

Wojciech CEPIŃSKI, Piotr JADWISZCZAK*

MOŻLIWOŚĆ WYKORZYSTANIA CHŁODZENIA RADIACYJNEGO W BUDYNKU JEDNORODZINNYM

Na całym świecie coraz większym zainteresowaniem cieszą się ekologiczne, naturalne sposoby pozyskiwania energii do chłodzenia budynków. Możliwość zaspokajania bądź uzupełniania potrzeb chłodniczych budynków ze źródeł naturalnych ściśle związana jest z cechami energetycznymi budynku i jego otoczenia. W artykule przedstawiono analizę wykorzystania chłodzenia radiacyjnego do zasilania lub wspomagania instalacji chłodniczej pracującej na potrzeby budynku jednorodzinny w warunkach klimatycznych Polski.

1. WSTĘP

1.1. WPROWADZENIE

Rosnąca potrzeba oszczędności energii konwencjonalnej oraz konieczność ograniczenia zanieczyszczenia powietrza sprzyja wykorzystywaniu „zielonej” energii naturalnej. W naszej strefie klimatycznej kształtowanie mikroklimatu pomieszczeń wymaga ich długookresowego ogrzewania i coraz powszechniej chłodzenia. Pochłania to prawie 40% wytworzonej w kraju energii. Pozyskiwanie taniej i „zielonej” energii ze źródeł naturalnych może zaspokajać lub uzupełniać potrzeby energetyczne budynków, obniżając zapotrzebowanie energii wytwarzanej z paliw kopalnych.

Pod pojęciem energii naturalnej rozumie się powszechnie dostępne w naturze źródła energii, którą można pozyskiwać i wykorzystywać w określonym celu. Teoretycznie w środowisku występują niewyczerpalne pokłady energii naturalnej. Podstawową przeszkodą w jej szerokim wykorzystywaniu do celów grzewczych i chłodniczych jest jej

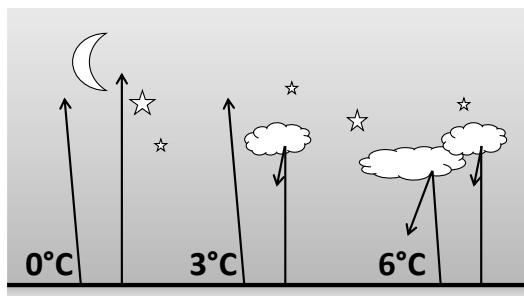
* Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, wojciech.cepinski@pwr.edu.pl.

mała gęstość oraz odwrotna proporcjonalność dostępności i zapotrzebowania. Łatwo dostępny w naturze zimą chłód potrzebny jest w budynkach latem, a naturalne ciepło dostępne latem potrzebne jest w budynkach zimą.

Ze względu na rosnące wymagania komfortu i dostępność technologii chłodzenie budynków staje się coraz powszechniejsze. Obok ogrzewania chłodzenie staje się znaczącą pozycją w całorocznym zapotrzebowaniu energii w budynkach. Energia naturalna może być źródłem chłodu również latem, istnieją bowiem technologie pozyskiwania użytecznego chłodu z natury nawet w środku lata. Jedną z nich jest wykorzystanie efektu chłodzenia radiacyjnego jako taniego, naturalnego źródła energii do ochładzania budynków.

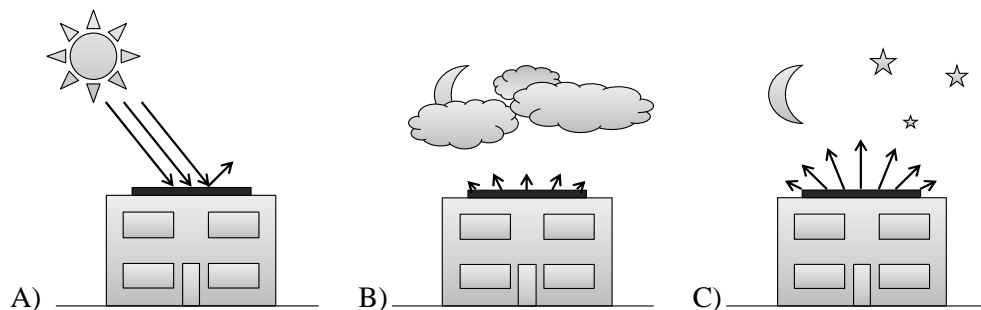
1.2. CHŁODZENIE RADIACYJNE [1, 2]

Zjawisko chłodzenia radiacyjnego polega na obniżaniu temperatury danego ciała poniżej temperatury otaczającego powietrza na skutek intensywnego wypromieniowania ciepła do chłodniejszego nieboskłonu (atmosfery). Najintensywniejsze chłodzenie radiacyjne dotyczy płaszczyzn poziomych (stropodachów, gruntu itp.). Najintensywniejsze chłodzenie radiacyjne występuje w nocy w warunkach bezchmurnego nieba, ponieważ do płaszczyzny poziomej dociera najmniejsze promieniowanie długofalowe atmosfery stanowiące rekompensatę dla wypromieniowania ciepła przez tę płaszczyznę. W wyniku znacznych radiacyjnych strat ciepła temperatura zewnętrznej powierzchni danego radiatora (stropodachu, gruntu, itp.) może obniżyć się w stosunku do temperatury powietrza otaczającego o 4 do 7°C, a w sprzyjających warunkach nawet o 11°C. Zachmurzenie nieboskłonu ogranicza chłodzenie radiacyjne, co pokazano na rysunku 1. W analogicznych warunkach temperaturowych przy pełnym, częściowym i zerowym zachmurzeniu osiąga się różne temperatury powierzchni wypromieniowującej ciepło w kierunku nieboskłonu. Z punktu widzenia pozyskiwania chłodu w naturalnym procesie chłodzenia radiacyjnego pożądane są bezchmurne noce, z odsłoniętym nieboskłonem.



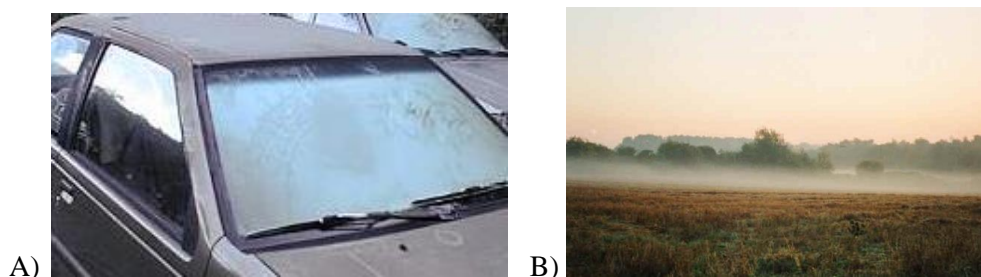
Rys. 1. Chłodzenie radiacyjne – mechanizm zjawiska

Chłodzenie radiacyjne jest pasywnym sposobem pozyskiwania chłodu do chłodzenia budynków. Jest przeciwieństwem rozpowszechnionego mechanizmu pozyskiwania ciepła z promieniowaniem słonecznym w kolektorach słonecznych (rys. 2).



Rys. 2. Pasywne ogrzewanie słoneczne (A) oraz pasywne chłodzenie radiacyjne w warunkach zachmurzonego (B) i bezchmurnego nieboskłonu (C)

Efekt pasywnego chłodzenia radiacyjnego znany jest od wielu wieków. Już w starożytności w krajach o gorącym klimacie wznoszono budynki w sposób wykorzystujący chłodzenie radiacyjne do kontrolowanego wychładzania nocą nagrzanymi w ciągu dnia pomieszczeniami. Wykorzystywano je również do produkcji lodu na pustyni. W Polsce można zaobserwować efekty chłodzenia radiacyjnego np. tworzącą się na powierzchni szyb samochodowych warstwę szronu w warunkach bezchmurnego nieba i dodatniej temperatury powietrza lub tzw. mgłę radiacyjną powstającą nad ranem na skutek nocnego wypromieniowania ciepła (rys. 3).



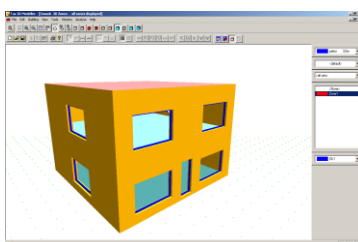
Rys. 3. Efekty chłodzenia radiacyjnego: A) zamrożona szyba samochodowa (źródło <http://www.rain.org>) oraz B) mgła radiacyjna (źródło <http://meteorologiaonline.republika.pl>)

W technice chłodniczej powstają nowatorskie konstrukcje z powodzeniem wykorzystujące efekt chłodzenia radiacyjnego. Specjalne materiały nanooptyczne odbijają promieniowanie słoneczne jednocześnie wypromieniowując ciepło do otwartego nieboskłonu obniżając temperaturę powierzchni na której są zamontowane, np. dachu budynku [3–5].

2. ANALIZA

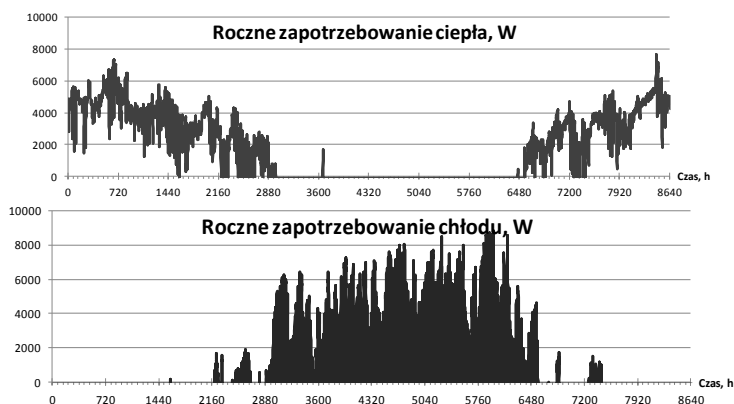
2.1. ZAŁOŻENIA

W artykule określono możliwość zasilania lub wspomagania pasywnym chłodzeniem radiacyjnym instalacji chłodniczej w jednorodzinny budynek niskoenergetyczny. Do analizy przyjęto budynek dwukondygnacyjny o prostej bryle ($9 \times 9 \times 6$ m), o dostępnej powierzchni płaskiego dachu 81 m^2 , zlokalizowany we Wrocławiu (rys. 4). Analizowany budynek jest ogrzewany zimą do temperatury normatywnej i chłodzony latem do tzw. temperatury nadążnej.



Rys. 4. Trójwymiarowy model numeryczny budynku – podstawa symulacji energetycznych

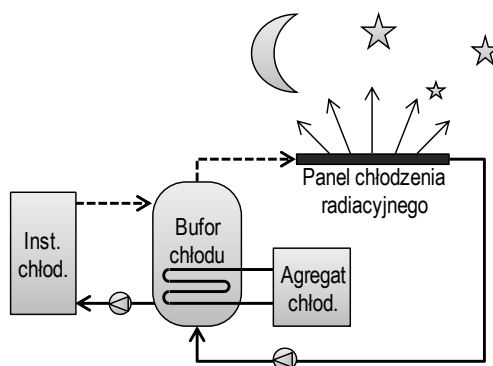
Wykorzystując dynamiczny model energetyczny budynku, zbudowany przy wykorzystaniu aplikacji komputerowej EDSL TAS, wyznaczono potrzeby energetyczne analizowanego budynku w skali całego roku. Symulację przeprowadzono w kroku godzinowym dla warunków typowego roku klimatycznego we Wrocławiu (rys. 5). Projektowe obciążenie cieplne budynku wynosi $8,0 \text{ kW}$, projektowe obciążenie chłodnicze $8,8 \text{ kW}$, roczne zapotrzebowanie ciepła na cele ogrzewania $17\,228 \text{ kWh}$, a chłodu $9\,887 \text{ kWh}$.



Rys. 5. Roczne zapotrzebowanie ciepła i chłodu w analizowanym budynku

Istnieje wiele rozwiązań instalacji i systemów chłodzenia budynków gdzie czynnikiem obiegowym jest woda. W zależności od przyjętego rozwiązania zmieniają się temperatury robocze wody obiegowej oraz rodzaj i wielkość odbiornika chłodu w pomieszczeniu. Niskie temperatury robocze wody obiegowej (np. 12/16°C) pozwalają ograniczać wielkość odbiornika i zwiększyć jego wydajność, wymagają jednak bardzo sprawnego źródła chłodu. Średnie temperatury (np. 14/18°C) zwiększają wymaganą powierzchnię odbiornika chłodu, pozwalając jednocześnie na stosowanie bardziej energooszczędnych źródeł chłodu. Wyższe temperatury wody obiegowej (np. 16/20°C) wymagają dużych powierzchni chłodzących w pomieszczeniach, jednocześnie umożliwiając wykorzystanie naturalnych źródeł chłodu o małej gęstości strumienia ciepła. W budynkach jednorodzinnych, gdzie wymagania odnośnie temperatury chłodzonych pomieszczeń są umiarkowane, spotyka się nawet układy chłodzące o relatywnie wysokich parametrach (np. 18/22°C) wykorzystujące płaszczyzny chłodzące będące w okresie zimowym ogrzewaniami płaszczyznowymi (podłogi, ściany). W czasie upałów jest to znaczna ulga dla użytkowników, a złożony układ chłodzenia aktywnego nie wymaga inwestycji.

Do analizy przyjęto wodny, dwururowy, pompowy system chłodzenia, zasilany konwencjonalnym sprężarkowym źródłem chłodu napędzanym energią elektryczną, dla czterech typowych zakresów temperatury wody obiegowej 12/16, 14/18, 16/20 i 18/22°C. Wykorzystując wspólny bufor układ wspomagany jest zespołem płaskich paneli chłodzenia radiacyjnego (rys. 6). Rodzaj odbiornika chłodu ma w tej analizie znaczenie wtórne, ponieważ celem jest określenie udziału chłodzenia radiacyjnego w rocznym zapotrzebowaniu chłodu w domu jednorodzinnym bez wskazywania szczegółowego rozwiązania instalacyjnego.



Rys. 6. Schemat instalacji pozyskiwania chłodu z chłodzenia radiacyjnego

Udział chłodzenia radiacyjnego w zaspokajaniu zapotrzebowania chłodu w budynku wyznaczono w całorocznej symulacji energetycznej zapotrzebowania chłodu i radiacyjnej produkcji chłodu. Dodatkowo w celu sprawdzenia wpływu wielkości paneli radiacyjnych dla tego samego budynku wariantowo zmieniano ich powierzchnię od

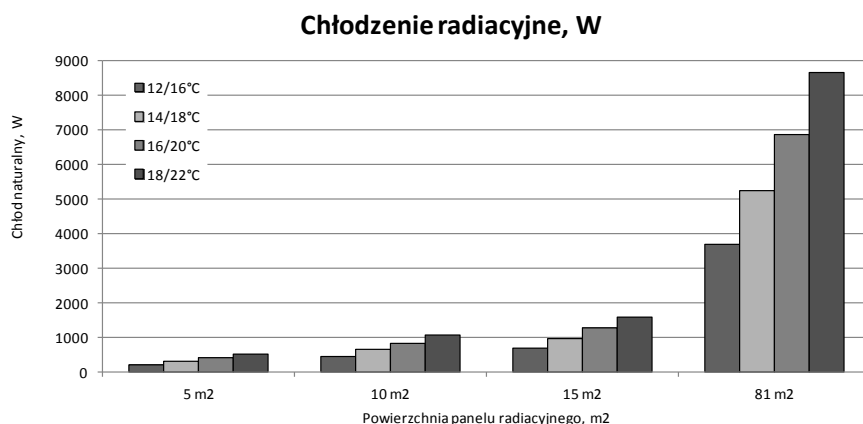
5 poprzez 10, 15 aż po 81 m² czyli całą dostępną powierzchnię dachu. Szczegółowo przeanalizowano dane meteorologiczne pod kątem występowania warunków umożliwiających chłodzenie radiacyjne oraz ilości naturalnego chłodu dostępnego z paneli radiacyjnych. Założono, że chłodzenie radiacyjne nie zachodzi przy pełnym zachmurzeniu, a w pozostałych przypadkach jego intensywność zależy od stopnia zachmurzenia niebosłonu. Chłodzenie radiacyjne zachodzi, gdy temperatura wody obiegowej jest maksymalnie o 1 K wyższa od temperatury otoczenia (ze względu na konwekcyjne straty ciepła panelu radiacyjnego).

2.2. WYNIKI

Całoroczna analiza oparta na symulacji numerycznej w kroku godzinowym pozwala w precyzyjny sposób ocenić możliwości zasilania lub wspomagania konwencjonalnego układu chłodzenia budynku panelami chłodzenia radiacyjnego. W przeciwieństwie do mechanicznych lub chemicznych źródeł chłodu nie wymagają one zasilania energią poza napędem pompy obiegowej. Podsumowanie wyników dotyczących wszystkich analizowanych wariantów zestawiono w tabeli 1 i przedstawiono na wykresie (rys. 7). Podano w niej roczną produkcję naturalnego chłodu oraz jej procentowy udział w rocznym zapotrzebowaniu chłodu w budynku, rozumiany jako oszczędność energii konwencjonalnej.

Tabela 1. Roczna produkcja chłodu w systemie chłodzenia radiacyjnego zależnie od wielkości kolektora i parametrów wodnej instalacji chłodu

Zapotrzebowanie chłodu, [kWh/a]	Parametry wodnej instalacji chłodu	Oszczędność	Chłodzenie radiacyjne 5 m ² , [W]	Chłodzenie radiacyjne 10 m ² , [W]	Chłodzenie radiacyjne 15 m ² , [W]	Chłodzenie radiacyjne 81 m ² , [W]
9 887	12/16°C	kWh	229	458	688	3 713
		%	2,3%	4,6%	7,0%	37,6%
	14/18°C	kWh	323	646	970	5 236
		%	3,3%	6,5%	9,8%	53,0%
	16/20°C	kWh	425	849	1 274	6 879
		%	4,3%	8,6%	12,9%	69,6%
	18/22°C	kWh	536	1 071	1 607	8 675
		%	5,4%	10,8%	16,2%	87,7%

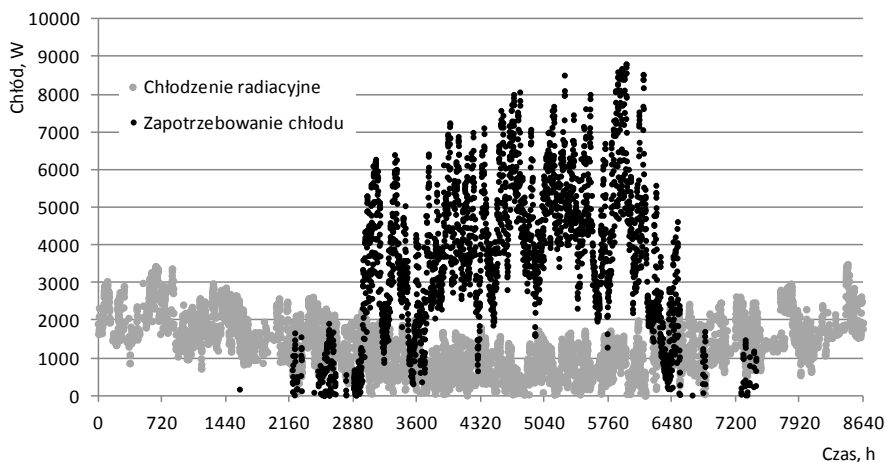


Rys. 7. Roczna produkcja chłodu w systemie chłodzenia radiacyjnego zależnie od wielkości panelu i parametrów wodnej instalacji chłodu

Zestawienie wyników pokazuje, że możliwe jest wspomaganie konwencjonalnego układu chłodzącego w budynku za pomocą paneli radiacyjnych (chłodzenia radiacyjnego). Wraz z rosnącą powierzchnią paneli radiacyjnych rośnie udział naturalnego chłodu w pokrywaniu zapotrzebowania budynku. Dodatkowo dla danej powierzchni paneli radiacyjnych widoczne jest zwiększanie udziału naturalnego chłodu wraz ze wzrostem temperatury wody obiegowej w układzie chłodzenia. Oznacza to, że naturalne źródło chłodu sprawniej zasila układy o mniejszej różnicy temperatur między wodą obiegową i otoczeniem, czyli wymagające mniejszej gęstości strumienia chłodu. W budynkach jednorodzinnych jest to wynik akceptowalny, w dużych komercyjnych obiektach może być to spore ograniczenie. Wysokie parametry i mała gęstość strumienia chłodu wymagają dużych nakładów na odbiorniki (wymienniki w pomieszczeniach) i przewody transportowe oraz zapowiada duże koszty pompowania. W domach jednorodzinnych wyposażonych już w systemy ogrzewania płaszczyznowego rozwiązanie to jest bardzo atrakcyjne. W analizowanym budynku wykorzystując całą dostępną powierzchnię dachu i obiegi ogrzewania podłogowego do chłodzenia pomieszczeń uzyskuje się 88% pokrycie potrzeb chłodniczych z naturalnego źródła, czyli bez pracy konwencjonalnego źródła chłodu. Oznacza to brak lub spore ograniczenie emisji CO₂ związanej z zużyciem energii elektrycznej przez sprężarkowe źródło chłodu.

Wyniki całorocznej analizy energetycznej pracy paneli radiacyjnych umożliwiają wskazanie okresów pracy paneli radiacyjnych oraz ocenę intensywności ich pracy w tych okresach. Wydajność chłodnicza paneli radiacyjnych, wykorzystywanych w zaproponowany w artykule sposób, są najmniejsze w okresie występowania najwyższych temperatury zewnętrznych, co niestety obniża ich przydatność. Uwzględniając jednak częstotliwość i czas trwania ekstremalnych temperatur okazuje się, że są to bar-

dzo małe ilości godzin w ciągu roku. Największa wydajność chłodnicza paneli radiacyjnych osiągana jest w okresach przejściowych przy względnie niewielkich lecz długotrwałych obciążeniach chłodniczych (rys. 8).



Rys. 8. Przykładowy wykres produkcji chłodu w systemie chłodzenia radiacyjnego dla wielkości panelu 15 m^2 i parametrów pracy instalacji $12/16^\circ\text{C}$

Powyższa analiza, dla rozpatrywanej lokalizacji, stawia pod sporym znakiem zapytania zasadność inwestycji w system wspomaganie instalacji chłodniczej panelem radiacyjnego chłodzenia szczególnie dla instalacji pracujących na niskich i średnich parametrach czynnika chłodniczego przy niewielkiej jego powierzchni. Wykorzystanie zjawiska radiacyjnego chłodzenia jest racjonalne i będzie najbardziej korzystne pod względem kosztów eksploatacji jedynie w przypadku możliwie najwyższych parametrów pracy instalacji chłodniczej oraz przy wykorzystaniu względnie dużej powierzchni paneli. W praktyce jako wspomaganie konwencjonalnego źródła chłodu rozwiązanie to może znaleźć zastosowanie głównie dla układów pracujących przy wykorzystaniu belek i płaszczyzn chłodzących przy jednoczesnym zagospodarowaniu znacznej powierzchni w miarę płaskiego dachu oraz wszędzie tam gdzie liczyć się będzie ekologiczny i nowatorski sposób pozyskiwania naturalnej energii.

3. PODSUMOWANIE

Obecnie ponownie skłaniamy się ku wszelkim możliwym sposobom pozyskiwania darmowej energii powstającej naturalnie w środowisku. Liczne wymagania prawne Unii Europejskiej, rosnąca świadomość oraz trend oszczędzania i poszanowania energii

sprawiają iż każde rozwiązanie nawet nieznacznie poprawiające sprawność działania instalacji chłodniczej winno być brane pod uwagę już na etapie planowania, projektowania, jak i realizacji nowych inwestycji.

Jak pokazała powyższa analiza właściwie wykorzystane chłodzenie radiacyjne pozwala na ograniczenie zużycia energii konwencjonalnej w przyjazny dla środowiska sposób, a dla rozwiązań skrajnie korzystnych np. w budynkach prawie- i zeroenergetycznych możliwe jest pasywne chłodzenie oparte wyłącznie na panelach radiacyjnych. Wymaga to odpowiedniego wykorzystania aspektów architektonicznych budynku, właściwego sposobu akumulacji i dystrybucji chłodu w budynku oraz poprawnej współpracy z innymi pasywnymi rozwiązaniami.

Interesującym rozwiązaniem jest połączenie w jednej płaszczyźnie kolektora słonecznego i panelu radiacyjnego. W dzień pozyskuje ona ciepło jako kolektor słoneczny, w nocy wytwarza chłód wykorzystując chłodzenie radiacyjne. Ogromnie poprawiło by rentowność inwestycji i wykorzystanie powierzchni dachu. Upowszechnienie nowoczesnych rozwiązań materiałowych [3–5] pozwoli na rozwój i dostępność tej formy wytwarzania chłodu w budynkach.

Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową nr S50532 Katedry Klimatyzacji, Ogrzewnictwa, Gazownictwa i Ochrony Powietrza.

LITERATURA

- [1] NOWAK H., *Oddziaływanie cieplnego promieniowania środowiska zewnętrznego na budynek*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
- [2] NOWAK H., *Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
- [3] RAMAN A.P., ANOMA M.A., Zhu L., REPHAELI E., FAN S., *Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight*, Nature, 2014, Vol. 515, 540–544.
- [4] ZAREA A., HANIFA M., MAHLIAA, T.M.I., SAKSAHDANA T.J., METSELAARC H.S.C., *Potential energy savings by radiative cooling system for a building in tropical climate*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Vol. 32, 642–650.
- [5] ZHU L., RAMAN A., FAN S., *Radiative cooling of solar absorbers using a visibly transparent photonic crystal thermal blackbody*, Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 112, No. 40, 12282–12287.

POSSIBILITY OF USE COOLING RADIATION IN THE SINGLE-FAMILY BUILDING

The article presents a simplified analysis of the reasonableness of the use of radiation cooling for the needs of single-family building in climatic conditions of the city on the Polish territory.