

dr hab. inż. prof. PK Tomasz Kisilewicz\*

# Wpływ izolacji termicznej ścian na mikroklimat w budynkach w okresie letnim

*Influence of thermal insulation of external walls on summer microclimate in buildings*

DOI: 10.15199/33.2015.05.45

**Streszczenie.** W przypadku budownictwa niskoenergetycznego od czasu do czasu pojawia się pogląd o szkodliwym wpływie znacznie pogrubionej izolacji na ochronę przed przegrzewaniem budynków w okresie letnim. Twierdzi się, że efektywna izolacja termiczna blokuje możliwość schładzania przegród w okresie nocnym przez przewodzenie ciepła na zewnątrz. Przeprowadzone w programie Energy Plus analizy symulacyjne pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że izolacja termiczna ścian (standardowa czy nawet bardzo gruba) nie pogarsza warunków we wnętrzu budynku w okresie letnim, a nawet wprost przeciwnie, wpływa w niewielkim stopniu korzystnie na ich poprawę. Kryterium oceny były warunki tzw. komfortu adaptacyjnego, sformułowane w dokumencie ASHRAE Standard 55. W referencyjnym wariantcie symulowanego obiektu zastosowano wymuszoną wentylację nocną jako podstawowy sposób ograniczenia przegrzewania wnętrza.

**Słowa kluczowe:** izolacja termiczna, adaptacyjny komfort cieplny, przegrzewanie wnętrza, chłodzenie nocne.

**Abstract.** In the case of very well insulated low energy buildings an opinion about negative influence of thermal insulation on summer microclimate in building may be heard. It is claimed that effective thermal insulation blocks possibility of discharge of building thermal storage by heat conduction to external environment. Carried out in Energy Plus computer program simulations allow author to conclude that thermal insulation does not deteriorate internal microclimate conditions and even contrary helps to a small extent to improve them. The basic criteria to assess thermal conditions in simulated facility were adaptive comfort requirements according to ASHRAE Standard 55. In the simulated object the only measure of overheating prevention was night cooling by means of mechanical ventilation.

**Keywords:** thermal insulation, adaptive thermal comfort, space overheating, night cooling.

**B**udynki o bardzo niskim zapotrzebowaniu na energię wymagają nowych systemów i narzędzi do projektowania oraz doświadczenia, którego na tym etapie jeszcze w naszym kraju nie ma. W efekcie takie budynki projektuje się jeszcze w sposób tradycyjny, tzn. podstawowe decyzje projektowe są podejmowane na podstawie intuicji, aktualnych trendów czy wręcz obiegowych opinii i zasad. Zwykle nie stosuje się na etapie projektowania odpowiednich narzędzi symulacyjnych, które mogłyby pomóc w racjonalizacji procesu projektowego. Dopiero na końcowym etapie branżowego, a nie interdyscyplinarnego łańcucha projektowania dokonywana jest analiza energetyczna budynku, ale niestety za pomocą standardowych narzędzi. Jeśli nawet uda się właściwie dobrać parametry instalacji, to niekoniecznie uzyskuje się tą drogą zamierzone niskie zapotrzebowanie na energię. Dla wielu projektantów

i użytkowników zaskakujące jest to, że oczekiwania i nacisk kładziony na niskie zapotrzebowanie energii na ogrzewanie, często skutkują intensywnym przegrzewaniem wnętrza lub koniecznością jego energochłonnego chłodzenia.

Zwiększanie udziału w bilansie cieplnym budynku energii odnawialnej jest możliwe m.in. przez racjonalne wykorzystanie w sposób bierny energii słonecznej. Powszechnie już wiadomo, że dobrze izolowane termicznie okna o orientacji południowej mogą w odpowiednich warunkach uzyskać dodatni bilans energetyczny także w naszej strefie klimatycznej. To stwierdzenie jest dość często interpretowane przez projektantów w zbyt prosty sposób, że przez maksymalne powiększenie pola powierzchni południowych okien minimalizuje się zapotrzebowanie na energię nieodnawialną. Skutki realizacji takiej zasady to często zwiększenie wartości zapotrzebowania na energię cieplną, ale co bardziej odczuwalne przez użytkowników budynku, przewymiarowane okna tworzą fatalny mikroklimat termiczny wnętrza.

**Świadome i racjonalne projektowanie budynków niskoenergetycznych wymaga więc powiązania podstawowych decyzji architektonicznych z ich skutkami przez zastosowanie właściwych narzędzi projektowych już na etapie wstępnej koncepcji projektowej.** Autor wielokrotnie podejmował już tę tematykę w swoich publikacjach, wskazując m.in. mity, jakie wciąż są obecne w budownictwie, proponując metody świadomego wykorzystania korelacji istniejących pomiędzy poszczególnymi właściwościami budynku, przypominając dość oczywistą i sankcjonowaną przepisami konieczność łącznego spojrzenia na zużycie energii do ogrzewania i chłodzenia [1] oraz sugerując konieczność wnikliwej analizy warunków termicznych w budynkach w okresach przejściowych i letnim [2].

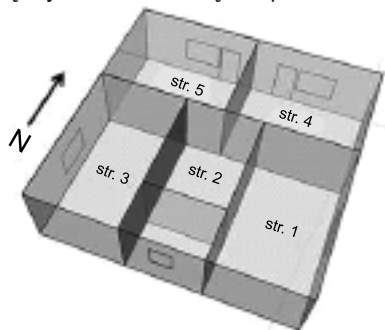
W artykule podjęto wstępną próbę poszukiwania odpowiedzi na ważne pytanie: czy i na ile bardzo gruba warstwa izolacji termicznej pogarsza warunki we wnętrzu w okresie letnim?

\* Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Łądowej; e-mail: tkisilew@pk.edu.pl

## Eksperyment symulacyjny

**Opis modelowanego obiektu.** Zasadą dotyczące izolowania termicznego przegród, doboru układu warstw, sprawdzania wymagań cieplnych są zwykle oparte na najprostszyc stacjonarnych opisach właściwości materiałów budowlanych. Tymczasem faktyczna ocena dynamicznych właściwości przegród i budynków jest – poza badaniami doświadczalnymi – możliwa tylko przy użyciu algorytmów symulacyjnych, dobrze opisujących kompleks zjawisk cieplnych zachodzących pomiędzy przegrodami i w samej przegrodzie. Jednym z nielicznych narzędzi tego typu jest program Energy Plus, który wciąż jest rozwijany, modyfikowany i poszerzany o kolejne moduły [3]. Na świecie powstają także interfejsy obliczeniowe bazujące na tym programie jako „silniku obliczeniowym” i oferujące duże ułatwienia we wprowadzaniu geometrii budynku oraz sterowaniu wszystkimi aspektami obliczeń. Swego rodzaju podwójnym interfejsem do programu Energy Plus jest popularny program graficzny SketchUp wraz z nakładką Open Studio, utworzony przez National Renewable Energy Laboratory.

Jako obiekt symulacji w programie Energy Plus wybrano bardzo prosty układ geometryczny przegród budynku o wymiarach zewnętrznych 10 x 10 m, przedstawiony na rysunku 1. Przyjęto, że jest to powtarzalna kondygnacja, której przegrody poziome rozdzielają środowiska o tych samych parametrach, a więc warunki brzegowe dla przegród poziomych, to warunki adiabatyczne. W praktyce najtrudniejsze warunki w okresie letnim występują na ostatniej kondygnacji budynków i silnie zależą od właściwości stropodachu [2]. Wpływ stropodachu na występowanie i intensywność przegrzewania ma jednak odrębny mechanizm i będzie przedmiotem



Rys. 1. Układ stref i przegród w symulowanym fragmencie budynku

badania na kolejnym etapie pracy, po określeniu wpływu izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych typowej kondygnacji.

W modelowanej części budynku wyodrębniono pięć stref klimatycznych: dwie symetryczne strefy po stronie południowej oraz trzy strefy w północnej części budynku. Wymiana ciepła między strefami odbywa się jedynie przez przewodzenie. Nie wprowadzono wymiany powietrza pomiędzy strefami ze względu na obecność zrównoważonej wentylacji mechanicznej. Strefy I i III to symetryczne strefy w północnej części budynku, o powierzchni 21 m<sup>2</sup> każda oraz oknami zorientowanymi na wschód i zachód. Strefa II w północnej części budynku składa się z dwóch pomieszczeń rozdzielonych ścianką działową, z oknem skierowanym na północ i powierzchnią 18 m<sup>2</sup>. Strefy cieplne IV i V symulowanego budynku to symetryczne pod względem rozmiarów i przeszkleń strefy południowe, o powierzchni 20 m<sup>2</sup> każda. Wskaźnik przeszklenia w strefie I i II wynosi 8,6% w stosunku do powierzchni podłogi (minimum oświetlenia), a w strefie IV i V 17,2%, natomiast całkowita liczba godzin w analizowanym okresie to 2208.

Wyjściowy wariant symulacyjny obiektu ma masywną konstrukcję ceglano-żelbetową. Ściany zewnętrzne: tynk wewnętrzny gipsowy 2 cm, cegła pełna 25 cm, standardowa izolacja termiczna 15 cm oraz tynk zewnętrzny. Ściany wewnętrzne: obustronnie otynkowany mur z cegły pełnej grubości 12 cm. Stropy: drewno 2,5 cm, wylewka 4 cm, izolacja akustyczna 3 cm, żelbet 12 cm. Okna i drzwi balkonowe oszklone zestawami 2-szybowymi o współczynniku przenikania  $U_g = 1,349 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Właściwości zastosowanych materiałów przedstawiono w tabeli 1, a parametry cieplne przegród w tabeli 2.

W strefie II znajduje się ściana działowa, której obydwie powierzchnie należą do tej samej strefy termicznej. W algorytmie programu ta ściana jest traktowana jako wewnętrzna masa akumulacyjna, która w istotny sposób powiększa pojemność cieplną strefy II.

**Warunki brzegowe oraz metoda oceny.** Warunki klimatyczne zewnętrzne to zbiór danych pogodowych dla Krakowa. Przyjęty okres symulacji obejmuje trzy letnie miesiące roku: czerwiec, lipiec i sierpień. Budynek nie jest wyposażony

Tabela 1. Właściwości zastosowanych materiałów

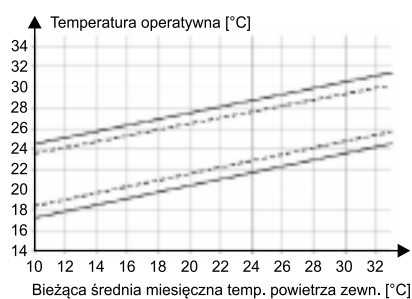
Materiał	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Przewodność cieplna [W/(m·K)]	Ciepło właściwe [J/(kg·K)]
Cegła pełna	1800	0,77	1000
Żelbet	2300	2,3	1000
Izolacja termiczna	15	0,043	1450
Tynk wewnętrzny	1601	0,726	840
Tynk zewnętrzny	1858	0,692	840
Drewno	800	0,22	2510
Wylewka	2000	1,1	840

Tabela 2. Izolacyjność termiczna przegród

Przegroda	U [W/(m <sup>2</sup> K)]
Ściana zewnętrzna	0,248
Okno/drzwi oszklone	1,349
Ściana wewnętrzna	2,793

w instalację chłodzenia, a jedyną formą czynnej ochrony przed przegrzewaniem jest zwiększona intensywność wymuszonej wymiany powietrza. W godzinach od 9.00 do 21.00 krotność wymian wentylacyjnych we wszystkich pomieszczeniach wynosi 0,5 1/h, a w nocy 2,0 1/h. Przyjęto także, że temperatura powietrza wewnętrznego w budynku mieszkalnym nie może spaść w nocy poniżej 20 °C. Taki schemat funkcjonowania budynku jest utrzymywany w sztywny sposób, niezależnie od warunków chwilowych. Zyski cieplne w analizowanym fragmencie pochodzą od czterech osób, z uwzględnieniem ich pełnej obecności w nocy i częściowej, wg szczegółowego schematu, w trakcie dnia oraz od wyposażenia i oświetlenia sztucznego.

Metodą oceny warunków termicznych powstających we wnętrzu budynku jest kryterium adaptacyjnego komfortu cieplnego wg metody ASHRAE Standard 55 – 2010 [4, 5] (rysunek 2). Metoda może być stosowana, jeśli temperatura powietrza zewnętrznego wynosi od +10 °C do +33,5 °C. Ocena mikroklimatu związana z tzw. komfortem adaptacyjnym polega na zaobserwowanym w praktyce stopniowym adaptowaniu się organizmu ludzkiego do warunków termicznych otoczenia w budynkach bez mechanicznego chłodzenia [4, 5]. Stopień adaptacji ma związek z możliwością wpływu użytkownika na warunki (np. otwieranie okien) i dopasowania odzieży do warunków [4]. Podejście zastosowane w metodzie ASHRAE jest zbliżone do rozwiązania przyjętego w normie europejskiej EN 15251 [6]. Kry-



**Rys. 2. Zakres akceptowanej wartości temperatury operatywnej w budynku bez chłodzenia w zależności od temperatury zewnętrznej, zgodnie z ASHRAE Standard 55 – 2010. Obszar pomiędzy liniami ciągłymi odpowiada akceptacji na poziomie 80% liczby użytkowników, a pomiędzy liniami przerywanymi akceptacji na poziomie 90%**

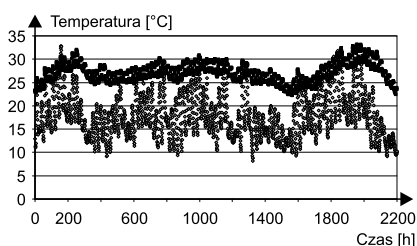
terium adaptacyjnego komfortu cieplnego jest używane w artykule przede wszystkim jako narzędzie do porównywania poszczególnych wariantów rozwiązań czy ich modyfikacji, a nie jako sposób formalnej oceny warunków wg obowiązujących wymagań. Istotną praktyczną zaletą stosowania tego podejścia w symulacjach bazujących na programie Energy Plus jest fakt, że program został wyposażony w opcję zliczania godzin spełniających warunki adaptacyjnego komfortu na dwóch poziomach akceptacji (90 i 80%). Tak więc podstawowa ocena analizowanych wariantów obliczeniowych będzie polegała na porównaniu liczby godzin, w których warunki cieplne we wszystkich strefach budynku nie mieszczą się w obszarze akceptowalnych warunków komfortu adaptacyjnego.

## Wyniki obliczeń

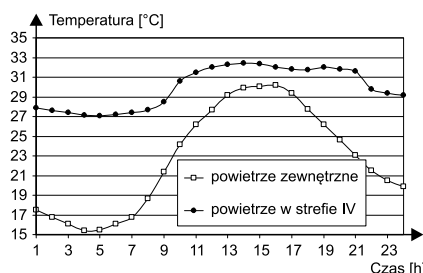
**Wariant referencyjny.** Wariant wyjściowy, traktowany jako wariant referencyjny, jest zbliżony pod względem izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych do standardowych rozwiązań stosowanych obecnie ( $U_{\text{ścian}} = 0,248 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Na rysunku 3 pokazano przebieg zmian temperatury powietrza zewnętrznego oraz temperatury powietrza w wybranej południowo-wschodniej strefie V podczas całego okresu symulacji. Mimo bardzo dużej liczby punktów na wykresach, dobrze widoczny jest efekt pozyskiwania i akumulowania energii słonecznej w budynku, powodujący znaczne zwiększenie temperatury we wnętrzu w porównaniu z warunkami zewnętrznymi. Natomiast wyraźne rozsuniecie w pionie wykresu temperatury we wnętrzu jest wynikiem dobowych zmian tem-

peratury w wyniku nocnego wentylowania budynku. Na rysunku 3, w okolicach współrzędnej 2000 h, widoczny jest także długi okres wysokiej temperatury zewnętrznej i związany z tym wzrost temperatury we wnętrzu budynku.

Na rysunku 4 pokazano dobowe zmiany temperatury powietrza zewnętrznego i powietrza w strefie IV podczas upalnego dnia sierpniowego. Wykresy sugerują, że przyjęta w wariantcie referencyjnym krotność wymian powietrza jest w tych warunkach zewnętrznych zbyt mała. Analizowany dzień jest częstką dłuższej sekwencji gorącego letniego okresu.



**Rys. 3. Temperatura operatywna w strefie IV (czarne punkty) oraz temperatura powietrza zewnętrznego (szare punkty) w okresie od czerwca do sierpnia**



**Rys. 4. Dobowe zmiany temperatury powietrza zewnętrznego i powietrza w strefie IV (21 sierpnia)**

Mimo intensywniejszej wentylacji wnętrza w nocy, temperatura wewnątrz budynku spada tylko w niewielkim stopniu. Podczas całego dnia istnieją także możliwości schładzania wnętrza przez wymianę powietrza. Taki scenariusz byłby z pewnością realizowany w warunkach rzeczywistych, natomiast sztywna procedura wymiany powietrza wynikająca z algorytmu programu symulacyjnego nie pozwala na uzależnienie wymiany powietrza od aktualnych warunków w budynku i jego otoczeniu.

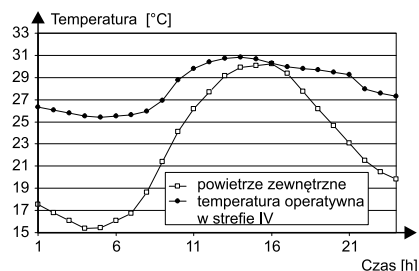
W tabeli 3 zestawiono liczbę godzin w przypadku poszczególnych stref, w czasie których warunki cieplne we wnętrzu wykraczają poza obszar komfortu adaptacyjnego. Duża liczba godzin dyskomfortu

**Tabela 3. Liczba godzin z warunkami wykraczającymi poza zakres akceptowany – wariant referencyjny**

Poziom akceptacji	Strefa				
	I	II	III	IV	V
90%	621	380	621	1292	1158
80%	342	88	342	1019	840

w obydwu południowych strefach IV i V jest oczywiście wynikiem bardzo dużych zysków słonecznych przez nieosłonięte szyby o wysokiej przepuszczalności promieniowania (współczynnik przepuszczalności  $g = 0,724$ ) w nadmiernie przeszklonych pomieszczeniach. Pomimo podwyższonej wymiany wentylacyjnej w nocy budynek przez długi okres jest przegrzewany. Minimalny okres przegrzewania w stosunku do całego okresu obliczeniowego wynosi 4% (strefa II z północnym oknem o małych rozmiarach), a w najgorszym przypadku jest to aż 59% czasu (południowo-zachodnia strefa IV).

Zwiększona dwukrotnie intensywność wentylacji w dzień i w nocy pozwoliła na zauważalne obniżenie dobowego przebiegu temperatury operatywnej w strefie IV (rysunek 5). Nie oznacza to jednak, niestety, całkowitego wyeliminowania przegrzewania, ale jedynie częściowe skrócenie czasu jego trwania (tabela 4). Porównanie wartości z tabel 3 i 4 pozwala potwierdzić korzystną zmianę czasu trwania warunków wykraczających poza zakres komfortu adaptacyjnego. Największa liczba godzin z warunkami spoza tego zakresu występuje obecnie w strefie II i stanowi 25% całego analizowanego okresu. Jedynie w tej strefie warunki uległy wyraźnemu pogorszeniu w porówna-



**Rys. 5. Dobowa zmiana temperatury powietrza zewnętrznego i temperatury operatywnej w strefie IV (21 sierpnia), w warunkach zwiększonej wymiany powietrza**

**Tabela 4. Liczba godzin z warunkami wykraczającymi poza zakres akceptowany – wariant referencyjny z podwyższoną wymianą wentylacyjną**

Poziom akceptacji	Strefa				
	I	II	III	IV	I
90%	217	541	217	508	444
80%	43	41	43	291	211

niu z wariantem wcześniejszym. W tej strefie zyski słoneczne są niewielkie, ale pojemność cieplna wnętrza relatywnie duża. Zwiększona wymiana powietrza skutkuje naładowaniem masy termicznej podczas długotrwałych warunków wysokiej temperatury powietrza zewnętrznego. Dodatkowo sprawdzono, że jeszcze wyższa intensywność wentylowania wnętrza budynku w trakcie dnia (2 wymiany) nie przynosi już spodziewanego zmniejszenia obciążenia cieplnego wnętrza.

**Warianty z pogrubioną izolacją termiczną ścian.** W tabeli 5 przedstawiono wyniki obliczeń symulacyjnych budynku z pogrubioną do 25 cm warstwą izolacji termicznej ścian zewnętrznych, z zachowaniem pozostałych cech budynku, m.in. pola powierzchni i rodzaju okien oraz sposobu działania wentylacji, bez żadnych dodatkowych zmian. Współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej wynosi 0,157 W/(m<sup>2</sup>K). Bardzo wyraźna zmiana oporu cieplnego zewnętrznej warstwy izolacyjnej ścian zewnętrznych ma bardzo niewielki, ale korzystny wpływ na warunki termiczne w budynku w analizowanym letnim okresie. Podobne rezultaty otrzymano w przypadku ścian o izolacyjności termicznej bliskiej standardowi budynku pasywnego (tabela 6). Współczynnik przenikania ciepła ściany zewnętrznej w tym wariantcie wynosi 0,115 W/(m<sup>2</sup>K). Zmiana czasu trwania warunków wykraczających poza strefy komfortu adaptacyjnego ma w tym przypadku już tylko charakter kosmetyczny. **Bardzo gruba izolacja termiczna ścian w śladowy sposób ogranicza przegrzewanie wnętrza.**

Warto zauważyć, że obserwowane w przeprowadzonych obliczeniach skutki zmiany oporu cieplnego ścian są zgodne co do zasady z uproszczonymi sposobami analizowania zjawisk dyna-

**Tabela 5. Liczba godzin z warunkami wykraczającymi poza zakres akceptowany – izolacja ścian grubości 25 cm**

Poziom akceptacji	Strefa				
	I	II	III	IV	V
90%	197	508	197	510	425
80%	38	30	38	292	203

**Tabela 6. Liczba godzin z warunkami wykraczającymi poza zakres akceptowany – izolacja ścian grubości 35 cm**

Poziom akceptacji	Strefa				
	I	II	III	IV	V
90%	187	502	187	511	425
80%	36	26	36	292	198

micznych, w których np. zasięg zmian temperatury w cyklu dobowym ogranicza się zaledwie do 10 cm [7, 8]. **W warunkach zbliżonej średniej wartości temperatury po obydwu stronach masywnej przegrody, zewnętrzna izolacja termiczna nie ma wpływu na jej zdolności akumulacyjne. Chroni natomiast przegrodę przed napływem ciepła z zewnątrz, szczególnie w przypadku przegród wyekspozowanych na bezpośrednie promieniowanie słoneczne.**

**Wariant bez izolacji termicznej ścian.** W odniesieniu do uzyskanych wyników, próba powierzchniowego intuicyjnego rozważania wpływu izolacji termicznej ścian na warunki cieplne we wnętrzu budynku mogłaby prowadzić do wniosku, że początkowa izolacja termiczna ścian w wariantcie referencyjnym (15 cm) jest już na tyle skuteczna, że jej dalsze zmiany nie mają znaczenia. W celu wyjaśnienia tej wątpliwości wykonano obliczenia symulacyjne ściany bez odrębnej warstwy izolacji termicznej, tj. składającej się tylko z 25 cm warstwy cegły pełnej oraz warstw tynku (tabela 7).

**Tabela 7. Liczba godzin z warunkami wykraczającymi poza zakres akceptowany – ściana bez izolacji termicznej**

Poziom akceptacji	Strefa				
	I	II	III	IV	V
90%	614	708	614	743	743
80%	183	184	183	391	406

Uzyskane wyniki jednoznacznie i bardzo wyraźnie potwierdzają, że obecność izolacji termicznej ma korzystny wpływ na ochronę wnętrza masywnego budynku przed przegrzewaniem. Zwiększony opór cieplny ścian zewnętrznych budynku pozwala efektywnie chronić wnętrze przed ciepłem przenikającym do budynku z zewnątrz.

## Podsumowanie

Duże zainteresowanie budownictwem energooszczędnym sprawia, że w Polsce zwiększa się liczba takich budynków. Daleko idące zmiany charakterystyki cieplnej budynków stwarzają jednak wiele problemów natury projektowej trudnych do jednoznacznego rozwiązania. Projektant nie ma dziś prostych reguł, których przestrzeganie gwarantowałoby poprawny efekt procesu projektowego. Wręcz przeciwnie, procedury projektowe komplikują się i należy brać pod uwagę jednocześnie wiele aspek-

tów budynku i jego przyszłego wyposażenia już na etapie koncepcji.

Skutkiem jednostronnego projektowania budynków o niskim – w założeniach – zapotrzebowaniu na energię może być intensywne przegrzewanie wnętrza w okresie letnim czy w okresach przejściowych. Przeprowadzone w programie Energy Plus analizy symulacyjne pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że **izolacja termiczna ścian (standardowa i bardzo gruba) nie pogarsza warunków we wnętrzu budynku w okresie letnim, a nawet wpływa korzystnie na ograniczenie stopnia jego przegrzewania.**

W przeprowadzonych analizach nie brano pod uwagę innych niż wzmiana wentylacja nocna możliwości biernej ochrony budynków przed przegrzewaniem, dzięki temu wyodrębniono wpływ tylko jednego czynnika. W praktyce jednak wszystkie możliwości powinny być wykorzystywane jednocześnie. Pierwszym i najbardziej skutecznym środkiem ochrony są oczywiście wszystkie formy bezpośredniej osłony okien przed nadmiernymi zyskami cieplnymi.

## Literatura

- [1] Kisilewicz T., Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych. Wydawnictwo PK, No. 364, Kraków 2008.
- [2] Kisilewicz T., Przegrzewanie budynków niskoenergetycznych, XIV Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź 2013, s. 325-330; oraz Napędy i Sterowanie 12/2013, ISSN 1507-7764.
- [3] Crawley D. B., Hand J. W., Kummert M., Griffith B. T., Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs, 9-th IBPSA Conference, Montreal 2005.
- [4] Pfafferott J.Ü., Herkel S., Kalz D.E., Zueschner A.: Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria, Energy and Buildings 39 (2007) 750-757, Elsevier.
- [5] Schweiker M., Brasche S., Bischof W., Hawighorst M., Wagner A.: Explaining the individual process leading to adaptive comfort: Exploring physiological, behavioural and psychological reactions to thermal stimuli, Journal of Building Physics, Volume 36 No. 4 / April 2013, SAGE Publications.
- [6] EN 15251:2007, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics.
- [7] PN-EN ISO 13790: 2008, Ciepłota właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii do ogrzewania.
- [8] Lu L., Fisher D.: Application of Conduction Transfer Function and Periodic Response Factors in Cooling Load Calculation Procedures, ASHRAE Transactions 2004, 110 (2).

Otrzymano 07.08.2014 r.