

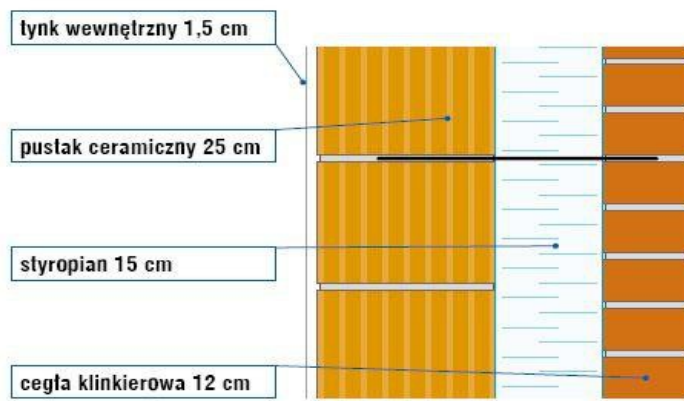
Metoda Elementów Skończonych
Sprawozdanie
Piotr Tutak

1. Zadanie

Zadany problem polega na symulowaniu rozkładu temperatury w murze trójwarstwowym:

- z dobową zmianą cyklu temperatury
- ze stałą niską temperaturą

Mur trójwarstwowy został zbudowany w programie według zamieszczonego schematu:



Jedyną różnicą jest grubość tynku wewnętrznego, która w użytym modelu wynosi 1 cm
Cały mur miał 0.53 metra grubości i jeden element siatki odpowiadał 1 cm² grubości muru

Parametry poszczególnych warstw:

1. tynk wewnętrzny:
 - $\rho = 1850 \text{ kg / m}^3$
 - $c = 840 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$
 - $\lambda = 0.82 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$
2. pustak:
 - $\rho = 818 \text{ kg / m}^3$
 - $c = 1000 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$
 - $\lambda = 0.283 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$
3. styropian:
 - $\rho = 30 \text{ kg / m}^3$
 - $c = 1460 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$
 - $\lambda = 0.04 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$
4. cegła klinkierowa:
 - $\rho = 1900 \text{ kg / m}^3$
 - $c = 880 \text{ J/kg}^{\circ}\text{K}$
 - $\lambda = 1.05 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$

Dane zostały wzięte ze źródeł producentów lub z ogólnych tablic o materiałach:

Porotherm 25 Dryfix



Zastosowanie

Produkt przeznaczony do budowy zewnętrznych ścian nośnych z dociepleniem oraz ścian nośnych wewnętrznych.

Grubość pustaków i ścian wynosi 25 cm. Porotherm 25 Dryfix to szlifowany pustak ceramiczny do murowania na cienkowarstwowej zaprawie do murowania na sucho - Porotherm Dryfix. Zastosowanie zaprawy do cienkich spoin znacznie przyspiesza prowadzenie prac budowlanych i poprawia parametry cieplne muru.

Parametry produktu

Wymiary b/h [mm]	250/373/249 mm
Plaskość powierzchni kładzenia [mm]	0,3
Równoległość powierzchni kładzenia [mm]	0,6
Masa [kg]	ok. 19
Grupa elementów murowych zgodnie z PN-EN 1996-1-1	2
Kategoria	I
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	10, 15
Wytrzymałość spoiny [MPa]	0,10
Trwałość (mrozoodporność)	F1 - wyrób mrozoodporny (wg PN-B-12012)
Zawartość aktywnych soli rozpuszczalnych	S0
Reakcja na ogień	A1
Ciepło właściwe [J/kg K]	1000 (wg PN-EN 1745)
Współczynnik dyfuzji pary wodnej	5/10 (wg PN-EN 1745)

Parametry ścian

Grubość [mm]	250
Masa [kg/m²]	ok. 199
Zużycie pustaków [szt./m²]	10,7
Zużycie zaprawy	1 puszka/5 m² muru

Parametry termiczne ścian

Wartości obliczeniowe ekwiwalentnego współczynnika przewodzenia ciepła, oporu cieplnego oraz współczynnika przenikania ciepła ścian murowanych na zaprawie Porotherm Dryfix w warunkach użytkowych.

Ściana nieotynkowana	λ [W/mK]	R [m²K/W]	U [W/m²K]
	0,283	0,88	0,95

Zestawienie parametrów fizycznych materiałów / wyrobów budowlanych wg PN-EN ISO 12524:2003, PN-EN ISO 6946:1999 i PN-91/B-02020

Lp.	Grupa materiałowa / materiał	Gęstość w stanie suchym (średnia), kg/m³	Ciepło właściwe w stanie suchym, J/(kg K)			Współczynnik przewodzenia ciepła w warunkach średniowilgotnych, W/(mK)		
			PN-EN 12524	PN-EN ISO 6946	PN-91/B-02020	PN-EN 12524	PN-EN ISO 6946	PN-91/B-02020
-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-8-	-9-
25	Mur z cegły klinkierowej	1900		880	880		1,05	1,05
145	Styropian	10 20 15÷40		1460 1460 1460			0,045 0,043 0,040	
213	Tynk lub gładź cementowo-wapienna	1850		840	840		0,82	0,82

2. Symulacja – warunki zewnętrzne

Wzory na współczynniki wymiany ciepła po obu stronach muru zostały ustalone na podstawie „Zbioru zadań z techniki cieplnej”, Autorzy: Mańkowski, Stanisław ; Kurzyński, Jan ; Rubik, Marian.

12.1.2. Konwekcyjne przejmowanie ciepła

Zjawisko wymiany ciepła między ciałem stałym a płynem opisane jest równaniem Newtona:

$$Q_0 = F \alpha (t_1 - \vartheta_1) \tau, \quad (12.3)$$

$$Q_0 = F \alpha (\vartheta_2 - t_2) \tau,$$

gdzie: α – współczynnik przejmowania ciepła $[W/(m^2 \cdot deg)]$,
 t_1, t_2 – temperatura płynu $[^{\circ}C]$,
 ϑ_1, ϑ_2 – temperatura ścianki $[^{\circ}C]$,
 F – powierzchnia przez którą zachodzi wymiana ciepła $[m^2]$.

Współczynnik α zależy od charakteru przepływu płynu (laminarny, przejściowy, burzliwy), od którego zależy też grubość warstewki przyściennej, przez którą zachodzi wymiana ciepła przez przewodzenie.

Właściwości fizyczne płynu dla obliczenia liczb kryterialnych określa się w zależności od temperatury odniesienia t_e , którą może być:

– średnia temperatura przepływającego płynu t_f :

$$t_f = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (12.5a)$$

gdzie: t_1, t_2 – średnie temperatury płynu odniesione do skrajnych umownych przekrojów przez które przepływa płyn;

Dla przegród budowlanych współczynnik przejmowania ciepła α może być obliczony ze wzorów:

Powierzchnie wewnętrzne:

przy $t_{f1} - \vartheta_1 < 5^{\circ}C$

$$\alpha = 3,49 + 0,093(t_{f1} - \vartheta_1); \quad (12.6c)$$

przy $t_{f1} - \vartheta_1 > 5^{\circ}C$

$$\alpha = \varphi \sqrt[4]{t_{f1} - \vartheta_1}, \quad (12.6d)$$

przy czym: $\varphi = 2,32$ – dla powietrza w zamkniętym pomieszczeniu,

$\varphi = 3,2$ – dla powietrza w pomieszczeniach produkcyjnych z wirującymi elementami maszyn
względnie w pobliżu bardzo zimnych powierzchni (okna, zewnętrzne drzwi.

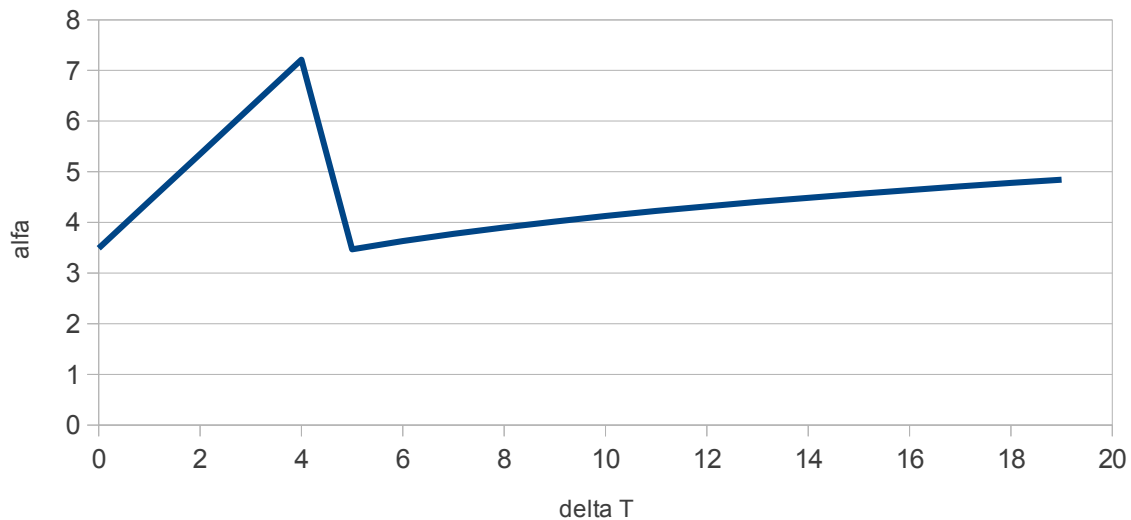
Powierzchnie zewnętrzne:

$$\alpha = 7,34^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 w} \quad (12.6e)$$

przy czym: w – największa średnia miesięczna prędkość wiatru w sezonie ogrzewczym. W przypadku stropów przykrytych strychami zabezpieczonymi przed wiatrem, przyjmuje się $w = 0,5$ m/s.

Wewnętrzny współczynnik przejmowania ciepła jest zależny od różnicy temperatur i zmienia się zgodnie z wykresem:

Zależność współczynnika przejmowania ciepła od różnicy temperatur



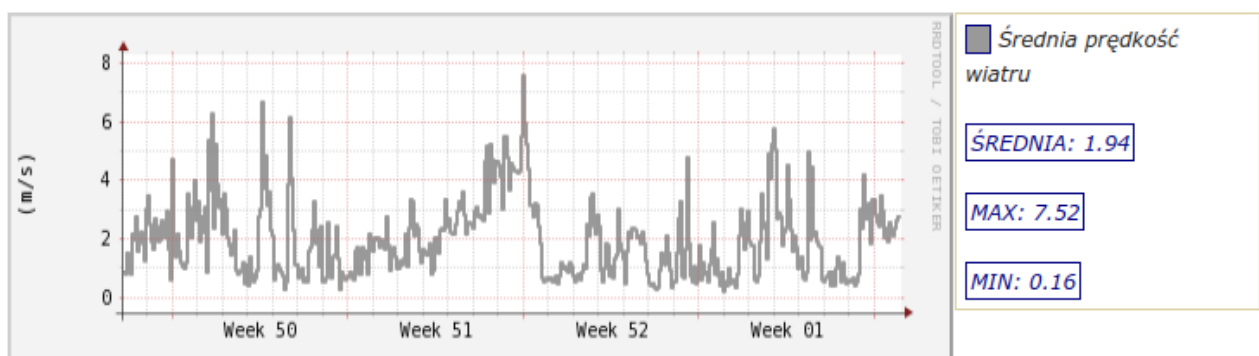
przyjmując $\phi=2.32$ dla powietrza w zamkniętym pomieszczeniu.

Przy założeniu że wewnętrzna temperatura ścian nie będzie się znacznie różniła od temperatury wewnętrznej powietrza, przyjąłem $\alpha=4.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Zewnętrzny współczynnik wymiany ciepła jest zależny od średniej maksymalnej prędkości wiatru w danym okresie.

Średnia maksymalna prędkość wiatru mierzona na Wydziale Fizyki AGH dla miesiąca grudzień wynosi:

Średnia prędkość wiatru - start wykresu 2017-12-09 00:00:00+01 (wykres miesięczny)



Co daje nam współczynnik wymiany ciepła $\alpha=3.79 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

Warunki w środku budynku były zawsze te same, temperatura wynosiła 22°C, natomiast odnośnie temperatury zewnętrznej zostały rozpatrzone 2 przypadki:

- stała temperatura = -10°C
- temperatura zmienna z cyklem dobowym:
 - 0:00 – 8:00 - -5°C
 - 8:00 – 20:00 - 5°C
 - 20:00 – 0:00 - 0°C

Temperatura początkowa ściany w obu przypadkach wynosiła:
 $t_0 = 20^\circ\text{C}$

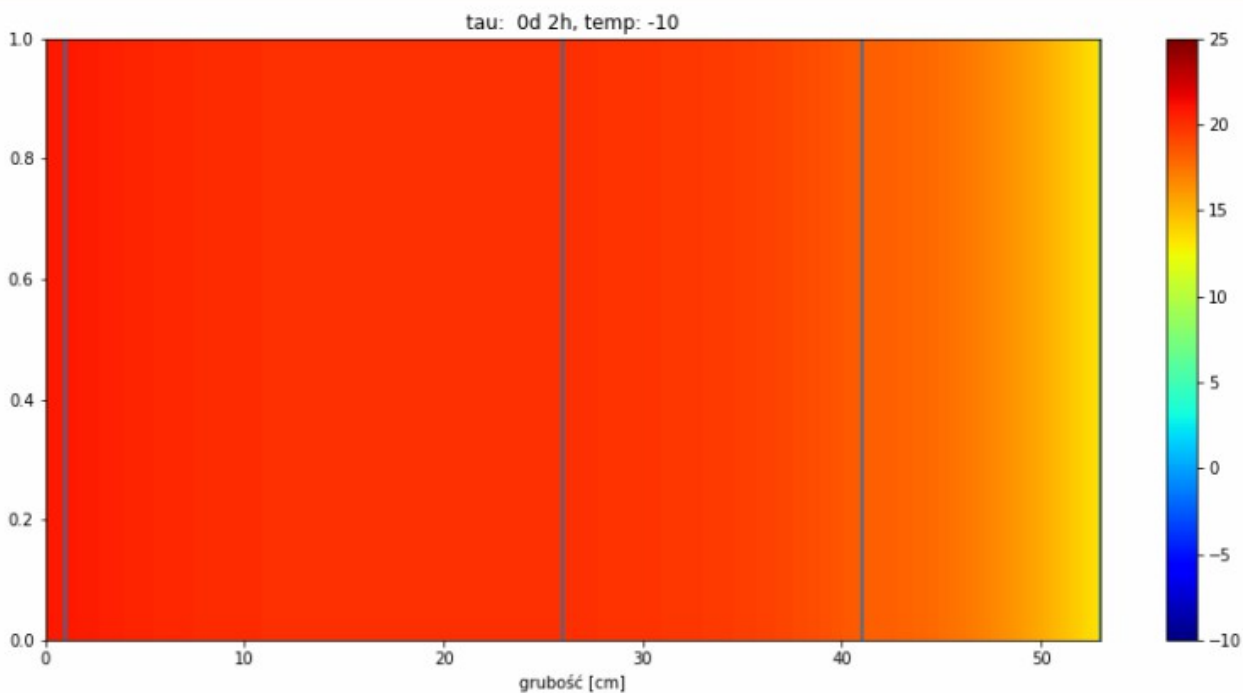
W obu przypadkach symulacja obejmowała 5 dni, z przyrostem czasowym ustalonym na $\Delta\tau = 30\text{ s}$

Wszystkie wydruki temperatury były robione po 2h czasu symulacji

3. Wyniki pomiarów

Stały mróz:

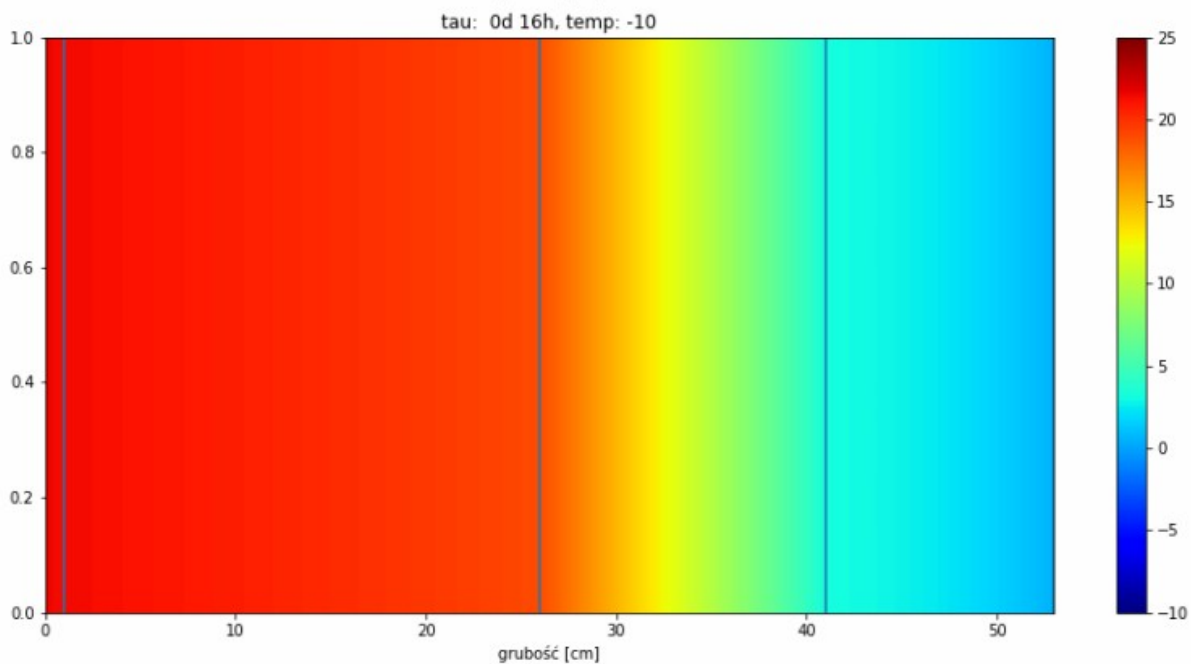
Na początku ściana cała jest nagrzana (czas po 2h ochładzania):



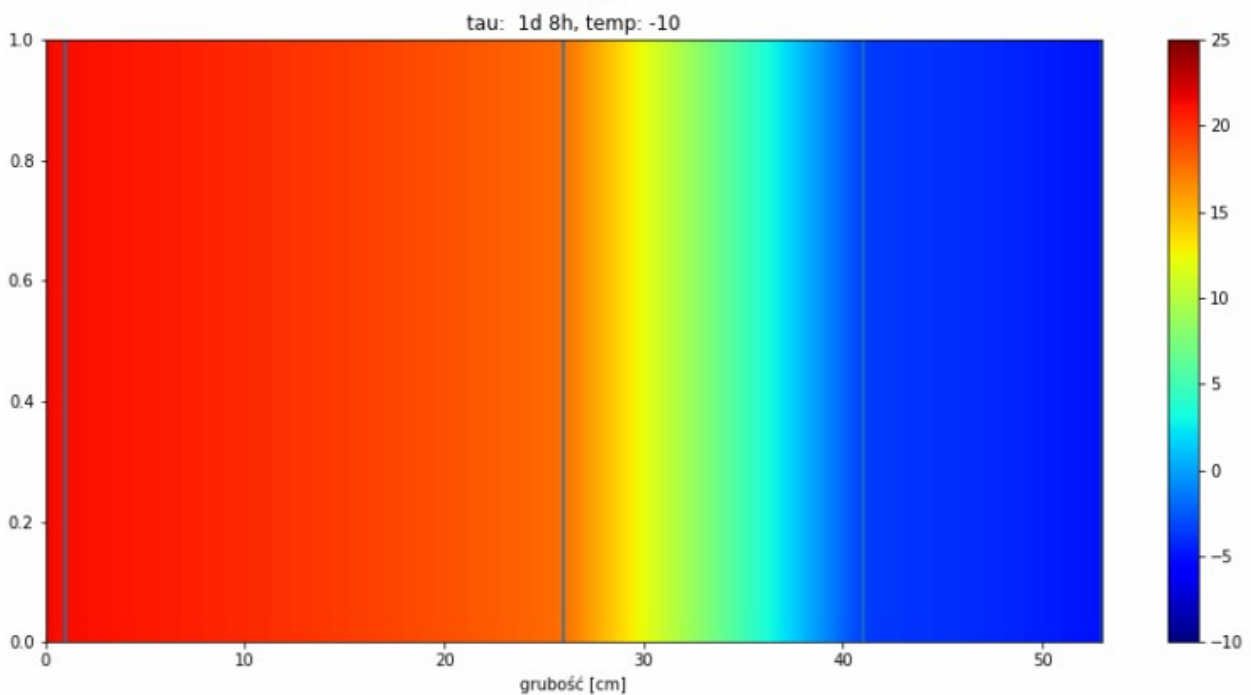
Liniami są zaznaczone granice kolejnych warstw.

Temperatura ściany od strony zewnętrznej powoli zaczyna spadać.

Po ok. 16h temperatura zewnętrznej ściany osiąga w przybliżeniu temperaturę 0C:



Następnie ściana w dalszym ciągu się ochładza i po kolejnych 12h:



Temperatura zewnętrznej ściany osiąga już temperaturę bliską temperatury warunków zewnętrznych.

Należy zauważyć że ściana trójwarstwowa podzieliła się na 3 wyraźne obszary zaznaczone zresztą bardzo dobrze przez kolejne warstwy.

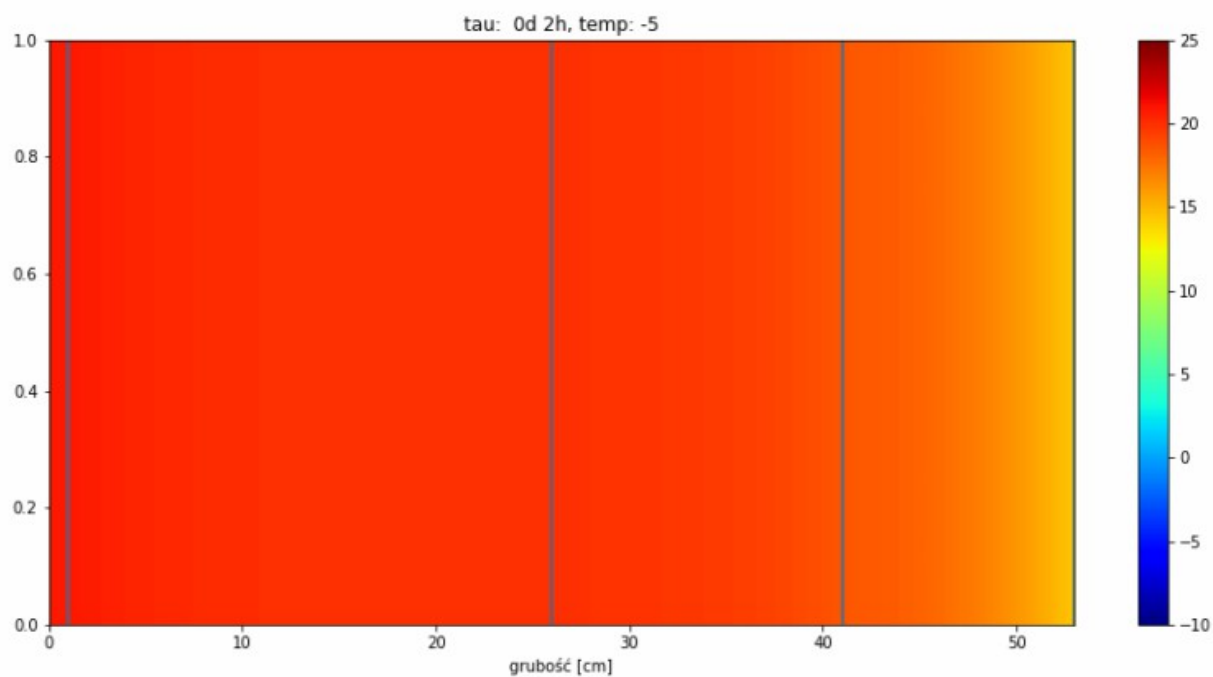
Warstwa wewnętrzna o temperaturze powyżej 15C, która jest zbudowana z pustaków. Warstwa środkowa o największym gradiencie temperatury, zbudowana ze styropianu, oraz warstwa zewnętrzna z cegły klinkierowej o stałej niskiej temperaturze.

A heatmap showing the temperature distribution in a wall cross-section. The x-axis is labeled 'grubość [cm]' (thickness [cm]) and ranges from 0 to 50. The y-axis ranges from 0.0 to 1.0. The color scale on the right indicates temperature values from -10 to 25. The plot shows a sharp temperature gradient at the boundary (x=0), with the temperature decreasing from approximately 25 at the boundary to about -10 at the other side of the wall. The temperature is relatively uniform across the thickness of the wall.

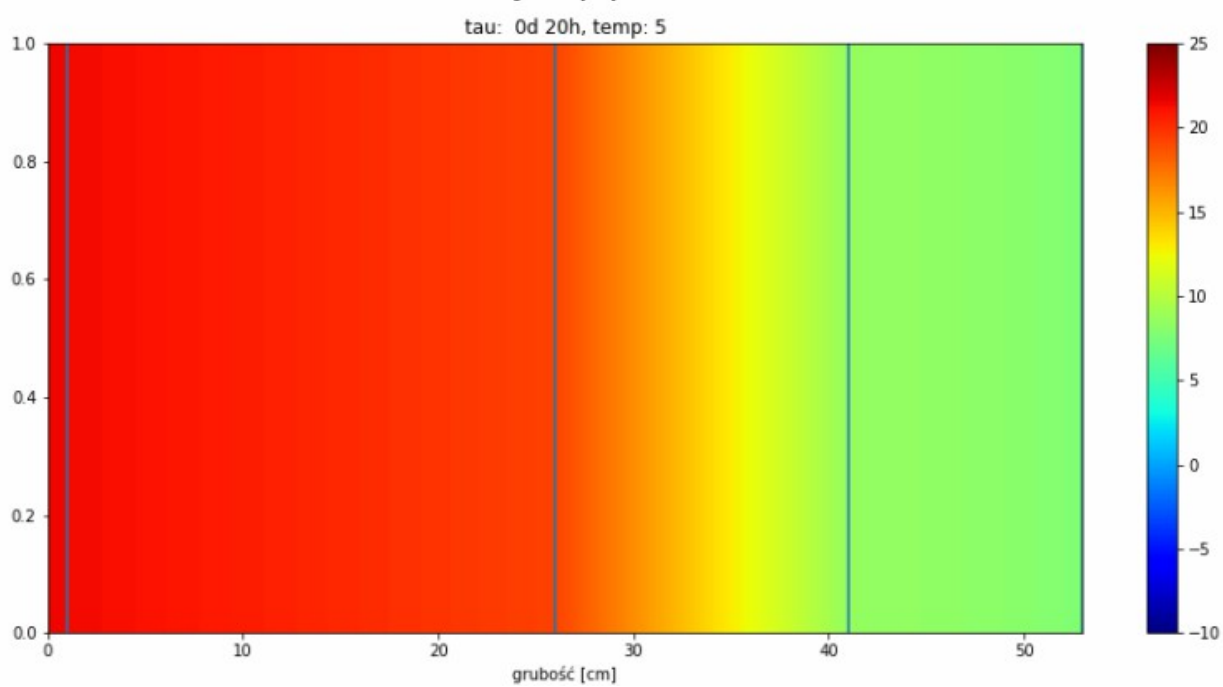
Całkowicie wewnętrzna warstwa, dzięki zastosowaniu bardzo dobrej izolacji ze styropianu pozostaje nadal ciepła z temperaturą bliską temperatury pokojowej.

20.68824 20.61621 20.40732 20.19828 19.98907 19.77968 19.57009 19.36028 19.15023 18.93993 18.72937 18.51853 18.30740
18.09596 17.88420 17.67212 17.45970 17.24693 17.03381 16.82033 16.60648 16.39225 16.17765 15.96267 15.74731 15.53157
15.31545 13.78496 12.25432 10.72356 9.19267 7.66165 6.13052 4.59927 3.06793 1.53648 0.00494 -1.52669 -3.05839 -4.59017
-6.12202 -7.65393 -7.71232 -7.77080 -7.82935 -7.88798 -7.94668 -8.00545 -8.06430 -8.12321 -8.18220 -8.24125 -8.30037 -8.35955

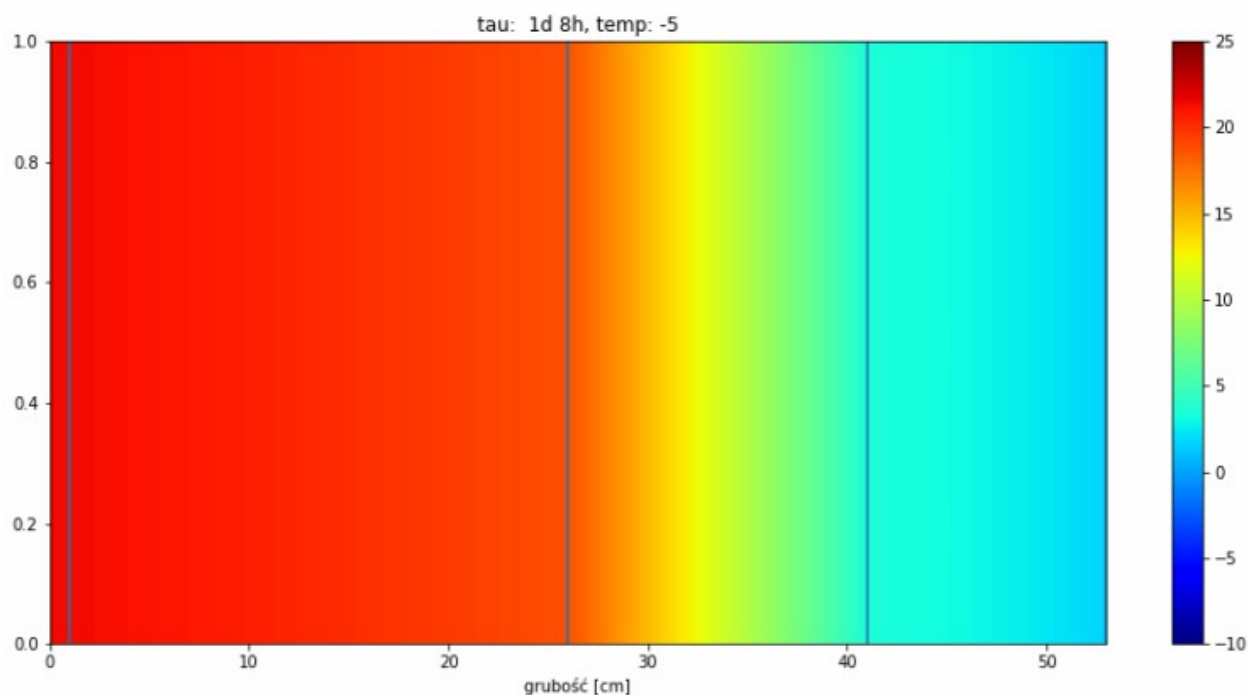
Drugi przypadek zakładał dobowe cykliczne zmiany temperatury zewnętrznej.
Stan początkowy po 2h symulacji:



Rozkład temperatur na koniec pierwszego dnia:

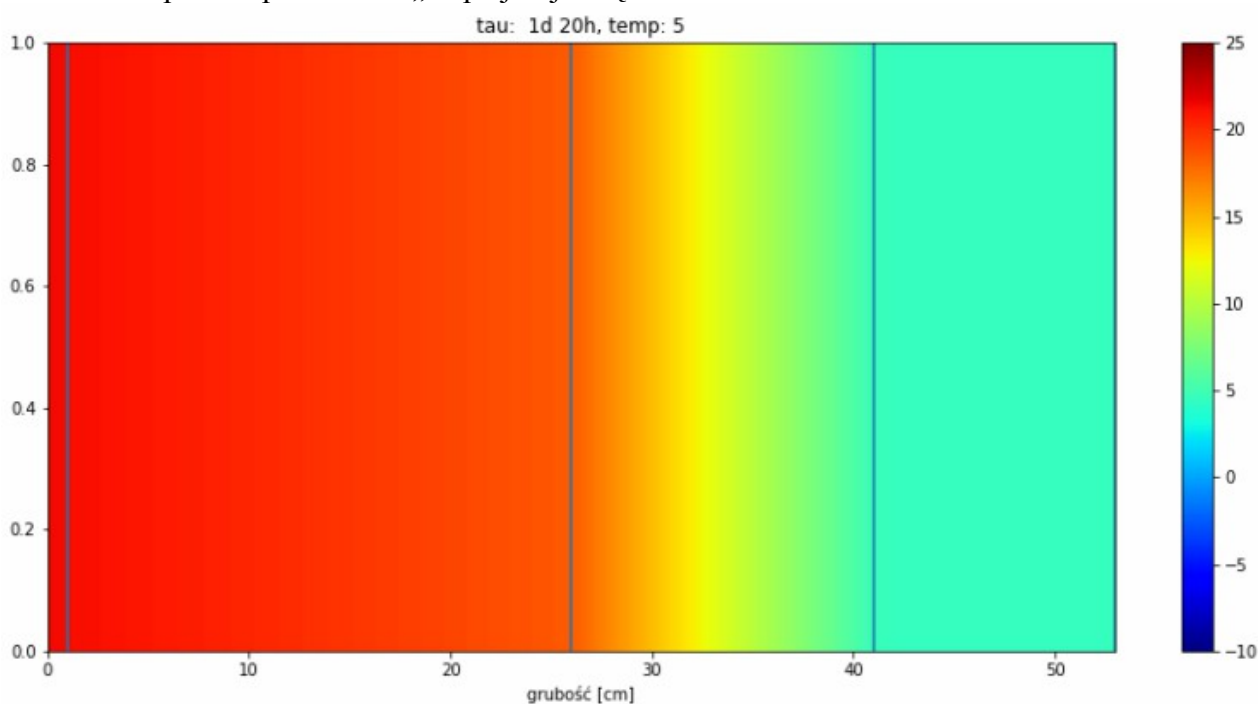


Rozkład temperatur pod koniec całego cyklu, nazajutrz przy zmianie temperatury na dodatnią:



Po spadku temperatury po pierwszej pełnej nocy temperatura ściany zaczęła powoli rosnąć w wyniku ogrzania w ciągu dnia.

Rozkład temperatur pod koniec „cieplejszej” części dnia:

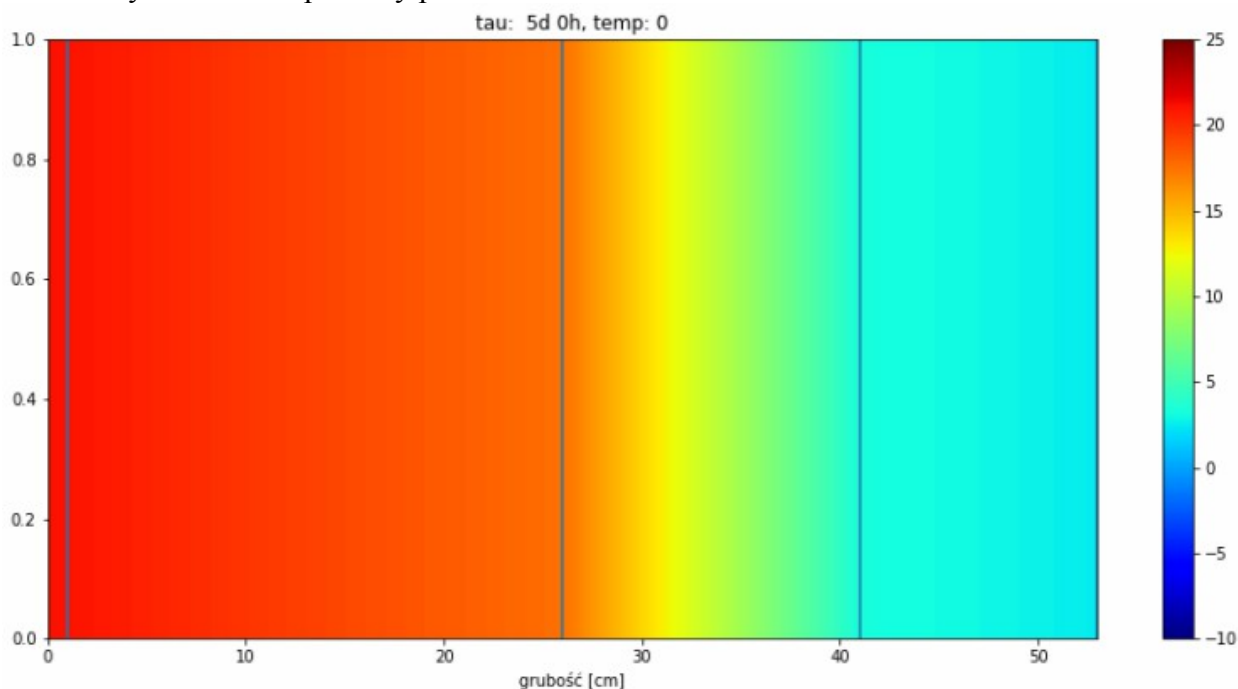


Można zaobserwować dalsze ochładzanie bardziej wewnętrznej części ściany, a zarazem niewielkie ogrzanie części zewnętrznej ściany.

Jak w poprzednim przypadku, największy gradient temperatur znajduje się w środkowej części ściany.

W następnych dniach ustaliła się pewnego rodzaju równowaga dynamiczna, która charakteryzowała się naprzemiennym nagrzewaniem i chłodzeniem części zewnętrznej ściany podczas gdy temperatura części wewnętrznej i środkowej ściany pozostawała mniej więcej na podobnym poziomie.

Ostateczny rozkład temperatury po 5 dniach:



tau:432000.0 temp.:0 czas symulacji:396.5162909999999

21.12277	21.07462	20.93511	20.79559	20.65606	20.51655	20.37705	20.23758	20.09817	19.95882	19.81957	19.68043	19.54145
19.40265	19.26406	19.12573	18.98768	18.84995	18.71257	18.57557	18.43898	18.30281	18.16707	18.03175	17.89685	17.76234
17.62816	16.67990	15.73155	14.78290	13.83376	12.88392	11.93316	10.98127	10.02801	9.07318	8.11653	7.15783	6.19684
5.23333	4.26705	3.29777	3.25843	3.21438	3.16562	3.11217	3.05405	2.99129	2.92396	2.85211	2.77582	2.69518
2.52131												2.61030

4. Podsumowanie i wnioski

Jak widać początkowe założenia odnośnie różnicy temperatur między temperaturą otoczenia wewnętrznego i wewnętrznej części ściany okazały się trafne. Różnica nie wzrosła powyżej 5C

- Największy gradient temperatur znajduje się w środkowej warstwie styropianu w obu przypadkach, co potwierdza izolacyjny charakter i powszechne zastosowanie tego materiału w ocieplaniu budynków
- Trójwarstwowa ściana budowlana ma bardzo dobre właściwości izolacyjne. Nawet przy ciągłym mrozie temperatura wewnętrzna ścian jest utrzymywana niewiele poniżej temperatury otoczenia, co zapewnia duży komfort mieszkańcom