

Marta Kadela¹, Iwona Pokorska-Silva², Lidia Fedorowicz³

BADANIA IN SITU I SYMULACJE NUMERYCZNE W OCENIE ZACHOWAŃ TERMICZNYCH OBIEKTÓW BUDOWLANYCH

Wprowadzenie

Przeprowadzenie bardziej rozbudowanych analiz dotyczących klimatu wewnętrznego i zużycia energii w obiektach budowlanych wiąże się zazwyczaj ze stosowaniem odpowiednich narzędzi symulacyjnych (programów symulujących przepływy energii w stanach nieustalonych).

Ocena wiarygodności analizy łączy się dodatkowo z oceną wpływu zmian określonych parametrów (fizycznych, geometrycznych, klimatycznych itd.) na wynik końcowy prowadzonej symulacji. Rozważając problem w aspekcie klimatycznym, wiadomo, że parametry, takie jak: temperatura, różnica temperatur, napromienianie słoneczne, ruch powietrza, mają zdecydowany wpływ zarówno na zużycie energii, jak i wewnętrzny komfort termiczny badanego obiektu.

Symulowanie prostej odpowiedzi termicznej (obiektu jednostrefowego lub bardziej złożonego, wielostrefowego) wymaga kolejno:

- utworzenia modelu badanego obiektu,
- określenia warunków brzegowych,
- opisanie interakcji układu obiekt-otoczenie,
- wprowadzenia odpowiednich dla danego modelu parametrów fizycznych.

Procedura i budowa modelu obwarowana jest określonymi warunkami (rys. 1).

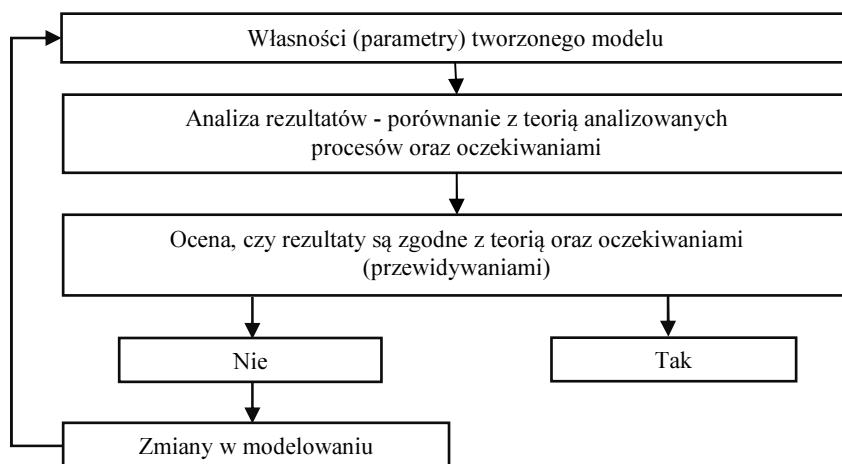
Modele matematyczne umożliwiające na analityczne (lub numeryczne) wyznaczenie funkcji przejścia strumieni ciepła przez przegrody strefy pozwalają m.in. na:

- otrzymanie rozkładu temperatur na powierzchniach przegrody,
- określenie czasu wychładzania obiektu (po wyłączeniu ogrzewania) czy
- ocenę wartości energii potrzebnej do zapewnienia określonego komfortu termicznego.

¹ Instytut Techniki Budowlanej, al. Korfantego 191, 40-153 Katowice, e-mail: m.kadela@itb.pl

² Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: iwona.pokorska-silva@polsl.pl

³ Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych, ul. Rolna 43, 40-555 Katowice, e-mail: lidiafedorowicz@gmail.com

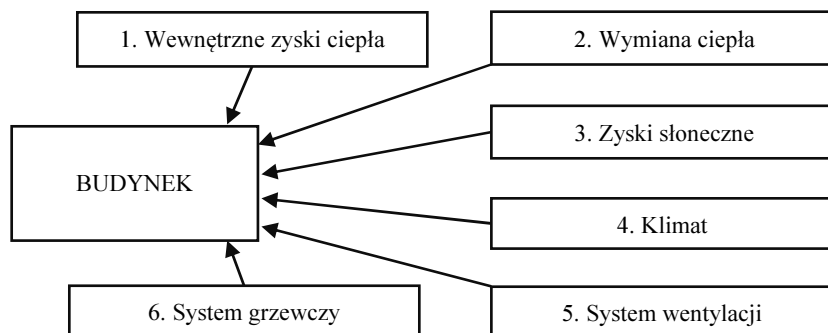


Rys. 1. Procedura budowy modelu

Określenie ilościowe zapotrzebowania energetycznego budynku umożliwia, na podstawie przyjętych kryteriów, wyznaczenie efektywności i jakości energetycznej badanego budynku. Chcąc najtrafniej ocenić jakość energetyczną domu i faktyczne koszty jego późniejszej eksploatacji (już na etapie projektu), najefektywniej jest wziąć pod uwagę jego wskaźnik zapotrzebowania na ciepło EU.

Współczynnik ten określa, jak dobrze dom jest zabezpieczony przed stratami ciepła - niezależnie od zainstalowanych w nim urządzeń grzewczych, strat energii w wyniku ich działania oraz oddziaływania urządzeń na środowisko.

W poniższych przykładach przedstawiono globalną ocenę stabilności termicznej odpowiedzi wewnętrznej obiektu. Ocena ta zostaje przeprowadzona poprzez wykonanie prostej symulacji numerycznej zachowania termicznego obiektu. Pozwala to w sposób uproszczony określić efektywność energetyczną budynku. Mając na uwadze taki efekt, przedstawiono w kolejnych rozdziałach badane i symulowane przez nas obiekty.



Rys. 2. Elementy uwzględnione w ocenie energetycznej obiektu

Na rysunku 2 zaznaczono elementy (1-6) wzięte pod uwagę w ocenie odpowiedzi termicznej przedstawionych w kolejnych rozdziałach trzech obiektów badawczych.

1. Symulacje wprowadzające w problem stabilności termicznej

Poniżej przedstawiono krótką analizę odpowiedzi termicznej (uzyskanej w programie ESP-r [1]) prostego obiektu 2-strefowego poddanego działaniu klimatu lokalnego w określonym przedziale czasu, rozważając wpływ elementów 2-6 z rysunku 2 na stabilność tej odpowiedzi. Dynamicznym zmianom klimatu lokalnego towarzyszy profil gruntowy o ustalonych miesięcznych wartościach.

W pracy rozważane są warunki stabilności termicznej obiektów, rozumianej jako brak wrażliwości - w założonych granicach ΔT i określonym przedziale czasu τ - temperatury wewnętrznej w strefie na dynamicznie zazwyczaj zmieniające się warunki zewnętrzne. Zastosowane tu pojęcie stabilności odpowiedzi termicznej obiektu ma oczywiste odniesienia do ogólnie rozumianej stateczności cieplnej przegrody lub pomieszczenia [2, 3].

Zwrócono jednak uwagę na praktyczny aspekt oceny globalnej stabilności termicznej obiektu w określonym przedziale czasu poprzez porównanie wyników symulacji (podrozdział 1.1) z zastosowaniem:

- (A) modelu obiektu rzeczywistego,
- (B) modelu uproszczonego (dla obiektu pozbawionego okna, czyli bez słonecznych zysków ciepła przez przegrodę przezroczystą).

Dopełnieniem powyższej oceny (podrozdział 1.2) jest badanie porównawcze funkcji czasu wychładzania obiektu, opisanego modelem (B) w warunkach:

- 1) stałej temperatury zewnętrznej $T_e = \text{const.}$,
- 2) temperatury zewnętrznej T_e zmieniającej się w sposób dynamiczny.

1.1. Obiekt 2-strefowy poddany działaniu klimatu lokalnego

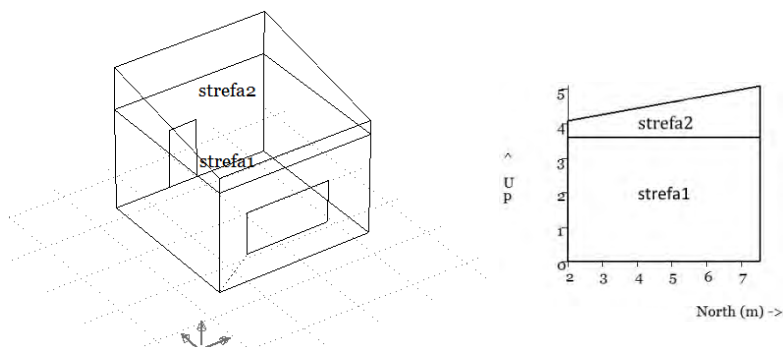
Wszystkie przegrody badanego obiektu o dwóch strefach (rys. 3) [4], dolnej ogrzewanej, górnej nieogrzewanej, dobrano tak, by spełniały wymagania aktualnych przepisów [5]. W analizach rozważono dwa poniższe warianty:

- (A) obiekt z oknem od strony południowej (rysunki 4-8 strona lewa),
- (B) obiekt pozbawiony okna (rysunki 4-8 strona prawa).

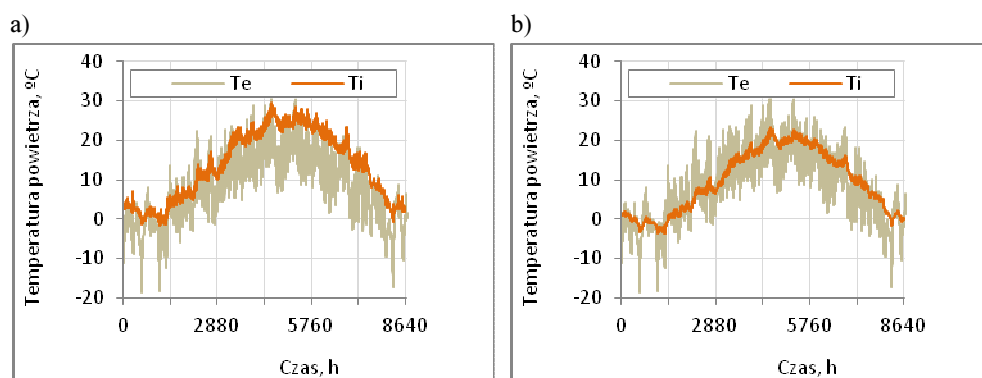
Oba przypadki przeanalizowano, wprowadzając (po początkowym wyłączeniu systemu grzewczego) ogrzewanie utrzymujące w pomieszczeniu użytkowym stałą temperaturę 20°C oraz wentylację naturalną (grawitacyjną oraz infiltrację).

Na rysunkach 4-8 zestawiono wyniki symulacji zachowania termicznego obiektu w ciągu całego roku kalendarzowego (rys. 4) oraz wybranych miesięcy, zimy i lata. Stosując model obiektu rzeczywistego (A) i uproszczonego (B), przedstawiono możliwość oceny stabilności termicznej obiektu poprzez określenie granicznych wartości ΔT i ΔT_1 (w założonym przedziale czasu τ) i porównanie ich

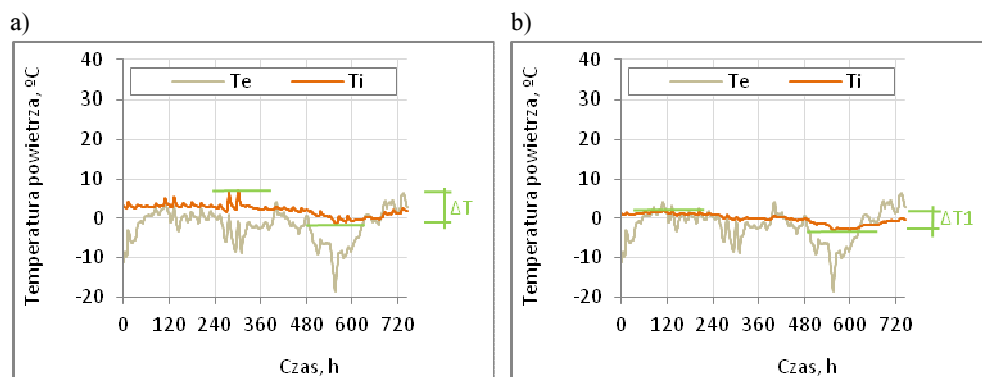
z oczekiwaną (przez użytkownika) wartością ΔT_w (rys. 5 i 7). Dopelnienie powyższego stanowi ocena zapotrzebowania na ciepło użytkowe Q (rys. 6 i 8), prowadząca dodatkowo do zapisanego poniżej spostrzeżenia.



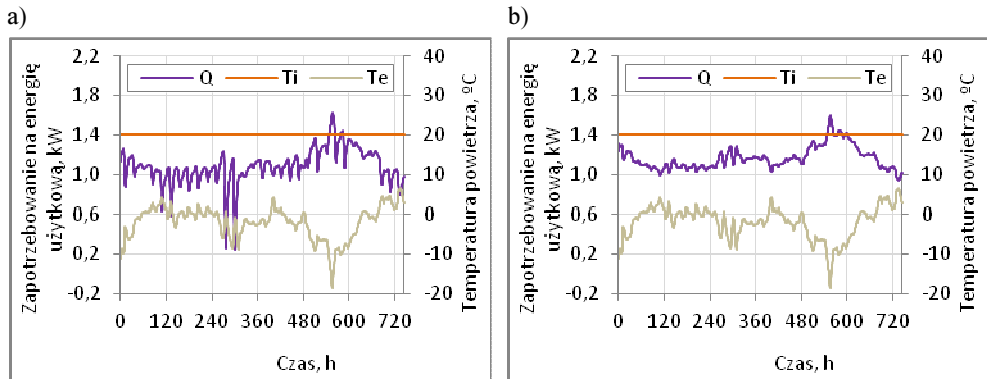
Rys. 3. Model obiektu z podziałem na strefy oraz przekrój pionowy



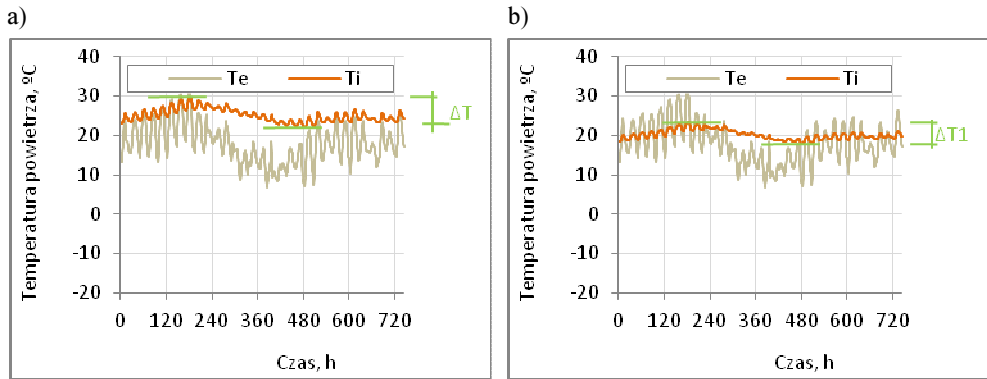
Rys. 4. Wartości temperatury wewnętrznej T_i w obiekcie nieogrzewanym oraz zewnętrznej T_e (01.01-31.12) - symulacja: a) model rzeczywisty A; b) model uproszczony B



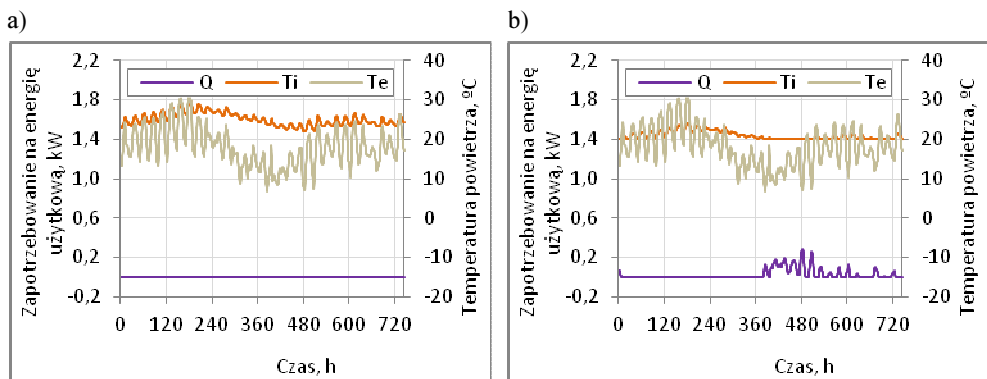
Rys. 5. Wartości temperatury wewnętrznej T_i w obiekcie nieogrzewanym oraz zewnętrznej T_e (01.01-31.01) - symulacja: a) model A z ΔT ; b) model B z ΔT_1



Rys. 6. Wartości: zapotrzebowania na energię Q , temperatury wewnętrznej T_i w obiekcie ogrzewanym oraz zewnętrznej T_e (01.01-31.01) - symulacja: a) model A; b) model B



Rys. 7. Wartości temperatury wewnętrznej T_i w obiekcie nieogrzewanym oraz zewnętrznej T_e (01.07-31.07) - symulacja: a) model A z ΔT ; b) model B z ΔT_1



Rys. 8. Wartości: zapotrzebowania na energię Q , temperatury wewnętrznej T_i w obiekcie ogrzewanym oraz zewnętrznej T_e (01.07-31.07) - symulacja: a) model A; b) model B

Ponieważ różnica w opisie rzeczywistości modelami - uproszczonym (B) i pełnym (A) - polega jedynie na zmianie w modelu B w ocenie energetycznej obiektu elementu 3 z rysunku 2 (słoneczne zyski - związane z oknem, którego wpływ w rzeczywistości może być łatwo modyfikowany), wynik symulacji w modelu B będzie miał zawsze charakter konserwatywny, czyli bezpieczny dla przeprowadzanej oceny.

1.2. Obiekt 2-strefowy poddany wychładzaniu

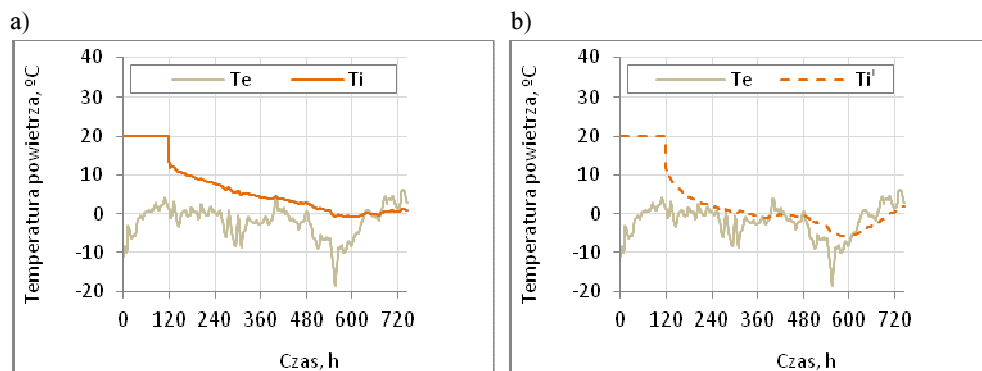
Obiekt opisany powyżej modelem uproszczonym (B), podrozdział 1.1, poddano badaniu czasu wychładzania - jako dodatkowej ocenie jakości energetycznej obiektu. Wyodrębniono kolejne elementy wpływające na wynik oceny:

- wartość współczynnika przenikania U dla przegród zewnętrznych,
- powierzchnię kontaktu obiektu z podłożem (temperatura gruntu T_g),
- wentylację obiektu (naturalną).

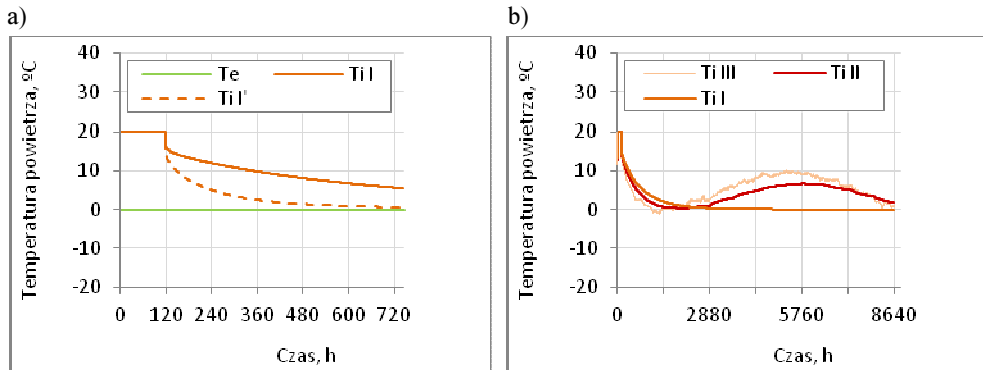
W analizie posłużono się oceną różnic w zachowaniu termicznym obiektu:

- w warunkach dynamicznego klimatu lokalnego, dla wartości współczynnika przenikania ciepła U jak w 1.1 - rys. 9a, dla wartości U_1 przegród bez izolacji - rys. 9b,
- dla warunków zewnętrznych odpowiadających zerowym wartościom temperatury i promieniowania - dla przegród zewnętrznych, łącznie z powierzchnią kontaktu z gruntem, z wyłączonym wpływem wentylacji - rys. 10a,
- dla warunków zewnętrznych odpowiadających zerowym wartościom temperatury i promieniowania - dla przegród zewnętrznych, w kontakcie z gruntem o profilu miesięcznym temperaturowym oraz z włączoną wentylacją - rys. 10b; analizę rozciągnięto na pełny rok kalendarzowy.

Uzyskano zatem wyraźny obraz stabilnej odpowiedzi termicznej obiektu (oraz możliwość oceny czasu wychładzania) dla odpowiednio niskich (realnych) wartości współczynnika U (rys. 9). Analiza z rysunku 10a, jako pomocnicza dla analizy z rysunku 10b, pozwoliła na czytelne wyodrębnienie wpływu elementów (b) i (c) z powyższej klasyfikacji na ocenę termicznej odpowiedzi obiektu.



Rys. 9. Wartości: temperatury zewnętrznej T_e oraz wewnętrznej w modelu B wychładzanym o przegrodach pionowych: a) z izolacją T_i ; b) bez izolacji T_i' - symulacja



Rys. 10. Wartości: a) temperatury zewnętrznej T_e oraz wewnętrznej T_i w modelu B o przegrodach z izolacją $T_i I$ bez izolacji $T_i I'$; b) temperatury wewnętrznej obiektu w kontakcie z gruntem $T_i II$ i obiektu z wentylacją i kontaktem z gruntem $T_i III$ - symulacja

2. Obiekty rzeczywiste

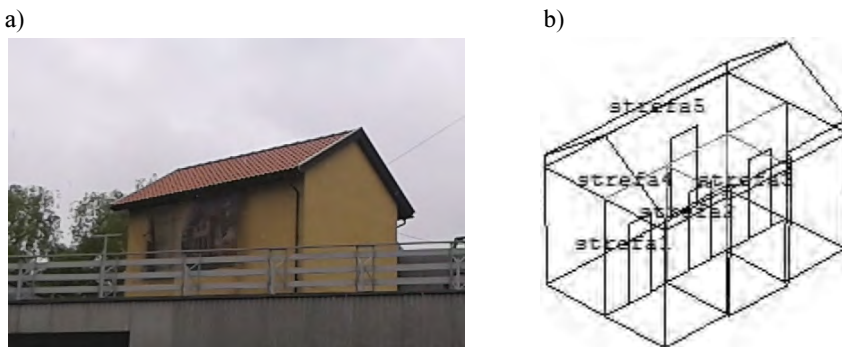
2.1. Obiekt doświadczalny - system rzeczywisty w warunkach in situ

Obiekt o przegrodach wykonanych w technologii szkieletu drewnianego (bez otworów okiennych) znajduje się na stanowisku badawczym KBOiFB (rys. 11). Współczynniki przenikania ciepła U przegród pionowych zewnętrznych wynoszą $0,19-0,09 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Pomiary termiczne prowadzono w podanych przedziałach czasu, rejestrując odpowiedź termiczną obiektu (temperaturę wewnętrzną oraz zużycie energii do ogrzewania):

1. 01.01.2015 do 31.01.2015 r. - w warunkach klimatu zewnętrznego,
2. 01.02.2015 do 08.03.2015 r. - dwukrotnie nagrzewając i wychładzając obiekt,
3. 09.03.2015 do 08.03.2016 r. - utrzymując w obiekcie minimalną temperaturę (w godzinach 22:00-6:00 $16 \pm 0,5^\circ\text{C}$, w godzinach 6:00-22:00 $18 \pm 0,5^\circ\text{C}$).

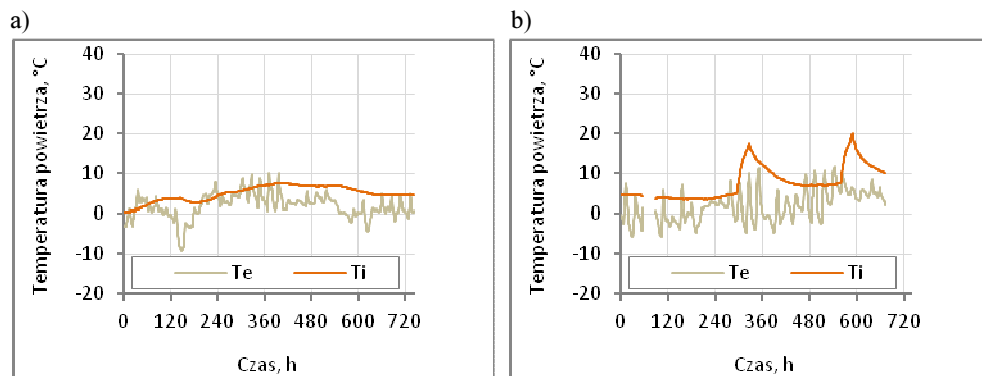
Badania obejmowały także pomiar parametrów klimatu lokalnego.



Rys. 11. a) Widok obiektu doświadczalnego; b) model obiektu w programie ESP-r

Rysunek 12 daje obraz stabilnej (mało dynamicznej) odpowiedzi obiektu w badawczych warunkach termicznych: przy wpływie klimatu zewnętrznego (rys. 12a) oraz na proces nagrzewania i wychładzania (rys. 12b).

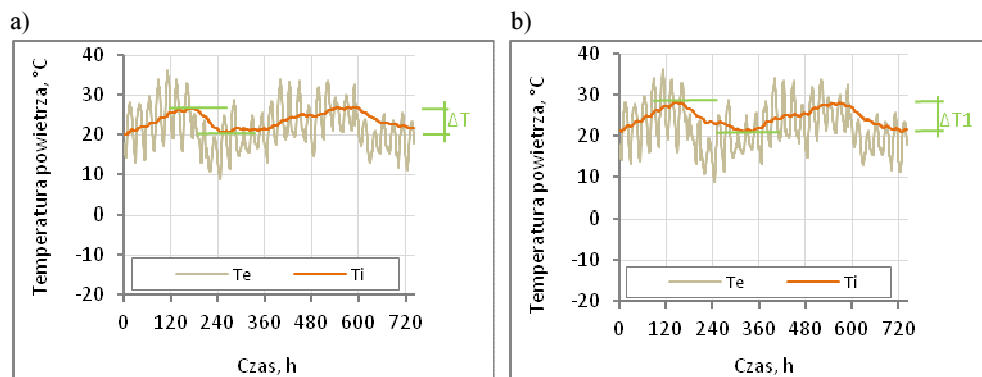
Charakter otrzymywanej odpowiedzi termicznej - funkcji wychładzania - w obiekcie badawczym przez brak otworów okiennych może być porównywany (z odniesieniem do rzeczywistych wartości współczynników U) do symulowanej odpowiedzi termicznej obiektu analizowanego w podrozdziale 1.2 - rys. 9a.



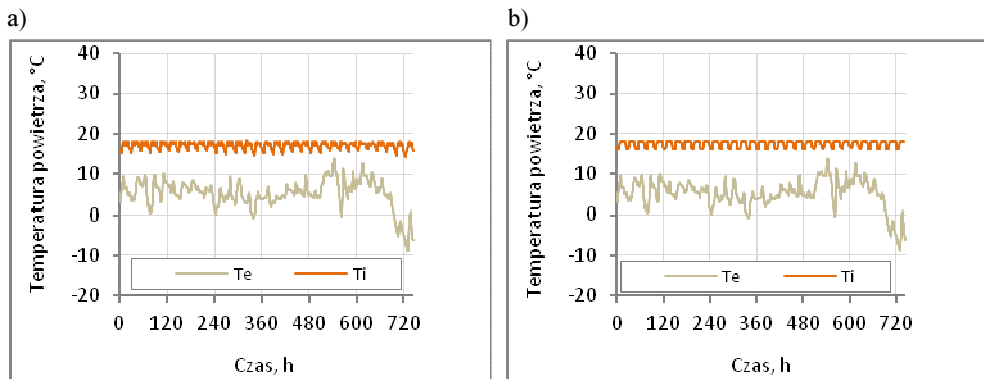
Rys. 12. Wartości temperatury wewnętrznej T_i oraz zewnętrznej T_e - badania w okresie: a) (01.01-31.01.2015); b) (01.02-28.02.2015)

Przedstawione na rysunkach 13-15 zapisy pomiarów i symulacji dają ogłąd zadowalająco stabilnego termicznie zachowania obiektu w dwóch skrajnie różnych przedziałach czasowych, w miesiącach lipiec i grudzień; w postaci temperatury wewnętrznej (rys. 13) oraz zużycia energii do ogrzewania (rys. 15).

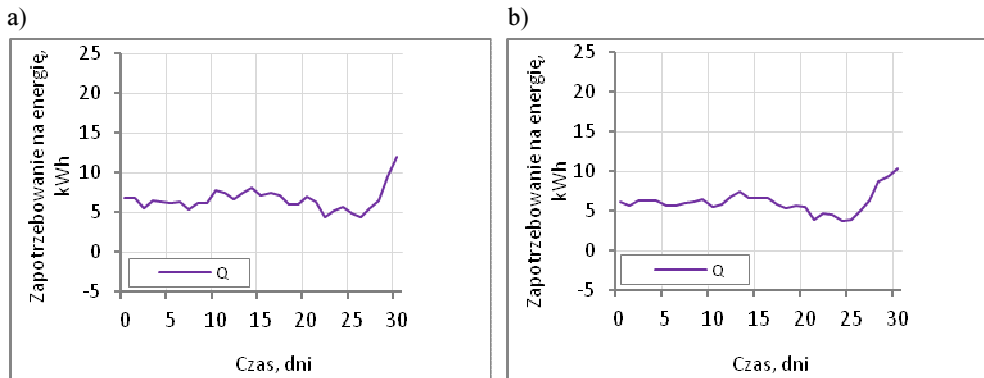
Badając stabilność termiczną obiektu rozumianą jako brak wrażliwości na warunki zewnętrzne, w założonych granicach ΔT i określonym przedziale czasu τ , należy zwrócić uwagę na potrzebę dostosowania oczekiwanych wartości ΔT (w zadanym przedziale τ) do zmienności rzeczywistego klimatu lokalnego.



Rys. 13. Wartości temperatury wewnętrznej T_i oraz zewnętrznej T_e (01.07-31.07.2015) a) badania z ΔT ; b) symulacja z ΔT_1



Rys. 14. Wartości temperatury wewnętrznej T_i oraz zewnętrznej T_e (01.12-31.12.2015):
a) badania; b) symulacja



Rys. 15. Wartości zapotrzebowania na energię Q (01.12-31.12.2015): a) badania;
b) symulacja

2.2. Obiekt rzeczywisty mieszkalny

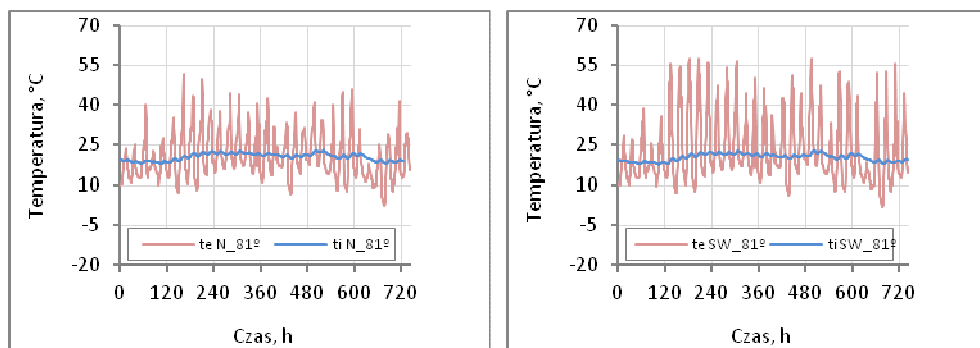
Przedmiotem wybranych badań termicznych jest budowany obiekt mieszkalny w kształcie kopuły (rys. 16). Rysunki 16-18 przedstawiają wybrany fragment badań, prowadzonych w warunkach in situ, nakierowanych na ocenę stabilności termicznej obiektu o charakterystycznej geometrii i budowie przegrody zewnętrznej, wynikającej ze stosowanej technologii.

Na rysunku 17 pokazano silnie dynamiczne zmiany temperatury na powierzchni zewnętrznej t_e i stabilny przebieg temperatury pomierzonej na powierzchni wewnętrznej t_i (w okresie budowy, w podanym przedziale czasu τ).

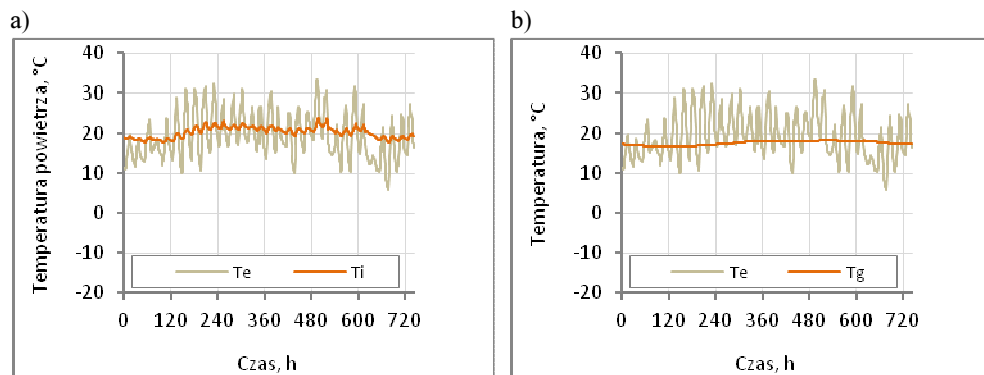
Rysunek 18b daje obraz stabilnej temperatury T_g pod obiektem (pod warstwami wyrównawczą i ciepłochronną). Badania odpowiedzi termicznej gruntu przeprowadzono w dwóch profilach pionowych (do głębokości ok. 2 m). Globalną odpowiedź termiczną obiektu jako reakcję na zewnętrzne dynamiczne zmiany pokazuje rysunek 18a, stanowiąc niejako „tło” dla pozostałych rysunków.



Rys. 16. Widok badanego obiektu oraz uproszczony model geometryczny z punktami pomiarowymi



Rys. 17. Wartości temperatury na powierzchni wewnętrznej t_i oraz zewnętrznej t_e - płaszczyzna północna 81° i południowo-zachodnia 81° (15.07-14.08.2016) - badania

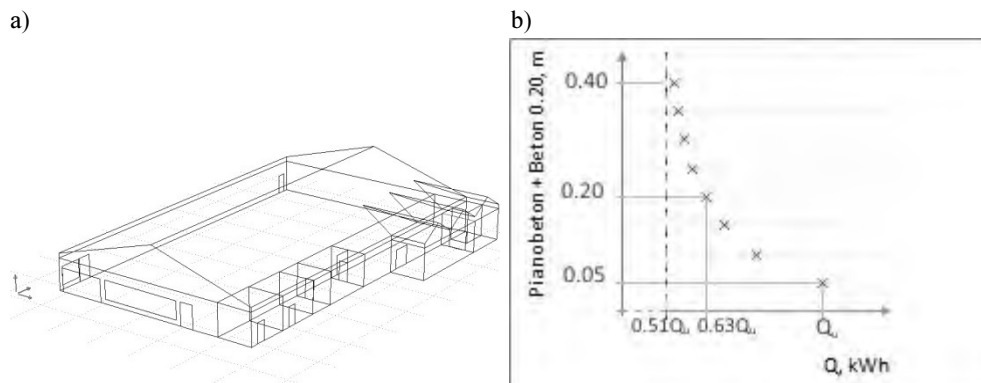


Rys. 18. Wartości temperatury zewnętrznej T_e oraz: a) temperatury wewnętrznej T_i ; b) temperatury gruntu T_g pod obiektem (15.07-14.08.2016) - badania

2.3. Przykład trzeci - obiekt rzeczywisty usługowy

Rysunek 19a stanowi obraz skuteczności symulacji badawczej - rejestrującej globalną odpowiedź termiczną dużego obiektu usługowego (rys. 19b). Przedmiotem oceny była przydatność wprowadzanych kolejno warstw materiału ciepłochronnego (pianobetonu) na otrzymywaną oszczędność energii Q wyznaczonej dla pokazanej, silnie asymptotycznej funkcji z rysunku 19a.

Analizowany obiekt usytuowany jest w warunkach klimatu lokalnego Katowic, w którym to utrzymywana jest stała temperatura $18 \div 22^\circ\text{C}$.



Rys. 19. a) Model obiektu analizowany w symulacji; b) wynik symulacji badawczej

Podsumowanie

W pracy przedstawiono możliwości podstawowej, a równocześnie bezpiecznej, konserwatywnej oceny stabilności termicznej badanego obiektu (zdefiniowanej w rozdziale 1) poprzez symulacje z zastosowaniem modeli o zaproponowanych uproszczeniach.

Przedstawiono propozycje różnych podejść do oceny termicznego zachowania badanych obiektów:

- od oceny ogólnej wrażliwości odpowiedzi termicznej obiektu (strefy) w symulacjach z zastosowaniem modeli o wprowadzonych celowo uproszczeniach; przykładowo z wyeliminowanym wpływem otworów na odpowiedź termiczną obiektu i jego zapotrzebowanie na energię cieplną,
- poprzez ocenę już stricte stabilności termicznej obiektu z dodatkową oceną czasu wychładzania (po uprzednim kontrolowanym nagrzewaniu),
- do badań in situ odpowiedzi przegrody (i całego obiektu) w warunkach rzeczywistych (określonych co do klimatu i lokalizacji obiektu).

Przeprowadzone analizy potwierdziły skuteczność symulacji o charakterze badawczym przy ocenie m.in. wpływu modyfikacji materiałów na jego energooszczędność.

Literatura

- [1] ESP-r CookBook, University of Strathclyde, Glasgow UK, 20110.
- [2] Gieryło R., Nowoczesny standard energetyczny budynków, Poradnik, Oficyna Wydawnicza Polcen, Warszawa 2015.
- [3] Klemm P., Pogorzelski J.A., Budownictwo ogólne, t. 2, Fizyka budowli, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2005.

- [4] Fedorowicz L., Pokorska-Silva I., Wspomaganie symulacją oceny energetycznej budynku, *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach* 2016, 8, 87-96.
- [5] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002, Nr 75, poz. 690 z późniejszymi zmianami).

Streszczenie

Wykonanie analiz numerycznych zachowań budynków w programach symulacyjnych wymaga zastosowania odpowiedniej bazy klimatycznej o zmieniających się dynamicznie wielkościach natężenia promieniowania słonecznego (rozproszonego i bezpośredniego), temperatury powietrza, prędkości i kierunku wiatru oraz wilgotności względnej powietrza. W artykule przedstawiono powiązane ze sobą zagadnienia oceny zachowania termicznego w warunkach in situ oraz w symulacjach numerycznych, dotyczące kolejno:

- obiektu doświadczalnego analizowanego w warunkach klimatu lokalnego (badania na stanowisku KBOiFB w Gliwicach),
- rzeczywistego obiektu mieszkalnego w kształcie kopuły,
- obiektu o przeznaczeniu usługowym o eksperymentalnej warstwie termiczno-chronnej z pianobetonu.

Przedstawione w niniejszym artykule wyniki są częścią badań prowadzonych w ramach projektu badawczego „*Wzmacnianie słabego podłoża poprzez zastosowanie warstwy z pianobetonu w kontakcie z podłożem gruntowym*” (LIDER/022/537/L-4/NCBR/2013), finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu LIDER IV, a także badań prowadzonych w ramach tematu BKM-504/RB03/2015.

Słowa kluczowe: symulacja numeryczna, odpowiedź termiczna obiektu, stabilność termiczna

In situ and numerical simulations in evaluation of the thermal behaviours of buildings

Abstract

Numerical analysis of the behavior of buildings in simulation programs require the use of an appropriate climate database with dynamically changing values of solar radiation (diffuse and direct), air temperature, relative humidity, wind speed and direction. In this paper will be presented inter-linked issues of assessment of the building thermal behavior, in situ and in numerical simulations, for:

- analyzed experimental object situated in the local climate (laboratory of The Technical University in Gliwice),
- real residential building in the shape of a dome,
- object intended for service industry with experimental thermal protective layer of foam concrete.

This work was supported by the on-going research project “*Stabilization of weak soil by application of layer of foamed concrete used in contact with subsoil*” (LIDER/022/537/L-4/NCBR/2013), financed by The National Centre for Research and Development within the LIDER Programme as well as research related to BKM-504/RB03/2015.

Keywords: numerical simulation, thermal response of the object, thermal stability