

## BADANIA LABORATORYJNE ORAZ SYMULACYJNE WYCHŁADZANIA KOMORY TESTOWEJ

Janusz BELOK<sup>\*</sup>, Lidia FEDOROWICZ<sup>\*\*</sup>, Artur NOWOŚWIAT<sup>\*</sup>, Iwona POKORSKA-SILVA<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli  
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: janusz.belok@polsl.pl, artur.nowoswiat@polsl.pl, iwona.pokorska-silva@polsl.pl

<sup>\*\*</sup> Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, Katedra Budownictwa  
ul. Rolna 43, 40-555 Katowice, e-mail: lidia.fedorowicz@wst.com.pl, lidia.fedorowicz@polsl.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki analiz symulacyjnych oraz badań laboratoryjnych określających wychładzanie komory testowej w czasie; z odwołaniem do zagadnień budownictwa energooszczędnego.

**Słowa kluczowe:** badania symulacyjne, wychładzanie obiektu, walidacja, akumulacyjność cieplna.

### 1. WPROWADZENIE

Tempo, z jakimi zachodzą zmiany we współczesnym świecie, nieprzerwanie wzrasta. Rozwój cywilizacji wiąże się jednak z większą konsumpcją dóbr oraz zużyciem znacznych ilości surowców naturalnych, a tym samym rosnącym naciskiem wywieranym przez ludzi na środowisko. W sektorze budownictwa skutkuje to zaostreniem wymagań dotyczących oszczędności energii i tym samym rośnie znaczenie, w dokonywanej już od wielu lat ocenie fizycznej budynków, wskaźników uzyskiwanych za pomocą symulacji energetycznych.

Na zachowanie budynku w dynamicznie zmiennych warunkach klimatu lokalnego, a co za tym idzie komfort jego użytkowania, wpływ ma nie tylko przewodność cieplna materiałów, z których zbudowane są przegrody, ale także ich pojemność cieplna. Zagwarantowanie, zatem odpowiednio wysokiej pojemności cieplnej przegród budynku może skutkować pozytywnym wpływem na warunki we wnętrzu budynku zarówno w okresie letnim jak i zimowym [1]. Ponieważ projektowanie budynku z uwzględnieniem zagadnień akumulacyjności cieplnej przegród, powinno przyczynić się do znacznej poprawy bilansu energetycznego budynku rozpoczęty cykl badań

laboratoryjnych poprzedzono wstępnymi analizami [2], dotyczącymi m.in. możliwości:

- numerycznej oceny stabilności temperatury w jednokomorowych obiektach o różnej geometrii oraz
- oceny cech akumulacyjnych przegród budowanych z różnych materiałów – zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i klimatu zewnętrznego.

W poniższej pracy wyznaczono czas wychładzania rzeczywistego jednokomorowego obiektu badawczego (rys. 1), rejestrując w zaznaczonych na rysunku punktach (1-8) przebieg spadku temperatury ( $T_i \rightarrow T_e$ ) w czasie  $t$  (rys. 4-5). W przedstawianym cyklu badawczym wykorzystano obiekt o wymiarach  $1,0\text{ m} \times 1,0\text{ m} \times 1,0\text{ m}$  i zastosowanych jednakowych przegrodach gipsowo-kartonowych o grubości  $g = 12,5\text{ mm}$ .

W jego wnętrzu, centralnie zainstalowano punktowe źródło ciepła o mocy  $250\text{ W}$ , które posłużyło nagraniu obiektu do odpowiednio wyższej temperatury, uprzedzając tym proces wychładzania.

Pomiary prowadzono przy użyciu:

- czujników temperatury pt100 oraz
- skanera MPI-16-00-R.

Odczyty temperatur wykonywane były w krokach czasowych  $dt = 10\text{ min}$ .

Temperaturę otoczenia mierzono w odległości  $1\text{ m}$  (punkt 2) od komory, przy zapewnieniu ustalonych warunków temperatury i wilgotności pomieszczenia laboratoryjnego.

Obiektowi badawczemu (z rys. 1) odpowiada wirtualna komora badawcza, której zachowanie w procesie wychładzania było przedmiotem symulacji numerycznych.

Model komory zbudowano dwukrotnie, jako:

- (I) wyizolowany sześcián (o parametrach przegród  $\lambda = 0,23 \text{ W/mK}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_p = 1000 \text{ J/kgK}$ ,  $g = 12,5 \text{ mm}$ ,  $\varepsilon = 0,91$  i  $\alpha = 0,70$  oraz w postaci stałej temperatury realizującej zewnętrzne warunki brzegowe  $T_{bc} = 15^\circ\text{C}$ ) – rys. 2,
- (II) sześcián (o danych materiałowych jak wyżej) wbudowany w jednorodne otoczenie reprezentujące laboratorium o  $T_{i2}=15^\circ\text{C}$  i  $T_{i3}=15^\circ\text{C}$ , utworzone przez sześcián zewnętrzny o przegrodach spełniających warunek  $U \leq 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$  oraz  $T_{bc} = 15^\circ\text{C}$  – rys. 3.

## 2. NARZĘDZIA SYMULACYJNE

Istnieje wiele dostępnych narzędzi symulacyjnych wspomagających projektowanie budynków energooszczędnych – od bardzo uproszczonych narzędzi, aż do rozbudowanych programów symulacyjnych.

W celu kompleksowej oceny termicznego zachowania budynku konieczny jest wybór odpowiednio zaawansowanego narzędzia komputerowego.

W niniejszej pracy wykorzystano program ESP-r (*Environmental Systems Performance*), pozwalający na analizę dynamicznego zachowania budynku, jak i jego elementów. Program ten umożliwia modelowanie przepływu masy i energii, dając wyniki odzwierciedlające rzeczywiste środowisko budynku. W programie dyskretyzacja przestrzeni dokonywana jest metodą objętości skończonych. Model obiektu dzielony jest na podobszary opisywane przez węzły, które to stanowią sieć wzajemnych połączeń i dla każdego z nich spełniona jest zasada zachowania energii i masy [3].

W celu oceny poprawności wyników symulacyjnych właściwym jest przeprowadzenie procesu walidacji, gdzie kompletna metodyka walidacji programu powinna składać się z:

- walidacji empirycznej – sprawdzany jest model oraz procedura rozwiązania,
- walidacji analitycznej – sprawdzana jest procedura rozwiązania,
- testów porównawczych – dokonywana jest względna ocena modelu oraz procedury rozwiązania [4].

W artykule przedstawiono równoległe wyniki analiz symulacyjnych oraz badań laboratoryjnych dotyczących wychładzania obiektu, ukierunkowanych na przeprowadzenie procesu walidacji stosowanych modeli obliczeniowych.

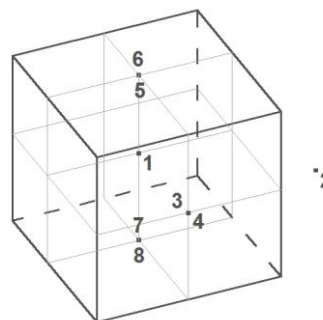
## 3. OPIS BADAŃ I WYNIKI

Eksperyment laboratoryjny (rys. 1) dotyczył oceny zachowania termicznego (wychładzania) rzeczywistego jednokomorowego obiektu badawczego (komory testowej). W przedstawianym cyklu badawczym wszystkie przegrody wykonano z płyt gipsowo-kartonowych.

Zastosowano system akwizycji danych pozwalający ogólnie na rejestrację z dowolnym krokiem czasowym.

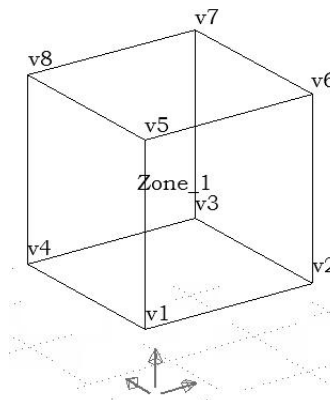
W trakcie pomiaru, rejestrowano temperatury wewnętrzną i zewnętrzną, a także temperatury powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych przegród obiektu.

Badania symulacyjne (rys. 2-3) wykonano z wykorzystaniem programu ESP-r. Jako początkowe temperatury przyjęto temperatury ( $T_i$ ,  $T_e$ ) uzyskane w eksperymencie laboratoryjnym.



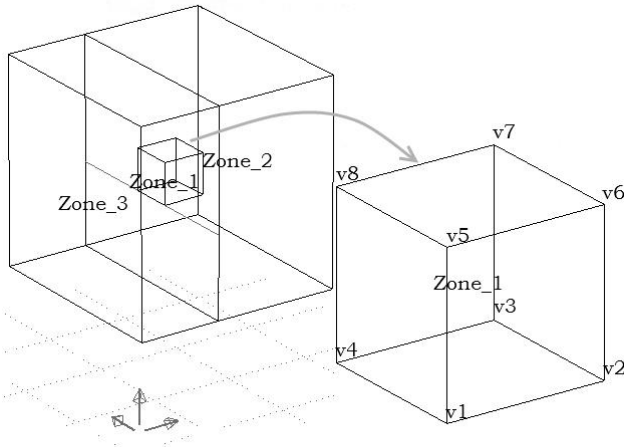
Rys. 1. Model obiektu rzeczywistego – schemat rozmieszczenia czujników temperatury: 1 i 2 - powietrze wewnętrzne i zewnętrzne, 3 i 4, 5 i 6 oraz 7 i 8 - powierzchnia wewnętrzna i zewnętrzna przegrody pionowej, poziomej górnej oraz dolnej

Fig. 1. Model of real object – schematic layout of temperature sensors: 1 i 2 - internal and external air, 3 i 4, 5 i 6, 7 i 8 - internal and external surface of the vertical, upper and bottom horizontal partitions



Rys. 2. Model obiektu wirtualnego dla zadania (I)

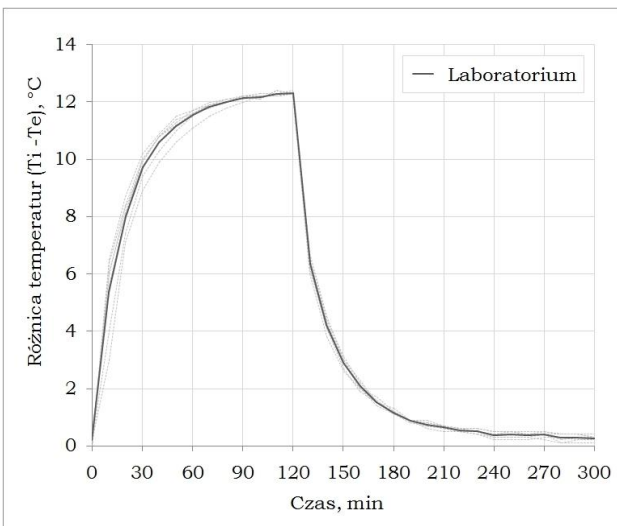
Fig. 2. Model of virtual object in task (I)



Rys. 3. Model obiektu wirtualnego dla zadania (II)  
Fig. 3. Model of virtual object in task (II)

Rysunek 4 przedstawia proces nagrzewania oraz wychładzania jednokomorowego obiektu badawczego (komory testowej); przy czym za reprezentatywny dla tego procesu uznano pomiar dokonywany w punkcie środkowym komory (punkcie 1 z rys.1).

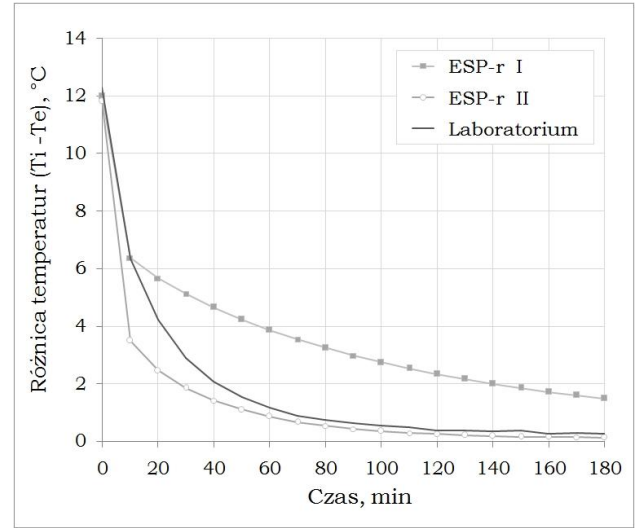
Eksperyment laboratoryjny przeprowadzono w miesiącu styczniu oraz lutym. W celu uzyskania wiarygodnych wyników, proces nagrzewania i wychładzania powtarzano kilkakrotnie



Rys. 4. Proces nagrzewania oraz wychładzania obiektu w badaniach laboratoryjnych  
Fig. 4. Cooling and heating process of the object in laboratory test

Na rysunku 5 zestawiono funkcje reprezentujące:

- proces wychładzania obiektu laboratoryjnego (komory testowej),
- wynik symulacji wychładzania w programie ESP-r - model I z rys.2,
- wynik symulacji wychładzania w programie ESP-r - model II z rys.3.



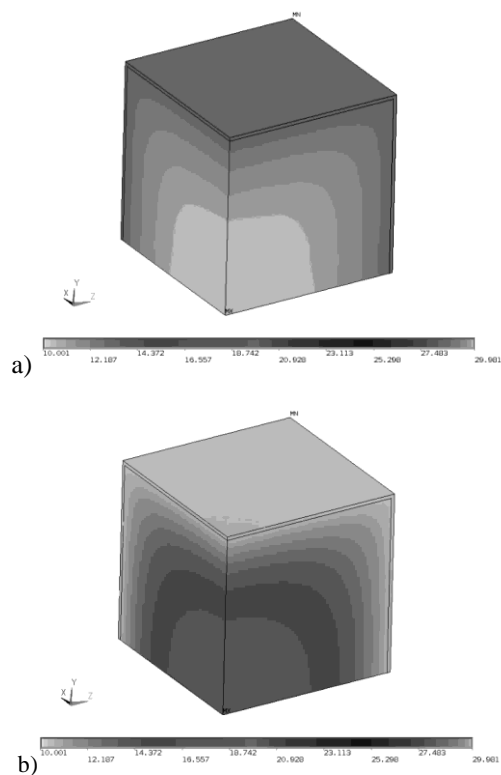
Rys. 5. Proces wychładzania obiektu rzeczywistego oraz wirtualnego  
Fig. 5. Cooling process of the real and virtual object

Utworzenie modelu komory jako „strefy w strefie” (model II z rys. 3) pozwoliło na uzyskanie funkcji wychładzania bliższej pomiarom laboratoryjnym. Ponadto zmiana kroku czasowego, przy którym generowane były wyniki, pozwoliła na kolejne, lepsze przybliżenie wyników symulacji do pomiarów laboratoryjnych.

Powyżej przedstawiono jedynie przebieg wyrównywania się temperatur obiekt badawczy – otoczenie ( $T_i \rightarrow T_e$ ).

Poszukiwanie szczegółowego rozkładu temperatur w przestrzeni, na powierzchni, czy w przegrodach komory testowej wymaga użycia innych sposobów symulacji zachodzących procesów termicznych. Jako przykład poszukiwań rozwiązań prowadzonych z użyciem MES [5] przytoczono rys. 6a i b przedstawiający wybrane etapy wychładzania wirtualnej komory badawczej przy temperaturze otoczenia  $T_e = 15^\circ\text{C}$  i konwekcyjnych warunkach brzegowych.

Na rysunku 7 zestawiono wyniki badań laboratoryjnych oraz analiz numerycznych w programie ESP-r (model II) i programie Ansys. Uzyskane rozwiązanie z Ansys w modelu uproszczonym jest bliskie wynikom symulacji dla modelu II z rys. 3.



Rys. 6. Model obiektu wirtualnego: a) 552s oraz b) 7007s eksperymentu numerycznego  
 Fig. 6. Model of virtual object: a) 552s and b) 7007s of the numerical experiment

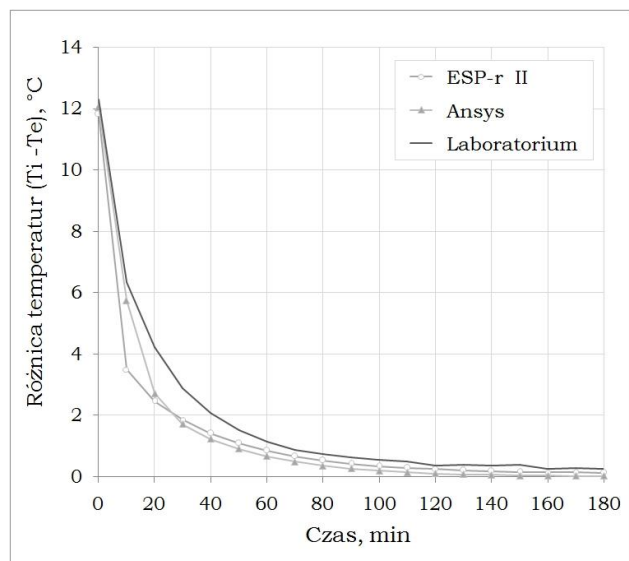
Kolejne, rozbudowane badania laboratoryjne oraz wielokrotne symulacje numeryczne powinny pozwolić na określenie warunków umożliwiających zbudowanie adekwatnej wirtualnej komory badawczej – wspomagającej lub zastępującej obiekt laboratoryjny – co potwierdza rys. 7.

### LABORATORY AND SIMULATION STUDIES OF THE TEST CHAMBER COOLING

**Summary:** The article presents the results of simulation analysis and laboratory studies of the test chamber cooling.

### Literatura

- [1] Garbalińska H., Bochenek M. *Izolacyjność termiczna a akumulacyjność cieplna wybranych materiałów ściennych*. Czasopismo Techniczne Architektura 11/2-A2 (2011) 81-96
- [2] Pokorska-Silva I. *Analysis of the test zone thermal behaviour with different boundary conditions*. PhD Interdisciplinary Journal 01 (2014) 225-231
- [3] ESP-r CookBook. University of Strathclyde, Glasgow UK, 20110
- [4] Panek A., Domoń P. *Metodyka walidacji programów komputerowych stosowanych do wyznaczania charakterystyki energetycznej budynków*. Energia i Budynek 09 (2007) 32-35
- [5] Ansys 12.1, dokumentacja programu, 2010.



Rys. 7. Proces wychładzania obiektu rzeczywistego oraz wirtualnego  
 Fig. 7. Cooling process of the real and virtual object