BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
2-B/2012
ZESZYT 3
ROK 109
ISSUE 3
YEAR 109

AGNIESZKA SADŁOWSKA-SAŁĘGA, JAN RADOŃ*

ANALIZA ZAPOTRZEBOWANIA NA ENERGIĘ KOŃCOWĄ DLA GMACHU GŁÓWNEGO MUZEUM NARODOWEGO W KRAKOWIE

ANALYSIS OF FINAL ENERGY DEMAND FOR MAIN BUILDING OF THE NATIONAL MUSEUM IN KRAKOW

Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę zapotrzebowania na energię końcową gmachu głównego Muzeum Narodowego w Krakowie. Analizę przeprowadzono na podstawie komputerowych symulacji kształtowania się mikroklimatu wewnątrz budynku za pomocą programu WUFI®plus. Obliczenia wykonano dla dziewięciu wariantów uwzględniających trzy zakresy dopuszczalnych wahań wilgotności względnej powietrza wewnętrznego oraz trzykrotności wymian powietrza. Najbardziej korzystne, ze względów energetycznych, jest utrzymywanie wilgotności względnej w najszerszych dopuszczalnych granicach oraz maksymalne możliwe zmniejszenie krotności wymian powietrza.

Słowa kluczowe: energia końcowa, ogrzewanie, chłodzenie, nawilżanie, osuszanie

Abstract

The paper presents an analysis of final energy demand for main building of The National Museum in Krakow. The analysis was performed based on computer simulations of formation of microclimate inside the building using WUFI®plus software. Calculations were performed for nine variants including three ranges of acceptable variation of internal relative humidity, and three air exchange rates. The most preferred, for reasons of energy use, is to keep the relative humidity in the widest acceptable limits and a maximum possible reduction in air exchange rates.

Keywords: final energy, heating, cooling, humidification, dehumidification

* Mgr inż. Agnieszka Sadłowska-Sałęga, dr hab. inż. Jan Radoń, prof. UR, Katedra Budownictwa Wiejskiego, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.

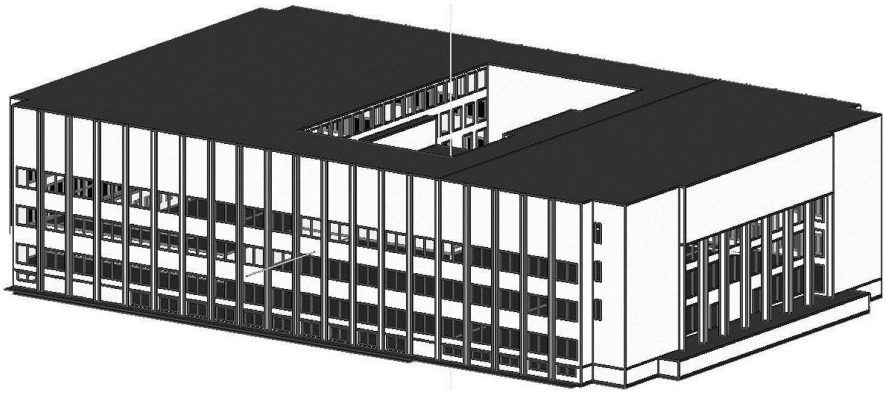
1. Wstęp

Niewłaściwy mikroklimat w budynkach muzealnych może prowadzić do nieodwracalnych uszkodzeń zgromadzonych eksponatów. Z drugiej strony ścisłe kontrolowanie parametrów powietrza wewnątrz budynków jest procesem technicznie skomplikowanym oraz bardzo energochłonnym. W celu minimalizacji kosztów energii, przy jednoczesnym spełnieniu wymagań konserwatorskich odnośnie do parametrów cieplno-wilgotnościowych powietrza wewnętrznego, przeprowadzono kompleksową analizę zmian zapotrzebowania na energię końcową w zależności od różnych scenariuszy kontroli mikroklimatu wewnątrz budynku muzealnego. W artykule przedstawiono obliczenia zapotrzebowania na energię potrzebną do utrzymania pożądanego mikroklimatu w salach wystawowych gmachu głównego Muzeum Narodowego w Krakowie wykonane w ramach projektu „*Zarządzanie kolekcją muzealną w oparciu o komputerowe modelowanie wpływu wahań mikroklimatu na obiekty zabytkowe*" finansowanego przez Unię Europejską.

2. Materiał i metody

Obliczenia zapotrzebowania na energię końcową potrzebną do utrzymania pożądanych parametrów powietrza wewnętrznego w gmachu głównego Muzeum Narodowego w Krakowie dokonano na podstawie wyników symulacji wykonanych za pomocą programu WUFI-®plus. Program ten, opracowany w Instytucie Fizyki Budowli Fraunhofera (Niemcy), wykonuje pełną analizę cieplno-wilgotnościową budynków [1].

Gmach główny Muzeum Narodowego w Krakowie mieści się przy Alei 3 Maja w Krakowie. Budynek został wzniesiony w latach 1934-1989 w technologii murowanej. Obecnie mieści on trzy wystawy stałe: Broń i Barwa w Polsce, Galeria Rzemiosła Artystycznego oraz Galeria Sztuki Polskiej XX wieku. Ponadto organizowane są w nim wystawy czasowe. W budynku można rozróżnić następujące typy pomieszczeń: sale wystawowe, pracownie konserwatorskie, pomieszczenia biurowe i techniczne oraz magazyny dzieł sztuki.



Rys. 1. Model gmachu głównego Muzeum Narodowego wygenerowany w programie WUFI®plus

Fig. 1. Model of main building of The National Museum generated by WUFI®plus software

Ogrzewanie jest realizowane przez system centralnego ogrzewania zasilany z MPEC S.A. w Krakowie. W części pomieszczeń biurowych, magazynów oraz pracowni konserwatorskich zainstalowana jest wentylacja mechaniczna. Scentralizowany system klimatyzacji kształtuje parametry powietrza wewnętrznego w salach wystawowych oraz niektórych pomieszczeniach biurowych i pracowniach konserwatorskich. Nawilżanie realizowane jest przez wytwornice pary, osuszanie natomiast w chłodnicy mokrej.

Konstrukcję przegród określono na postawie audytu energetycznego budynku [2] oraz własnych obserwacji i pomiarów (współczynniki przenikania ciepła wynoszą: dla ścian zewnętrznych – 0,826 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (nowa część) oraz – 1,099 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (stara część), dla stropodachu – 0,778 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ i okien – 3 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Obliczeniowe warunki klimatyczne określa klimat statystyczny dla miasta Krakowa opracowany przez Politechnikę Łódzką [3]. Do obliczeń wydzielono trzy strefy budynku charakteryzujące się różnymi parametrami powietrza wewnętrznego:

1) strefa nieogrzewana (wjazd) z rocznym rozkładem temperatury w formie sinusoidy (10 ± 5°C z maksimum 1 sierpnia) oraz stałą wilgotnością względną na poziomie 50%,
2) strefa częściowo ogrzewana (piwnica) z rocznym rozkładem temperatury w formie sinusoidy (15 ± 5°C z maksimum 1 sierpnia) oraz stałą wilgotnością względną na poziomie 50%,
3) strefa ogrzewana, obejmująca sale wystawowe, pracownie konserwatorskie oraz pomieszczenia biurowe, dla której zostały określone dopuszczalne przedziały wahań temperatury i wilgotności względnej oraz warianty krotności wymian powietrza:
   a) temperatura: 19-25°C,
   b) wilgotność względna: 45-60%; 35-60%; 35-65%,
   c) krotności wymian: 0,4 h^{-1}; 1,2 h^{-1}; 2,5 h^{-1}.

Obliczenia zapotrzebowania na energię końcową wykonano dla strefy ogrzewanej, której powierzchnia wynosi 19 500 m^2, a kubatura 76 219 m^3 (objętość powietrza w tej strefie wynosi 68 601 m^3, przegrody wewnętrzne zostały uwzględnione w obliczeniach masy budynku). Parametry powietrza stref częściowo ogrzewanej i nieogrzewanej oraz parametry powietrza zewnętrznego stanowią warunki brzegowe dla tych obliczeń.

Energię potrzebną do ogrzewania i chłodzenia, strumień wilgoci potrzebny do nawilżenia powietrza w okresie zimowym, a także strumień wilgoci niezbędny do osuszenia powietrza w okresie letnim obliczono dla dziewięciu wariantów przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1

Warianty obliczeń zapotrzebowania na energię końcową

Warianty	Wilgotność względna [%]	Krotność wymian [h^{-1}]
1	45-60	0,4
2		1,2
3		2,5
4	35-60	0,4
5		1,2
6		2,5
7	35-65	0,4
8		1,2
9		2,5

W gmachu głównym Muzeum Narodowego w Krakowie pracuje 300 pracowników (7 dni w tygodniu od 8:00 do 18:00). Na podstawie danych dotyczących sprzedaży biletów (z ostatnich 3 lat) oszacowano średnią liczbę osób zwiedzających muzeum (od 10:00 do 18:00 z wyłączeniem poniedziałków): od października do kwietnia – 50 osób, maj – 175 osób, czerwiec – 50 osób, lipiec oraz sierpień – 85 osób, wrzesień – 65 osób. Jednostkowe zyski ciepła i wilgoci od ludzi przyjęto na podstawie bazy danych WUFI®plus z uwzględnieniem rodzaju aktywności pracowników oraz zwiedzających (pracownicy – praca siedząca, zwiedzający – aktywność umiarkowana).

Przyjęto stałe zyski ciepła od oświetlenia na poziomie 922 163 kWh w skali roku (dane uzyskane od Muzeum Narodowego w Krakowie). Światło zapalane jest w muzeum na 9 godzin dziennie (9:00–18:00), zatem średnie godzinowe zyski ciepła wynoszą 281 000 W.

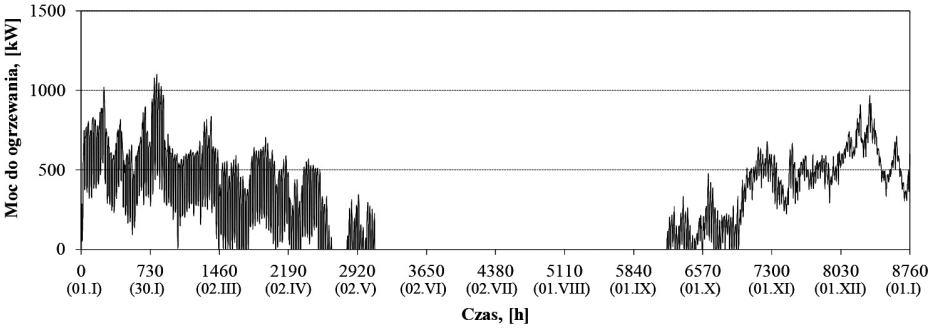
Do szacunkowego obliczenia zapotrzebowania na energię końcową przyjęto, z braku dokładnych danych, następujące założenia:

1) sprawność systemu ogrzewania, przyjęta za audytem energetycznym [2] – 73,72 %,
2) współczynnik efektywności energetycznej wytworzenia chłodu ESEER – 3,
3) sprawność wytwornicy wraz z systemem dystrybucji pary – 80%,
4) energia chłodnicza potrzebna do osuszenia powietrza – 2,8 kWh na każdy kilogram odprowadzanej wilgoci [4].

3. Wyniki i analiza obliczeń

Na podstawie obliczeń wykonanych za pomocą programu WUFI®plus otrzymano wyniki obejmujące m.in.:

– godzinowe przebiegi zmienności: temperatury i wilgotności względnej powietrza wewnętrznego, zapotrzebowania na moc do ogrzewania i chłodzenia, a także strumienia masowego wody potrzebnej do nawilżania powietrza oraz wilgoci jaką należy wytrącić z powietrza w celu jego osuszenia,
– roczne zapotrzebowanie na energię do grzania i chłodzenia,
– masę wody potrzebną do nawilżania powietrza oraz masę wody, jaką należy odprowadzić, aby utrzymać żądaną wilgotność względną powietrza wewnętrznego.



Rys. 2. Godzinowa zmienność zapotrzebowania na moc do ogrzewania dla wariantu 2

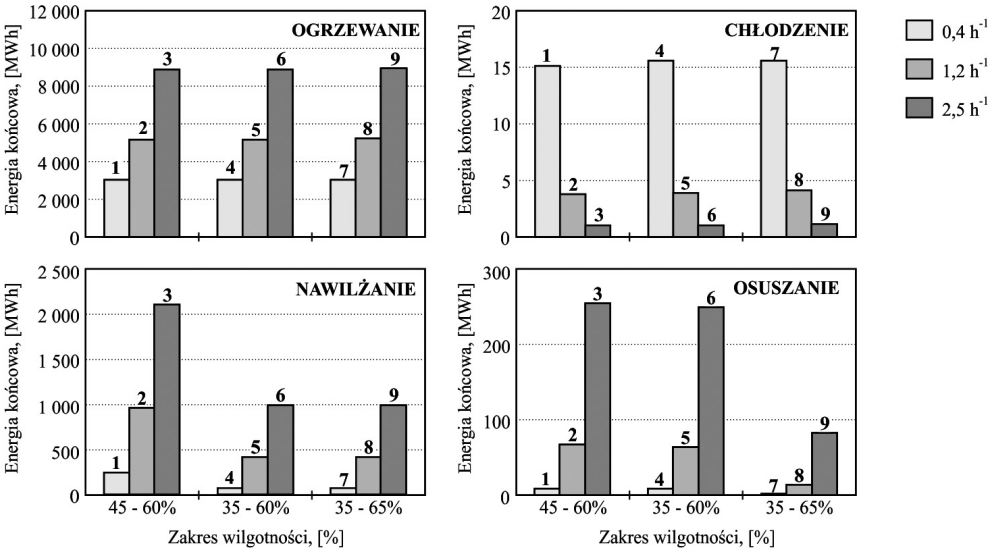
Fig. 2. Pattern of hourly power demand for heating (variant 2)

Godzinowe zapotrzebowanie na moc do ogrzewania dla wariantu 2 pokazano na rys. 2, natomiast roczne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia oraz masy wody do nawilżania i osuszania zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą programu WUFI®plus

Wariant	Energia netto, [kWh]		Masa wilgoci, [kg]	
	ogrzewanie	chłodzenie	nawilżanie	osuszanie
1	2 209 290	45 098	281 712	9981
2	3 789 107	11 261	1 096 747	72 053
3	6 515 735	2949	2 422 841	270 432
4	2 210 830	46 599	76 356	9104
5	3 808 374	11 763	471 973	68 841
6	6 535 838	3059	1 139 840	265 093
7	2 231 955	46 471	75 855	820
8	3 830 635	12 341	471 064	15 993
9	6 560 068	3427	1 138 753	89 336



Rys. 3. Zapotrzebowanie na energię końcową potrzebną do utrzymania żądanych warunków w gmachu głównym Muzeum Narodowego w Krakowie

Fig. 3. Final energy demand needed to maintain the desired conditions in main building of The National Museum in Cracow

Liczba godzin chłodzenia w ciągu roku jest niewielka i wynosi 225 h dla krotności 0,4 h^{-1}; 66 h dla krotności 1,2 h^{-1} i 21 h dla krotności 2,5 h^{-1}.

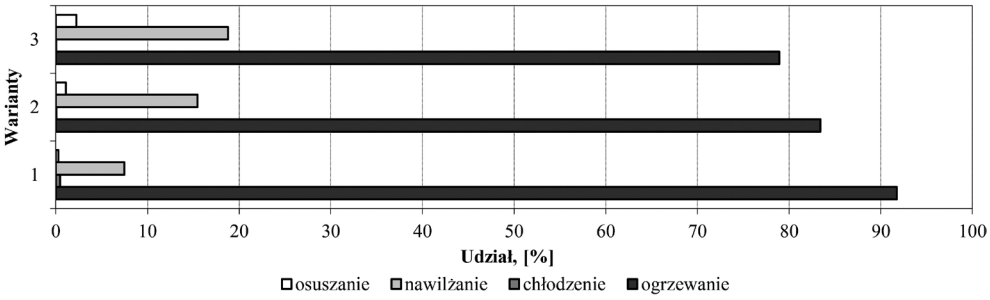
Konieczność nawilżania powietrza wewnętrznego istnieje w okresie zimowym oraz częściowo w wiosenno-jesiennym. Średnia roczna liczba godzin nawilżania wynosi: 4497 h dla zakresu RH 45-60%, 2936 h dla zakresu RH 35-60%, 2931 h dla zakresu RH 35-65%. Uwzględniając wpływ krotności wymian, otrzymano następującą liczbę godzin nawilżania w ciągu roku: 2562 h dla krotności 0,4 h^{-1}; 3792 h dla krotności 1,2 h^{-1}; 4009 h dla krotności 2,5 h^{-1}.

Konieczność osuszania powietrza wewnętrznego istnieje w okresie letnim (od maja do października). Średnia roczna liczba godzin osuszania wynosi: 698 h dla zakresu RH 45-60%, 677 h dla zakresu RH 35-60%, 249 h dla zakresu RH 35-65%. Natomiast przy uwzględnieniu wpływu krotności wymian wynosi ona: 157 h dla krotności 0,4 h^{-1}; 511 h dla krotności 1,2 h^{-1}; 956 dla krotności 2,5 h^{-1}.

Na podstawie danych uzyskanych z symulacji komputerowej, po przyjęciu założeń dotyczących sprawności systemu uzdatniania powietrza, obliczono energię końcową. Średnie roczne zużycie energii na ogrzewanie odniesione do jednostki powierzchni użytkowej, w zależności od krotności wymian, wynosi: 155 $kWh \cdot m^{-2}$ dla krotności 0,4 h^{-1}, 260 $kWh \cdot m^{-2}$ dla krotności 1,2 h^{-1} oraz 455 $kWh \cdot m^{-2}$ dla krotności 2,5 h^{-1}. Na rys. 3 przedstawiono zmiany rocznego zapotrzebowania na energię końcową dla poszczególnych procesów uzdatniania powietrza w zależności od przyjętego wariantu.

Średni procentowy udział zapotrzebowania na energię końcową dla ogrzewania, biorąc pod uwagę wszystkie warianty obliczeń, wynosi 89,9%. Dla chłodzenia wynosi on 0,2%, dla nawilżania 8,9%, natomiast dla osuszania 1,0% (rys. 4.).

Zmiana dopuszczalnego zakresu wahań wilgotności względnej ma znikomy wpływ na zapotrzebowanie na energię końcową dla ogrzewania (maksymalny wzrost wyniósł 1,2%). W przypadku chłodzenia wpływ zmiany dopuszczalnego zakresu wahań wilgotności względnej rośnie wraz ze wzrostem krotności wymian, jednak zmiany te nie przekroczyły 16,2%. Największy wpływ na zapotrzebowanie na energię końcową do nawilżania ma zmiana wartości dolnego zakresu wilgotności względnej. Zmniejszenie minimalnej dopuszczalnej wilgotności względnej z 45% na 35% powoduje maksymalny spadek zapotrzebowania na energię końcową o ok. 73% dla krotności wymian na poziomie 0,4 h^{-1}. Maksymalny



Rys. 4. Procentowy udział zapotrzebowania na energię końcową dla poszczególnych procesów (warianty 1, 2, 3)

Fig. 4. Percentage of final energy demand for each process (variant 1, 2, 3)

spadek zapotrzebowania na energię końcową do osuszania, o wielkości 91%, otrzymano przy zwiększeniu maksymalnej dopuszczalnej wilgotności względnej powietrza z 60% do 65%. Jednak, podobnie jak w przypadku nawilżania, zysk ten zmniejsza się wraz ze wzrostem krotności wymian. Zestawienie wpływu zmian dopuszczalnego zakresu wahań wilgotności względnej na energię końcową do nawilżania i osuszania zawarto w tabeli 3.

Tabela 3

Zmiana zapotrzebowania na energię końcową, w %, w zależności od zmian dopuszczalnego zakresu wahań wilgotności względnej

Proces	Krotnośćwymian, [h^{-1}]	Zmiana dopuszczalnego zakresu wahań wilgotności względnej		
		45-60% na 35-60%	45-60% na 35-65%	35-60% na 35-65%
Nawilżanie	0,4	-72,90	-73,07	-0,66
	1,2	-56,97	-57,05	-0,19
	2,5	-52,95	-53,00	-0,10
Osuszanie	0,4	-8,78	-0,66	-90,99
	1,2	-4,46	-0,19	-76,77
	2,5	-1,97	-0,10	-66,30

Tabela 4

Zmiana zapotrzebowania na energię końcową, w %, w zależności od zmian krotności wymian

Proces	Zakres RH, [%]	Zmiana krotności wymian, [h^{-1}]		
		0,4 na 1,2	1,2 na 2,5	0,4 na 2,5
Ogrzewanie	45-60	71,8	72,0	195,4
	35-60	72,3	71,6	195,6
	35-65	71,6	71,3	193,9
Chłodzenie	45-60	-75,0	-73,8	-93,5
	35-60	-74,8	-74,0	-93,4
	35-65	-73,4	-72,2	-92,6
Nawilżanie	45-60	289,3	120,9	760,0
	35-60	518,1	141,5	1392,8
	35-65	521,0	141,7	1401,2
Osuszanie	45-60	621,9	275,3	2609,6
	35-60	656,2	285,1	2811,8
	35-65	1850,6	458,6	10796,3

Największy wpływ na zapotrzebowanie na energię końcową ma intensywność wentylacji (tab. 4). Zwiększenie krotności wymian z poziomu 0,4 h^{-1} do 1,2 h^{-1} spowoduje wzrost zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania o ok. 72%. Wzrasta również zapotrzebowanie na energię końcową do nawilżania i osuszania. Maksymalny wzrost dla nawilżania (521%) i osuszania (1850%) otrzymano dla dopuszczalnego zakresu wahań wilgotności względnej wynoszącego 35-65%. Przy tej samej zmianie krotności wymian powietrza zaobserwowano spadek zapotrzebowania na energię końcową do chłodzenia. Maksymalny spadek (75%) wystąpił dla dopuszczalnego zakresu wahań wilgotności względnej wynoszącego 45-60%.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zostały porównane z rzeczywistym zużyciem energii w gmachu głównym Muzeum Narodowego w Krakowie. W przypadku zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania i chłodzenia uzyskano dużą zgodność wyników (różnica nie przekroczyła 10%). Większe różnice pomiędzy rzeczywistym a obliczeniowym zapotrzebowaniem na energię dla pozostałych procesów wynikają przypuszczalnie z niedokładnych danych o sprawności systemu klimatyzacji.

4. Wnioski

Największe zapotrzebowanie na energię końcową w gmachu głównym Muzeum Narodowego w Krakowie występuje dla ogrzewania (konieczność grzania występuje przez ok. 65% roku). Ilość zapotrzebowania na energię rośnie niemal liniowo wraz z krotnością wymiany powietrza. Pomimo zastosowania klimatu statystycznego uzyskano dużą zgodność z rzeczywistym, przeciętnym zużyciem energii końcowej do ogrzewania.

Chłodzenie jest konieczne jedynie przez kilka dni w ciągu roku. Ten wynik znajduje również potwierdzenie w praktyce. Stąd chłodzenie nie jest przyczyną zużycia dużej ilości energii. W tym przypadku koszt jest generowany raczej poprzez konieczność instalacji urządzeń chłodniczych.

Najmniej wrażliwe na zmianę dopuszczalnych wahań wilgotności względnej powietrza jest zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania. Z kolei, co oczywiste, najbardziej uzależniona od tego parametru jest energia końcowa potrzebna do osuszania oraz nawilżania.

Najbardziej korzystne, ze względów energetycznych, jest utrzymywanie wilgotności względnej w możliwie najszerszych granicach oraz maksymalnie możliwa, ze względów higienicznych, redukcja krotności wymian powietrza.

Literatura

[1] Gawin D., Kossecka E., *Program komputerowy WUFI i jego zastosowanie w analizach cieplno-wilgotnościowych przegród budowlanych*, Komputerowa Fizyka Budowli, Drukarnia Wydawnictw Naukowych S.A., Łódź 2007.

[2] Maludziński B., *Audyt energetyczny budynku Muzeum Narodowego – Gmach Główny w Krakowie al. 3 maja*, Kraków 2011.

[3] Gawin D., Kossecka E., *Typowy rok meteorologiczny do symulacji wymiany ciepła i masy w budynkach*, Komputerowa Fizyka Budowli, Drukarnia Wydawnictw Naukowych S.A., Łódź 2002.

[4] Odyjas A., *Koszty nawilżania i osuszania powietrza w systemach klimatyzacyjnych*, Chłodnictwo & Klimatyzacja 4/2006, Euro-Media Sp. z o.o., Warszawa 2006.