

DOROTA CHWIEDUK\*

ZAPOTRZEBOWANIE NA CIEPŁO I CHŁÓD  
POMIESZCZEŃ NA PODDASZUHEATING AND COOLING ENERGY NEEDS  
OF ROOMS AT ATTICS

## Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane aspekty dostępności promieniowania słonecznego i jego termicznej konwersji w budynku. We współczesnych budynkach przepływ energii przez okna, spowodowany głównie promieniowaniem słonecznym, oraz straty (zyski) wentylacyjne decydują o zapotrzebowaniu na ciepło/chłód budynku. Przeprowadzono symulację numeryczną w celu wyznaczenia zmienności w czasie obciążeń grzewczych/chłodniczych budynku. Wyniki pokazują, że oddziaływanie promieniowania słonecznego poprzez jego bezpośrednie przenikanie przez szyby do pomieszczeń i ich przegrzewanie może być istotnym problemem dla pomieszczeń o pewnej lokalizacji. Istnieją różne możliwości ograniczenia zysków z promieniowania słonecznego. Jedną z nich jest zastosowanie materiałów PCM zintegrowanych ze strukturą budynku, co opisano w referacie.

*Słowa kluczowe: energia słoneczna, zapotrzebowanie na ciepło/chłód, materiały PCM*

## Abstract

Paper deals with some aspects of solar energy availability and its thermal conversion in a building. In present buildings energy flow through windows, caused mainly by solar energy, and heat ventilation losses (gains) decide on energy demand of a building. The numerical simulation has been performed to predict the energy demand changes in time. The results show that overheating in summer due to high solar irradiation and energy transmitted and absorbed in glazing could be a real problem for some room locations. There are different options to overcome the problem of too much solar gain. One of the measure is to apply Phase Change Materials and to incorporate them into building structure, what is presented in the paper.

*Keywords: solar energy, heating/cooling energy demand, Phase Change Materials*

\* Dr hab. inż. Dorota Chwieduk, prof. PW, Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska.

## 1. Wstęp

Dobrze zaprojektowany i wykonany budynek powinien zachowywać się w zimie jak kolektor słoneczny i magazyn pozyskanej energii promieniowania słonecznego, a także jak swoista pułapka cieplna. Jednocześnie powinien wykazywać się zdolnością do funkcjonowania w cyklu rewersyjnym, czyli w lecie powinien być kolektorem i magazynem chłodu. W ciągu dnia w zimie budynek powinien być „otwarty” na oddziaływanie promieniowania słonecznego, w nocy powinien się „zamykać”, aby zachowywać pozyskane ciepło dzięki ograniczeniu w jak największym stopniu strat ciepła do otoczenia. Z kolei latem w czasie dnia budynek powinien być „zamknięty”, aby ograniczyć dostęp promieniowania słonecznego, natomiast nocą powinien „otwierać się”, aby umożliwić chłodzenie wnętrza.

## 2. Dostępność promieniowania słonecznego

Warunki nasłonecznienia charakteryzują się dużą zmiennością napromieniowania zarówno w krótkim, dziennym, jak i w długim, rocznym przedziale czasu. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń napromieniowywania w dowolnym przedziale czasu różnie usytuowanych powierzchni sformułowano wnioski odnośnie kształtowania obudowy budynku w kontekście jego nasłonecznienia [1, 2]. Jak wykazały przeprowadzone analizy symulacyjne w okresie najlepszej dostępności promieniowania słonecznego najbardziej nasłonecznione są powierzchnie o małym pochyleniu ( $\beta = 15^\circ$ ), bliskie poziomym i zorientowane na południowy zachód (o kącie azymutalnym  $\gamma = +45^\circ$ ). W miesiącu czerwcu, w którym występują najlepsze warunki nasłonecznienia w skali roku, średnie dzienne napromieniowanie osiąga poziom  $19 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{dzień})$ . Ze wzrostem pochylenia (względem poziomu) napromieniowanie maleje, osiągając najmniejsze wartości dla powierzchni pionowych. Dla kierunku południowego  $\gamma = 0^\circ$  średnie dzienne półsferyczne napromieniowanie powierzchni pionowej osiąga poziom  $10,5 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{dzień})$ , czyli jest prawie dwukrotnie mniejsze niż dla najlepiej eksponowanych powierzchni. Powierzchnie południowe o dużych pochyleniach, a szczególnie pionowe, są w lecie względnie równomiernie napromieniowywane w ciągu dnia i ich dzienne półsferyczne napromieniowanie jest znacznie mniejsze niż powierzchni wschodnich, a szczególnie zachodnich. Powierzchnie zachodnie obudowy budynku są więc najbardziej napromieniowywane w czasie całego lata.

W okresie najgorszej dostępności promieniowania słonecznego, w zimie, najlepiej nasłonecznione są powierzchnie o dużych pochyleniach, większych co najmniej o  $10^\circ$  od lokalnej szerokości geograficznej i zwrócone na południe. Dla Warszawy pochylenie to wynosi  $52^\circ$ . W grudniu, miesiącu o najgorszych warunkach nasłonecznienia, dla „najlepiej” usytuowanej powierzchni ( $\beta = 65^\circ$ ,  $\gamma = 0^\circ$ ) średnie dzienne półsferyczne napromieniowanie wynosi około  $2,5 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{dzień})$ . Napromieniowanie dzienne powierzchni pionowej południowej wynosi w tym okresie około  $1,9 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{dzień})$ , czyli jest przeszło pięciokrotnie niższe niż w czerwcu. Natomiast w grudniu napromieniowanie powierzchni poziomej wynosi zaledwie  $1,5 \text{ MJ}/(\text{m}^2\text{dzień})$ . Zmiany napromieniowania są czułe zarówno na pochylenie, jak i na orientację, przy czym występuje wyraźna preferencja dla kierunku południowego i kątów azymutalnych bliskich zeru, ze względu na wyraźne zwiększenie zysków słonecznych.

### 3. Wpływ energii promieniowania słonecznego na bilans cieplny wybranych modelowych pomieszczeń budynku

Sformułowany model matematyczny i jego zapis numeryczny pozwalają na prowadzenie obliczeń symulacyjnych procesów zachodzących w obudowie budynku i jego otoczeniu w zmieniających się w czasie warunkach i dla różnych parametrów konstrukcyjno-materiałowych obudowy budynku. Równania opisujące przepływ energii przez przegrody budynku są równaniami cząstkowymi parabolicznymi dla obszarów wewnętrznych, dla których sformułowano warunki początkowe i brzegowe. Do obliczeń przyjęto dla każdego miesiąca te same dzienne rozkłady temperatury otoczenia zewnętrznego i strumienia energii promieniowania słonecznego, powtarzające się cyklicznie w kolejnych dniach danego miesiąca. Bilanse dobowe energii dla kolejnych dni zmieniają się, dążąc do pewnych ustalonych wartości w kolejnych przedziałach czasowych, zgodnie z twierdzeniem o asymptotycznych własnościach rozwiązań równań parabolicznych. Do obliczeń symulacyjnych przyjęto pewne założenia odnośnie stanu termicznego wnętrza budynku i jego otoczenia oraz pewne wartości parametrów materiałowych i konstrukcyjnych przegród zewnętrznych nieprzezroczystych i przezroczystych, najbardziej istotne przedstawiono w tabeli 1. Parametry fizyczne materiałów budowlanych i struktura obudowy zostały tak przyjęte, aby budynek spełniał obowiązujące wymagania energooszczędności.

Tabela 1

Wybrane charakterystyczne parametry obudowy rozważanego budynku

Element obudowy	Grubość [m]	Ciepło właściwe [J/(kg K)]	Przewodność cieplna [W/(m K)]	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Parametry optyczne dla promieniowania słonecznego	Emisyjność dla promieniowania cieplnego
Przegroda						
Ściana	0,52				0,55	0,92
warstwa:						
zewnętrzna	0,12	840	0,78	1600		
środkowa	0,2	800	0,038	38		
wewnętrzna	0,2	840	0,7	1600		0,5
Okno						
Szyba	0,004	840	0,78	2700	Transmisyjność /refleksyjność/ absorpcyjność 0,803/0,101/ 0,096	0,84
przeźreń powietrzna	0,012	1005	0,033	1,225	–	–

Nieprzezroczyste przegrody (trójwarstwowe) charakteryzują się dobrą izolacyjnością cieplną. Instalacja wentylacyjna (mechaniczna) jest wyposażona w urządzenia rekuperacyjne. Zapotrzebowanie na ciepło w wyniku przepływu ciepła przez przegrody nieprzezroczyste i na cele wentylacyjne jest znacznie ograniczone. Okna są standardowe, dobrej jakości, z wkładką izolacyjną w szczelinie gazowej między szymbami (w rozpórce). W rozważaniach przyjęto, że temperatura pomieszczeń jest utrzymywana na stałym poziomie w ciągu całego roku, dzięki odpowiedniemu sterowaniu automatyką funkcjonowania urządzeń grzewczo/chłodzących. W tabeli 2 zawarto wyniki obliczeniowe miesięcznego zapo-

trzebowania  $Q_{h/c}$  na ciepło i chłód pomieszczeń modelowych na poddaszu (powierzchnia 16 m<sup>2</sup>, kubatura 40 m<sup>3</sup>, parametry obudowy zamieszczone są w tabeli 1) o różnej orientacji oraz miesięczne sumy energii/ciepła  $Q_{ok}$  wymieniane przez okna dla dwóch różnych powierzchni okien.

Tabela 2

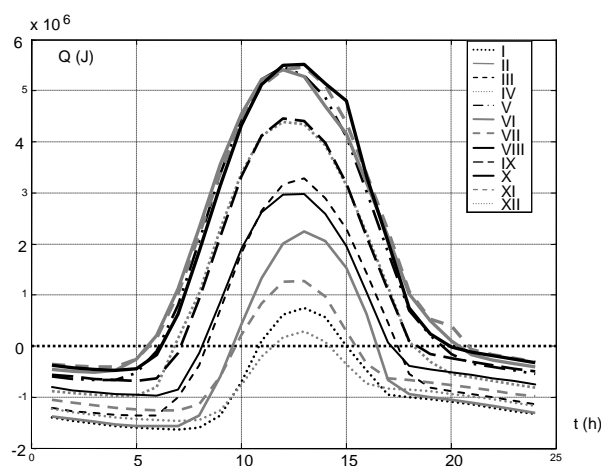
**Miesięczne zapotrzebowanie  $Q_{h/c}$  na ciepło i chłód pomieszczeń na poddaszu o różnej orientacji oraz miesięczne sumy energii/ciepła  $Q_{ok}$  wymieniane przez okna [MJ]**

[MJ]	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Pochylenie = 45°, azymut = 0°, okno 1×1 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	376,52	257,21	150,10	45,92	223,34	272,43	309,01	280,22	121,42	60,95	236,59	348,70
$Q_{ok}$	108,81	29,99	55,15	161,43	260,16	271,45	288,06	272,12	170,24	67,17	49,14	111,74
Pochylenie = 45°, azymut = -90°, okno 1×1 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	411,36	324,31	233,71	23,99	155,51	229,02	248,15	182,41	29,31	141,40	272,53	365,14
$Q_{ok}$	140,80	91,60	21,62	99,68	202,55	234,53	236,31	189,03	92,18	3,92	82,14	126,84
Pochylenie = 45°, azymut = 90°, okno 1×1 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	400,1	301,5	205,9	5,31	185,5	258,9	297,2	243,4	53,26	128,9	268,4	361,5
$Q_{ok}$	130,5	70,61	3,85	116,2	228,1	259,9	278,0	240,9	112,5	7,09	78,34	123,5
Pochylenie = 45°, azymut = 180°, okno 1×1 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	419,41	346,80	289,78	113,44	78,03	177,58	195,83	99,95	58,38	186,77	286,11	369,73
$Q_{ok}$	148,20	112,26	73,12	20,66	136,96	190,97	192,01	119,21	17,86	44,04	94,61	131,05
Pochylenie = 45°, azymut = 0°, okno 2×2 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	680,68	300,55	94,32	631,18	1125,5	1203,6	1292,0	1212,5	719,12	203,53	356,41	671,12
$Q_{ok}$	445,97	100,23	276,14	736,44	1164,9	1209,2	1280,2	1211,4	765,79	317,41	192,08	463,86
Pochylenie = 45°, azymut = -90°, okno 2×2 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	824,9	578,5	252,1	350,9	863,4	1035,9	1056,7	834,0	362,8	119,2	505,4	739,2
$Q_{ok}$	588,4	374,6	65,7	461,6	909,6	1045,9	1050,9	842,8	418,9	0,97	339,1	531,1
Pochylenie = 45°, azymut = 90°, okno 2×2 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	778,6	483,9	137,2	425,7	979,1	1151,3	1246,1	1069,7	455,1	69,17	488,1	724,3
$Q_{ok}$	542,6	281,1	47,66	534,9	1022,3	1158,3	1235,5	1072,3	508,7	49,99	322,2	516,3
Pochylenie = 45°, azymut = 180°, okno 2×2 (m <sup>2</sup> )												
$Q_{h/c}$	858,28	671,58	484,23	8,29	562,90	836,23	853,54	514,28	23,92	300,89	561,50	758,20
$Q_{ok}$	621,24	466,38	294,81	109,36	617,02	851,40	853,15	531,42	88,87	177,27	394,47	549,79

Przedstawione w tabeli 2, a także w formie graficznej na rys. 1–3 wyniki przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych [1, 2] dotyczą wybranych pomieszczeń na poddaszu, które są ograniczone przegrodami pochylonymi (45° względem poziomu). Latem ma miejsce szczególnie wyraźny wpływ okna na bilans cieplny pomieszczeń. Przepływ ciepła do pomieszczenia obrazują dane w tabeli 2, które są na zacięniowanym tle. Latem pozostałe składowe bilansu, takie jak wymiana ciepła przez przegrody nieprzezroczyste i do celów wentylacyjnych jest na niewielkim poziomie. Pochylenie powierzchni okna i innych prze-

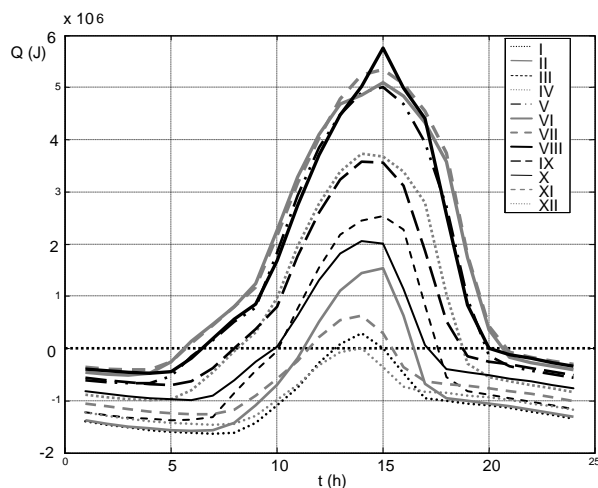
gród zewnętrznych zwiększa znacznie przepływ energii do wnętrza pomieszczenia i powoduje wzrost zapotrzebowania na chłód.

Na rysunkach 1–3 przedstawiono przebiegi zmian zapotrzebowania na ciepło/chłód w ciągu jednego reprezentatywnego dnia w kolejnych miesiącach roku, dla pomieszczeń na poddaszu zorientowanych w czterech podstawowych kierunkach, o dużych oknach połaciowych ( $2 \times 2 \text{ m}^2$ ). Należy zaznaczyć, że rozkład wartości energii nie jest funkcją ciągłą, lecz schodkową, ale ze względu na dużą liczbę danych wartości energii (godzinne) dla wyraźniejszej prezentacji wyników obliczeń, wartości energii poszczególnych obciążeń są przedstawione jako krzywa ciągła. Przedstawione w tabeli 2 dane są sumami miesięcznymi i nie oddają w pełni dynamiki zjawisk zachodzących w budynku i jego otoczeniu, bowiem powstają w wyniku zsumowania zapotrzebowania na ciepło i chłód w danym dniu, opisanych matematycznie wartościami ujemnymi i dodatnimi. Dopiero analiza zmienności obciążeń w ciągu doby, co zilustrowano na rys. 1–3, obrazuje rzeczywisty, a nie uśredniony w czasie rozkład obciążeń. Wartości ujemne oznaczają zapotrzebowanie na ciepło (pomieszczenie traci ciepło), dodatnie zapotrzebowanie na chłód (pomieszczenie zyskuje ciepło, które trzeba odprowadzić). Jak można zauważyć w ciągu dnia, w różnym czasie w zależności od miesiąca, występuje zapotrzebowanie na chłód przy orientacji południowej i zachodniej. Zapotrzebowanie na chłód występuje także, choć w krótszym czasie w pomieszczeniach północnych, co może wydawać się zaskakujące.



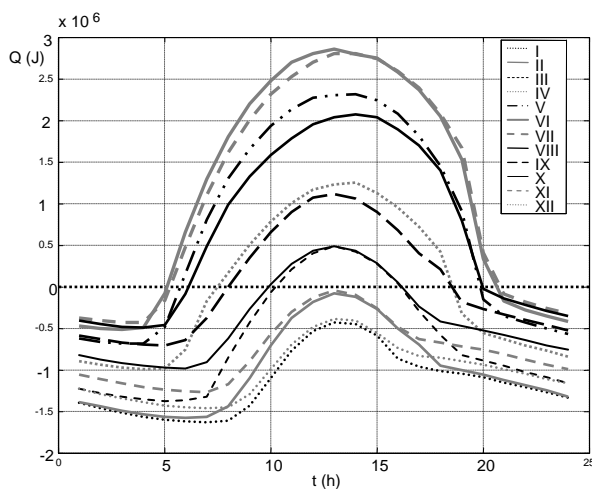
Rys. 1. Dobowy rozkład obciążeń w kolejnych miesiącach roku, pomieszczenia na poddaszu, okna  $2 \times 2 \text{ m}^2$ , zorientowanie na południe [2]

Fig. 1. Daily energy demand changes in all months, rooms at attics, windows  $2 \times 2 \text{ m}^2$ , south oriented



Rys. 2. Dobowy rozkład obciążeń w kolejnych miesiącach roku, pomieszczenia na poddaszu, okna  $2 \times 2 \text{ m}^2$ , zorientowanie na zachód [2]

Fig. 2. Daily energy demand changes in all months, rooms at attics, windows  $2 \times 2 \text{ m}^2$ , west oriented



Rys. 3. Dobowy rozkład obciążeń w kolejnych miesiącach roku, pomieszczenia na poddaszu, okna  $2 \times 2 \text{ m}^2$ , zorientowanie na północ [2]

Fig. 3. Daily energy demand changes in all months, rooms at attics, windows  $2 \times 2 \text{ m}^2$ , north oriented

W przypadku pomieszczenia północnego zapotrzebowanie na chłód występuje od marca do października. Latem jest ono średnio dwukrotnie niższe niż dla pozostałych orientacji, natomiast zapotrzebowanie na ciepło zimą jest tylko nieznacznie wyższe. Pochylone połączenie dachu, w tym okna, są napromieniowywane promieniowaniem bezpośrednim nie tylko

latem, ale i w miesiącach wiosennych, tj. od kwietnia do września. Wtedy bowiem w ciągu dnia (różny czas dostępności promieniowania słonecznego w różnych miesiącach) kąt wzniesienia Słońca jest większy niż  $45^\circ$  (pochylenie połaci dachu  $45^\circ$ ) i promieniowanie słoneczne bezpośrednio dociera również do połaci północnych – w maju, czerwcu i lipcu w przybliżeniu od  $9^{00}$  do  $15^{00}$ , w sierpniu od  $10^{00}$  do  $14^{00}$ , w kwietniu od  $10^{30}$  do  $13^{30}$ . Należy dodać, że przy mniejszym pochyleniu dachu, co często jest stosowane – np.  $25^\circ$ , czas dostępności promieniowania słonecznego latem znacznie wydłuża się, nawet do kilkunastu godzin. Przykładowo w czerwcu powierzchnia północna o pochyleniu  $25^\circ$  „widzi” Słońce praktycznie przez cały dzień, bowiem wschód i zachód Słońca występują znacznie przed linią wschód–zachód, a mianowicie kąty azymutalne wynoszą odpowiednio  $-130$  i  $+130$ . Do położenia odpowiadającego dokładnie kierunkowi geograficznemu wschodu Słońce dociera około godz. 7 rano, kiedy to kąt wzniesienia Słońca jest już większy od  $25^\circ$ . Kierunek zachodni Słońce przecina około godz. 17, kąt wzniesienia jest wtedy mniejszy nieznacznie od  $25^\circ$  i tylko przez krótki czas bezpośrednio promieniowanie nie dociera do rozważanej powierzchni. Promieniowanie bezpośrednio dociera także do rozważanej powierzchni obudowy w miesiącach jesiennych (w październiku od  $11^{00}$  do  $13^{00}$ , we wrześniu od  $9^{00}$  do  $15^{30}$ ), a nawet zimowych (np. w lutym od  $11^{30}$  do  $12^{30}$ , marcu od  $9^{30}$  do  $14^{30}$ ). Należy zaznaczyć, że podane godziny dotyczą czasu słonecznego, a nie lokalnego. Czas dostępności promieniowania słonecznego można oszacować na podstawie diagramów drogi Słońca [3] lub dokładnie obliczyć na podstawie zależności geometrii sferycznej Ziemi i Słońca [4, 1]. Na skutek wzrostu napromieniowywania powierzchni pochylonej obudowy wzrasta strumień energii słonecznej przepływającej do wnętrza, w konsekwencji rośnie zapotrzebowanie na chłód pomieszczeń północnych, co zwykle nie jest oczekiwane w naszych warunkach klimatycznych, dlatego też temu problemowi poświęcono więcej miejsca w referacie.

W dużych miastach, ze względu na wysoki koszt gruntu, firmy deweloperskie przeznaczają ostatnie kondygnacje budynków na mieszkania. Mieszkania tego typu, zwane mansardowe, czyli mieszkania na poddaszu przy dachach pochylonych, a zwłaszcza poziomych, mogą ulegać znacznemu przegrzewaniu. Opisany przykład budynku odpowiada ze względu na zastosowane rozwiązania materiałowe obecnym normom i wymaganiom energooszczędności. Jednakże usytuowanie mieszkania bezpośrednio pod pochyloną obudową skutkuje występowaniem znacznych zysków cieplnych, przede wszystkim od promieniowania słonecznego, co dotyczy, jak pokazano na rys. 1–3, wszystkich orientacji, nawet północnych. Zimą zwiększona dostępność promieniowania słonecznego wpływa pozytywnie na bilans cieplny budynku, zmniejszając zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania pomieszczeń. Jednakże latem prowadzi do przegrzewania pomieszczeń i zapotrzebowania na chłód. Ograniczenie zysków od promieniowania słonecznego może nastąpić poprzez stosowanie zasłon zewnętrznych (żaluzji, rolet, okiennic) na oknach połaciowych, co jest możliwe, ale trudniejsze i kosztowniejsze niż przy oknach standardowych, pionowych. Jeżeli przestrzeń poddasza musi być rzeczywiście przeznaczona na mieszkanie, wtedy jedną z możliwości poprawy stanu termicznego pomieszczeń jest zastosowanie materiałów PCM wkomponowanych w strukturę budynku.

#### 4. Zastosowanie materiałów zmiennofazowych PCM

Oddziaływanie energii promieniowania słonecznego na budynek ma niewątpliwie pozytywny wpływ zimą. Latem może także przyczyniać się do zmniejszenia zużycia energii konwencjonalnej, do chłodzenia dzięki zastosowaniu materiałów zmiennofazowych PCM (*Phase Change Materials*) w strukturze budynku. Stosowanie tych materiałów może poprawiać bilans cieplny budynku w cyklu całorocznym, dzięki umożliwieniu w ciągu dnia magazynowania energii słonecznej w elementach budynku, takich jak ściany, posadzki i stropy, i oddawaniu jej do pomieszczeń z przesunięciem fazowym nocą. Zjawiska te mogą służyć zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia budynków. W efekcie rozkład obciążeń pokazany na rys. 1–3 ulega spłaszczeniu. Materiały PCM stosowane w budownictwie ulegają przemianie fazowej (topnienie-zestalenie) o bardzo dużej entalpii przemiany, zachodzącej w zakresie zmian temperatury w pomieszczeniu. Są one w stanie przejąć duży strumień ciepła, nieznacznie tylko zmieniając temperaturę. Stosowanie materiałów PCM w strukturze budynku polega na dodaniu ich w odpowiedniej proporcji do materiałów budowlanych, takich jak gips czy cement. Pojemność cieplna materiałów PCM zależy przede wszystkim od ciepła przemiany fazowej i dla materiałów, które mogą być stosowane w budownictwie wynosi od 100 kJ/kg (gotowe produkty – mikrokapsułki) do 250 kJ/kg (substancje jednorodne). Można zaznaczyć, że jeżeli w materiale PCM występują duże przechłodzenia, wtedy nie stosuje się go w budownictwie. Mogą bowiem nie wystąpić warunki zapewniające jego zestalenie, w konsekwencji materiał nie działa jako cykliczny zasobnik ciepła (efekt ten zmniejsza się, dodając substancje pełniące funkcje zarodków nukleacji). Kolejnym ważnym zagadnieniem jest stabilność materiału przy zachodzeniu przemian topnienie-zestalenie, których może być do kilkunastu tysięcy.

W ramach prowadzonego w ITC PW projektu naukowo-badawczego analizowane są właściwości termofizyczne (przewodność cieplna, pojemność cieplna) kompozytów budowlanych z PCM w zależności od koncentracji i postaci dodanego PCM. Przebadano próbki kompozytu o zawartości PCM od 15 do 40% (wagowo). Prowadzone są prace nad opracowaniem nowej metody pomiarów efektywnych właściwości cieplnych struktur budowlanych zawierających materiał ulegający przemianie.

#### Literatura

- [1] Chwieduk D., *Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku*, Prace IPPT, 11/2006, Warszawa.
- [2] Chwieduk D., *Some aspects of modeling the energy balance of a room in regard to the impact of solar energy*, Solar Energy, International Journal Elsevier Science, 82, 2008, 870-884.
- [3] Chwieduk D., *Dostępność promieniowania słonecznego do obudowy budynku zlokalizowanego w Polsce Centralnej*, Polska Energetyka Słoneczna, nr 1–4/2008, Wyd. PTES-ISES, Warszawa 2008, 46-56.
- [4] Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons Inc., New York 1991.

*Prace wykonywane są w ramach realizacji projektu badawczego Nr N N512 459936 „Badania akumulacji ciepła z wykorzystaniem materiałów ulegających przemianie fazowej w zastosowaniu do budownictwa energooszczędnego”.*