

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

# Pojemność cieplna a komfort termiczny w budynkach energooszczędnych

*Heat capacity versus thermal comfort in low energy buildings*

**Streszczenie.** Ograniczanie zużycia energii w budownictwie energooszczędnym przy jednocześnie wysokich wymaganiach dotyczących komfortu cieplnego wymaga zwrócenia uwagi na przegrzewanie współczesnych budynków. W artykule zwrócono uwagę na korzystny wpływ pojemności cieplnej na ograniczenie dyskomfortu cieplnego we wnętrzu budynku. Analizowany w artykule efekt to tylko jeden z aspektów biernej ochrony budynku przed nadmiernymi wahaniami temperatury we wnętrzu. W dobrym projektowaniu należy wykorzystać wszystkie możliwe środki ochrony.

**Słowa kluczowe:** komfort cieplny, przegrzewanie wnętrza, pojemność cieplna, aktywność cieplna.

**Abstract.** Reduction of energy consumption by the energy efficient buildings and at the same time high expectations regarding thermal comfort require special attention paid to overheating. This article emphasizes the beneficial influence of thermal capacity to reduce thermal discomfort inside the building. Analyzed in this article effect is just one aspect of a passive building protection against excessive temperature fluctuations in the interior. In a good design all the possible means of protection should be used.

**Keywords:** adaptive thermal comfort, space overheating, thermal capacity, thermal effusivity.

Wiele mówi się ostatnio na temat bardzo kontrowersyjnego problemu nazywanego „ociepleniem klimatu”. Spór dotyczy nie samego efektu, bo ten stosunkowo łatwo można obserwować, ale przyczyn tego zjawiska. Jeśli jednak zwróci się uwagę na standardy projektowania budynków, przepisy budowlane czy świadomość projektantów, to łatwo zauważyć, że przegrzewanie budynków jest wciąż traktowane marginalnie lub kompletnie ignorowane. W praktyce użytkowej kończy się to albo na dodawaniu urządzeń chłodzących, co napędza w dalszym stopniu ekologiczne przyczyny efektu cieplarnianego, albo też na doraźnych działaniach użytkowników, przeczekiwaniu trudnego okresu i narzekaniu na uciążliwe warunki.

Od długiego już czasu staram się propagować maksymalne wykorzystanie naturalnych zjawisk i rozwiązań, które pozwalają ograniczyć zapotrzebowanie budynków na energię zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia [1]. Jedyną trudnością, to konieczność integracji całego procesu projektowania budynków wokół tego zagadnienia i pewne ograniczenie swobody kształtowania bryły i elewacji budynku. To ograniczenie wskazuje więc

bardzo istotny, ale rzadko artykułowany problem: czy powstające budynki, ingerujące i niszczące środowisko naturalne, już przez sam fakt ich wzniesienia, mają być przez następne dziesiątki lat ogromnym obciążeniem dla tego środowiska czy też szkody można zminimalizować lub przynajmniej zmniejszyć. Proponowane zabiegi wiążą się zwykle tylko z lepszym (racjonalnym i zapewne bardziej pracochłonnym) projektowaniem, a nie wymagają istotnych nakładów inwestycyjnych.

Projektowanie budynków energooszczędnych jest dziś zajęciem bardzo modnym, a pewnie też dość intratnym. Rzadko jednak jest zakończone faktycznym sukcesem, tzn. powstaniem budynku o niskim łącznym zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania, chłodzenia, oświetlenia i jednocześnie zapewniającym komfort użytkownika. Wynika to m.in. z braku wspomnianego już zintegrowanego projektowania bryły, obudowy i instalacji oraz stosowania marnych (lub żadnych) narzędzi w procesie projektowania. Świadome i racjonalne projektowanie budynków niskoenergetycznych wymaga powiązania podstawowych decyzji architektonicznych z ich skutkami przez zastosowanie właściwych narzędzi projektowych i wytworzenie takiego sprzężenia już na etapie wstępnej koncepcji projektowej.

Jedną z bardzo istotnych właściwości budynku jest ich pojemność cieplna. Zdolność do akumulowania ogromnej ilości energii wynika z konstrukcji budynku, doboru materiałów, geometrii pomieszczeń itd. Obecność akumulatora energii o wielkiej pojemności w budynku masowym ma zarówno skutki pozytywne, jak i negatywne. Warto więc w sposób świadomy wykorzystać ten efekt tam, gdzie może to być korzystne. W artykule podjęto próbę poszukiwania odpowiedzi na istotne pytanie: w jakim stopniu zdolności akumulacyjne budynku mają wpływ na warunki termiczne w jego wnętrzu w okresie letnim i ochronę wnętrza przed przegrzewaniem? Maksymalizacja zimowych biernych zysków słonecznych prowadzi zwykle do znacznego obciążenia termicznego wnętrza w okresie lata. Jednocześnie też dąży się w budynkach zero- i niemal zeroenergetycznych do ograniczenia całkowitego (całorocznego) zapotrzebowania na energię i całkowitej rezygnacji z mechanicznych systemów chłodzenia. W tej sytuacji bierne ograniczenie wahań temperatury we wnętrzu i jego przegrzewania ma znaczenie pierwszorzędne.

## Narzędzie obliczeniowe

**Opis modelowanego obiektu.** Przedmiotem symulacji w programie Energy Plus jest bardzo prosty układ

\* Politechnika Krakowska, Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli

geometryczny przegród budynku o rozmiarach zewnętrznych 10 x 10 m, przedstawiony na rysunku 1, traktowany jako powtarzalna kondygnacja budynku. W związku z tym, że obydwie stropy rozdzielają środowiska o tych samych parametrach, warunki brzegowe dla przegród poziomych przyjęto jako adiabatyczne w warstwie izolacji akustycznej.

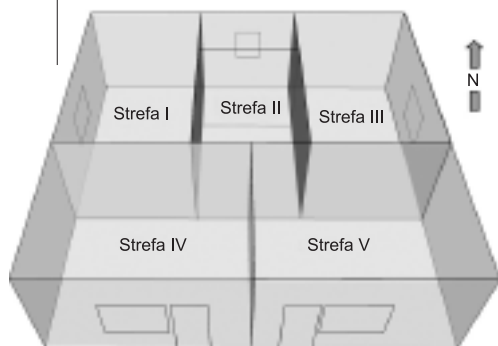
W modelowanej części budynku wyodrębniono 5 stref termicznych:

- dwie symetryczne strefy mieszkalne, nr I i III, w części północno-wschodniej i północno-zachodniej; wskaźnik przeszklenia w strefie I i III w stosunku do powierzchni podłogi wynosi 8,6% (minimum oświetleniowe);

- jedna strefa komunikacyjna, nr II, w północnej części budynku z niewielkim przeszkleniem od strony północnej; w tej strefie znajduje się dodatkowa ściana działowa, traktowana jako wewnętrzna pojemność cieplna tej strefy;

- dwie symetryczne strefy mieszkalne, nr IV i V, po stronie południowej z obfitym przeszkleniem skierowanym na południe; wskaźnik przeszklenia w obydwu strefach wynosi 17,2%.

Wymiana ciepła między strefami odbywa się jedynie przez przewodzenie. Nie wprowadzono wymiany powietrza pomiędzy strefami ze względu na obecność zrównoważonej wentylacji mechanicznej. Wyjściowy wariant symulacyjny obiektu ma masywną konstrukcję ceglano-żelbetową. Układ warstw w ścianach zewnętrznych: tynk wewnętrzny 2 cm; cegła pełna 25 cm; standardowa izolacja termiczna 15 cm oraz tynk zewnętrzny 0,5 cm. Ściany wewnętrzne: obustronnie otynkowany mur z cegły pełnej grubości 12 cm. Stropy: posadzka drewniana 2,5 cm; wylewka betonowa 4 cm; izolacja akustyczna 3 cm; żelbet 12 cm; tynk



Rys. 1. Układ pomieszczeń i stref termicznych w symulowanym fragmencie budynku

wewnętrzny 2 cm. Okna i drzwi balkonowe oszklone zestawami dwuszybowymi o współczynniku przenikania  $U_g = 1,349 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Właściwości zastosowanych materiałów oraz przegród podano w tabelach 1 i 2.

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/akustyczna	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/oszklone drzwi	1,349
Ściana wewnętrzna	2,793

**Warunki brzegowe oraz metoda oceny.** Zewnętrzne warunki klimatyczne to zbiór danych pogodowych ASHRAE dla Krakowa. Przyjęty okres symulacji obejmuje tylko trzyletnie miesiące roku: czerwiec, lipiec i sierpień. Całkowita liczba godzin w analizowanym okresie wynosi 2208. Budynek nie jest wyposażony w instalację chłodzenia, a jedyną formą czynnej ochrony przed przegrzewaniem jest zwiększona intensywność wymuszonej wymiany powietrza w trakcie nocy. W dzień, w godzinach 9<sup>00</sup> – 21<sup>00</sup>, krotność wymiany wentylacyjnych we wszystkich pomieszczeniach wynosi 1,0 1/h, a w nocy przyjęto 4,0 1/h. Zakłada się, że w trakcie dnia nie są otwierane okna. Przyjęto także, że temperatura powietrza wewnętrznego w budynku mieszkalnym nie może spaść poniżej 20 °C. Taki schemat funkcjonowania budynku jest utrzymywany w sztywny sposób, niezależnie od warunków chwilowych. Zyski ciepłe pochodzą od czterech osób, z uwzględnieniem ich pełnej obecności w nocy i częściowej, wg szczegółowego schematu obecności, w trakcie dnia, a także od wyposażenia oraz oświetlenia

sztucznego. Mimo że rozpatrywany okres symulacji dotyczy jedynie najcieplejszych miesięcy roku, to utrzymanie w każdym momencie we wnętrzu minimalnej temperatury na zadanym poziomie wymagałoby ogrzewania wnętrza, szczególnie w drugiej połowie sierpnia. W praktyce, chwilowe spadki temperatury są przez użytkowników tolerowane.

Metodą oceny warunków termicznych we wnętrzu budynku jest kryterium adaptacyjnego komfortu cieplnego wg metody ASHRAE Standard 55-2010 [2, 3]. Ocena mikroklimatu w tej metodzie polega na obserwowanym w praktyce stopniowym adaptowaniu się organizmu ludzkiego do warunków termicznych otoczenia w budynkach bez mechanicznego chłodzenia. Naturalny mechanizm adaptacji sprawia, że warunki, których wystąpienie w okresie chłodnym spowodowałoby znaczny dyskomfort użytkowników, w długim okresie wzrastającej temperatury mogą być traktowane jako akceptowalne. Stopień adaptacji ma związek z możliwością wpływu użytkownika na istniejące warunki (np. otwieranie okien) i dopasowania odzieży do tych warunków [4]. **Kryterium adaptacyjnego komfortu cieplnego** jest w artykule używane przede wszystkim jako narzędzie do porównywania poszczególnych wariantów rozwiązań czy ich modyfikacji, a nie jako sposób formalnej oceny warunków we wnętrzu wg obowiązujących wymagań czy norm. Tak więc podstawowa ocena analizowanych wariantów rozwiązań materiałowych budynku będzie polegała na porównaniu liczby godzin, w których warunki ciepłe we wnętrzu wykraczają poza obszar warunków komfortu adaptacyjnego.

## Wpływ pojemności cieplnej budynku na komfort cieplny we wnętrzu

Opisany wariant traktowany jest jako wariant referencyjny. Pojemność cieplna jednostkowej powierzchni otynkowanego muru ceglanego o całkowitej grubości 27 cm wynosi 475,46 kJ/(m<sup>2</sup>·K). Ściana izolowana warstwą izolacji termicznej grubości 15 cm spełnia nowe wymagania formalne  $U_{\text{ściany}} = 0,248 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . W tabeli 3 zestawiono maksymalną wartość temperatury powietrza zewnętrznego oraz maksymalne wartości

**Tabela 3. Wariant referencyjny budynku – maksymalna temperatura powietrza oraz temperatura operatywna**

Temperatura	Powietrze zewnętrzne	Strefa				
		I	II	III	IV	V
Maksymalna temperatura powietrza [°C]	32,84	27,11	26,11	27,17	29,23	29,38
Maksymalna temperatura operatywna [°C]	–	26,49	25,70	26,84	27,79	28,93

temperatury powietrza i temperatury operatywnej w poszczególnych strefach analizowanego fragmentu budynku.

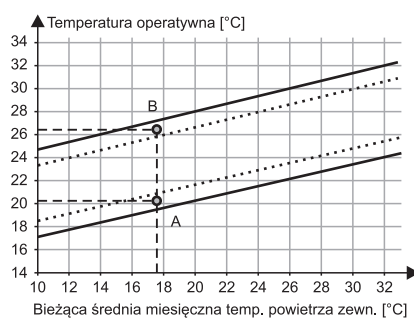
Duże powierzchnie południowego przeszklenia bez osłon zacięniających w istotny sposób wpływają na wartość maksymalnej temperatury. Niezależnie jednak od tej oczywistej obserwacji należy podkreślić wyraźną różnicę pomiędzy maksymalną wartością temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego we wszystkich strefach, a także nieco niższą wartość temperatury operatywnej. Nawet w najcieplejszych momentach roku i w przeszklonych pomieszczeniach widoczny jest wciąż korzystny wpływ przegród masywnych. W tabeli 4 zestawiono syntetyczne wyniki trzymiesięcznej oceny warunków wewnętrznych w poszczególnych strefach symulowanego obiektu, w postaci liczby godzin wykraczających poza obszar warunków adaptacyjnego komfortu cieplnego, w zależności od wymaganego poziomu akceptacji.

**Tabela 4. Wariant referencyjny – liczba godzin z warunkami wykraczającymi poza zakres komfortu adaptacyjnego**

Poziom akceptacji	I	II	III	IV	V
90%	180	240	152	217	241
80%	0	0	6	90	105

Jeśli przyjmujemy wymaganie, że 90% użytkowników akceptuje warunki cieplne w budynku, to w poszczególnych jego strefach występuje od 152 do 241 h wykraczających poza zakres komfortu cieplnego. W przypadku maksymalnej wartości, tj. 241 h, stanowi to niemal 11% czasu całego analizowanego okresu. O uporczywym przegrzewaniu wnętrza można mówić w przypadku strefy południowo-wschodniej (nr V). Nawet przy redukcji wymagań dotyczących akceptacji do poziomu

80% liczba godzin przegrzewania jest znaczna (rysunek 2). Szczególna sytuacja ma natomiast miejsce w strefie nr II z małym północnym oknem. Paradoksalnie, wszystkie wykazane w tej strefie godziny dyskomfortu to warunki oceniane jako zbyt chłodne, mimo lata i podtrzymywania temperatury powietrza w budynku na poziomie nie niższym niż 20 °C. Minimalna godzinowa temperatura powietrza zewnętrznego w analizowanym letnim okresie roku wynosi zaledwie 8,2 °C, a średnia wartość całego trzymiesięcznego okresu to 17,8 °C. Przy minimalnej godzinowej temperaturze operatywnej w strefie nr II wynoszącej 20,3 °C takie warunki nie mieszczą się już w obszarze 90% akceptacji (punkt A na rysunku 2). Zmniejszenie wymagań termicznych, a więc przyjęcie 80% poziomu akceptacji sprawia, że analizowany moment



**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 80% użytkowników, węższy obszar pomiędzy liniami przerywanymi akceptacji 90% użytkowników**

mieści się w przedziale warunków akceptowanych. Maksymalna temperatura operatywna w strefie nr II wynosi 25,70 °C (tabela 1). Ta wartość na rysunku 2 mieści się jeszcze w obszarze pomiędzy liniami przerywanymi, który odpowiada 90% akceptacji warunków termicznych. W strefie nr II nie ma więc, wg przyjętych w tej analizie kryteriów komfortu adaptacyjnego, przegrzewania wnętrza. Pokazana w tabeli 2 duża liczba godzin dyskomfortu w tej strefie budynku to w całości niedogrzanie wnętrza.

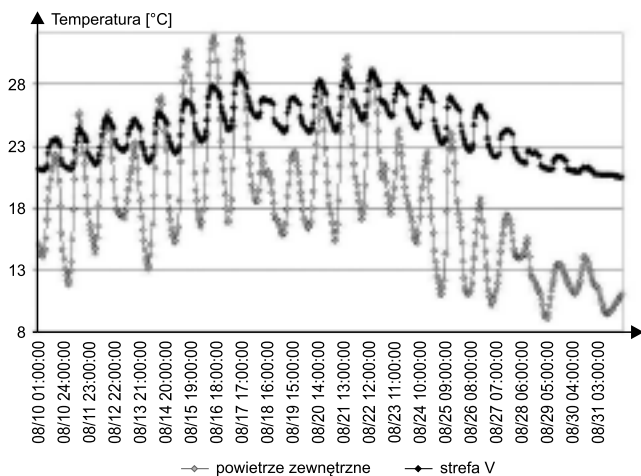
W I strefie budynku maksymalna wartość temperatury operatywnej wynosi 26,49 °C (tabela 1). Przyjmując ponownie, że średnia temperatura miesięczna wynosi 17,8 °C, ekstremalne warunki w tej strefie (punkt B na rysunku

2) nie mieszczą się w zakresie 90% akceptacji, ale spełniają wymagania 80% poziomu akceptacji. Warto ponownie podkreślić, że relatywnie niewielka różnica pomiędzy maksymalną temperaturą powietrza a temperaturą operatywną (tabela 1), wynikająca z pojemności cieplnej przegród, sprawia, że warunki we wnętrzu są dogodniejsze dla użytkowników tego budynku.

W stosowanej w Polsce metodologii przygotowywania świadectw charakterystyki energetycznej, analiza cieplna budynków bazuje na prymitywnym miesięcznym bilansie strat i zysków cieplnych. Próba poprawienia jakości takich obliczeń polega na uwzględnieniu pojemności cieplnej w bilansie obiektu. Wpływa ona bowiem na faktyczną skuteczność wykorzystania zysków termicznych. Przyjęto, że w obliczeniach pojemności uwzględnia się jedynie warstwy przegród do łącznej głębokości 10 cm. Taka sugestia wynika z obserwacji zasięgu istotnych zmian temperatury wywołanych falą harmoniczną o okresie 24 h, czyli dobowych wahań warunków brzegowych.

Klimatyczne warunki zewnętrzne, oprócz silnej dobowej pulsacji, podlegają także zmianom o okresie znacznie dłuższym, np. kilku lub kilkunastu dni. Na rysunku 3 pokazano wartości temperatury powietrza zewnętrznego oraz temperatury operatywnej w południowo-wschodniej części budynku w okresie od 10 sierpnia do 31 sierpnia. Fala długotrwałych upałów powoduje znaczny, okresowy wzrost temperatury w strefie. Nadwyżka temperatury w stosunku do warunków zewnętrznych, to efekt energii zmagazynowanej w przegrodach. W takich warunkach zasięg istotnych zmian temperatury w przegrodzie jest znacznie większy, a więc także zdolność akumulacyjna przegród o większej niż 10 cm grubości ma decydujący wpływ na komfort cieplny wnętrza.

**Budynek masywny o zmniejszonej pojemności cieplnej.** Zmniejszenie pojemności cieplnej przegród budynku uzyskano w tym wariantcie przez pocienienie ceglanego muru konstrukcyjnego wszystkich ścian zewnętrznych budynku do grubości 12 cm. Ściany wewnętrzne pozostały bez zmian. Nie zmieniano również pozostałych założeń symulacyjnych tego zadania,



**Rys. 3. Przebieg zmiany temperatury powietrza zewnętrznego oraz temperatury operatywnej w strefie nr V w okresie od 10 do 31 sierpnia typowego roku referencyjnego**

m.in. dotyczącego grubości warstwy izolacji termicznej. Pojemność cieplna otynkowanego muru ceglano grubości 14 cm wynosi 241,46 kJ/(m<sup>2</sup>·K). W tabeli 5 zestawiono liczbę godzin wykraczających poza kryterium komfortu adaptacyjnego w poszczególnych strefach termicznych obiektu o zmniejszonej pojemności. Główna zmiana wyników, w porównaniu z wariantem referencyjnym, polega na zwiększeniu liczby godzin dyskomfortu we wszystkich strefach analizowanego budynku,

**Tabela 5. Budynek masywny o zmniejszonej pojemności cieplnej**

Poziom akceptacji	Liczba godzin w strefach obiektu				
	I	II	III	IV	V
90%	263	274	227	263	289
80%	1	0	25	117	136

np. w strefie nr V o 20%, a w strefie I aż o 46%. Uzyskane wyniki potwierdzają dość oczywiste oczekiwania związane z korzystnym wpływem akumulacji ciepła w budynku na ograniczenie przegrzewania wnętrza.

**Budynek o bardzo małej pojemności cieplnej.** W wariantcie symulacyjnym budynku o bardzo małych zdolnościach akumulacyjnych przyjęto, że ściany wewnętrzne składają się z dwóch warstw płyt gipsowo-kartonowych, o łącznej grubości 2,5 cm. Taką pojemnością cieplną charakteryzują się budynki szkieletowe, w których warstwy powierzchniowe pełnią także funkcje usztywniające. Właściwości termiczne płyt g-k przyjęto zgodnie z PN-EN 12524 – gęstość 900 kg/m<sup>3</sup>, ciepło właściwe 1000 J/(kg·K), prze-

wodność cieplna 0,25 W/(m·K). Pojemność cieplna jednej gipsowej okładziny ściany wynosi 22,5 kJ/(m<sup>2</sup>·K). W tabeli 6 zestawiono liczbę godzin z warunkami wykraczającymi poza kryterium komfortu adaptacyjnego w poszczególnych strefach termicznych obiektu o bardzo małej pojemności. Ponad dwudziestokrotne zmniejszenie pojemności cieplnej ścian skutkuje istotnymi zmianami warunków termicznych we wnętrzu budynku. Kilkakrotnie rośnie liczba godzin dyskomfortu we wszystkich strefach. Budynek z małą pojemnością

termiczną ma małe zdolności do ograniczania wahań temperatury, a warunki w jego wnętrzu, mimo intensywnej wentylacji nocnej, są już tylko wypadkową temperatury zewnętrznej oraz pozyskiwanego promieniowania słonecznego (tabela 7).

Końcowy wariant zmiany pojemności cieplnej to pojedyncza płyta gipsowa jako okładzina wewnętrzna ścian. W tym przypadku jednostkowa pojemność cieplna ściany wynosi zaledwie 11,25 kJ/(m<sup>2</sup>·K). Kolejne obniżenie zdolności akumulacyjnych budynku pogarsza warunki we wnętrzu (tabela 8). W przypadku cienkich warstw masywnych, zmiana ich grubości tylko o kilkanaście milimetrów (ale też proporcjonalnie duża w stosun-

**Tabela 6. Budynek 1 o bardzo małej pojemności cieplnej**

Poziom akceptacji	Liczba godzin w strefach obiektu				
	I	II	III	IV	V
90%	487	462	480	543	564
80%	89	76	122	273	297

**Tabela 7. Budynek 1 o bardzo małej pojemności cieplnej – maksymalna temperatura operatywna w strefie**

Temperatura	Liczba godzin w strefach obiektu				
	I	II	III	IV	V
Maksymalna temperatura operatywna [°C]	29,59	28,71	29,95	32,26	32,61

**Tabela 8. Budynek 2 o bardzo małej pojemności cieplnej**

Poziom akceptacji	Liczba godzin w strefach obiektu				
	I	II	III	IV	V
90%	523	497	515	574	581
80%	118	100	136	296	317

ku do wariantu wcześniejszego) pociągają za sobą zauważalne zmiany dla komfortu cieplnego.

Należy przypomnieć, że w symulowanym fragmencie budynku ściany nie są jedynym akumulatorem energii. We wszystkich analizowanych wariantach pozostawiono bez zmian warstwy podłogowe (drewno + podkład betonowy) oraz sufitowe (otynkowany strop żelbetowy). Zmniejszono więc tylko częściowo pojemność cieplną pomieszczeń, a mimo to skutki tych zmian w znaczny sposób wpływały na warunki we wnętrzu budynku. Przy całkowitej zmianie konstrukcji z masywnej na lekką przegrzewanie wnętrza byłoby znacznie bardziej intensywne.

## Znaczenie oporu cieplnego izolacji termicznej ścian

Od dawna rozumiano, że brak zdolności akumulacyjnych budynku można w pewnym stopniu kompensować lepszą izolacyjnością termiczną obudowy zewnętrznej. W tabeli 9 pokazano ocenę komfortu cieplnego w budynku z pojedynczą płytą gipsową, ale z izolacją termiczną grubości 25 cm. Uzyskane wyniki potwierdzają czę-

**Tabela 9. Budynek o minimalnej pojemności cieplnej, izolacja termiczna pogrubiona do 25 cm**

Poziom akceptacji	Liczba godzin w strefach obiektu				
	I	II	III	IV	V
90%	472	458	456	526	541
80%	105	93	126	278	296

ściowo oczekiwania związane z podwyższoną izolacyjnością termiczną ścian. Bardziej efektywna ich izolacja termiczna pozwala na niewielkie ograniczenie przegrzewania wnętrza budynku. Zarówno w przypadku poziomu akceptacji 90, jak i 80% liczba godzin dyskomfortu zmniejszyła się. Nie są to jednak zmiany pozwalające nawet na częściowe rozwiązanie tego problemu. Kolejne zwiększenie oporu cieplnego przegród, przez bardzo znaczne pogrubienie izolacji (35 cm), pozwala ponownie obniżyć nieco liczbę godzin przegrzewania wnętrza (tabela 10). Zmiany te nie są jednak proporcjonalne do wzrostu grubości izolacji i oczywiście nie eliminują przegrzewania wnętrza.

Należy podkreślić, że izolacja termiczna obudowy budynku w zdecydo-

**Tabela 10. Budynek o minimalnej pojemności cieplnej, izolacja termiczna pogrubiona do 35 cm**

Poziom akceptacji	Liczba godzin w strefach obiektu				
	I	II	III	IV	V
90%	443	437	422	502	518
80%	97	88	120	264	283

wany i bardzo korzystny sposób wpływa na ochronę wnętrza przed przegrzewaniem. Nieuzasadnione są natomiast stwierdzenia o „przeizolowaniu budynku” czy oczekiwania, że słabiej izolowane przegrody ułatwią rozładowanie nagromadzonej we wnętrzu energii do otoczenia i w ten sposób zmniejszą uciążliwość przegrzewania wnętrza.

## Znaczenie aktywności cieplnej materiału akumulującego energię

Zdolności akumulacyjne przegród budowlanych zależą od ciepła właściwego i gęstości materiałów tworzących te przegrody. Dostęp do pojemności cieplnej na całej grubości warstwy jest z kolei zależny od przewodności cieplnej materiału. Proces wymiany energii między warstwą materiałową a otoczeniem charakteryzuje kombinacja tych trzech parametrów, nazywana efuzywnością termiczną lub po polsku aktywnością termiczną materiału  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$$

gdzie:

$\lambda$  – przewodność cieplna materiału;  
 $c$  – ciepło właściwe;  
 $\rho$  – gęstość objętościowa.

Jak łatwo zauważyć, ciężkie materiały konstrukcyjne, typu żelbet, kamień naturalny charakteryzują się wysoką aktywnością cieplną, a więc najbardziej nadają się do konstruowania akumulatorów energii w budynku. W tabeli 11 zestawiono wartości aktywności cieplnej materiałów użytych do obliczeń

**Tabela 11. Aktywność cieplna materiałów stosowanych w obliczeniach symulacyjnych**

Materiał	Aktywność cieplna [ $W \cdot s^{1/2} / (m^2 \cdot K)$ ]
Żelbet	2300
Cegła	1177
Drewno	664
Gips	474

symulacyjnych. Biorąc pod uwagę podane wyniki, oczywiste jest stwierdzenie, że nie tylko grubość, ale i rodzaj materiału ma duży wpływ na stateczność cieplną wnętrza. W celu zilustrowania tego efektu w tabeli 12 pokazano wyniki obliczeń przegrzewania budynku, w którym zamiast kon-

**Tabela 12. Żelbetowa konstrukcja ścian grubości 12 cm, izolacja termiczna 15 cm**

Poziom akceptacji	Liczba godzin w strefach obiektu				
	I	II	III	IV	V
90%	207	224	190	222	239
80%	0	0	11	88	105

strukcyjnej warstwy ceglanej grubości 12 cm zastosowano żelbetową warstwę konstrukcyjną o tej samej grubości, zarówno w ścianach zewnętrznych, jak i wewnętrznych.

Bezpośredni wpływ rodzaju materiału na termiczne warunki we wnętrzu budynku warto obserwować, porównując wartości z tabeli 12 z informacjami zawartymi w tabeli 5. Dwukrotna różnica aktywności cieplnej między żelbetem a cegłą skutkuje w przypadku strefy V zmniejszeniem liczby godzin przegrzewania o 20%, a w przypadku strefy nr I o 27%. Natomiast w przypadku analizowanego wcześniej wariantu minimalnej pojemności wystąpiło złożenie dwóch niekorzystnych dla mikroklimatu czynników, nie tylko bardzo znaczne zmniejszenie grubości warstwy, ale także niska aktywność termiczna gipsu, nawet w porównaniu z cegłą. W tabeli 11 pokazano właściwości drewna w związku z jego obecnością na podłodze symulowanego obiektu. W przypadku tej przegrody występuje konflikt wymagań. Niska aktywność cieplna warstwy posadzkowej jest bardzo pożądana przy bezpośrednim kontakcie bosej stopy z podłogą. Natomiast obecność drewna utrudnia akumulację energii w bezpośrednio nasłonecznionej zwykle przegrodzie.

## Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule wyniki obliczeń symulacyjnych oraz bazujące na nich analizy mają na celu pokazanie wpływu decyzji projektowych związanych z wyborem rodzaju konstrukcji budynku i doborem materiałów na mikroklimat wewnętrzny w okresie letnim. Duża trudność związana z tym zagadnieniem polega na wzajemnym powią-

zaniu bardzo wielu czynników, mających wpływ na efekt końcowy, dlatego też w pokazanych obliczeniach unikano zmieniania wielu różnych cech budynku jednocześnie, a także zbytniego poszerzania poruszanej tematyki. Skoncentrowano się na pokazaniu pozytywnego wpływu pojemności cieplnej budynku na eliminację lub ograniczenie przegrzewania wnętrza. Ciężkie i dobrze przewodzące materiały budowlane nadają budynkowi żadaną zwykle stateczność cieplną, która pozwala znacznie ograniczyć maksymalną temperaturę operatywną, ale też chroni wnętrze przed spadkiem temperatury w trakcie lata. Wpływ pojemności cieplnej budynku jest jednak tylko jednym ze sposobów biernego kształtowania korzystnego mikroklimatu wnętrza, bez udziału wymuszających te warunki instalacji i związanych z nimi nakładów. Inne sposoby, to dobór racjonalnej powierzchni i rodzaju przeszkleń, stałe geometryczne osłony otworów okiennych, ograniczenie promieniowania docierającego przez szyby do wnętrza przy użyciu szyb o zmiennych parametrach, a także różnego rodzaju zasłon i rolet czy wreszcie – wykorzystany w opisanych symulacjach – sposób schładzania masy termicznej budynku przez intensywne wentylowanie wnętrza w nocy. Dobre wykorzystanie wszystkich dostępnych możliwości powinno zapewnić racjonalne projektowanie budynków energooszczędnych.

## Literatura

- [1] Kisilewicz, T. Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych. Wydawnictwo PK, No. 364, Kraków 2008.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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.