny wysokości
$\lambda$	– współczynnik przewodzenia ciepła [ $\text{W}/(\text{mK})$ ]
$\rho$	– gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\tau$	– czas [ $\text{s}$ ]

### 1. Wstęp

W klimacie umiarkowanym budynki mieszkalne ogrzewane są przez ponad 200 dni w roku. Zmniejszenie zużycia energii i poprawa efektywności energetycznej w systemach ogrzewania należą więc do najbardziej rozwijających się dziedzin w zakresie inżynierii sanitarnej. Jedną z metod oszczędzania energii w ogrzewanych pomieszczeniach jest zastosowanie systemu ogrzewania niestacjonarnego. W procesie takim w użytkowanym obiekcie dopuszcza się możliwość realizacji osłabień ogrzewania w pewnych okresach cyklu dobowego. Przez odpowiednio dobrane intensywności ogrzewania w czasie wyłączenia lub zmniejszenia mocy grzewczej uzyskuje się oszczędności energii, nie pogarszając jednocześnie warunków komfortu cieplnego ogrzewanych pomieszczeń w wybranych okresach użytkowania.

Przez ogrzewanie niestacjonarne należy więc rozumieć taki rodzaj ogrzewania, w którym przez pewien czas możliwe jest obniżenie temperatury wewnętrznej poniżej jej wartości projektowej (np. poniżej 20°C). Oszczędności z tego wynikające mogą być osiągane przez wyłączenie instalacji grzewczej (*tryb wyłączenia*), obniżenie mocy cieplnej instalacji w zależności od temperatury zewnętrznej (*tryb osłabienia*) i regulowanie mocy cieplnej w celu utrzymania obniżonej, przyjętej wartości temperatury wewnętrznej (*tryb obniżenia temperatury*). Wyróżnia się także *tryb normalny*, gdy instalacja ma za zadanie utrzymanie temperatury wewnętrznej na poziomie, na jakim powinna być w przypadku normalnej pracy instalacji oraz *tryb wzmożonego działania*, następujący po trybach obniżenia, odpowiadający pracy instalacji z pełną mocą.

W artykule wyznaczano pola temperatur w przegrodach budowlanych oraz temperatury powietrza w pomieszczeniach przy ogrzewaniu z przerwami (w trybie wyłączenia) za pomocą metody bilansów elementarnych [1].

## 2. Model matematyczny wymiany ciepła w pomieszczeniu

Założono nieustalone, jednowymiarowe przewodzenie ciepła przez przegrody budowlane, stałe wartości gęstości, ciepła właściwego i współczynnika przewodzenia ciepła materiałów budowlanych. Rozwiązanie równań modelu wymiany ciepła otrzymano za pomocą metody bilansów elementarnych [1].

W metodzie bilansów elementarnych badany obszar dyskretyzuje się (dzieli) na elementy geometryczne i sporządza się dla nich bilanse energii na podstawie następujących założeń:

- brak obecności wewnętrznych źródeł ciepła,
- każdy element reprezentowany jest przez węzeł leżący w środku ciężkości elementu,
- cały element ma temperaturę równą temperaturze węzła,
- pomiędzy sąsiednimi węzłami występuje liniowy rozkład temperatury,
- w węzłach leżących wewnątrz ciała skupiona jest cała pojemność cieplna elementów,
- węzły leżące na powierzchni ciała traktowane są jako bezpojemnościowe.

Przy założeniu izobarycznego przepływu ciepła ciepło dopływające do rozpatrywanego węzła z węzłów sąsiadujących lub z powierzchni ciała powoduje przyrost entalpii elementu. Równanie bilansu energii w węźle  $i$  można zapisać w postaci

$$\frac{\partial I_i}{\partial \tau} = \sum_j \dot{Q}_{ij} + \dot{Q}_{w_i} \quad (1)$$

gdzie:

- $\dot{Q}_{ij}$  – strumień ciepła dopływający z węzła  $j$  sąsiadującego z węzłem  $i$ ,
- $\dot{Q}_{w_i}$  – strumień ciepła dopływający do węzła  $i$  z powierzchni ciała,
- $I_i$  – entalpia rozpatrywanego elementu,
- $\tau$  – czas.

W przypadku gdy nie zachodzi przemiana fazowa, równanie (1) można zapisać następująco

$$V_i \rho_i c_{p_i} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \sum_j \dot{Q}_{ij} + \dot{Q}_{w_i} \quad (2)$$

przy czym

$$\dot{Q}_{ij} = A_i K_{ij} (T_j - T_i) = \frac{A_i}{R_{ij}} (T_j - T_i) \quad (3)$$

gdzie  $A_i$  jest powierzchnią prostopadłą do kierunku przewodzenia ciepła, zaś  $K_{ij}$  jest przewodnością cieplną pomiędzy węzłami  $i, j$  będącą odwrotnością oporu cieplnego  $R_{ij}$ , zdefiniowanego jako

$$R_{ij} = \frac{\Delta x_{ij}}{\lambda_{ij}} \quad (4)$$

W powyższej zależności  $\Delta x_{ij}$  jest odległością pomiędzy węzłami  $i$  oraz  $j$ , natomiast  $\lambda_{ij}$  średnim współczynnikiem przewodzenia ciepła na odcinku  $i, j$ .

Strumień ciepła  $\dot{Q}_{w_i}$  dopływający do węzła  $i$  z powierzchni  $S_i$  ciała zależy od rodzaju warunku brzegowego. W rozpatrywanym przypadku jest to warunek brzegowy III rodzaju (warunek Newtona), w którym uwzględnia się opór przejmowania ciepła na powierzchni elementu różnicowego, czyli

$$\dot{Q}_{w_i} = A_i K_{f_i} (T_{f_i} - T_i) = \frac{A_i}{R_{iS} + R_{S\alpha_i}} (T_{f_i} - T_i) = \frac{A_i}{\frac{\Delta x_{iS}}{\lambda_{iS}} + \frac{1}{\alpha_i}} (T_{f_i} - T_i) \quad (5)$$

gdzie:

- $T_{f_i}$  – temperatura płynu omywającego powierzchnię elementu  $i$ ,
- $K_{f_i}$  – przewodność cieplna pomiędzy płynem a rozpatrywanym węzłem,
- $R_{S\alpha_i}$  – opór wnikania ciepła pomiędzy płynem a powierzchnią  $S_i$ ,
- $\alpha_i$  – współczynnik wnikania ciepła pomiędzy płynem a powierzchnią  $S_i$ ,
- $R_{iS}$  – opór przewodzenia ciepła pomiędzy elementem  $i$  a powierzchnią  $S_i$ ,
- $\lambda_{iS}$  – średni współczynnik przewodzenia ciepła na odcinku  $i, S_i$ ,
- $\Delta x_{iS}$  – odległość pomiędzy węzłem  $i$  oraz powierzchnią  $S_i$ .

Występującą po lewej stronie równania (2) pochodną temperatury po czasie zastąpiono schematem różnicowym wstecznym (niejawnym). Równanie bilansu energii (2) sprowadza się wówczas do równania algebraicznego w postaci

$$V_i \rho_i c_{p_i} \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta \tau} = \sum_j \dot{Q}_{ij}^{n+1} + \dot{Q}_{w_i}^{n+1} \quad (6)$$

w którym  $n$  jest numerem kroku czasowego o wielkości  $\Delta\tau$ . Należy przy tym dodać, że temperatury  $T_i^{n+1}$  we wszystkich węzłach w kroku czasowym  $n+1$  są niewiadome, jest więc konieczne rozwiązywanie układu równań dla węzłów na każdym kolejnym kroku czasowym. Po uporządkowaniu układu równań (6) w zapisie macierzowym przyjmuje postać

$$\mathbf{C}^{n+1} \mathbf{T}^{n+1} = \mathbf{C}^n \mathbf{T}^n + \mathbf{q} \quad (7)$$

gdzie:

- $\mathbf{T}$  – wektor temperatur o  $r$  elementach,
- $\mathbf{C}$  – macierz współczynników o wymiarach  $r \times r$ ,
- $\mathbf{q}$  – wektor wyrazów wolnych o  $r$  elementach,
- $r$  – liczba równań.

W modelu przyjęto, że temperatury powietrza po zewnętrznej stronie przegród są znane. Niewiadomymi zaś są temperatury w węzłach wewnętrznych oraz temperatura powietrza w pomieszczeniu. Niewiadomych jest więc o jedną więcej niż równań. Niezbędne jest zatem wprowadzenie do układu równań dodatkowego, uzupełniającego równania. Jest nim bilans energii powietrza w pomieszczeniu [2]

$$V_p \rho_p c_p \frac{\partial T_{f_i}}{\partial \tau} = \dot{Q}_g - \dot{Q}_z - \dot{Q}_w - \dot{Q}_s - \dot{Q}_o \quad (8)$$

w którym:

- $V_p$  – objętość powietrza w pomieszczeniu,
- $\rho_p, c_p$  – odpowiednio: gęstość oraz ciepło właściwe powietrza w pomieszczeniu,
- $\dot{Q}_g$  – strumień ciepła oddawany przez grzejnik,
- $\dot{Q}_z$  – strumień ciepła wnikającego od powietrza do przegród zewnętrznych pomieszczenia,
- $\dot{Q}_w$  – strumień ciepła wnikającego od powietrza do ścian wewnętrznych pomieszczenia,
- $\dot{Q}_s$  – strumień ciepła wnikającego od powietrza do stropów w pomieszczeniu,
- $\dot{Q}_o$  – strumień ciepła przenikającego przez okna oraz ciepła niezbędnego do podgrzania powietrza infiltrującego do pomieszczenia.

Strumień ciepła wnikającego od powietrza w pomieszczeniu do powierzchni ścian zewnętrznych  $A_z$  jest wyrażony wzorem, w którym uwzględnia się wyznaczoną temperaturę powietrza  $T_{f_i}$  w pomieszczeniu oraz temperaturę  $T_k$  ostatniego węzła w ścianie zewnętrznej od pomieszczenia

$$\dot{Q}_z = A_z \frac{T_{f_i} - T_k}{\frac{\Delta x_{kS}}{\lambda_{kS}} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (9)$$

Strumień ciepła wnikającego od powietrza w pomieszczeniu do powierzchni ścian wewnętrznych  $A_w$  jest wyrażony wzorem, w którym znowu uwzględnia się wyznaczaną temperaturę powietrza  $T_{f_i}$  w pomieszczeniu oraz temperaturę  $T_m$  ostatniego węzła w ścianie wewnętrznej od pomieszczenia

$$\dot{Q}_w = A_w \frac{T_{f_i} - T_m}{\frac{\Delta x_{mS}}{\lambda_{mS}} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (10)$$

Strumień ciepła wnikającego od powietrza w pomieszczeniu do powierzchni stropów  $A_s$  jest wyrażony wzorem, w którym uwzględnia się wyznaczaną temperaturę powietrza  $T_{f_i}$  w pomieszczeniu oraz temperaturę  $T_n$  ostatniego węzła w stropie od pomieszczenia

$$\dot{Q}_s = A_s \frac{T_{f_i} - T_n}{\frac{\Delta x_{nS}}{\lambda_{nS}} + \frac{1}{\alpha_i}} \quad (11)$$

Występujący we wzorze (8) strumień ciepła  $\dot{Q}_o$  jest sumą strumienia ciepła przenikającego przez okna oraz ciepła niezbędnego do podgrzania powietrza infiltrującego do pomieszczenia. Zgodnie z normą [5] jest on określony wzorem

$$\dot{Q}_o = [U_o A_o + \varepsilon H s \Sigma(al)] (T_{f_i} - T_e) \quad (12)$$

przy czym:

- $U_o$  – współczynnik przenikania ciepła przez okna w pomieszczeniu,
- $A_o$  – powierzchnia okna,
- $a$  – współczynnik przenikania powietrza przez szczeliny zależny od stopnia szczelności okien,
- $l$  – długość szczelin w oknach,
- $\varepsilon$  – współczynnik korekcyjny wysokości, uzależniony od położenia pomieszczenia ponad poziomem terenu,
- $H$  – charakterystyka budynku – wielkość zależna od prędkości wiatru oraz osłonięcia budynku,
- $s$  – liczba znamionowa pomieszczenia zależna od wartości  $\Sigma(al)$ ,
- $T_e$  – temperatura powietrza zewnętrznego infiltrującego do pomieszczenia, przyjmowana jako wielkość znana.

Wreszcie strumień ciepła oddawany przez grzejnik  $\dot{Q}_g$  liczy się na zasadzie przenikania ciepła przez ścianę grzejnika z zależności

$$\dot{Q}_g = U_g A_g \left( \frac{T_{w1} + T_{w2}}{2} - T_{fi} \right) \quad (13)$$

gdzie:

- $U_g$  – współczynnik przenikania ciepła przez ścianę grzejnika,
- $A_g$  – powierzchnia grzewcza grzejnika,
- $T_{w1}, T_{w2}$  – odpowiednio: temperatura wody zasilającej grzejnik oraz powrotnej,
- $T_{fi}$  – temperatura powietrza w pomieszczeniu.

Ten sam strumień ciepła grzejnika  $\dot{Q}_g$  jest określony jako strumień entalpii wody przepływającej przez grzejnik

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_w c_w (T_{w1} - T_{w2}) \quad (14)$$

w której  $\dot{m}_w$  jest masowym strumieniem przepływu wody przez grzejnik, zaś  $c_w$  ciepłem właściwym wody, przyjmowanym jako wielkość stała dla średniej temperatury wody w grzejniku. Po wyznaczeniu  $T_{w2}$  z ostatniego wzoru i podstawieniu do (13) otrzymuje się równanie opisujące strumień oddawanego przez grzejnik ciepła w funkcji temperatury zasilania grzejnika oraz temperatury w pomieszczeniu

$$\dot{Q}_g = \frac{U_g A_g}{1 + \frac{U_g A_g}{2\dot{m}_w c_w}} (T_{w1} - T_{fi}) \quad (15)$$

Temperatura zasilania grzejnika  $T_{w1}$  jest zmienna, gdyż przy regulacji pogodowej zależy od temperatury powietrza zewnętrznego  $T_e$ . Aby wyznaczyć temperaturę  $T_{w1}$ , przyjęto, że grzejnik w pomieszczeniu dostarcza taką ilość ciepła, która pokrywa straty przenikania ciepła oraz wentylacyjne wynikające z charakterystyk budynku w warunkach ustalonych, czyli

$$\frac{U_g A_g}{1 + \frac{U_g A_g}{2\dot{m}_w c_w}} (T_{w1} - T_{fi}) = U_z A_z + U_o A_o + \epsilon H r \Sigma(al) (T_{fi} - T_e) \quad (16)$$

gdzie:

- $U_z$  – współczynnik przenikania ciepła przegród zewnętrznych wyznaczony dla warunków ustalonych,
- $A_z$  – powierzchnia przegród zewnętrznych.

Podobny bilans można sporządzić dla warunków granicznych sezonu grzewczego

$$\frac{U_g A_g}{1 + \frac{U_g A_g}{2 \dot{m}_w c_w}} (T_{w1 \min} - T_{fi}) = U_z A_z + U_o A_o + \varepsilon H r \Sigma(al) (T_{fi} - T_{e \max}) \quad (17)$$

gdzie:

- $T_{w1 \min}$  – najniższa temperatura wody zasilającej grzejnik (np. 40°C),
- $T_{e \max}$  – najwyższa temperatura zewnętrzna, graniczna dla sezonu grzewczego (np. 12°C).

Po wyznaczeniu z (16) i (17) temperatur wody i odjęciu stronami otrzymano równanie pozwalające wyznaczyć temperaturę wody zasilającej grzejnik

$$T_{w1} = T_{w1 \min} + \frac{U_z A_z + U_o A_o + \varepsilon H r \Sigma(al)}{\frac{U_g A_g}{1 + \frac{U_g A_g}{2 \dot{m}_w c_w}}} (T_{e \max} - T_e) \quad (18)$$

Współczynnik przenikania ciepła grzejnika  $U_g$  we wzorach (15) i (18) nie jest wielkością stałą, gdyż zależy zarówno od zmiennych temperatur wody zasilającej i powrotnej z grzejnika, odpowiednio:  $T_{w1}$  i  $T_{w2}$ , jak i od zmiennej temperatury powietrza w pomieszczeniu  $T_{fi}$

$$U_g = d \left( \frac{T_{w1} + T_{w2}}{2} - T_{fi} \right)^e \dot{m}_w^f \quad (19)$$

przy czym  $d$ ,  $e$  oraz  $f$  są stałymi dla danego typu grzejnika. Temperaturę wody powrotnej  $T_{w2}$  ruguje się za pomocą zależności

$$T_{w2} = T_{w1} - \Delta T_g = T_{w1} - \Delta T_g^o \frac{T_{fi} - T_e}{T_{fi} - T_e^o} \quad (20)$$

gdzie:

- $\Delta T_g^o$  – największy spadek temperatury w grzejniku, przyjęty dla stacjonarnych warunków obliczeniowych (projektowych), czyli dla niskiej temperatury zewnętrznej (np. -20°C) oraz dla projektowej temperatury wewnętrznej (np. 20°C),
- $\Delta T_g$  – spadek temperatury wody w grzejniku w danej chwili,
- $T_e^o$  – obliczeniowa (projektowa) temperatura powietrza zewnętrznego,
- $T_e$  – temperatura powietrza zewnętrznego w danej chwili.



Po wstawieniu (20) do (19) otrzymuje się zależność, z której wyznaczano wartości współczynnika przenikania ciepła grzejnika

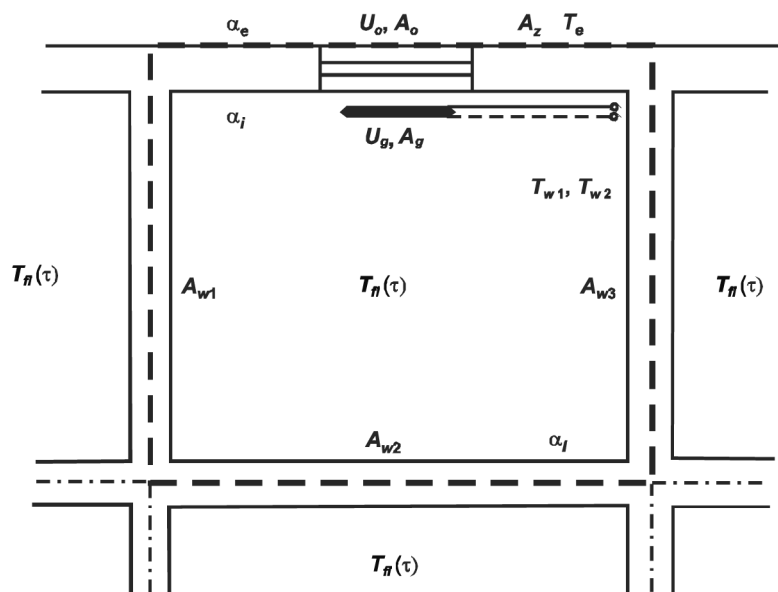
$$U_g = d T_{f_i}^e \left[ \frac{T_{w1}}{T_{f_i}} - 1 - \frac{\Delta T_{g^o} (T_{f_i} - T_e)}{2 T_{f_i} (T_{f_i} - T_e^o)} \right]^e \dot{m}_w^f \quad (21)$$

W modelu współczynnik przenikania ciepła grzejnika wyznaczany był iteracyjnie na każdym kroku czasowym na podstawie przyjmowanych z poprzedniego kroku czasowego temperatur: powietrza w pomieszczeniu oraz zasilania grzejnika.

W modelu wyznaczano wartości temperatur w węzłach przegród oraz powietrza w pomieszczeniu na poszczególnych krokach czasowych po wyłączeniu instalacji grzewczej. Przyjęto jako wyjściowy stan normalnego trybu ogrzewania i utrzymywania w pomieszczeniu temperatury 20°C.

### 3. Przykład obliczeniowy

Rozpatrywano pomieszczenia z jedną ścianą zewnętrzną oraz z pięcioma przegrodami wewnętrznymi. Schemat przykładowego pomieszczenia podano na rys. 1 [2].



Rys. 1. Schemat pomieszczenia [2]

Fig. 1. Room scheme [2]

Założenia do obliczeń zestawiono w tab. 1.

Tabela 1

**Założenia do obliczeń**

Ściana wewnętrzna	Tynk cementowy	0,005 m
	Cegła pełna	0,120 m
	Tynk cementowy	0,005 m
Strop	Żelbet	0,140 m
Pomieszczenie 1	$a \times b \times h = 3 \text{ m} \times 3 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$	Pow. okna: 2,25 m <sup>2</sup>
Pomieszczenie 2	$a \times b \times h = 3 \text{ m} \times 7,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$	Pow. okna: 6,10 m <sup>2</sup>
$U$ okna: 2 W/(m <sup>2</sup> K)		

W analizowanych dwóch pomieszczeniach założono cztery różne rodzaje ścian zewnętrznych (jak w tab. 2). Warstwy podano w kolejności od strony wewnętrznej.

Tabela 2

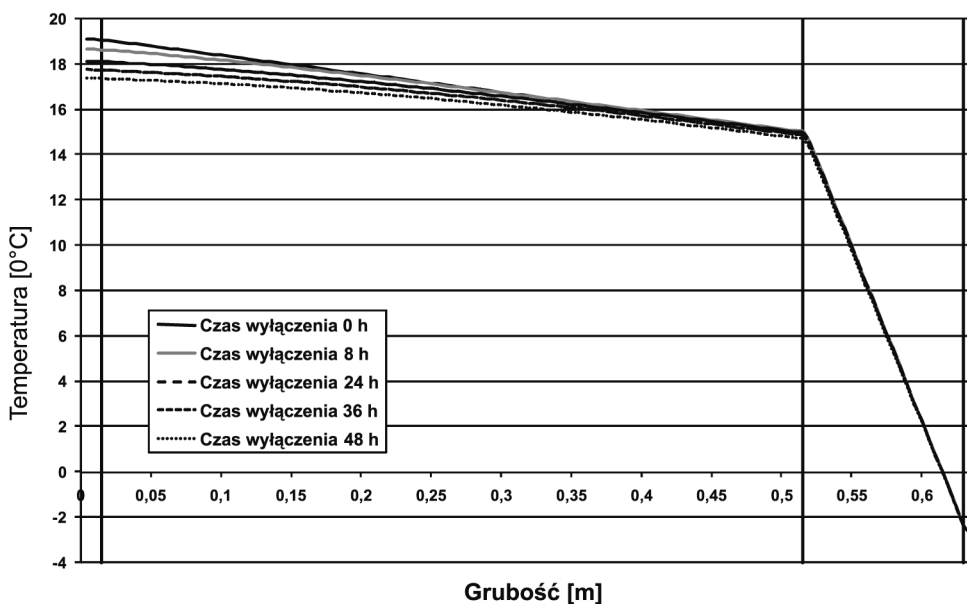
**Rodzaje ścian zewnętrznych przyjętych do obliczeń**

	Material	Grubość [m]	Współczynnik przewodzenia ciepła [W/(mK)]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Ciepło właściwe [J/(kgK)]
Ściana zewnętrzna 1	tynk cem.-wap.	0,015	0,82	1850	840
	cegła pełna	0,500	0,77	1800	880
	styropian	0,120	0,042	15	1460
	tynk cem.	0,005	1,0	2000	840
Ściana zewnętrzna 2	tynk cem.-wap.	0,015	0,82	1850	840
	pustak MAX	0,29	0,44	1100	880
	styropian	0,12	0,042	15	1460
	tynk cem.	0,005	1,0	2000	840
Ściana zewnętrzna 3	tynk cem.-wap.	0,015	0,82	1850	840
	żelbet	0,15	1,7	2500	840
	styropian	0,05	0,042	15	1460
	żelbet	0,05	1,7	2500	840
Ściana zewnętrzna 4	płyta gips.-kart.	0,012	0,23	1000	1000
	welna mineralna	0,2	0,05	80	750
	saiding	0,005	0,2	1300	1460

Obliczenia wykonano dla temperatur powietrza zewnętrznego równych średnim miesięcznym dla III strefy klimatycznej Polski [6]. Wyznaczano wartości temperatur w węzłach ścian zewnętrznych oraz temperatury powietrza w pomieszczeniu w poszczególnych krokach czasowych dla każdego miesiąca sezonu grzewczego. Obliczenia wykonano dla pomieszczenia 1 (3 m × 3 m) oraz pomieszczenia 2 (3 m × 7,5 m), przyjmując cztery warianty rodzajów ścian zewnętrznych (jak w tab. 2). Wykresy zamieszczone na rys. 2–10 dotyczą stycznia – miesiąca najchłodniejszego w sezonie grzewczym, gdzie średnia temperatura zewnętrzna wynosi  $-3^{\circ}\text{C}$ . W modelu przyjęto, że ogrzewanie jest wyłączane przy temperaturze wewnętrznej w pomieszczeniach wynoszącej  $20^{\circ}\text{C}$ .

Na rysunkach 2 i 3 podano rozkłady temperatur w ścianie zewnętrznej 1 i, odpowiednio, w pomieszczeniach 1 oraz 2 w wybranych krokach czasowych po wyłączeniu ogrzewania.

Ściana 1 jest zbudowana przede wszystkim z warstw cegieł o grubości 50 cm. Ma więc dużą pojemność cieplną, a co za tym idzie, wolno reaguje na zmiany temperatur w pomieszczeniu. Jak wynika z rys. 2, wraz z obniżaniem temperatury powietrza w pomieszczeniu malały również temperatury wewnątrz ściany zewnętrznej. Przy czym wartości temperatur w węzłach od strony pomieszczenia obniżały się szybciej niż w węzłach położonych bardziej w głąb ściany. Należy dodać, że z powodu dużej pojemności cieplnej ściany 1 temperatura w węzle położonym najbliżej pomieszczenia obniżyła się tylko o ok. 2 K w pomieszczeniu 1 oraz o ok. 1 K w pomieszczeniu 2 dla czasu wyłączenia ogrzewania wynoszącego aż 48 h. Porównując rysunki 2 i 3, można zauważyć, że ściany zewnętrzne w po-

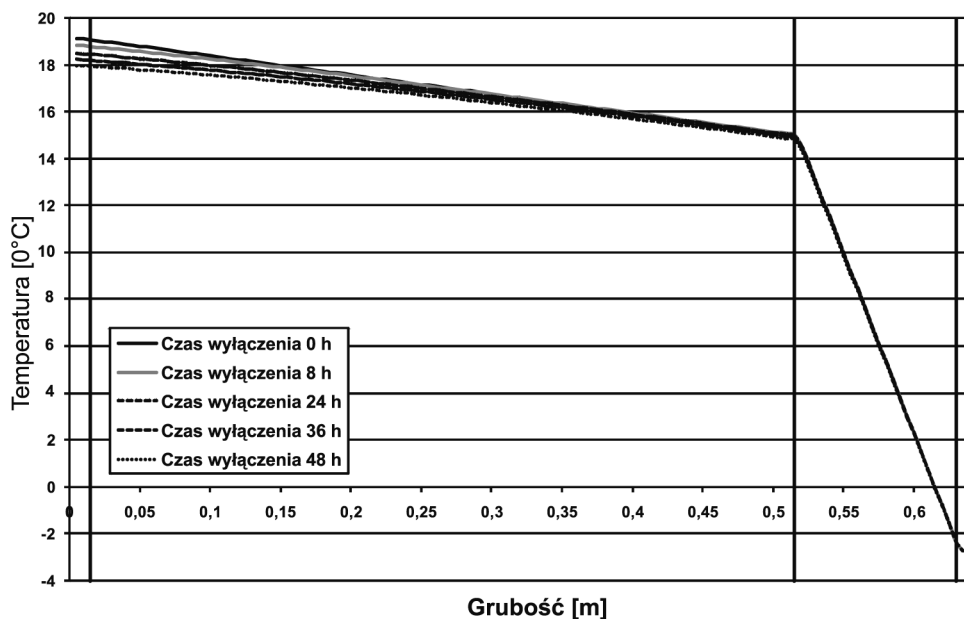


Rys. 2. Rozkład temperatury w ścianie zewnętrznej w wybranych godzinach po wyłączeniu ogrzewania: ściana 1, pomieszczenie 1

Fig. 2. External wall temperature distribution during heating cut-off time: wall 1, room 1

mieszczeniu większym 2 wolniej stygną niż w pomieszczeniu mniejszym 1. Przyczyną takiego zjawiska jest niewątpliwie większa pojemność cieplna ściany zewnętrznej (większa jej powierzchnia) w pomieszczeniu 2 niż w pomieszczeniu 1.

Dodatkowo można stwierdzić, że w obrębie warstwy izolacyjnej ściany 1 temperatury w węzłach obniżyły się tylko nieznacznie po wyłączeniu ogrzewania.



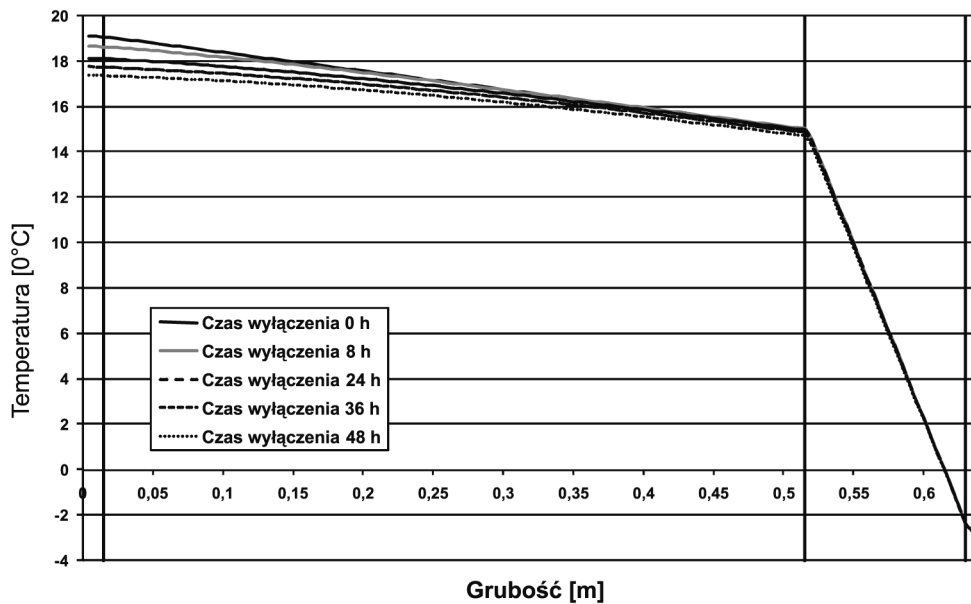
Rys. 3. Rozkład temperatury w ścianie zewnętrznej w wybranych godzinach po wyłączeniu ogrzewania: ściana 1, pomieszczenie 2

Fig. 3. External wall temperature distribution during heating cut-off time: wall 1, room 2

Na rysunku 4 podano rozkład temperatury w ścianie 2 w pomieszczeniu 1 w zależności od czasu wyłączeń ogrzewania. W ścianie 2 jest warstwa 29 cm pustaka MAX. Jest to więc również, tak jak ściana 1, przegroda o dużej pojemności cieplnej. Można więc zauważyć podobny rozkład temperatur w węzłach ściany 2 jak na rys. 2 dla ściany 1. Tym razem jednak zmiany temperatur w węzłach po wyłączeniu ogrzewania obejmują – nie tak jak w wypadku ściany 1 tylko warstwę nośną, ale również warstwę izolacyjną.

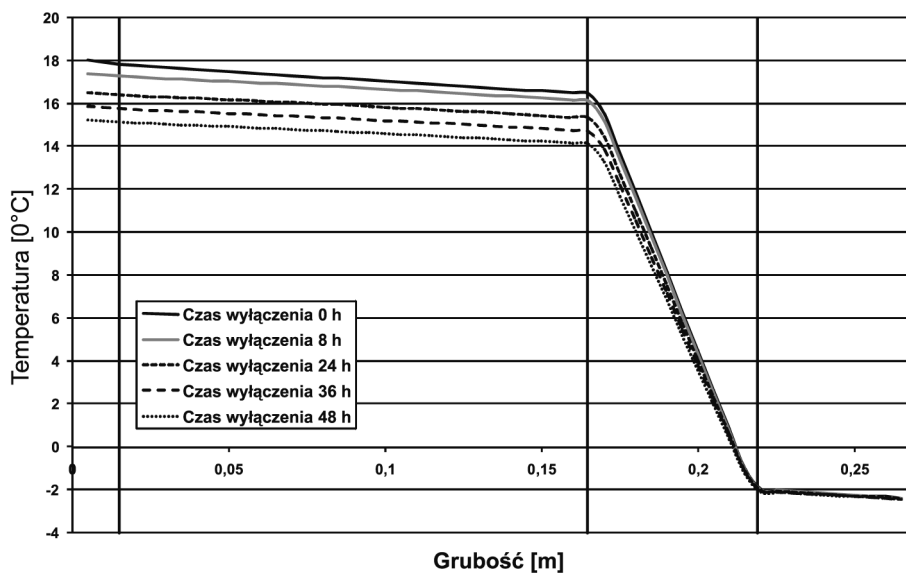
Z kolei na rysunku 5 zamieszczono rozkład temperatur w ścianie 3 po wyłączeniu ogrzewania. Jak wynika z rys. 5, ściana 3 z żelbetu szybciej się wychładza niż ściany 1 i 2. Temperatura w węzle brzegowym od strony pomieszczenia po 48 h. od wyłączenia ogrzewania spadła o ok. 3 K. Można również zauważyć, że zmiany temperatur wewnątrz ściany 3 w poszczególnych węzłach obejmują warstwę nośną oraz całą warstwę izolacyjną.

Wreszcie na rysunku 6 podano rozkład temperatur w ścianie 4 po wyłączeniu ogrzewania.



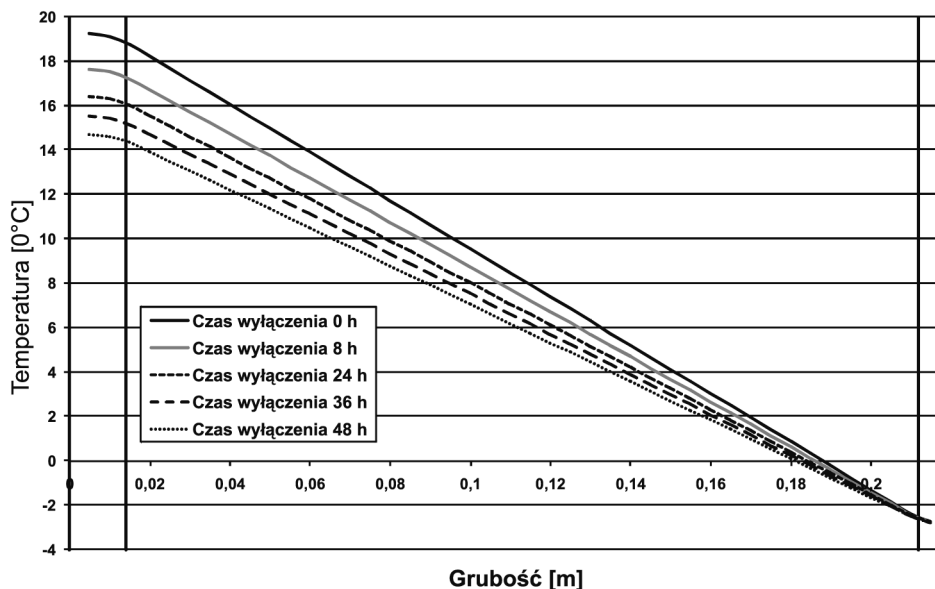
Rys. 4. Rozkład temperatury w ścianie zewnętrznej w wybranych godzinach po wyłączeniu ogrzewania: ściana 2, pomieszczenie 1

Fig. 4. External wall temperature distribution during heating cut-off time: wall 2, room 1



Rys. 5. Rozkład temperatury w ścianie zewnętrznej w wybranych godzinach po wyłączeniu ogrzewania: ściana 3, pomieszczenie 1

Fig. 5. External wall temperature distribution during heating cut-off time: wall 3, room 1



Rys. 6. Rozkład temperatury w ścianie zewnętrznej w wybranych godzinach po wyłączeniu ogrzewania: ściana 4, pomieszczenie 1

Fig. 6. External wall temperature distribution during heating cut-off time: wall 4, room 1

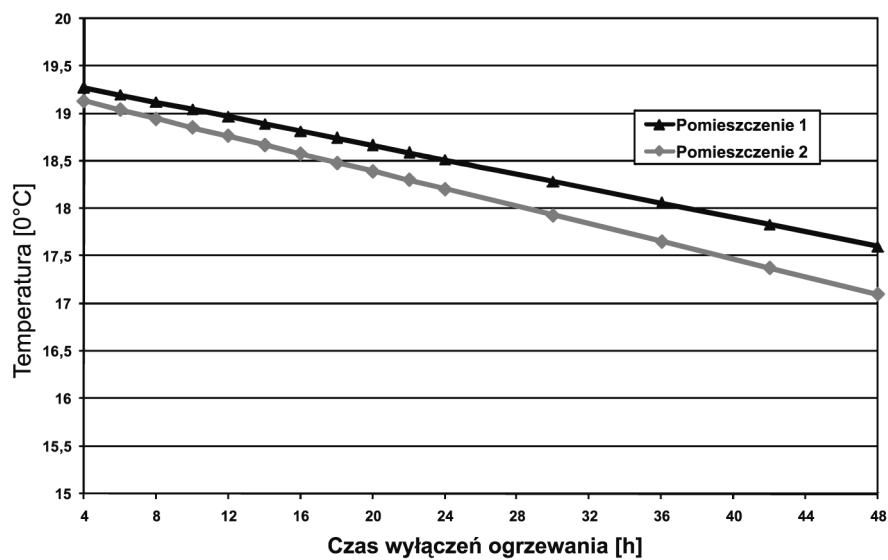
Ściana 4 jest lekką konstrukcją mającą niewielką pojemność cieplną. Temperatura w węźle brzegowym od strony pomieszczenia po 48 h od wyłączenia ogrzewania spadła o ponad 4 K, a temperatury w poszczególnych węzłach obniżyły się w obrębie całej grubości ściany 4.

Oprócz rozkładów temperatur w ścianach zewnętrznych w modelu wyznaczono również temperatury powietrza w pomieszczeniu po wyłączeniu ogrzewania. Na rysunku 7 podano wartości temperatur wewnętrznych w pomieszczeniach 1 i 2, jeśli ścianą zewnętrzną w pomieszczeniu była ściana 1 z cegły.

Jak wynika z rys. 7, wolniej wychładza się pomieszczenie 1 – mniejsze niż pomieszczenie 2 – większe. Przyczyną jest pojemność cieplna powietrza w pomieszczeniu, która jest dużo mniejsza niż ścian. Pomieszczenie 1 jest mniejsze, a więc ma w porównaniu z pomieszczeniem 2 więcej przegród o dużej pojemności magazynujących ciepło. W obydwu pomieszczeniach po czasie wyłączenia ogrzewania wynoszącym 48 h temperatura wewnętrzna spadła do ponad 17°C.

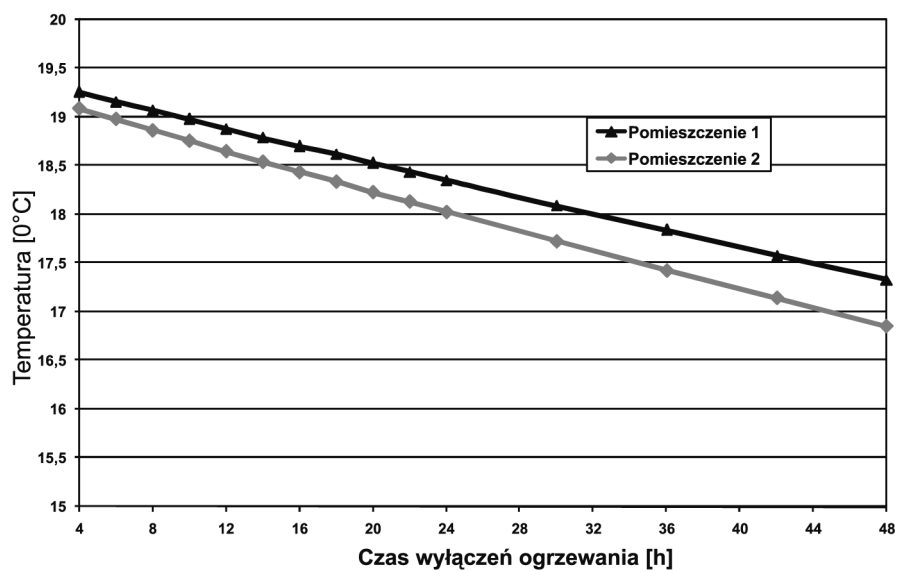
Podobne jak zamieszczone wyżej obliczenia wykonano również w pomieszczeniach 1 i 2 ze ścianą zewnętrzną 2. Na rysunku 8 podano wartości temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach w zależności od czasu wyłączenia ogrzewania.

Porównując rysunki 7 i 8, można zauważyć, że w pomieszczeniach 1 i 2 ze ścianami zewnętrznymi 2 temperatura powietrza maleje nieco szybciej i po 48 h od wyłączenia ogrzewania wynosi ok. 17°C.



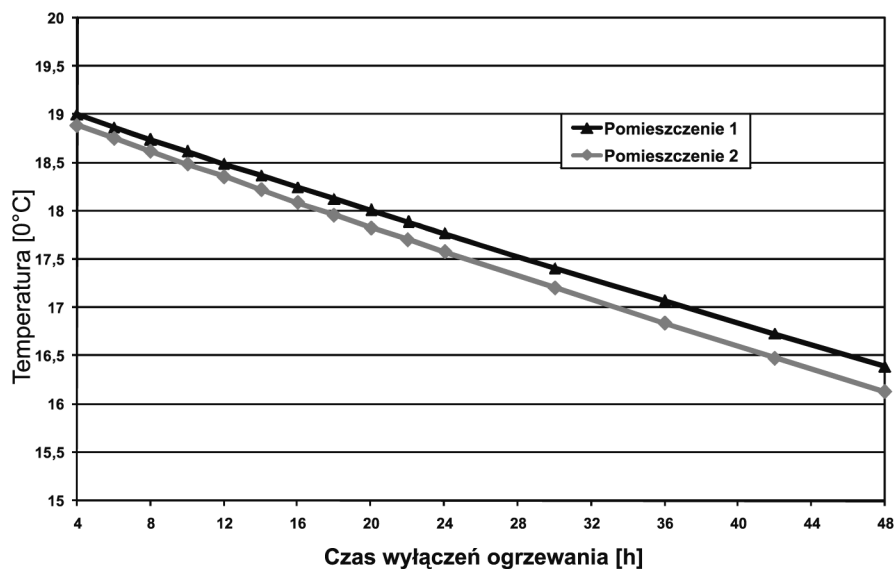
Rys. 7. Wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu w zależności od czasu wyłączeń ogrzewania: ściana 1, pomieszczenia 1 i 2

Fig. 7. Internal temperature as a function of heating cut-off time: wall 1, room 1 and 2



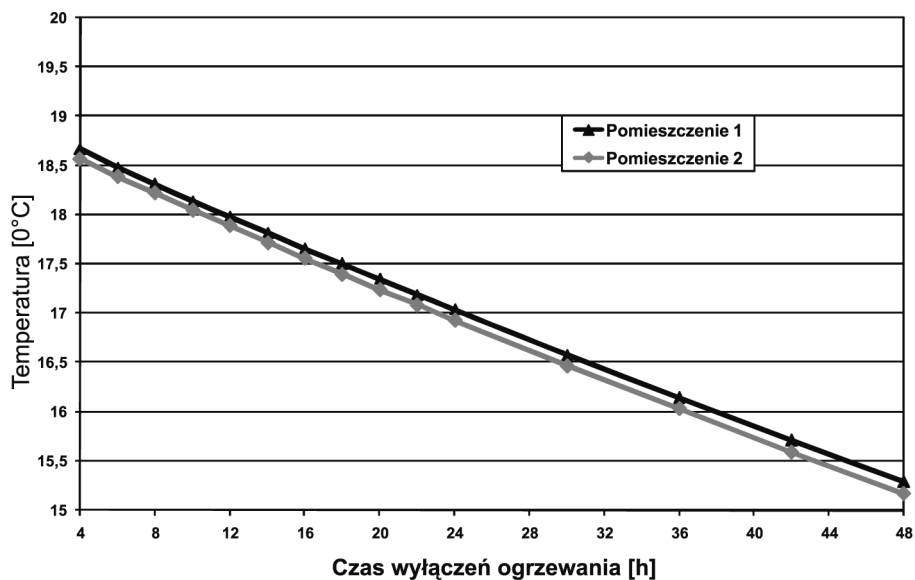
Rys. 8. Wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu w zależności od czasu wyłączeń ogrzewania: ściana 2, pomieszczenia 1 i 2

Fig. 8. Internal temperature as a function of heating cut-off time: wall 2, room 1 and 2



Rys. 9. Wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu w zależności od czasu wyłączeń ogrzewania: ściana 3, pomieszczenia 1 i 2

Fig. 9. Internal temperature as a function of heating cut-off time: wall 3, room 1 and 2



Rys. 10. Wartości temperatury powietrza w pomieszczeniu w zależności od czasu wyłączeń ogrzewania: ściana 4, pomieszczenia 1 i 2

Fig. 10. Internal temperature as a function of heating cut-off time: wall 4, room 1 and 2



Na rysunku 9 podano wartości temperatur wewnętrznych po wyłączeniu ogrzewania dla pomieszczeń 1 i 2 ze ścianami zewnętrznymi 3. Ściana 3 (z żelbetu) ma mniejszą pojemność cieplną niż ściany 1 i 2; pomieszczenia z takimi ścianami dość szybko się wychładzają. Po 48 h od wyłączenia ogrzewania w pomieszczeniach 1 i 2 panuje temperatura już tylko nieco ponad 16°C.

Z kolei na rysunku 10 podano temperatury wewnętrzne w pomieszczeniach ze ścianą 4 – lekką konstrukcją. Jak można zauważyć, takie pomieszczenia bardzo szybko się wychładzają. Po 48 h temperatura spadła z 20°C do nieco ponad 15°C.

Na rysunkach 7–10 widać wyraźny wpływ pojemności cieplnej przegród budowlanych na wartości temperatur wewnętrznych przy ogrzewaniu z przerwami. Im pojemność przegród jest większa, tym wolniej pomieszczenia się wychładzają.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

W artykule badano rozkłady temperatur w przegrodach budowlanych przy ogrzewaniu z przerwami. Rozpatrywano okresy wyłączenia ogrzewania od 4 do 48 h w dwóch pomieszczeniach o różnych kubaturach (tab. 1). W rozpatrywanych pomieszczeniach przyjęto cztery różne rodzaje ścian zewnętrznych (tab. 2). Obliczenia wykonano przy założeniu stałych temperatur powietrza zewnętrznego równych średnim miesięcznym.

Na rysunkach 2–6 można zauważyć wpływ pojemności cieplnej przegród budowlanych na rozkład temperatur w ścianach zewnętrznych. Im większa jest pojemność cieplna ścian, tym wolniej maleje ich temperatura po wyłączeniu ogrzewania. Należy również dodać, że przegrody z dużą pojemnością cieplną wolniej również się rozgrzewają, jeśli po okresie wyłączenia nastąpi ponowne włączenie instalacji grzewczej.

W artykule wyznaczano również temperatury powietrza wewnątrz pomieszczeń. Z rysunków 7–10 wynika, że po wyłączeniu ogrzewania temperatury wewnętrzne wolniej maleją w pomieszczeniach z przegrodami o dużej pojemności cieplnej.

Przy doborze rodzaju przegród w pomieszczeniach warto więc mieć na uwadze ich pojemność cieplną.

#### Literatura

- [1] G d u l a S.J., *Przewodzenie ciepła*, praca zbiorowa, PWN, Warszawa 1984.
- [2] H o p k o w i c z M., *Uproszczone modele matematyczne dynamiki cieplnej obiektów ogrzewanych*, Zeszyt Naukowy nr 1, Wyd. PK, Kraków 1992.
- [3] EN ISO 13786 Właściwości cieplne komponentów budowlanych. Dynamiczne charakterystyki cieplne. Metody obliczania, wrzesień 1999.
- [4] EN ISO 13790 Thermal performance of buildings – Calculation of energy use for space heating, June 2004.
- [5] DIN 4701 Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden, März 1983.
- [6] PN-B-02025 Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego, lipiec 2001.