

**Lidia FEDOROWICZ**

Wyższa Szkoła techniczna w Katowicach, Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk  
Stosowanych, ul. Rolna 43, Katowice; e-mail: [lidiafedorowicz@gmail.com](mailto:lidiafedorowicz@gmail.com)

**Iwona POKORSKA-SILVA**

Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, Gliwice;  
e-mail: [iwona.pokorska-silva@polsl.pl](mailto:iwona.pokorska-silva@polsl.pl)

## WSPOMAGANIE SYMULACJĄ OCENY ENERGETYCZNEJ BUDYNKU

s. 87-96

### STRESZCZENIE

Przedstawiono istotne elementy charakterystyki energetycznej budynku wyznaczone zgodnie z metodologią z Rozporządzenia [1] oraz za pomocą komputerowej symulacji procesów wymiany masy i energii zachodzących w budynku, pokazując i ustosunkowując się do różnic w wynikach uzyskanych w obu podejściach przy ocenie zapotrzebowania na energię. Zasygnalizowano rolę przeprowadzanej analizy w ogólnym procesie kalibrowania modelu obliczeniowego.

### SŁOWA KLUCZOWE

charakterystyka energetyczna, symulacja komputerowa, klimat lokalny, dynamiczna wymiana ciepła

### WPROWADZENIE

W krajach Unii bazę dla pełniejszego, aniżeli wcześniejsze podejścia, zapisu charakterystyki energetycznej budynków, z uwzględnieniem zewnętrznych warunków klimatycznych (w tym lokalnych), wymagań dotyczących klimatu wewnętrznego oraz opłacalności ekonomicznej – stanowi Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europy [2].

Pod pojęciem charakterystyka energetyczna budynku rozumie się taką ilość energii, uzyskaną za pomocą obliczeń lub zmierzoną, która potrzebna jest do zaspokojenie zapotrzebowania na energię związaną z użytkowaniem budynku.

Zmiany wprowadzone w przepisach Prawa Budowlanego [3] to efekt „obostrzeń” energetycznych w polityce europejskiej. Porządkując – wymagania Dyrektywy podaje ustawa o charakterystyce energetycznej [4], Rozporządzenie [1] określa natomiast metodologię obliczania charakterystyki energetycznej, sposób sporządzania świadectwa charakterystyki energetycznej oraz wzory świadectw charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku.

### Podstawy metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku

W Rozporządzeniu [1] podane są dwie metody wyznaczania charakterystyki energetycznej: obliczeniowa oraz zużyciowa. Metoda obliczeniowa uznawana jest za bardziej obiektywną, gdyż oparta jest na standardowym sposobie użytkowania oraz standardowych danych klimatycznych. Metoda zużyciowa jest natomiast, w odniesieniu do warunków lokalnych dokładniejsza, ponieważ sprzęga rzeczywiste potrzeby użytkownika z uwzględnieniem klimatu lokalnego. Wartości zapotrzebowania na energię dla poszczególnych obiektów nie mogą jednak tworzyć bazy dla uogólnień. Zwykle w praktyce używana jest metoda obliczeniowa, w której wyznaczane są:

- współczynnik strat ciepła przez przenikanie przez obudowę oraz wentylację,
- miesięczne straty ciepła przez przenikanie i wentylację,
- miesięczne zyski ciepła od nasłonecznienia i wewnętrzne oraz współczynnik ich wykorzystania,
- miesięczne zapotrzebowanie ciepła użytkowego na ogrzewanie i wentylację,
- **roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji  $Q_{H,nd}$** ,
- roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do przygotowania ciepłej wody użytkowej  $Q_{W,nd}$
- roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do chłodzenia  $Q_{C,nd}$ ,
- roczne zapotrzebowanie energii użytkowej  $Q_u$

$$Q_u = Q_{H,nd} + Q_{W,nd} + Q_{C,nd} \quad (1)$$

- wskaźnik rocznego zapotrzebowania energii użytkowej EU,
- średnia sprawność sezonowa systemu ogrzewczego i chłodzenia oraz roczna systemu przygotowania ciepłej wody,
- roczne zapotrzebowanie na energię końcową dostarczoną do budynku dla systemu ogrzewczego  $Q_{k,H}$ , przygotowania ciepłej wody użytkowej  $Q_{k,W}$ , chłodzenia  $Q_{k,C}$  oraz systemu wbudowanej instalacji oświetlenia  $Q_{k,L}$ ,
- roczne zapotrzebowanie na energię pomocniczą  $E_{el,pom}$ ,
- roczne zapotrzebowanie energii końcowej  $Q_k$ ,

$$Q_k = Q_{k,H} + Q_{k,W} + Q_{k,C} + Q_{k,L} + E_{el,pom} \quad (2)$$

- wskaźnik rocznego zapotrzebowania energii końcowej EK,
- współczynniki nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej,
- roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną dla systemu ogrzewczego  $Q_{p,H}$ , przygotowania ciepłej wody użytkowej  $Q_{p,W}$ , chłodzenia  $Q_{p,C}$  oraz systemu wbudowanej instalacji oświetlenia  $Q_{p,L}$ ,
- roczne zapotrzebowanie nieodnawialnej energii pierwotnej  $Q_p$ ,

$$Q_p = Q_{p,H} + Q_{p,W} + Q_{p,C} + Q_{p,L} \quad (3)$$

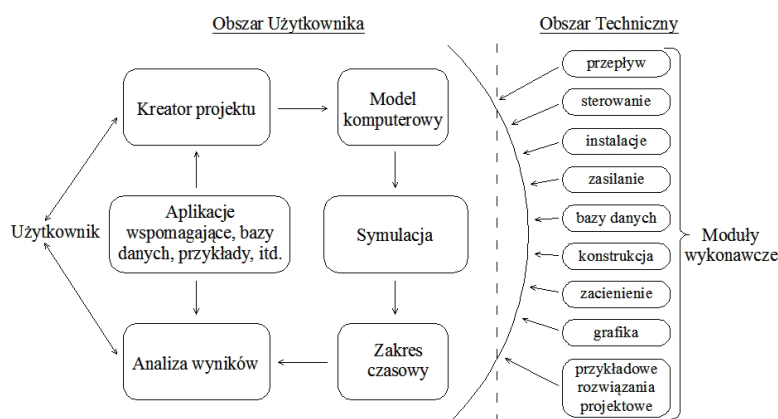
- wskaźnik rocznego zapotrzebowania nieodnawialnej energii pierwotnej EP.  
 Wyróżnione powyżej (czcionka pogrubiona) roczne zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji jest przedmiotem przedstawionej analizy, co wynika z dwóch aspektów takiego podejścia. Pierwszy, to stwierdzenie, że najtrafniejsza ocena jakości energetycznej budynku i faktycznych kosztów jego późniejszej eksploatacji już na etapie projektu wynika z właściwej oceny zapotrzebowania na ciepło. Drugi aspekt wiąże się z rozdziałami 2÷4.

### Narzędzia symulacyjne

W celu przeprowadzeniu poniższych analiz (spośród wielu dostępnych programów symulacyjnych wspomagających ocenę zachowania badanego obiektu) wybrano program *ESP-r Environmental Systems Performance*, pozwalający na analizę dynamicznego zachowania budynku oraz jego elementów. W programie ESP-r dyskretyzacja przestrzeni dokonywana jest metodą objętości skończonych. Model obiektu dzielony jest na podobszary opisywane przez węzły stanowiące sieć wzajemnych połączeń. Dla każdego z węzłów spełniona jest zasada zachowania energii i masy [5].

Model obiektu budowany jest poprzez jego podział na strefy. Każdej ze stref przypisywane są parametry materiałowe, konstrukcyjne, przepływy energii i masy, wybrany system ogrzewania (chłodzenia) czy klimatyzacji. Kolejno określa się oddziaływania pomiędzy poszczególnymi strefami.

Program symulacyjny ogólnie składa się z modułów odpowiedzialnych za operacje wykonywane na modelu, którego budowa, wraz z uwzględnieniem elementów „rozbudowujących” (przykładowo moduły wykonawcze na rys.1) ma wpływ na wyniki końcowe symulacji. Rysunek 1 przedstawia podstawowy schemat programu ESP-r.



Rys. 1. Schemat programu ESP-r [5]  
 Fig. 1. Structure of ESP-r [5]

### Dane klimatyczne

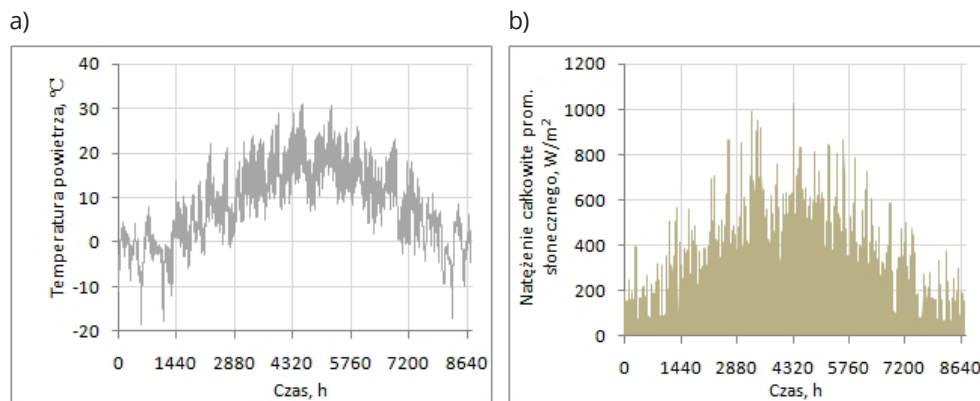
W obliczeniach energetycznych w budownictwie wykorzystuje się lokalne dane klimatyczne bazujące na długoletnich pomiarach. Dla obszaru Polski udostępnione zostały na stronie Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa bazy klimatyczne z 61 stacji; w postaci typowych lat meteorologicznych oraz opracowanych dla nich danych statystycznych.

Obliczenia charakterystyk energetycznych budynków bazują m.in. na wartościach sum całkowitego promieniowania na płaszczyznę (horyzontalną lub nachyloną, jak również zorientowaną względem stron świata) oraz średnich miesięcznych temperaturach powietrza.

Złożone analizy energetyczne, wykonywane w programach symulacyjnych, wymagają jednak posłużenia się bardziej szczegółowymi danymi – w postaci wartości godzinowych. Przeprowadzenie analiz w programie symulacyjnym ESP-r wymaga

zatem wprowadzenia odpowiedniej bazy klimatycznej, złożonej z wartości godzinowych następujących zmiennych klimatycznych: natężenia rozproszonego promieniowania słonecznego, natężenia bezpośredniego promieniowania słonecznego, temperatury powietrza, prędkości i kierunku wiatru, wilgotności względnej powietrza.

Poniższe rysunki (rys. 2a i 2b) przedstawiają, przykładowo temperaturę powietrza zewnętrznego oraz natężenie całkowite promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną dla typowego roku meteorologicznego Katowic.



Rys. 2. Wartości: a) temperatury powietrza zewnętrznego, b) natężenia całkowitego promieniowania słonecznego na płaszczyznę horyzontalną dla typowego roku meteorologicznego (Katowice) [7]

Fig. 2. Values of: a) the external air temperature, b) the intensity of total solar radiation on a horizontal plane for a typical meteorological year (Katowice) [7]

### Sformułowanie zagadnienia

Publikacje typu „vademecum właściwego wyboru” (m.in. położenia, materiałów, kształtu, wyposażenia domu) stwarzają pozory rozwiązań wszelkich problemów energooszczędności w budownictwie. Jednakże wykonanie prostych nawet analiz, tak jak przykładowo przedstawione w artykule, pokazuje, co wnieść może symulacja komputerowa w ocenę termicznego zachowania badanego obiektu w porównaniu z oceną obliczeniową wg [1].

Poniżej przedstawiono wyniki analizy zapotrzebowania ciepła na cele grzewcze obiektu z rys. 3a, otrzymane dwiema metodami:

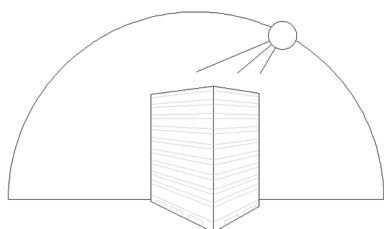
- (I) zgodnie z metodologią wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku – metoda obliczeniowa,
- (II) przy użyciu programu ESP-r – metoda numeryczna.

Dla wyraźnego pokazania, zachowania obiektu w warunkach klikatu lokalnego i czytelnego wyodrębnienia różnic pomiędzy metodami (I) i (II), analizę przeprowadzono przyjmując obiekt o prostej geometrii (rys. 3a) oraz o wyraźnej orientacji ścian perforowanych względem stron świata (północ-południe).

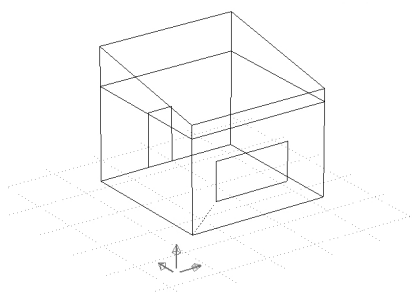
Badany obiekt uznajemy za wolnostojący, niepodpiwniczony jednopiętrowy budynek mieszkalny o nieużytkowym poddaszu. Część użytkową stanowi pomieszczenie o wymiarach 5,550 x 5,550 x 3,585 m, ponad nim znajduje się poddasze nieużytkowe. Wprowadzono ogrzewanie ciągłe, utrzymujące w pomieszczeniu użytkowym stałą temperaturę 20°C oraz przyjęto wentylację naturalną (grawitacyjną oraz infiltrację).

Pominięto zyski wewnętrzne. Wszystkie przegrody dobrano tak by spełniały wymagania aktualnych przepisów [6]; Tab. 1.

a)



b)



Rys. 3. a) Idea symulacji, b) model obiektu  
 Fig. 3. a) The concept of simulation, b) Model of the object

Tabela 1. Wartości współczynników przenikania ciepła przegród

Rodzaj przegrody	Budowa / grubość przegrody, m	Współczynnik przenikania ciepła $U(U_{eq})$ , W/m <sup>2</sup> K	Współczynnik przenikania ciepła $U_{C(max)}$ W/m <sup>2</sup> K (od 01.01.17 r. [6])
Ściana zewnętrzna	tynk cementowy 0.015 styropian EPS 0.14 cegła pełna 0.38 tynk cementowy 0.015	0,20	0,23
Podłoga na gruncie	grunt rodzimy 0.40 żwir zagęszczony 0.15 podkład betonowy 0.10 styropian EPS 0.06 posadzka betonowa 0.10	(0,26)	0,30
Strop nad częścią użytkową	strop betonowy 0.10 wełna mineralna 0.22 wylewka betonowa 0.04	0,17	0,18
Okno	Oszklenie potrójne	1,10	1,10
Drzwi	Drewniane izolowane	1,50	1,50

Ponieważ badania mają charakter na pół akademicki, w analizach wykonanych metodą obliczeniową oraz numeryczną przy wyznaczaniu energii użytkowej rozważono dwa poniższe warianty:

- (A) obiekt z oknem od strony południowej (we wszystkich rysunkach – strona lewa),
- (B) obiekt pozbawiony okna (we wszystkich rysunkach – strona prawa).

Jak już zaznaczono, przedmiotem analiz była energia ( $Q_{H,nd}$ ), której wartość stanowi podstawowy miernik ekonomiczności danego budynku.

### Wyniki analiz i wnioski

Wartości zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji – uzyskane za pomocą metody symulacyjnej oraz obliczeniowej – przedstawiono w Tabeli 2. Całość poprzedzono wstępnymi analizami. Przeprowadzono mianowicie prosty proces kalibrowania tworzonego modelu obliczeniowego, weryfikując zgodność obu metod na poziomie wyjściowym. Do strefy użytkowej (nie perforowanej – wariant (B)) dodawano kolejno poddasze nieużytkowe, wentylację, drzwi oraz okno analizując wyniki.

Różnica w zużyciu ciepła, określona rocznym zapotrzebowaniem na energię użytkową, oceniona w modelu w strefie użytkowej (B) oraz wg [1] nie przekracza 2%. Przy rozbudowywaniu wyjściowej strefy użytkowej o kolejne elementy różnice te ulegają zwiększeniu. Jednak, aby wyniki uzyskane w modelu obliczeniowym (tu model w programie ESP-r) można było uznać za wiarygodne, budowany model powinien zostać wstępnie wykalibrowany.

Opis procesu kalibrowania modelu, w którym odpowiedź termiczna obiektu, reprezentującego wyjściową strefę użytkową – ocenianą w procesie wychładzania realizowanym w laboratorium – była porównywana z odpowiedzią w programie ESP-r oraz programie Ansys zamieszczono w [8, 9].

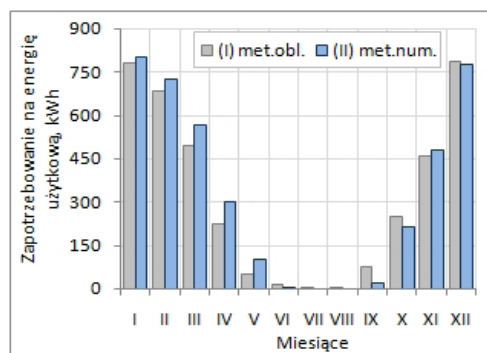
Na zapotrzebowanie na energię (pierwotną, końcową, użytkową) wpływa wiele czynników, takich jak lokalizacja, usytuowanie względem stron świata, rodzaj zastosowanego paliwa do ogrzewania, ilość mieszkańców itp., stąd proces symulowania wydaje się procesem w pełni odpowiadającym na takie potrzeby – rysunki 4÷9.

Tabela 2. Wartości zapotrzebowania na energię użytkową do ogrzewania i wentylacji

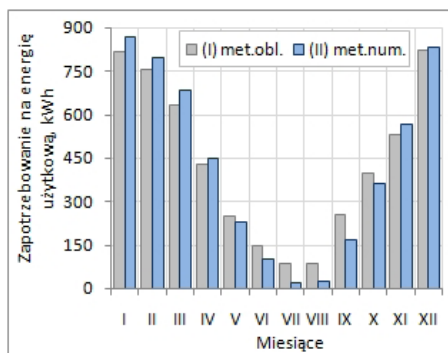
Wariant	Metoda	Energia użytkowa, kWh/rok
A	obliczeniowa	3812.6
	numeryczna	3984.8
B	obliczeniowa	5189,4
	numeryczna	5085.4

Rysunek 4 pokazuje istotę różnic między oceną zapotrzebowania na ciepło użytkowe na ogrzewanie i wentylację przeprowadzoną metodą obliczeniową, a podejściem symulacyjnym. Przedstawiono miesięczne zapotrzebowanie na energię, tak jak otrzymuje się je w metodzie (I) oraz wyniki sprowadzone do tej samej postaci w rozwiązaniu symulacyjnym (II).

a)



b)

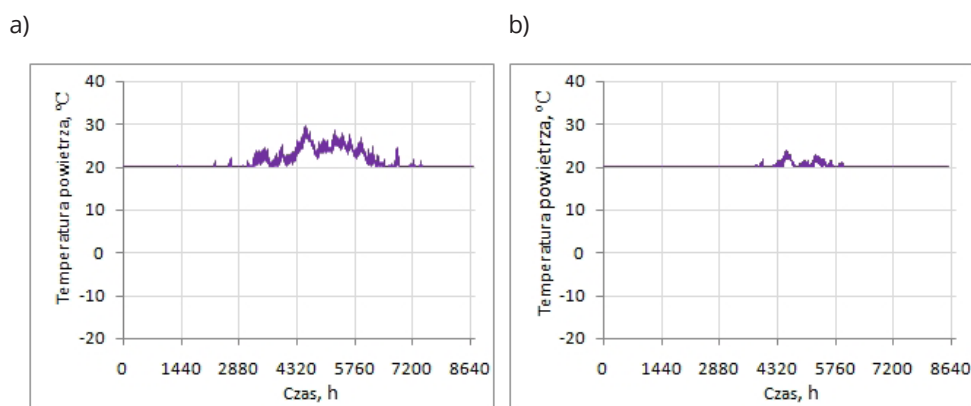


Rys. 4. Wartości zapotrzebowania na energię użytkową dla badanego obiektu otrzymane metodami (I) i (II); a) dla wariantu A, b) dla wariantu B

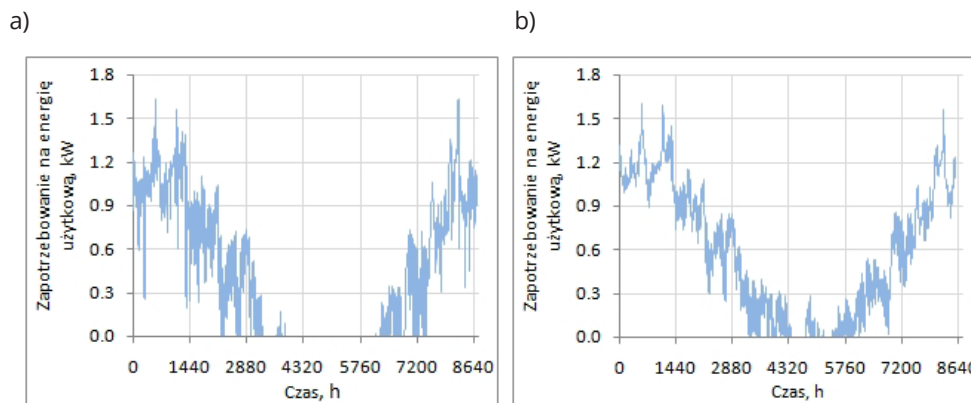
Fig. 4. Values of the demand for usable energy – methods (I) i (II): a) variant A, b) variant B

Wychodząc od analizy miesięcznego zapotrzebowania na energię z rys. 4 (gdzie lewa strona reprezentuje badany obiekt o dużym oknie południowym – wariant A, prawa strona obiekt pozbawiony tego okna – wariant B) możemy prześledzić rzeczywistą, dynamiczną odpowiedź badanego obiektu, możliwą do uzyskania jedynie poprzez symulację:

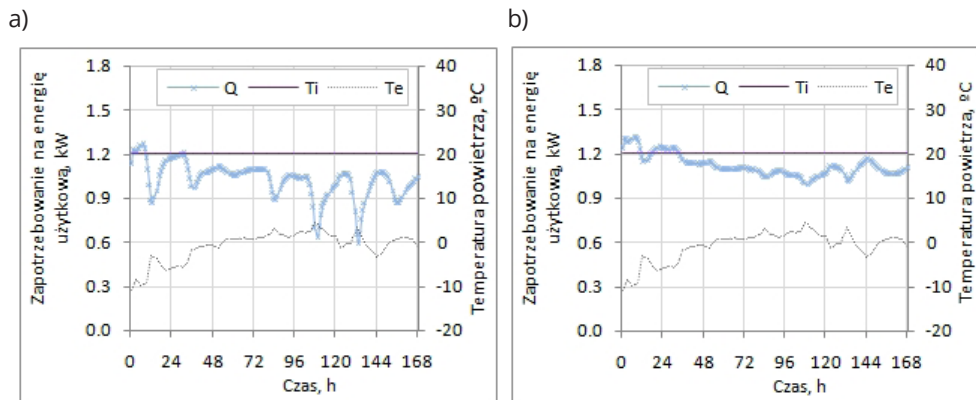
1. zmienność temperatury wewnętrznej w pomieszczeniu użytkowym (dla wariantu A i wariantu B), przy ustalonej wartości temperatury wewnętrznej  $T_i \geq 20^\circ\text{C}$  – rys. 5,
2. zmienne, dynamiczne zapotrzebowanie na energię (dla wariantu A i wariantu B) – rys. 6,
3. zapotrzebowanie na energię obiektu, w zależności od temperatury zewnętrznej  $T_e$  oraz odpowiedź w postaci temperatury wewnętrznej  $T_i$  – rysunki 7 i 8, gdzie dla pozycji 1. i 2. rola zysków pochodzących od promieniowania jest wyraźnie widoczna.



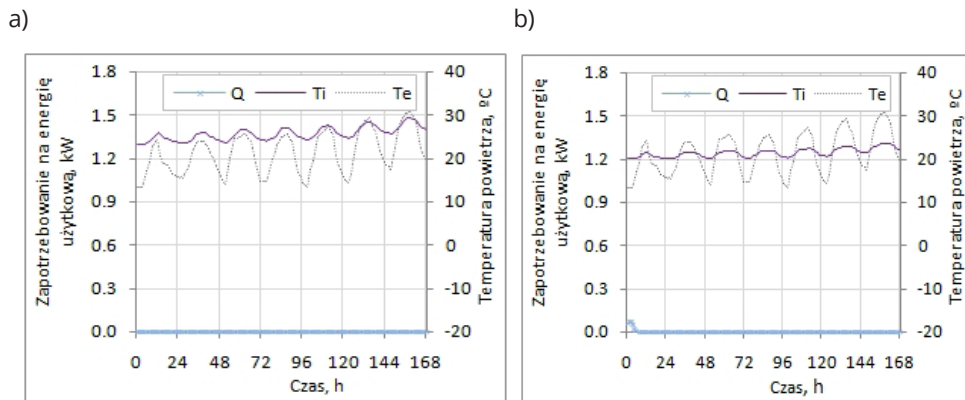
Rys. 5. Wartości temperatury wewnętrznej symulowane w badanym obiekcie: a) dla wariantu A, b) dla wariantu B  
 Fig. 5. Values of the internal temperature in simulation: a) variant A, b) variant B



Rys. 6. Wartości zapotrzebowania na energię użytkową dla obiektu: a) wariant A, b) wariant B  
 Fig. 6. Values of the demand for usable energy: a) variant A, b) variant B

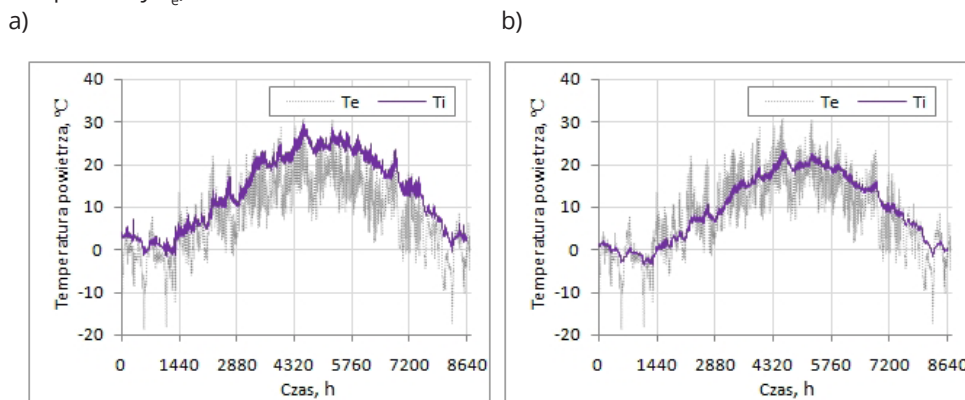


Rys. 7. Wartości zapotrzebowania na energię użytkową  $Q$ , dla temperatury wewnętrznej  $T_i$  oraz zewnętrznej  $T_e$ : a) wariant A, b) wariant B (01.01-07.01)  
 Fig. 7. Values of the demand for usable energy  $Q$ , internal temperature  $T_i$  and external temperature  $T_e$ : a) variant A, b) variant B (01.01-07.01)



Rys. 8. Wartości zapotrzebowania na energię użytkową  $Q$ , dla temperatury wewnętrznej  $T_i$  oraz zewnętrznej  $T_e$ :  
 a) wariant A, b) wariant B (01.07-07.07)  
 Fig. 8. Values of the demand for usable energy  $Q$ , internal temperature  $T_i$  and external temperature  $T_e$ : a) variant A, b) variant B (01.07-07.07)

Wynik symulacji przedstawionej na rys. 9 uwidacznia rolę zysków pochodzących od promieniowania słonecznego w utrzymaniu temperatury wewnętrznej obiektu nieogrzewanego na poziomie  $T_i \geq 0^\circ\text{C}$ , temperatura wewnętrzna  $T_i$  w obiekcie A (na „tle” rzeczywistej temperatury zewnętrznej  $T_e$  – wykres  $T_i$  zbliżony jest do obwiedni górnej temperatury  $T_e$ ).



Rys. 9. Wartości temperatury wewnętrznej w obiekcie nieogrzewanym oraz zewnętrznej: a) wariant A, b) wariant B  
 Fig. 9. Values of the internal temperature in the unheated building and external temperature: a) variant A, b) variant B



Oczywiste jest, że powszechnie stosowane proste metody obliczeniowe często nie pozwalają na dokładne określenie zapotrzebowania na moc cieplną lub ilości energii, którą w przyszłości będzie zużywał projektowany lub modernizowany budynek.

Pełna analiza zagadnień komfortu cieplnego jest możliwa do przeprowadzenia w zaawansowanych programach do symulacji energetycznych budynków, wykorzystujących szczegółowe dane klimatyczne.

Wyniki analiz opartych na danych godzinowych lepiej nadają się do odzwierciedlenia zachowania termicznego budynku będącego w kontakcie z klimatem charakteryzującym się dużą zmiennością [10], a różnice w wynikach nawet prostych zagadnień badawczych potwierdzają, iż symulacyjne programy komputerowe są cennym uzupełnieniem powszechnie stosowanych metod, wymagających dalszego udoskonalania.

### **Bibliografia**

- [1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U.2015, poz. 376).
- [2] Dyrektywa 2010/31/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (wersja przekształcona), Dziennik urzędowy Unii Europejskiej z 18.06.2010.
- [3] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414 z późniejszymi zmianami).
- [4] Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków (Dz.U. 2016, poz 290).
- [5] ESP-r CookBook. University of Strathclyde, Glasgow UK, 20110.
- [6] 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).
- [7] Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa: Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne do obliczeń energetycznych budynków, 01 marzec 2016 [przełądane: 30 lipca 2016], Dostępny w: [http://mib.gov.pl/2-Wskazniki\\_emisji\\_wartosci\\_opalowe\\_paliwa.htm](http://mib.gov.pl/2-Wskazniki_emisji_wartosci_opalowe_paliwa.htm)
- [8] Pokorska-Silva, I.: Analiza procesu wychładzania wirtualnej komory badawczej. Praca zbiorowa pod red. J. Bzówki - Współczesny stan wiedzy w inżynierii lądowej. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2015. s.565-572.
- [9] Belok, J., Fedorowicz, L., Nowoświat, A., Pokorska-Silva, I.: Badania laboratoryjne oraz symulacyjne wychładzania komory testowej. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce. XV Polska Konferencja Naukowo-Techniczna. Materiały konferencyjne [CD-ROM]). Łódź 2015. s.19-22.
- [10] Kurtz, K., Gawin, D.: Certyfikacja energetyczna budynków mieszkalnych z przykładami. Wrocław: Wrocławskie Wydawnictwo Naukowe Atla 2 2009. ISBN 978-83-60732-28-1.

## **SIMULATION SUPPORT IN BUILDING ENERGY EVALUATION**

### **SUMMARY**

The article presents essential elements of the building energy performance determined according to the methodology of the Regulation [1] and by means of computer simulation of mass and energy exchange taking place in the building. The differences in the results obtained in both approaches are shown. The role of the analysis in the overall process calibration of the calculation model is indicated.

### **KEYWORDS**

Energy performance, computer simulation, local climate, dynamic heat exchange