

STUDIA I MONOGRAFIE

z. 260

Marcin Lorenc

Pomiary i modelowanie
komfortu cieplnego
w obiektach sakralnych



POLITECHNIKA OPOLSKA

Opole 2010

ISSN 1429-6063

POLITECHNIKA OPOLSKA

KOMITET REDAKCYJNY

Andrzej KNAPIK, Jan KUBIK,
Tadeusz ŁAGODA – przewodniczący,
Mariusz MIGAŁA, Iwona MULICKA,
Jan SADECKI, Małgorzata WRÓBLEWSKA

Recenzenci:

dr hab. inż. Anna Domańska,
prof. Politechniki Poznańskiej

prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn

Redaktor:

Jan Sadecki

Komitet Redakcyjny Wydawnictw Politechniki Opolskiej
ul. S. Mikołajczyka 5

ISBN 978-83-60691-73-1

Skład: Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej.
Nakład 115+25+10 egz. Ark. wyd. 13,6. Ark. druk. 13,0.
Druk i oprawa: Sekcja Poligrafii Politechniki Opolskiej.

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń	5
1. Wprowadzenie.....	7
2. Charakterystyka historyczna i architektoniczna Katedry Opolskiej.....	13
2.1. Rys historyczny Katedry Opolskiej.....	13
2.2. Architektura zewnętrzna.....	14
2.3. Architektura wnętrza	14
3. Pomiary i ocena komfortu cieplnego Katedry Opolskiej	17
3.1. Komfort cieplny	18
3.2. Mikroklimat pomieszczeń	20
3.3. Charakterystyka aparatury pomiarowej.....	21
3.4. Metodyka oceny środowiska termicznie umiarkowanego.....	25
3.4.1. Metody wyznaczania wskaźnika <i>PMV</i>	26
3.4.2. Metody wyznaczania wskaźnika <i>PPD</i> charakteryzującego przewidywany odsetek niezadowolonych	28
3.5. Metodyka oceny ujemnego obciążenia termicznego.....	28
3.5.1. Metoda wyznaczania wskaźnika siły chłodzącej powietrza <i>WCI</i>	29
3.5.2. Metoda wyznaczania wskaźnika wymaganej ciepłochronności odzieży <i>IREQ</i>	30
3.6. Zakres i wyniki pomiarów wielkości charakteryzujących klimat i mikroklimat.....	32
3.7. Wartości wskaźników <i>WCI</i> i <i>IREQ</i> oraz <i>PMV</i> i <i>PPD</i> wyznaczone dla Katedry Opolskiej.....	40
4. Ocena wyników pomiarów parametrów mikroklimatu	43
4.1. Histogramy i funkcje gęstości rozkładów parametrów charakteryzujących klimat i mikroklimat.....	43
4.1.1. Miary położenia elementów próby	46
4.1.2. Miary zmienności elementów próby	47
4.2. Zastosowanie analizy korelacyjnej i funkcji regresji do określenia współzależności rejestrowanych parametrów klimatu oraz mikroklimatu	48
4.2.1. Wyznaczenie wskaźnika korelacji liniowej Pearsona	51
4.2.2. Ocena istotności współczynnika korelacji liniowej Pearsona	52
4.2.3. Zastosowanie liniowej funkcji regresji do określenia zależności między badanymi zmiennymi.....	53
4.3. Analiza uzyskanych wyników	56

5. Dobór systemu grzewczego dla Katedry Opolskiej	67
5.1. Wyznaczenie zapotrzebowania energii cieplnej przez Katedrę Opolską	67
5.2. Kryteria wyboru systemów grzewczych dla obiektów sakralnych	68
5.2.1. Rachunek ekonomiczny kosztów wykonania i eksploatacji systemu ogrzewczego	70
5.2.2. Określenie cen poszczególnych nośników energii	73
5.2.3. Wyznaczenie nakładów inwestycyjnych związanych z wykonaniem systemu grzewczego	84
5.2.4. Kryteria funkcjonalne i techniczne wyboru systemu grzewczego	86
5.2.5. Aspekty ekologiczne	89
5.3. Wybór systemu grzewczego dla Katedry Opolskiej	89
6. Pomiary rozkładu pól temperaturowych w Katedrze Opolskiej	91
6.1. Charakterystyka systemu pomiarowego	91
6.1.1. Ogólna koncepcja rozwiązania technicznego systemu pomiarowego	92
6.1.2. Mikroprocesorowy układ pomiaru temperatury	93
6.1.3. Telemetryczny system transmisji danych	100
6.1.4. System komputerowy do rejestracji i archiwizacji danych	104
6.2. Wyniki pomiarów rozkładu temperatur	105
7. Zastosowanie modelowania numerycznego do prognozowania rozkładu temperatury w obiekcie sakralnym ogrzewanym ciepłym powietrzem	133
7.1. Modelowanie rozkładu pól temperaturowych w Katedrze Opolskiej	136
7.2. Wyniki modelowania numerycznego	143
7.3. Interpolacja danych pomiarowych rozkładów pól temperaturowych	146
7.4. Analiza uzyskanych wyników	149
8. Metodologia postępowania przy projektowaniu i wyborze systemów grzewczych dla obiektów sakralnych	157
9. Podsumowanie	159
Literatura	163
Streszczenie	171
Summary	173
Załącznik A	175
Załącznik B	183
Załącznik C	187

Wykaz ważniejszych oznaczeń

C	– pojemność cieplna
clo	– jednostka oporności cieplnej odzieży
C_p	– pojemność cieplna przy stałej wartości ciśnienia
C_{pal}	– cena paliwa PLN/t; PLN/Nm ³ ; PLN/dm ³
D_o	– dominata
E	– energia zużyta do ogrzewania, kWh/a, GJ/a,
e'	– wilgotność bezwzględna powietrza, wyrażona przez ciśnienie cząstkowe pary wodnej
E_{pal}	– energia zużyta do ogrzewania, zawarta w paliwie, kWh/a
f_{cl}	– stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego
h	– współczynnik przewodnictwa cieplnego
h_c	– współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję
I_{cl}	– oporność cieplna odzieży
$IREQ$	– wskaźnik wymaganej ciepłochronności odzieży
IRR	– wewnętrzna stopa zwrotu nakładów inwestycyjnych
K	– współczynnik określający zależność pomiędzy ciepłochronnością odzieży A_{cl} , i średnią prędkością ruchu powietrza
k	– współczynnik przenikania ciepła
KC	– koszt 1 GJ ciepła wyznaczonego po stronie instalacji
M	– szybkość metabolicznej produkcji ciepła
Me	– mediana
met	– jednostka metabolizmu
M_{pal}	– masa paliwa zużyta w ciągu roku
n	– wektor jednostkowy prostopadły do powierzchni
NPV	– zaktualizowana wartość netto nakładów inwestycyjnych
p_a	– ciśnienie cząstkowe pary wodnej
PBT	– okres zwrotu nakładów
PMV	– wskaźnik określający przewidywaną ocenę średnią
PPD	– wskaźnik określający przewidywany odsetek niezadowolonych
PV	– wartość bieżąca nakładów inwestycyjnych
p_w	– ciśnienie pary wodnej
Q	– strumień ciepła
Q_{or}	– zysk lub utrata ciepła netto przez organizm
\dot{Q}_n	– moc nominalna cieplna instalacji grzewczej (wyznaczona dla $t_w = +10^\circ\text{C}$ i $t_z = -20^\circ\text{C}$), kW
\dot{Q}	– zapotrzebowanie ciepła

\dot{Q}_F	– zapotrzebowanie ciepła przez okna i inne elementy budowlane, nie akumulujące ciepła
\dot{Q}_L	– zapotrzebowanie ciepła do nagrzania elementów akumulujących ciepło
\dot{Q}_W	– zapotrzebowanie ciepła do potrzeb wentylacji
RH	– wilgotność względna powietrza charakteryzującego mikroklimat
RH_{zewn}	– wilgotność względna powietrza charakteryzującego klimat
r_{xy}	– estymator współczynnika korelacji liniowej Pearsona
s	– odchylenie standardowe
T	– temperatura w rozpatrywanym punkcie
t_a	– temperatura powietrza charakteryzującego mikroklimat
t_d	– temperatura powierzchni odzieży
t_g	– temperatura termometru kulistego
t_m	– temperatura termometru wilgotnego
t_r	– średnia temperatura promieniowania
T_{re}	– temperatura wnętrza ciała
T_{sk}	– zewnętrzna temperatura skóry
T_{zewn}	– temperatura powietrza charakteryzującego klimat
u	– prędkość przepływu
v	– średnia prędkość ruchu powietrza
v_{ar}	– względna prędkość przepływu powietrza
W	– praca zewnętrzna
$WBGT$	– wskaźnik stosowany do opisu środowiska gorącego
WCI	– wskaźnik siły chłodzącej powietrza
W_u	– wartość opałowa (dolne ciepło spalania), GJ/t; GJ/Nm ³ ; GJ/dm ³
\bar{x}	– średnia arytmetyczna
\hat{y}	– aproksymata liniowej funkcji regresji
\hat{Y}	– teoretyczna wartość funkcji regresji $\hat{Y} = f(X)$ odpowiadająca danemu poziomowi wartości zmiennej X
λ	– współczynnik przewodzenia ciepła
Δt_{pr}	– asymetria temperatury promieniowania
ρ	– współczynnik korelacji liniowej Pearsona
ρ_o	– gęstość ośrodka
η	– sprawność całkowita źródła ciepła (jednostki kotłowej)
A_{cl}	– przewodność cieplna odzieży
τ	– czas wykorzystania mocy szczytowej w roku, h/a

1. Wprowadzenie

Problem ogrzewania obiektów sakralnych nie istniał prawie do końca XIX wieku. Niezadowolenie ludzi ze zbyt niskich temperatur występujących w świątyniach podczas ich użytkowania było impulsem do budowania systemów grzewczych. Na przełomie XIX i XX wieku pojawiły się pierwsze próby ogrzewania już istniejących obiektów tego typu. Najprostszym systemem stosowanym do dnia dzisiejszego w wielu kościołach, m.in. w Polsce, był system ogniowo-powietrzny, oparty na wprowadzaniu ciepłego powietrza w okolice prezbiterium, a następnie jego odprowadzaniu w końcu nawy głównej lub naw bocznych. Efektywność takiego ogrzewania jest bardzo niska. Jednak do niewątpliwych zalet można zaliczyć: możliwość wykorzystania lokalnych paliw (chrust, drewno, węgiel) oraz brak konieczności dodatkowej obsługi, co wiąże się z niskimi kosztami eksploatacyjnymi. System ten był przez wiele lat doskonalony pod kątem nowych rozwiązań technicznych m.in. przez znanych specjalistów branży grzewczej: Krischera, Kasta i innych [1].

Niektórzy autorzy w swoich publikacjach [2, 3] przytaczają opinię obowiązującą wśród konserwatorów zabytków, że obiektów sakralnych, w których znajdują się cenne obrazy, polichromie, meble, organy nie należy ogrzewać. Jednak nowoczesne świątynie o bardzo dużych przeszkleniach, kościoły przyklasztorne, kaplice przy domach wychowawczych, szpitalach, itp., gdzie wierni przychodzą bez okryć zewnętrznych, wymagają stosowania ogrzewania. Podstawowym celem realizowanym przez systemy grzewcze jest przystosowanie parametrów termicznych do potrzeb wiernych, a następnie zapewnienie właściwych warunków dla konstrukcji budynku i znajdujących się często w ich wnętrzach dzieł sztuki, które wymagają zróżnicowanych warunków mikroklimatycznych.

Aby sprostać takim wymaganiom, należy liczyć się z poniesieniem znaczących kosztów inwestycyjnych związanych z wykonaniem systemu grzewczego oraz jego późniejszą eksploatacją. Dlatego też bardzo istotnym zagadnieniem jest wybór sposobu ogrzewania zapewniającego z jednej strony komfort cieplny przebywających we wnętrzu osób, a z drugiej strony optymalnych kosztów: inwestycyjnych, eksploatacyjnych, utrzymania i serwisowania oraz kosztów „ukrytych” związanych z nakładami na konserwację, i restaurację samego obiektu oraz jego wyposażenia.

Przyjmując jako kryterium klasyfikacji kubaturę, a także rodzaj użytego budulca, obiekty sakralne w sposób ogólny można podzielić na trzy podstawowe grupy [2]. Do pierwszej z nich można zaliczyć kościoły o kubaturze nie przekraczającej 3000 m^3 , w szczególności wykonane z kamienia, które wprawdzie mają stosunkowo dużą bezwładność termiczną i w następstwie dużą zdolność wygładzania i niwelowania zmian klimatu zewnętrznego, ale ich mikroklimat jest wyraźnie destabilizowany przez wiernych. Wzrost temperatury podczas zgromadzeń może wynosić nawet od 15°C do 20°C [3]. Dodatkowo przy złej wentylacji dochodzi najczęściej do kondensacji pary wodnej. W niektórych kościołach skraplanie wody zaczyna się po 1 do 2 godz. po ostatnim zgromadzeniu wiernych i zamknięciu kościoła. W innych, kondensacja rozpoczyna się czasem już w kilkanaście minut po rozpoczęciu pierwszego nabożeństwa. Występowanie tego niekorzystnego zjawiska może przyczynić się do szybkiej degradacji wnętrza kościoła poprzez rozwój grzybów pleśniowych, zwiększenie intensywnego rozwoju owadów niszczących drewno i drastyczne przyspieszenie procesów destrukcji całego wyposażenia.

Drugą grupę stanowią kościoły o kubaturze mieszczącej się w przedziale od 3000 m^3 do 20000 m^3 . Są to najczęściej obiekty barokowe, w których widoczna jest wyraźna, silna zależność mikroklimatu występującego w ich wnętrzu od warunków zewnętrznych. Szczególnie dotyczy to tych kościołów, w których nieocienione drzewami okna przepuszczają do wnętrza znaczne ilości energii słonecznej. Dobowe amplitudy zmian temperatury i wilgotności względnej powietrza osiągają w nich wysokie wartości, często odpowiadające parametrom klimatu zewnętrznego. W obiektach tych istnieje zagrożenie wystąpienia kondensacji w okresie zimy. Ogrzewanie w takim przypadku musi być projektowane ze szczególną starannością, a warunkiem poprawności jego działania jest bardzo sprawny system sterowania.

Do trzeciej grupy zalicza się wielkogabarytowe obiekty sakralne o stabilnym klimacie. Są to głównie kościoły gotyckie o kubaturze przekraczającej $20\,000 \text{ m}^3$, w których podstawowym budulcem była cegła. Dobowe zmiany amplitudy temperatury przez ok. (70-75)% dni w roku nie przekraczają 1°C . Natomiast zmiany wilgotności przez większość dni w roku nie osiągają nawet 5% [3]. Budowle te mają dużą zdolność buforowania ciepła, przez co są odporne zarówno na szybkie i gwałtowne zmiany parametrów klimatu, jak również na wolno zmieniające się warunki pogodowe związane ze zmianami pór roku. Przejście od okresu jesiennego do zimowego oraz od zimy do wiosny zachodzi w nich w sposób niezwykle łagodny z wyłączeniem sytuacji, w których następuje drastyczna zmiana warunków klimatycznych, np. na skutek przeciągów. Zgromadzenia bardzo dużej liczby osób wywołują jedynie nieznaczne zmiany parametrów mikroklimatu. W obiektach tych prawie nigdy nie występuje zjawisko kondensacji, mimo że zarówno sklepienia jak i ściany mogą mieć w okresie zimowym temperatury ujemne. Zgromadzone w nich dzieła sztuki, ołtarze, me-

ble czy znajdująca się w ich wnętrzach polichromia są zazwyczaj w nienaruszonym stanie. Przykładem takiego kościoła jest Katedra Opolska, której widok ogólny przedstawiono na rys.1.1.



Rys. 1.1. Widok ogólny Katedry Opolskiej

Źródło: [4].

Przyjęta klasyfikacja obiektów sakralnych na trzy podstawowe grupy, wynikająca z kubatury i zastosowanego budulca, jest istotna z punktu widzenia doboru systemu grzewczego, a także wentylacyjnego. Dla każdej z grup należy stosować inne rozwiązania techniczne, w celu uzyskania wymaganego komfortu cieplnego przebywających w ich wnętrzu ludzi, jak również utrzymywać przyjazny mikroklimat dla przechowywanych tam dzieł sztuki, polichromii czy też mebli. Niniejsza monografia odnosi się wyłącznie do trzeciej grupy obiektów sakralnych, charakteryzujących się stabilnym mikroklimatem w okresie całego roku. Reprezentantem tej grupy obiektów jest Katedra Opolska, w której w okresie od 20.01.2006 roku do 30.03.2006 roku oraz w okresie od 10.08.2006 roku do 30.09.2006 roku zarejestrowano wybrane parametry mikroklimatu. W tym samym okresie rejestrowano również wybrane parametry klimatu. Natomiast w okresie od 1.03.2007 roku do 31.12.2007 roku przeprowadzono pomiary wewnątrz obiektu, umożliwiające wyznaczenie rozkładu temperatur. Na podstawie uzyskanych danych dokonano weryfikacji założenia o przynależności Katedry Opolskiej do grupy obiektów charakteryzujących się stabilnym mikroklimatem, dokonano wyboru rozwiązania technicznego systemu grzewczego, zapewniającego utrzymanie odpowiednich parametrów mikroklimatycznych dla przebywających w jej wnętrzu osób, jak również zgromadzonych dzieł sztuki.

Problematyka doboru odpowiedniego typu i parametrów systemu grzewczego dla potrzeb ogrzewania budynków sakralnych jest zagadnieniem bardzo trudnym i złożonym, gdyż są to obiekty niepowtarzalne, bardzo zróżnicowane architektonicznie i wykonane w różnych okresach, a tym samym technologiach. Ze względu na stosunkowo niewielką liczbę tego typu obiektów oraz ich indywidualność, nie ma do tej pory sprawdzonych metod obliczeniowych pozwalających wyznaczyć w sposób jednoznaczny wielkość zapotrzebowania na energię cieplną. W literaturze można znaleźć tylko nieliczne prace [5-7], w których przedstawiono propozycje obliczania mocy cieplnej dla potrzeb ogrzewania kościołów. Równie złożonym zagadnieniem jest wybór systemu grzewczego, głównie z powodu krótkiego czasu użytkowania wynoszącego od kilku do kilkunastu godzin na dobę lub nawet w tygodniu. Ponadto, wymagania różnych elementów wyposażenia obiektów sakralnych są w dużej mierze indywidualne, niepowtarzalne i dodatkowo bardzo zróżnicowane.

Głównym celem poznawczym przeprowadzonych przez autora prac naukowo-badawczych było wypracowanie metodologii postępowania przy projektowaniu systemów grzewczych zaopatrujących obiekty sakralne w energię cieplną, która byłaby użyteczna dla całej grupy tego typu budowli.

Ogólny cel pracy można sformułować następująco:

Istnieje możliwość doboru i weryfikacji prawidłowości wyboru systemu grzewczego dla obiektów sakralnych, pozwalającego zapewnić komfort ciepły przebywającym w ich wnętrzu osobom z wykorzystaniem nowoczesnych metod modelowania matematycznego, narzędzi statystycznych i pomiarów.

Celem szczegółowym przeprowadzonych przez autora prac było wykorzystanie nowoczesnych metod modelowania matematycznego, narzędzi statystycznych i pomiarów do doboru oraz weryfikacji prawidłowości projektowanych systemów grzewczych dla obiektów sakralnych. Dla zrealizowania założonych celów przeprowadzono kolejno pomiary wybranych parametrów mikroklimatu oraz rozkładu temperatur w Katedrze Opolskiej, która jest obiektem reprezentatywnym dla grupy wielkogabarytowych budowli sakralnych. Poszczególne wartości tych parametrów rejestrowano z wykorzystaniem cyfrowego miernika mikroklimatu BABUC M, natomiast w celu wyznaczenia rozkładu temperatur we wnętrzu Katedry Opolskiej, zaprojektowano i wykonano mikroprocesorowy system pomiarowy pozwalający na jednoczesny pomiar temperatury w 288 punktach. Otrzymane wartości parametrów środowiska termicznego umożliwiły wyznaczenie wskaźników charakteryzujących komfort ciepły przebywających w obiekcie osób oraz na określenie zależności korelacyjnych i regresyjnych występujących pomiędzy wybranymi parametrami mikroklimatu i klimatu zewnętrznego. Po wyznaczeniu wielkości zapotrzebowania na energię

cieplną Katedry Opolskiej, przeprowadzeniu analiz porównawczych cen podstawowych nośników energii oraz funkcjonalności możliwych do zastosowania rozwiązań technicznych systemu grzewczego, określeniu kosztów inwestycyjnych związanych z instalacją, wybrano najbardziej korzystne rozwiązanie, a następnie je zaimplementowano. W celu określenia rozkładu temperatur we wnętrzu obiektu, przeprowadzono pomiary temperatury w okresie od 1-03-2007 do 31-12-2007, wykorzystując do tego zaprojektowany i wykonany przez autora mikroprocesorowy układ pomiarowy. Badania symulacyjne modelujące rozkład temperatury wykonano z wykorzystaniem oprogramowania COMSOL Multiphysics Modeling. Otrzymane wyniki pozwoliły na weryfikację teoretycznego rozkładu uzyskanego w wyniku modelowania z danymi pomiarowymi.

Tematyka podjętych przez autora prac stanowi połączenie wiedzy z zakresu technologii informatycznej, modelowania matematycznego procesów technicznych, statystyki opisowej, numerycznych technik pomiarowych i opracowania wyników oraz metrologii wielkości nieelektrycznych. Monografia składa się z *rozdziału pierwszego* będącego wprowadzeniem do podjętej tematyki, siedmiu rozdziałów zawierających kolejno: opis badanego obiektu, wyniki wykonanych pomiarów, analiz i modelowania matematycznego oraz weryfikacji teoretycznego modelu rozkładu temperatury z zarejestrowanymi wartościami, podsumowania stanowiącego opis metodyki postępowania przy projektowaniu i wyborze systemów grzewczych dla wielkogabarytowych obiektów sakralnych, wniosków, literatury oraz trzech załączników. W *rozdziale drugim* niniejszej monografii przedstawiono opis historyczny oraz charakterystykę architektoniczną obiektu, w którym badano komfort cieplny i rozkład temperatury. W *rozdziale trzecim* zaprezentowano wyniki pomiarów i ocenę komfortu cieplnego osób przebywających we wnętrzu Katedry Opolskiej w okresie zimy i lata. Przedstawiono wybrane wartości parametrów termicznych charakteryzujących klimat i mikroklimat obiektu. *Rozdział czwarty* zawiera wyniki obliczeń wskaźników statystyk opisowych, będących miarami położenia i zmienności. W rozdziale tym przedstawiono także wyniki związane z zastosowaniem wnioskowania statystycznego do oceny istotności współczynnika korelacji i regresji liniowej w ocenie zależności wartości temperatur i wilgotności względnej, występujące we wnętrzu i na zewnątrz obiektu. W *rozdziale piątym* wyznaczono wielkość zapotrzebowania na energię cieplną przez Katedrę Opolską. Ponadto wskazano zastosowane kryteria analizy ekonomicznej, funkcjonalnej i technicznej przy wyborze systemu grzewczego, porównano ceny poszczególnych nośników energii cieplnej oraz dokonano wyboru sposobu i rodzaju ogrzewania. W *rozdziale szóstym* scharakteryzowano zaprojektowany i wykonany mikroprocesorowy układ przeznaczony do pomiaru rozkładu temperatur, a także przedstawiono uzyskane wyniki. *Rozdział siódmy* poświęcony jest zastosowaniu modelowania numerycznego do prognozowania rozkładu temperatury w obiekcie sakralnym ogrzewanym ciepłym powietrzem. Modelowanie przeprowadzono

w środowisku COMSOL Multiphysics Modeling, wykorzystując moduł Heat Transfer Module. W rozdziale tym przeprowadzono również weryfikację wyników otrzymanych na drodze modelowania z wartościami uzyskanymi podczas pomiarów rozkładu temperatury w obiekcie Katedry Opolskiej. W *rozdziale ósmym* przedstawiono opracowaną przez autora metodologię postępowania przy projektowaniu i doborze systemów grzewczych przeznaczonych do ogrzewania wielkogabarytowych obiektów sakralnych. W *podsumowaniu* natomiast przedstawiono wnioski, jakie sformułowano na podstawie przeprowadzonych prac naukowo-badawczych.

Autor od wielu lat zajmuje się zagadnieniami związanymi z projektowaniem systemów grzewczych oraz ich implementacją w obiektach o zróżnicowanym przeznaczeniu. Zebrane przez ten okres doświadczenia oraz wyniki prac były pomocne w przygotowaniu niniejszej monografii.

2. Charakterystyka historyczna i architektoniczna Katedry Opolskiej

2.1. Rys historyczny Katedry Opolskiej

Źródła historyczne podają [4], że kościół św. Krzyża zbudowany został w 1024 r. przez Bolesława Chrobrego. Pierwszą, pewną wiadomość o istnieniu kościoła parafialnego w Opolu pod wezwaniem Znalezienia Krzyża św. przekazuje dokument z 1223 r., wystawiony przez biskupa wrocławskiego Wawrzyńca. Ze względu na bogate wyposażenie, dostarczone później parafii przez opolskich książąt i ze względów duszpasterskich oraz społecznych, biskup Tomasz I między 1232-1239 rokiem podniósł opolską świątynię do rangi kolegiaty.

W roku 1415 pożar w znacznym stopniu zniszczył obiekt. Odbudowa trwała przez cały wiek XV. W 1447 r. dobudowano nowe, istniejące do dzisiaj prezbiterium i dwie zakrystie. Prace ukończono około 1520 roku. W tym też okresie zbudowano nowy ołtarz główny i boczną kaplicę pod wezwaniem Trójcy św.

W 1615 roku kolegiata ponownie płonęła. Wieża, szczyty dachu i całe sklepienie runęło. Poważne szkody spowodowały również późniejsze pożary, które miały miejsce w latach 1622 i 1647. Odbudowa po klęskach pożarowych przyczyniła się do wprowadzenia nowego wystroju barokowego wnętrza. Niezmieniony pozostał jedynie ołtarz Trójcy św.

W 1882 roku usunięto z kościoła ołtarze barokowe, ustawione przy filarach międzynawowych i zastąpiono je nowymi neogotyckimi. W 1900 roku ukończono dwie wysokie wieże, a w 1914 roku wzniesiono w zachodnim przęśle nowy chór muzyczny.

Od 1945 roku, kiedy to Stolica Apostolska utworzyła z Opolszczyzny kościelną jednostkę administracyjną, kościół św. Krzyża wyznaczono na katedrę.

W latach 1965-1967, z polecenia ks. bp Ordynariusza dra Franciszka Jopa i w porozumieniu z Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków przystąpiono do prac konserwatorskich na szerszą skalę. Zrekonstruowano boczne kamienne wejścia, obniżono posadzkę we wszystkich trzech nawach wschodniego przęśla, i odbito tynki na jego murach oraz w piastowskiej kaplicy Trójcy Przenajświętszej. Podobne działania przeprowadzono również w kaplicy św. Jadwigi oraz częściowo w południowym przedsionku. Zgodnie z duchem i z zasadniczymi

wskazówkami II Soboru Watykańskiego usunięto z głównej nawy wszystkie boczne ołtarze. Ponadto w sąsiedztwie ołtarza Matki Bożej Piekarskiej odsłonięto zamurowane okno, niektóre okna przedłużono, a do ośmiu okien sprowadzono nowe witraże. Wszystkim tynkom wewnątrz świątyni nadano nowy wygląd. Renowacja przyczyniła się do podkreślenia gotyckiej architektury, a wewnątrz świątyni zamieniła w olbrzymią przestrzeń [4].

2.2. Architektura zewnętrzna

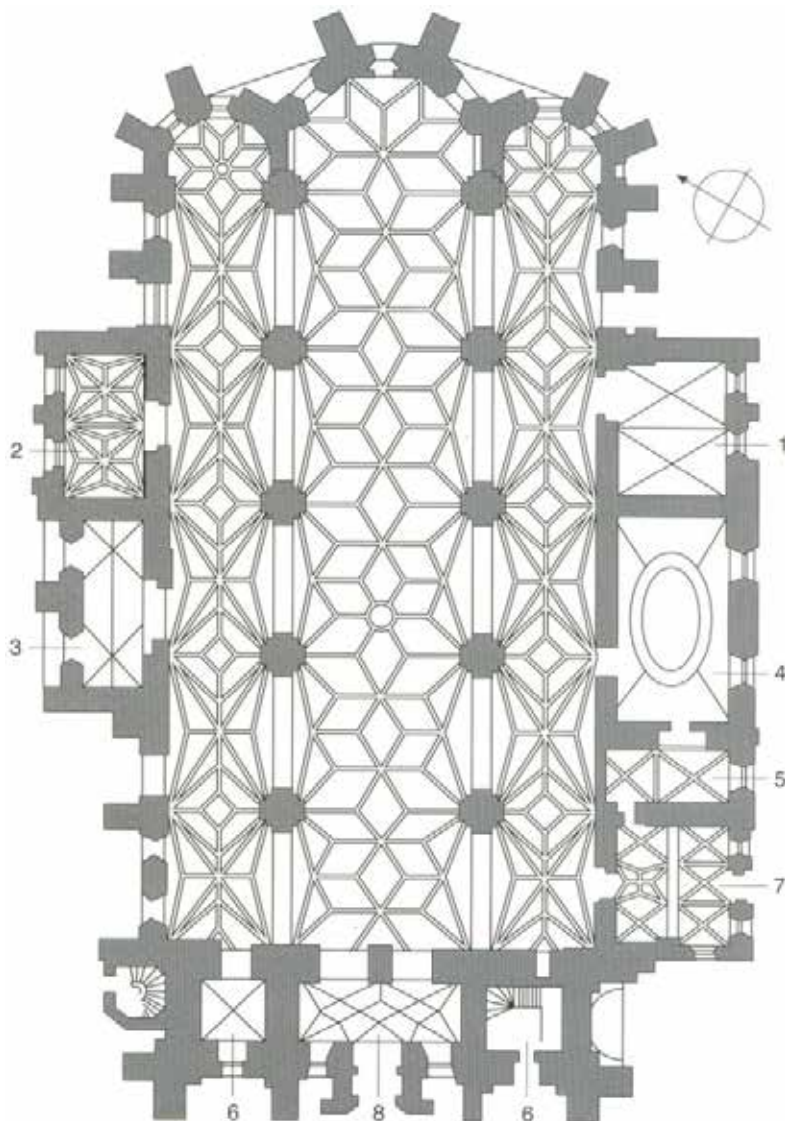
Katedra, czyli kościół Św. Krzyża, jest położona w Opolu w narożniku dwóch ulic, Katedralnej i Książąt Opolskich. Z ulicy Katedralnej prowadzi na plac kościelny szeroka, murowana brama z kamiennym łukiem, nad którym wznosi się zespół figur, przedstawiający Chrystusa, Matkę Bożą i św. Jana Ewangelistę.

Obiekt Katedry Opolskiej charakteryzuje się monumentalną konstrukcją. Zewnętrzne wymiary wynoszą odpowiednio: długość 60,7 m, szerokość 26,5 m, mury są wysokie na 18 m, wieże, najwyższe w Opolu, mają wysokość 73 m. Cała bryła jest opięta silnymi przyporami. Portale i wąskie, wysokie okna, ozdobione przeźrocami oraz wysokie wnęki na szczycie zachodnim są zakończone ostrymi łukami. Okna wykazują równe odstępki, co łącznie z wysokim spadzistym dachem i trójkątnym szczytem wskazuje na konstrukcję gotycką.

Do murów przylegają dobudówki, nakryte dachami poziomymi: od południa kaplica piastowska Trójcy Przenajświętszej i duża zakrystia, czyli dawna sala kapitulna, mała zakrystia i przedsionek, od północy kaplica św. Jadwigi i św. Anny. Wszystkie mury bocznych kaplic są zwieńczone wnękami [4]. Na rys. 2.1 przedstawiono poziomy rzut Katedry Opolskiej z zaznaczonymi pomieszczeniami pomocniczymi.

2.3. Architektura wnętrza

Do wnętrza Katedry Opolskiej prowadzi główne zachodnie wejście, zbudowane w latach 1899 – 1900. Drugie wejście znajduje się od strony południowej. Układ przestrzenny katedry przedstawia się w formie trójnawowej hali, zakończonej od wschodu jednym pięciobokiem i dwoma sześciobokami. Pięć par potężnych filarów profilowanych, podtrzymuje za pomocą gotyckich łuków sklepienie gwiazdowo-siatkowe, którego kamienne żebra dochodzą do późnogotyckich wsporników, wskutek czego wnętrze dzieli się na pięć przęseł. Układ przestrzenny Katedry Opolskiej przedstawia na ogół zharmonizowaną całość. Rzeczywista konstrukcja świątyni pochodzi jednak z różnych okresów.



Rys. 2.1. Rzut poziomy katedry św. Krzyża. 1 – kaplica Trójcy Świętej, 2 – kaplica św. Jadwigi, 3 – kaplica św. Anny, 4 – duża zakrystia, 5 – mała zakrystia, 6 – wejście na wieżę, 7 – kruchta południowa, 8 – wejście główne

Źródło: [4].

Katedra ze względu na szczegółowe formy architektoniczne należy do kręgu budownictwa wrocławskiego wieku XIV. Do tej grupy zalicza się we Wrocławiu kościół Najświętszej Maryi Panny na Piasku i kościół św. Elżbiety, kościół w Świdnicy, w Legnicy, w Strzegomiu, Ziębicach i w Namysłowie. Z gru-

pą świątyń, dominujących na Górnym Śląsku, łączą je wspólne, pierwotne założenie konstrukcji opartej na planie czteroprzęsłowym, zbliżonym do kwadratu, który budowniczy potrafili umiejętnie włączyć w nowszą wschodnią konstrukcję. Katedra Opolska przedstawia najbardziej zespolone formy górnośląskiej architektury sakralnej z pierwszej połowy XV wieku.

Istnieje bogata bibliografia opisująca architekturę Katedry Opolskiej, a także jej historyczne i społeczne znaczenie [4, 8-12].

3. Pomiary i ocena komfortu cieplnego Katedry Opolskiej

Do podstawowych zadań stawianych obiektom, w których przebywają ludzie, obok ochrony przed klimatem zewnętrznym, należy zapewnienie właściwego komfortu cieplnego. Ochrona przed wpływem zmiennych, niekorzystnych warunków klimatycznych jest zasadniczo realizowana przez odpowiednie projektowanie przegród zewnętrznych o jak największej, a przy tym ekonomicznie uzasadnionej izolacji cieplnej oraz szczelności. Drugie z wymienionych zadań realizowane jest przez systemy grzewcze, wentylacyjne czy klimatyzacyjne. Do podstawowych parametrów komfortu cieplnego pomieszczeń, oddziałujących na ludzi w nich przebywających, należy zaliczyć: wilgotność, prędkość i kierunek przepływu powietrza, temperaturę otaczających przegród i powietrza wewnętrznego [13]. Proces wymiany ciepła między obiektem a otoczeniem ma charakter nieliniowy i niestacjonarny, a ponadto poddany jest wymuszeniom stochastycznym. Nieliniowość związana jest ze zmianą współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych przegród wywołany zmianami temperatury na skutek oddziaływania klimatu zewnętrznego oraz zakłóceń pracy instalacji wewnętrznych. Niestacjonarność jest wynikiem starzenia się materiałów przegród budynku. Natomiast źródłem charakteru stochastycznego są parametry klimatu zewnętrznego oraz zakłócenia wywołane np. przeciągami czy też wietrzeniem budynku [14].

Analityczne rozwiązanie zagadnień związanych z wyznaczeniem komfortu cieplnego jest możliwe jedynie dla obiektów o prostej budowie bądź przy przyjęciu wielu założeń upraszczających. W celu przeprowadzenia oceny komfortu cieplnego występującego w okresie zimy i lata w Katedrze Opolskiej przeprowadzono serię pomiarów z wykorzystaniem cyfrowego miernika mikroklimatu BABUC M. Pozwoliło to na wyznaczenie podstawowych parametrów mikroklimatu, a tym samym na ocenę środowiska termicznego obiektu i właściwy dobór systemu grzewczego.

W ostatnim czasie coraz częściej do oceny komfortu cieplnego w pomieszczeniach, w których przebywają ludzie, wykorzystuje się badania termograficzne [15]. Jest to efektywna i nieinwazyjna metoda diagnostyczna oparta o pomiary termowizyjne, gdzie specjalną kamerą uzyskuje się obraz pola

temperaturowego badanego obiektu oraz zdalny pomiar temperatury z rozdzielczością do $0,05^{\circ}\text{C}$. Badania termowizyjne umożliwiają wykrywanie: wad technologicznych przegród budynków, wad izolacji termicznej przegród budowlanych, mostków termicznych, zawilgoceń przegród, niekontrolowanej filtracji powietrza.

3.1. Komfort cieplny

Komfort cieplny definiowany jest jako najkorzystniejsze warunki mikroklimatu pomieszczenia, w których człowiek czuje się dobrze, a gospodarka cieplna jego ustroju przebiega najekonomiczniej [16-18]. Aby w skali środowisk cieplnych określić miejsca, w których można się spodziewać dyskomfortu, należy dokładniej zdefiniować granice obszaru określonego mianem komfortu cieplnego.

Analizie warunków, jakie należy spełnić, aby zapewnić komfort cieplny, jak również sposobom jego ścisłej definicji poświęcono w literaturze specjalistycznej wiele uwagi [18-27]. Przy ustalonych parametrach mikroklimatu, koniecznym warunkiem komfortu cieplnego jest spełnienie równania bilansu cieplnego. Przy konstruowaniu tego równania autorzy w różnym stopniu uwzględniają złożone mechanizmy wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem. Dla porównania, na rys. 3.1 przedstawiono mechanizmy wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem, uwzględnione przez Fanger'a i Lustineca.

Mały okrąg na rys. 3.1 odzwierciedla wnętrze ciała o temperaturze T_{re} i szybkości metabolicznej produkcji ciepła M . Większy okrąg obrazuje powierzchnię charakteryzowaną zewnętrzną temperaturą skóry T_{sk} . Największy pierścień odzwierciedla odzież ochronną scharakteryzowaną przewodnością cieplną Λ_{cl} . Stan środowiska określają następujące parametry: temperatura powietrza t_a , średnia temperatura promieniowania t_r , ciśnienie pary wodnej p_w i średnia prędkość ruchu powietrza v . Strzałki przedstawione na rys. 3.1 określają różne możliwości wymiany i rozpraszania ciepła.

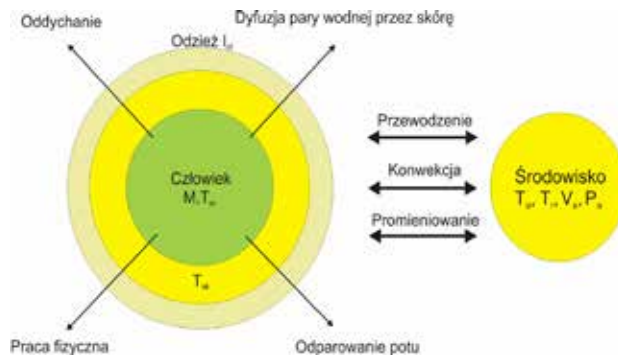
Równanie komfortu cieplnego otrzymuje się przez podstawienie do równania bilansu cieplnego ustalonych wcześniej (doświadczalnie) wyrażen określających temperaturę skóry i szybkość wydzielania potu w warunkach zaistnienia komfortu cieplnego, tak więc spełnienie równania bilansu jest warunkiem koniecznym, lecz niewystarczającym. Na podstawie rys. 3.1b można zauważyć, że model Lustineca zawiera uproszczenia polegające zarówno na pominięciu pewnych kanałów wymiany ciepła, jak i opisu środowiska. Uproszczenia te wpływają w sposób oczywisty na kształt równania komfortu cieplnego:

$$f(M, \Lambda_{cl}, t_a, t_r, p_w, v) = 0 \quad (3.1)$$

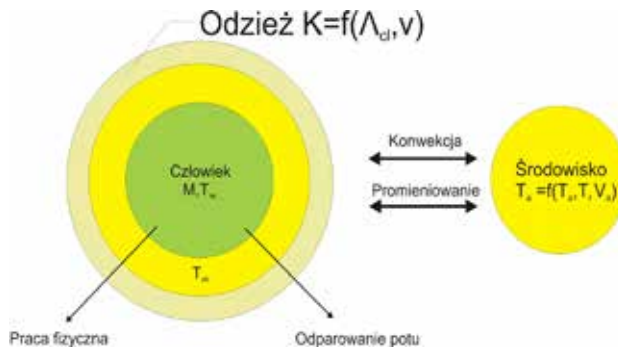
$$f(M, K, t_g) = 0 \quad (3.2)$$

gdzie: M – szybkość metabolicznej produkcji ciepła, Λ_{cl} – przewodność cieplna odzieży, t_a – temperatura powietrza, t_r – średnia temperatura promieniowania, p_w – ciśnienie pary wodnej, v – średnia prędkość ruchu powietrza, K – współczynnik określający zależność pomiędzy ciepłochronnością odzieży Λ_{cl} i średnią prędkością ruchu powietrza v , t_g – temperatura termometru kulistego.

a)



b)



Rys. 3.1. Poglądowe przedstawienie mechanizmów wymiany ciepła między człowiekiem a otoczeniem. a) mechanizm wymiany ciepła zaproponowany przez P.O. Fangera [26], b) mechanizm wymiany ciepła zaproponowany przez K. Lustineca [20]

Źródło: [28].

Rozwiązanie równania komfortu cieplnego (3.1) zaproponowane przez Fangera [18] jest bardziej złożone od równania komfortu cieplnego zaproponowanego przez Lustineca [20] (3.2) i wymaga stosowania wielokrotnych iteracji. Natomiast uproszczenie Lustineca nadaje się do praktycznego zastosowania bez tych ograniczeń.

Równanie (3.1) dostarcza informacji o tym, jakie kombinacje zmiennych parametrów zapewniają komfort cieplny. W praktyce bardziej interesujące jest pytanie, w jaki sposób można przewidzieć wrażenia cieplne przy dowolnych kombinacjach wydatku energetycznego, wartości jednostkowej oporności cieplnej odzieży (*clo*) oraz czterech cieplnych parametrów środowiska. Odpowiedź na to pytanie daje opracowany przez Fangera wskaźnik – przewidywana ocena średnia – który jest zależnością między wrażeniem cieplnym wyrażonym w siedmiostopniowej psychofizycznej skali ocen a zmiennymi parametrami cieplnymi otoczenia. W wyniku dalszych badań okazało się, że zamiast stosowania przewidywanej oceny średniej *PMV* jako wskaźnika określającego środowisko cieplne, bardziej reprezentatywne mogłoby być określenie udziału ludzi (wyrażone w%), podających zdecydowanie negatywną ocenę środowiska.

3.2. Mikroklimat pomieszczeń

Klimat stanowi syntezę warunków pogodowych w danym obszarze kuli ziemskiej, dokonaną na drodze długotrwałej obserwacji i analizy statystycznej zmiennych parametrów charakteryzujących stan atmosfery na tym terenie. Mikroklimat jest to struktura klimatyczna w małej skali, warstwy atmosfery pokrywającej wyodrębnioną powierzchnię. Termin mikroklimat stosuje się również do określenia środowiska termicznego w pomieszczeniu zamkniętym [29]. Według normy [30] mikroklimat pomieszczenia tworzą istniejące w nim warunki klimatyczne, które są wynikiem jednoczesnego oddziaływania na człowieka: stopnia czystości powietrza, składu chemicznego, temperatury, wilgotności względnej i prędkości powietrza, a także temperatury otaczających przegród. Zbiór parametrów mikroklimatu jest szerszy niż zbiór parametrów środowiska termicznego, ponieważ poza: wilgotnością powietrza, średnią temperaturą promieniowania i asymetrii, prędkością przepływu powietrza, obejmuje również stopień jego czystości. Zagadnienia dotyczące czystości powietrza ze względu na swoją obszerność i fakt, iż nie jest to przedmiotem monografii, w niniejszej pracy nie będą poruszane. Tematyka ta została przedstawiona m.in. w pracach: [31-33].

Występujący niekorzystny mikroklimat w pomieszczeniach, w których przebywają ludzie, może u człowieka wywoływać takie odczucia jak duszności, brak tlenu, ból głowy, zmęczenie czy senność. Wyjaśnienie przyczyn tych odczuć jest bardzo złożone. Istnieją różne propozycje łączenia ich z tzw. zespołem pozatermicznym elementów mikroklimatu pomieszczenia, takich jak: zanieczyszczenie i jonizacja powietrza, hałas, pola elektrostatyczne i elektromagnetyczne, radioaktywne promieniowanie materiałów, czy wreszcie mikroflora i mikrofauna pomieszczeń. Zagadnieniom tym poświęcono m.in. prace [34, 35].

W przypadku, gdy w pomieszczeniu przebywają ludzie, zachodzi potrzeba zachowania zasad ergonomii, a w szczególności stworzenia warunków sprzyja-

jących skupieniu, co pozwala na bezpieczne i efektywne wykonywanie różnych czynności. Zagadnieniom związanym z oceną wpływu temperatur występujących w pomieszczeniach, w których wykonywana jest praca na wydajność i bezpieczeństwo pracujących tam osób, poświęcono m.in. prace [36-39]. Przyjazne dla człowieka środowisko termiczne określane jest mianem komfortu cieplnego. Według norm [30, 40] komfort cieplny określa stan, w którym człowiek jest zadowolony ze środowiska termicznego.

Z punktu widzenia ergonomii, wybór wielkości charakteryzujących środowisko termiczne umiarkowane, akceptowane przez człowieka (przy przyjęciu kryterium obciążenia termicznego albo komfortu cieplnego) określa norma [41], wg której do wielkości podstawowych środowiska termicznego należą:

- temperatura powietrza t_a w °C,
- średnia temperatura promieniowania t_r w °C,
- asymetria temperatury promieniowania Δt_{pr} w K,
- wilgotność bezwzględna powietrza, wyrażona przez ciśnienie cząstkowe pary wodnej e' w kPa,
- prędkość przepływu powietrza v_a w m/s.

Wyznaczenie obciążeń termicznych oddziałujących na człowieka w środowisku gorącym określa norma [42], natomiast w przypadku ujemnych obciążeń termicznych stosuje się metody i sposób interpretacji, który opisano w normie [43].

3.3. Charakterystyka aparatury pomiarowej

Wymagania związane z wprowadzaniem coraz ostrzejszych przepisów dotyczących odpowiednich parametrów klimatu jak również ogólny postęp technologiczny sprawiły, że konstrukcje współczesnych przyrządów pomiarowych, wykorzystywanych w systemach nadzoru klimatu są oparte o technikę mikroprocesorową. Elementy wpływające na uzyskiwane wyniki pomiarowe, a więc: sensor i przetwornik analogowo-cyfrowy powinny stanowić jedną nierozłączną całość, regulowaną wspólnie w procesie kalibracji. Regulacja urządzenia pomiarowego podczas tego procesu powinna odbywać się na drodze elektronicznej, bez użycia potencjometrów, trymetrów, itp. Transmisja wyników pomiarów z przyrządu powinna być realizowana w technice cyfrowej, dzięki czemu możliwe jest jednoczesne przesłanie większej liczby danych pomiarowych (np. temperatury i wilgotności). Metody pomiaru parametrów charakteryzujących mikroklimat oraz urządzenia realizujące te funkcje szczegółowo opisano m.in. w pracy [29]. Przykładem takiego urządzenia jest cyfrowy miernik mikroklimatu BABUC M, którego ogólny widok przedstawiono na rys. 3.2. Urządzenie to może być stosowane do wyznaczania wybranych parametrów mikroklimatu dla środowisk gorących, umiarkowanych i zimnych. Zestaw BABUC M umożliwia

wyznaczenie wartości temperatury: powietrza, poczernionej kuli, wilgotnej naturalnej, średniej temperatury promieniowania oraz wilgotności względnej i prędkości ruchu powietrza. Widok ogólny cyfrowego miernika mikroklimatu BABUC M wykorzystanego przez autora w pomiarach mikroklimatu Katedry Opolskiej przedstawiono na rys. 3.2. W zastosowanym zestawie pomiarowym wilgotność względna powietrza mierzona jest przy wykorzystaniu psychrometru BSU 102, którego widok ogólny przedstawiono na rys. 3.3. Składa się on z dwóch termometrów, suchego i mokrego. Część pomiarowa termometru mokrego owinięta jest koszulką z gazy lub batystu, zwilżoną wodą destylowaną. Wentylator umieszczony w osi termometrów nad nimi, wywołuje przepływ powietrza wynoszący w przybliżeniu 4 m/s. W atmosferze o wilgotności względnej niższej niż 100% woda odparowuje z wilgotnej otuliny i ochładza go do temperatury niższej, oznaczanej symbolem t_m , niż temperatura t_a , zmierzona za pomocą termometru suchego.



Rys. 3.2. Widok ogólny cyfrowego miernika mikroklimatu BABUC M

Źródło: [44].



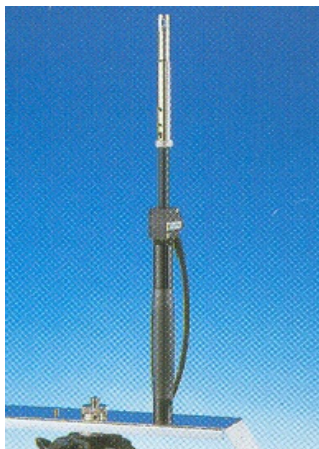
Rys. 3.3. Widok ogólny psychrometru BSU 102

Źródło: [44].

Największe obniżenie temperatury występuje, gdy szybkość odparowywania potrzebna dla utrzymania stanu nasycenia nad otuliną przyjmuje wartość ustaloną. Wówczas obniżenie temperatury zależy od czystości otuliny i wody, prędkości ruchu powietrza wentylującego, zjawisk promieniowania ciepła, wymiarów i dokładności termometrów oraz właściwości przejmowania masy i ciepła przez powietrze.

Zakres pomiarowy psychrometru BSU 102 mieści się w przedziale od 0% do 100% wartości wilgotności względnej, natomiast dokładność wynosi $\pm 1\%$. Czujniki temperatury mokrej i suchej wykorzystane do wyznaczenia wilgotności względnej charakteryzowały się zakresem pomiarowym mieszczącym się w przedziale od 0°C do 150°C , przy dokładności pomiaru wynoszącej $0,2^{\circ}\text{C}$ [44].

Pomiar prędkości ruchu powietrza w zestawie BABUC M realizowany jest z wykorzystaniem anemometru BSV 101, którego widok ogólny przedstawiono na rys. 3.4. Umożliwia on wykonywanie pomiarów w zakresie od 0 do 50 m/s z dokładnością $\pm 0,04$ m/s. [44]. W urządzeniu tym określanym inaczej termotanemometrem z gorącym drutem (ang: hot wire) przepływający prąd elektryczny przez platynowy drut z wykorzystaniem efektu Joule'a, utrzymuje temperaturę wyższą od temperatury otoczenia. Prędkość powietrza obliczana jest na podstawie wielkości natężenia prądu potrzebnego do utrzymania stałej temperatury platynowego drutu i znanego termicznego współczynnika dyspersji.



Rys. 3.4. Ogólny widok anemometru BSV 101

Źródło: [44].

Temperatura wilgotna naturalna w zestawie BABUC M mierzona jest przy użyciu sondy temperaturowej typu BSU 121 z kulą mokrą, wentylowaną naturalnie. Zakres pomiarowy sondy mieści się w przedziale od 0 do 150°C , natomiast dokładność pomiaru wynosi $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$. Podobnie jak w przypadku pomiaru temperatury wilgotnej z wymuszonym obiegiem powietrza, część pomiarowa termome-

tru owinięta jest koszulką z gazy lub batystu i zwilżona wodą destylowaną, przy czym obieg powietrza wokół sondy jest w tym przypadku naturalny [44].

Temperatura wilgotna naturalna różniąc się od temperatury wilgotnej z wymuszonym obiegiem powietrza, niezbędna jest przede wszystkim do wyznaczenia wskaźnika *WBGT* (ang: wet bulb globe temperature), stosowanego do opisu środowisk gorących. Widok ogólny sondy BSU 121 przedstawiono na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Widok ogólny sondy temperaturowej BSU 121

Źródło: [44].

Przy ocenie mikroklimatu średnią temperaturę promieniowania można wyznaczyć dwoma metodami:

- przez pomiar temperatury poczernionej kuli i temperatury powietrza (oraz prędkości przepływu powietrza w otoczeniu poczernionej kuli przy konwekcji wymuszonej),
- przez obliczenie średniej temperatury promieniowania z wyników pomiaru temperatury ścian, z wykorzystaniem czujników kątowych wyznaczonych na podstawie wzajemnego ustawienia i wymiarów płaszczyzn promieniujących.

W zestawie BABUC M średnia temperatura promieniowania obliczana jest na podstawie pomiaru temperatury: poczernionej kuli (rys. 3.6) i powietrza. Temperatura poczernionej kuli jest wskazywana przez czujnik umieszczony wewnątrz kulistej, poczernionej od strony zewnętrznej, osłony. Pomiar temperatury poczernionej kuli powinien spełniać wymagania norm [41, 42], w których określono kryteria dotyczące wykonania samej kuli i zamontowanego w jej wnętrzu termometru, do których zalicza się:

- średnicę kuli, która powinna wynosić 0,15 m,
- współczynnik emisyjności powierzchni kuli powinien być bliski wartości $\varepsilon = 0,95$,

- grubość osłony kuli powinna być możliwie jak najmniejsza,
- zakres pomiarowy temperatury winien mieścić się w przedziale od 5 do 120°C,
- dokładność pomiaru w zakresie od 5 do 50°C $\pm 0,5^\circ\text{C}$, a od 50°C $\pm 1^\circ\text{C}$.



Rys. 3.6. Widok ogólny czujnika do pomiaru temperatury poczernionej kuli BTS 131

Źródło: [44].

Podczas eksperymentu pomiar temperatury promieniowania przeprowadzono z wykorzystaniem czujnika BTS 131 przeznaczonego do pracy w zakresie od 0°C do 100°C. Dokładność wynosiła 0,2°C [44].

3.4. Metodyka oceny środowiska termicznie umiarkowanego

W celu wykonania oceny środowiska termicznego występującego w Katedrze Opolskiej w okresie letnim, oddziaływującego na ludzi przebywających w tym czasie w obiekcie, na podstawie normy [40] wyznacza się dwa wskaźniki: *PMV* (ang. predicted mean vote), tzn. przewidywanej oceny średniej oraz *PPD* (ang. predicted percentage of dissatisfied), tzn. przewidywanego odsetka niezadowolonych.

Odczucia termiczne człowieka odnoszą się głównie do równowagi cieplnej całego ciała. Na równowagę tę wpływa aktywność fizyczna, odzież, którą ma na sobie, jak również parametry otaczającego powietrza, takie jak: temperatura, średnia temperatura promieniowania, prędkość przepływu powietrza i wilgotność. Po przeprowadzeniu oceny lub pomiarów powyższych czynników, można przewidzieć wrażenia cieplne całego ciała, obliczając wskaźnik *PMV*. Natomiast *PPD* podaje informację dotyczącą niespełnienia warunków komfortu termicznego przez przewidywanie procentu ludzi, którzy w określonym otoczeniu odczuwają nadmierne gorąco lub zimno. Niespełnienie warunków komfortu termicznego może być spowodowane oddziaływaniem subiektywnych, nega-

tywnych czynników mikroklimatu na całe ciało człowieka. W tym przypadku granice komfortu mogą być wyrażone wskaźnikami *PMV* i *PPD*. Jednakże, niespełnienie warunków komfortu termicznego może być również spowodowane niepożądanym miejscowym przegrzaniem lub oziębieniem określonej części ciała. W takiej sytuacji wskaźniki wykorzystywane do oceny środowiska termicznie umiarkowanego, nie mogą być wykorzystywane.

3.4.1. Metody wyznaczania wskaźnika *PMV*

PMV jest wskaźnikiem, który przewiduje średnią ocenę dużej grupy osób określających swe wrażenia cieplne w siedmiostopniowej skali ocen [40]. Poziomy odczuć cieplnych w zależności od wartości wskaźnika *PMV* przedstawiono w tab. 3.1. Wskaźnik *PMV* można określić, gdy zostanie oceniona aktywność fizyczna człowieka (wytwarzanie energii metabolicznej) i rodzaj zastosowanej odzieży (oporność cieplna odzieży) oraz gdy zostaną zmierzone następujące parametry środowiska:

- temperatura powietrza,
- średnia temperatura promieniowania,
- względna prędkość przepływu powietrza,
- cząstkowe ciśnienie pary wodnej.

Wskaźnik *PMV* jest oparty na równowadze cieplnej ciała ludzkiego. Człowiek znajduje się w równowadze cieplnej, gdy wewnętrzne wytwarzanie ciepła w jego ciele jest równe utracie jego ciepła do otoczenia. Układ termoregulacji ciała człowieka zmienia automatycznie temperaturę skóry i wydzielanie potu w celu utrzymania równowagi cieplnej.

Tabela 3.1

Poziomy ocen odczuć cieplnych w zależności od wartości wskaźnika *PMV*
w skali Bedforda i ASHRAE

LP	Skala komfortu cieplnego		Liczbowa	Linijowa
	Bedforda	ASHRAE		
1	Za gorąco	Gorąco	7	7 .
2	Zbyt ciepło	Ciepło	6	6 .
3	Przyjemnie ciepło	Lekko ciepło	5	5 .
4	Przyjemnie	Ani za ciepło, ani za zimno	4	4 .
5	Przyjemnie chłodno	Lekko chłodno	3	3 .
6	Za chłodno	Chłodno	2	2 .
7	Za zimno	Zimno	1	1 .

} Strefa
komfortu

Źródło: [17].

Do wyznaczenia wskaźnika PMV , obciążenie fizjologiczne układu termoregulacji zostało skorelowane z wrażeniami cieplnymi ponad 1300 badanych osób. Wskaźnik PMV jest wyrażony następującym równaniem [40]:

$$\begin{aligned} PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \{ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot \\ & [5733 - 6,99(M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] + \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_a) - 0,001 \cdot 4M(34 - t_a) + \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35,7 - 0,028(M - W) - I_{cl} \{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 + \\ & - (\bar{t}_r + 273)^4] \} + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a), \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$h_c = \begin{cases} 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} & \text{dla } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}} \\ 12,1\sqrt{v_{ar}} & \text{dla } 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290I_{cl} & \text{dla } I_{cl} \leq 0,78m^2 \cdot \frac{^\circ C}{W} \\ 0,05 + 0,645I_{cl} & \text{dla } > 0,78m^2 \cdot \frac{^\circ C}{W} \end{cases} \quad (3.6)$$

gdzie: M – metabolizm, W/m^2 (jednostka metabolizmu 1 met = 58 W/m^2), W – praca zewnętrzna, W/m^2 , I_{cl} – oporność cieplna odzieży, $m^2 \text{ } ^\circ C/W$ (jednostka oporności cieplnej odzieży 1 clo = 0,155 $m^2 \text{ } ^\circ C/W$), f_{cl} – stosunek pola powierzchni ciała okrytego odzieżą do pola powierzchni ciała odkrytego, t_a – temperatura powietrza, $^\circ C$, \bar{t}_r – średnia temperatura powietrza, $^\circ C$, v_{ar} – względna prędkość przepływu powietrza, m/s, p_a – ciśnienie cząstkowe pary wodnej, Pa, h_c – współczynnik wymiany ciepła przez konwekcję, $W/m^2 \text{ } ^\circ C$, t_d – temperatura powierzchni odzieży, $^\circ C$.

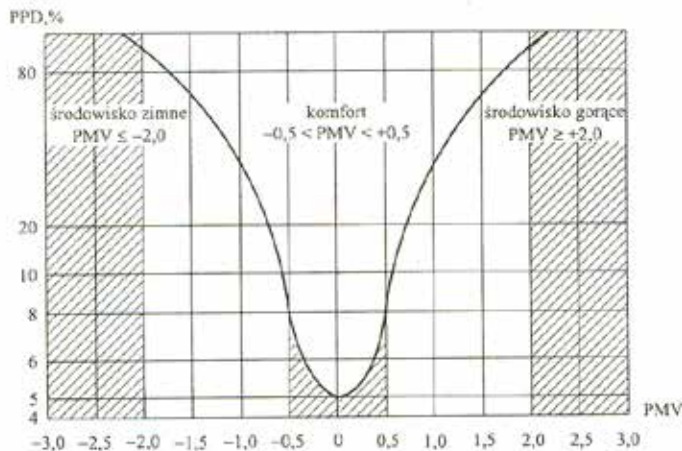
Według równania (3.3), wskaźnik PMV można obliczyć dla dowolnych kombinacji metabolizmu, odzieży, temperatury powietrza, średniej temperatury promieniowania, prędkości przepływu i wilgotności powietrza. Wskaźnik PMV został określony dla warunków ustalonych, ale w przybliżeniu może być również stosowany w czasie występowania nieznacznych fluktuacji jednej lub kilku zmiennych, pod warunkiem, że brane są pod uwagę średnie ważone tych zmiennych w funkcji czasu w ciągu jednej godziny [40].

3.4.2. Metody wyznaczania wskaźnika *PPD* charakteryzującego przewidywany odsetek niezadowolonych

Wskaźnik *PPD* jest wartością średnią wrażeń cieplnych grupy ludzi przebywających w tym samym środowisku. Jednakże indywidualne oceny są rozłożone wokół tej samej wartości średniej i można przewidzieć liczbę osób, które będą odczuwały brak komfortu ze względu na ciepło lub zimno. Wskaźnik *PPD* stanowi prognozę liczby osób odczuwających brak komfortu termicznego i umożliwia przewidzenie, jaki procent w grupie będzie odczuwał brak komfortu termicznego, tzn. osób, które ocenią środowisko wg 7-stopniowej skali wrażeń cieplnych (tab. 3.1) jako: gorące (+3), ciepłe (+2), chłodne (-2) lub zimne (-3). Po wyznaczeniu wskaźnika *PMV*, wskaźnik *PPD* można odczytać z rys. 3.7 lub obliczyć z równania [40]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)}. \quad (3.7)$$

Wskaźnik *PPD* określa liczbę osób, które uważają, że nie zostały spełnione warunki komfortu termicznego. Pozostałe osoby w grupie będą oceniały warunki termiczne jako neutralne, dość ciepłe lub dość chłodne.



Rys. 3.7. Przewidywany odsetek niezadowolonych (*PPD*) jako funkcja przewidywanej średniej oceny (*PMV*)

Źródło: [17].

3.5. Metodyka oceny ujemnego obciążenia termicznego

W celu wyznaczenia ujemnego obciążenia termicznego spowodowanego oddziaływaniem środowiska z temperaturą pomieszczenia niższą od 10°C, na pod-

stawie normy [43] wyznacza się wartości dwóch wskaźników: *WCI* (ang. wind chill index), tzn. wskaźnik siły chłodzącej powietrza oraz *IREQ* (ang. required clothing insulation), tzn. wskaźnik wymaganej ciepłochronności odzieży oraz ich wartości dopuszczalnych dla oceny miejscowego i ogólnego narażenia osób na oddziaływanie zimnego środowiska. Temperatury poniżej 10°C występują w badanym obiekcie od późnej jesieni do wczesnej wiosny. Dlatego istnieje konieczność wyznaczenia wskaźników *WCI* i *IREQ*.

Ujemne obciążenie termiczne, jakiemu może być poddany człowiek znajdujący się w środowisku zimnym, zależy od tego, czy warunki środowiska doprowadzają do ogólnego oziębienia całego ciała, czy tylko miejscowego oziębienia jego części lub powierzchni. Wyróżnienie tych dwóch sposobów oddziaływania warunków środowiska zimnego na organizm wynika zarówno z różnego zachowania się poszczególnych narządów i organizmu jako całości, jak i z różnych skutków lub efektów tego oddziaływania. W normie [43] zalecono, żeby działanie zimna na organizm oceniać oddzielnie w przypadku tych dwóch sposobów oddziaływania, jak również podano zasady wyznaczania wartości *WCI* i *IREQ*.

3.5.1. Metoda wyznaczania wskaźnika siły chłodzącej powietrza *WCI*

W przypadku chłodzenia miejscowego, działanie środowiska zimnego na organizm człowieka jest oceniane za pomocą wskaźnika siły chłodzącej powietrza *WCI*, wyrażonego wzorem (3.8) [43].

$$WCI = (10,45 + 10\sqrt{v_{ar}} - v_{ar})(33 - t_a), \quad (3.8)$$

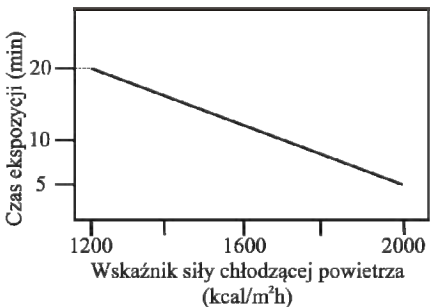
gdzie: *WCI* – wskaźnik siły chłodzącej powietrza, kcal/m²h, v_{ar} – względna prędkość ruchu powietrza, m/s, t_a – temperatura powietrza, °C.

Metoda obliczania miejscowego ujemnego obciążenia termicznego jest oparta na bezpośrednim pomiarze temperatury i prędkości ruchu powietrza oraz na wyznaczaniu wartości średnich uwzględniających zmiany tych parametrów w czasie i w przestrzeni. Zebrane w ten sposób, a następnie przetworzone dane służą do obliczenia wartości wskaźnika *WCI* bezpośrednio za pomocą wzoru (3.8). Wartości odniesienia wskaźnika *WCI* odpowiadają poziomom oddziaływania, na które w warunkach podanych w tab. 3.2 mogą być narażone prawie wszystkie osoby bez żadnych szkodliwych skutków pod warunkiem, że nie wykazywały one uprzednio żadnych objawów chorobowych. Ponadto ustalenie tych poziomów oddziaływania ze względu na zdrowie ludzi nie przesądza o poziomach, które mogłyby być ustalone ze względu na inne ważne przyczyny, takie jak zmiana funkcji nabłonka wyścielającego drogi oddechowe przy skrajnie surowych warunkach środowiska (temperatura powietrza -35 do -45°C) oraz

zmiana reakcji psychomotorycznych, które mogłyby doprowadzić do wypadków np. w czasie wykonywania pracy [43].

Tabela 3.2

Wartości odniesienia wskaźnika siły chłodzącej powietrza WCI

Wskaźnik siły chłodzącej powietrza WCI (kcal/m ² h)	Dozwolony czas ekspozycji
$WCI \leq 1200$	Ekspozycja ciągła
$1200 < WCI < 2000$	Ekspozycja skrócona 
$WCI \geq 2000$	Ekspozycja zabroniona nawet w warunkach awaryjnych

Źródło: [43].

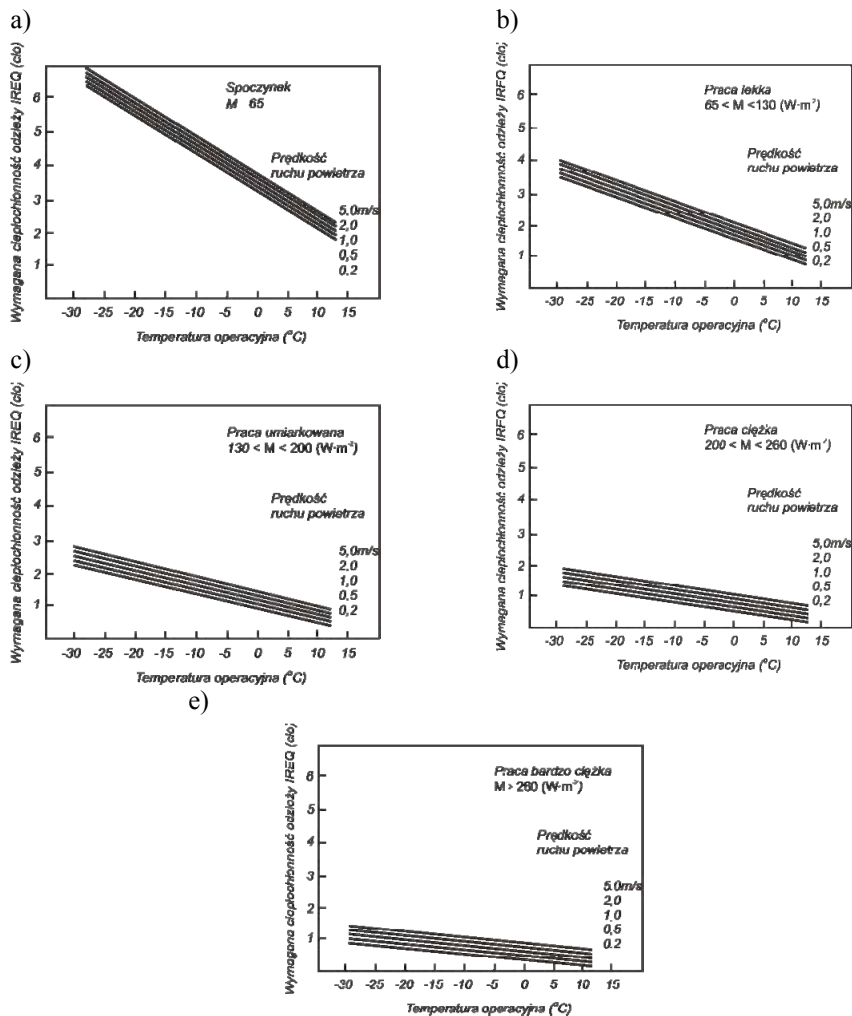
3.5.2. Metoda wyznaczania wskaźnika wymaganej ciepłochronności odzieży *IREQ*

W przypadku ogólnego chłodzenia, działanie środowiska zimnego na organizm człowieka jest oceniane za pomocą wskaźnika wymaganej ciepłochronności odzieży *IREQ*, który należy wyznaczać korzystając bezpośrednio z wykresów prezentowanych na rys. 3.8. Podano na nich wartości liczbowe *IREQ* przy ustalonej wilgotności względnej 50% dla różnych poziomów metabolizmu (wydatku energetycznego), prędkości ruchu powietrza i różnych temperatur operacyjnych wg [40].

Metoda obliczania wskaźnika wymaganej ciepłochronności odzieży *IREQ* jest więc oparta na bezpośrednim pomiarze temperatury i prędkości ruchu powietrza, średniej temperatury promieniowania oraz na oznaczeniu metabolizmu (wydatku energetycznego) i obliczeniu wartości średnich uwzględniających zmiany tych parametrów w czasie i w przestrzeni otaczającej człowieka. Zebrane w ten sposób i przetworzone dane służą do wyznaczenia wartości wskaźnika *IREQ* bezpośrednio z wykresów przedstawionych na rys. 3.8.

Wartości odniesienia wskaźnika *IREQ* odpowiadają poziomowi oddziaływania, na który mogą być narażone prawie wszystkie osoby bez żadnych szko-

dliwych skutków dla zdrowia, pod warunkiem, że nie wykazywały one uprzednio żadnych objawów chorobowych.



Rys. 3.8. Wartości odniesienia wskaźnika wymaganej ciepłochronności odzieży IREQ dla różnych poziomów metabolizmu. a) spoczynek: $M < 65$ $W \cdot m^{-2}$, b) praca lekka: $65 < M < 130$ $W \cdot m^{-2}$, c) praca umiarkowana: $130 < M < 200$ $W \cdot m^{-2}$, d) praca ciężka: $200 < M < 260$ $W \cdot m^{-2}$, e) praca bardzo ciężka: $M > 260$ $W \cdot m^{-2}$

Źródło: [43].

Do wyznaczenia wartości współczynników WCI i $IREQ$ niezbędne jest wykonanie pomiaru trzech wielkości fizycznych charakteryzujących środowisko,

tj.: temperatury powietrza, prędkości ruchu powietrza i średniej temperatury promieniowania. Mierząc temperatury powietrza, dokonuje się pomiaru:

- temperatury powietrza będącej parametrem podstawowym, gdzie pomiar może być wykonany według dowolnej metody, niezależnie od kształtu zastosowanego czujnika,
- temperatury wilgotnej naturalnej, która jest wielkością wskazywaną przez czujnik pokryty wilgotną tkaniną przy naturalnym ruchu powietrza,
- temperatury poczernionej kuli wskazanej przez czujnik umieszczony w środku kuli.

Drugą wielkością fizyczną niezbędną do wyznaczenia wartości współczynników WCI i $IREQ$ jest prędkość ruchu powietrza, która może być zmierzona za pomocą rurek spiętrzających, sond piętrzających, anemometrem mechanicznym, termooanemometrem, anemometrem laserowym lub innego typu np. akustycznymi.

Do obliczenia średniej temperatury promieniowania wykorzystuje się zmierzone wartości temperatury powietrza, prędkości ruchu powietrza oraz temperatury termometru z poczernioną kulą. Znając powyższe wielkości fizyczne, można na podstawie zależności (3.9) wyznaczyć średnią temperaturę promieniowania [43].

$$t_r = \sqrt[4]{(t_g + 273)^4 + 2,5 \cdot 10^8 \cdot v_{ar}^{0,6} (t_g - t_a)} - 273, \quad (3.9)$$

gdzie: t_r – średnia temperatura promieniowania, °C, t_g – temperatura termometru z poczernioną kulą, °C, t_a – temperatura powietrza, °C, v_{ar} – prędkość ruchu powietrza, m/s.

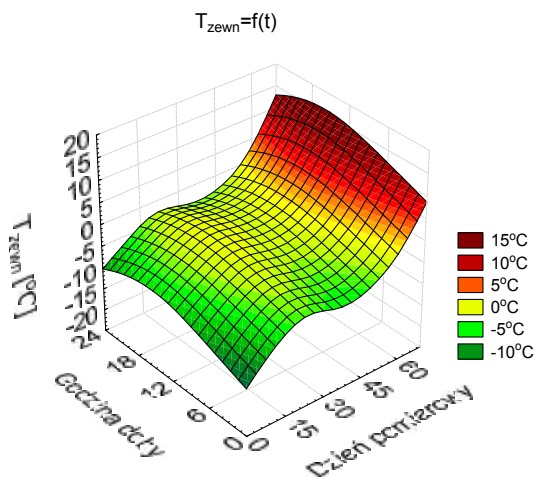
3.6. Zakres i wyniki pomiarów wielkości charakteryzujących klimat i mikroklimat

Podstawowe wartości charakteryzujące klimat, do których zalicza się temperaturę oraz wilgotność względną powietrza, występujące w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006 jak również w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006 uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział w Opolu. Zarejestrowane wartości temperatury powietrza i wilgotności względnej dla wymienionych dwóch okresów pomiarowych, przedstawiono odpowiednio w formie wykresów przestrzennych na rys. 3.9 i rys. 3.10 oraz na rys. 3.11 i rys. 3.12, na których oś X reprezentuje kolejny dzień pomiarowy, począwszy od 20-01-2006 dla okresu zimowego, natomiast dla okresu letniego pierwszy dzień pomiarowy przypada na 10-08-2006. Oś Y na wszystkich wykresach reprezentuje kolejne godziny doby, natomiast na osi Z przedstawiono odpowiednio wartości tempe-

ratury powietrza i wartości wilgotności względnej powietrza. Najniższa zarejestrowana temperatura powietrza w okresie zimowym wyniosła $-19,7^{\circ}\text{C}$. Wystąpiła ona w dniu 31-01-2006 o godz. 8.00. Natomiast najwyższa temperatura zarejestrowana była w dniu 27-03-2006 o godz. 17.00 i wynosiła $15,5^{\circ}\text{C}$. Wilgotność względna powietrza zewnętrznego zmieniała się w szerokim zakresie od 32% w dniu 01-03-2006 o godz. 16.00 do 100% w dniu 24-03-2006 w godz. od 01.00 do 09.00. W okresie letnim zakres zmian temperatur mieścił się w granicach od $7,2^{\circ}\text{C}$ do $36,7^{\circ}\text{C}$. Najniższą temperaturę zarejestrowano w dniu 30-09-2006 o godz. 03.00, natomiast najwyższą w dniu 17-08-2006 o godz. 15.00. Wilgotność względna powietrza zmieniała się podobnie jak w okresie zimowym w stosunkowo szerokim zakresie. Najniższą wartość zarejestrowano w dniu 15-09-2006 wynoszącą 24%, natomiast 31-08-2006 odnotowano największą, 90-procentową.

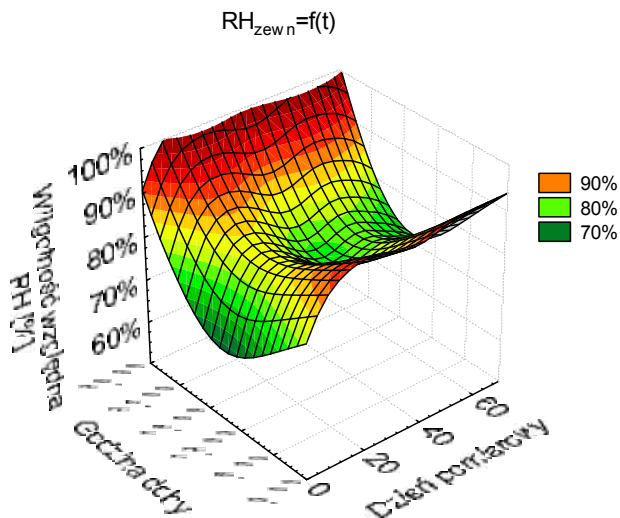
Pomiary parametrów podstawowych elementów mikroklimatu Katedry Opolskiej wykonano z wykorzystaniem cyfrowego miernika klimatu BABUC M, który szczegółowo scharakteryzowano w rozdz. 3.3. Rejestrację prowadzono nieprzerwanie w okresie zimowym od 20-01-2006 do 30-03-2006, kiedy do ogrzewania wykorzystywano stary, mało wydajny system ogniowo-powietrzny oraz w okresie letnim od 10-08-2006 do 30-09-2006, mierząc co godzinę następujące parametry:

- temperaturę powietrza (t_a),
- temperaturę wilgotną naturalną (t_g),
- temperaturę pocznionej kuli (t_r) oraz
- wilgotność względną (RH).



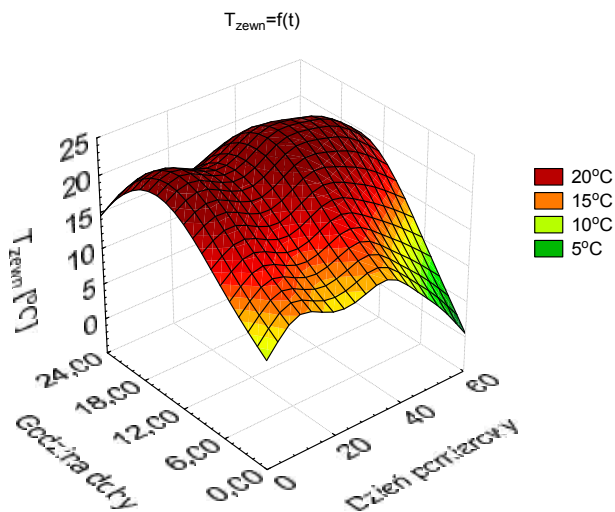
Rys. 3.9. Zmiany temperatury zewnętrznej zarejestrowane w Opolu w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z IMiGW w Opolu.



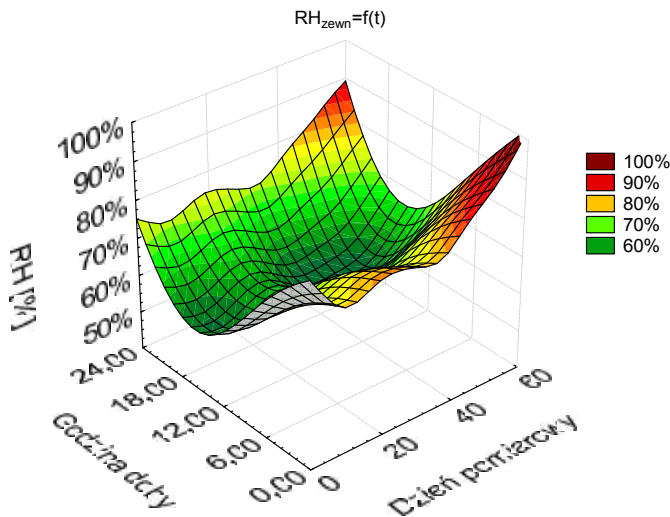
Rys. 3.10. Zmiany wilgotności względnej powietrza zarejestrowane w Opolu w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z IMiGW w Opolu.



Rys. 3.11. Zmiany temperatury zewnętrznej zarejestrowane w Opolu w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z IMiGW w Opolu.

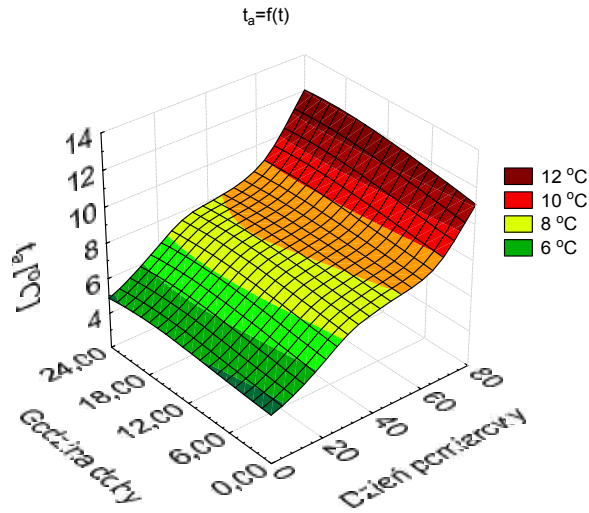


Rys. 3.12. Zmiany wilgotności względnej powietrza zarejestrowane w Opolu w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z IMiGW w Opolu.

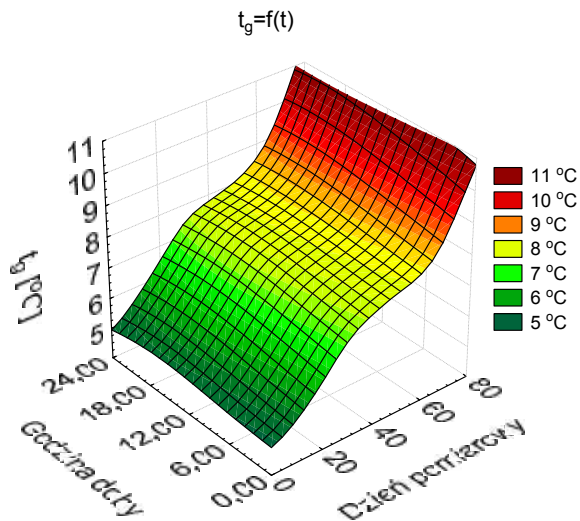
Ponadto rejestrowano, ale nie uwzględniano w dalszych obliczeniach i analizach prędkości powietrza (v) ze względu na niezmiennie małe wartości, wynoszące zawsze poniżej $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, które nie miały wpływu na odczucia cieplne ludzi. Mierzone dane przenoszono z pamięci miernika klimatu BABUC M do komputera PC, dokonując 1632 odczyty w okresie zimowym oraz odpowiednio 1231 w okresie letnim. Uzyskane wartości wybranych parametrów mikroklimatu przedstawiono w postaci wykresów przestrzennych na rys. od 3.13. do 3.16 dla okresu zimowego oraz na rys. od 3.17 do 3.20 dla okresu letniego.

Na podstawie otrzymanych parametrów wyznaczono dla Katedry Opolskiej wartości wskaźników WCI i $IREQ$ charakteryzujących mikroklimat zimny oraz odpowiednio wartości wskaźników PMV i PPD związanych z mikroklimatem umiarkowanym. Do wyznaczenia poszczególnych wartości wskaźników mikroklimatu wykorzystano oprogramowanie InfoGAP ver. 2.0.4 firmy LSI – Lastem, współpracujące z aparaturą pomiarową BABUC-M. Pozwalało ono na rejestrację i archiwizację parametrów, na podstawie których w dalszej kolejności wyznaczano wskaźniki charakteryzujące mikroklimat występujący w obiekcie.



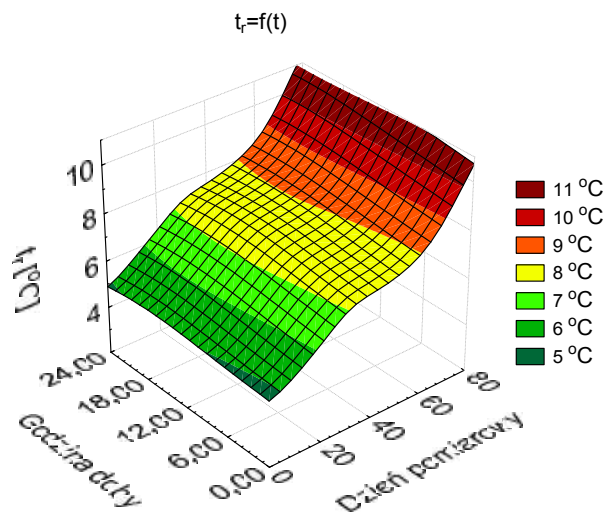
Rys. 3.13. Zmiany temperatury powietrza t_a zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne.



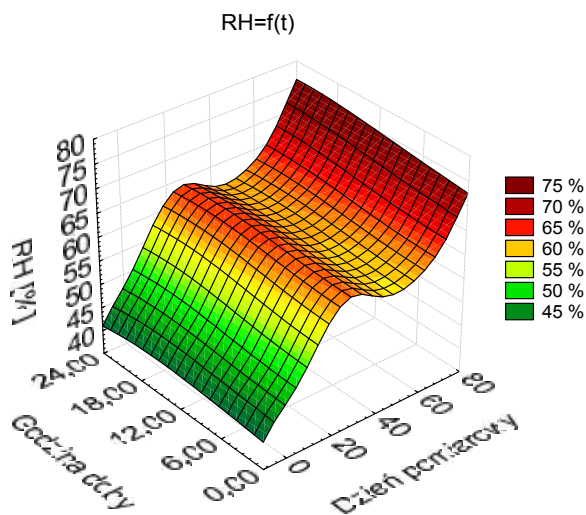
Rys. 3.14. Zmiany temperatury wilgotnej kuli t_g zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne.



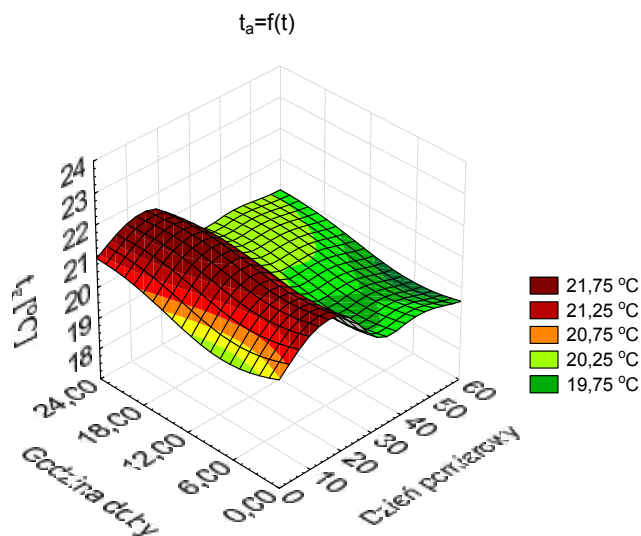
Rys. 3.15. Zmiany temperatury poczwernionej kuli t_r , zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne.



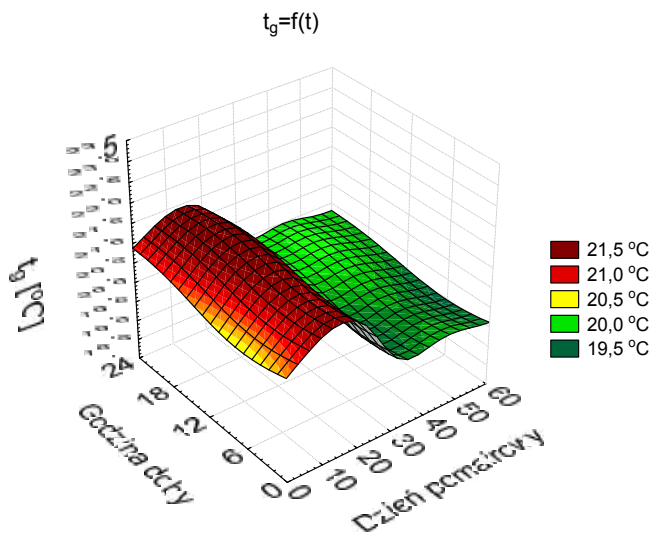
Rys. 3.16. Przebieg zmian wilgotności względnej RH zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne.



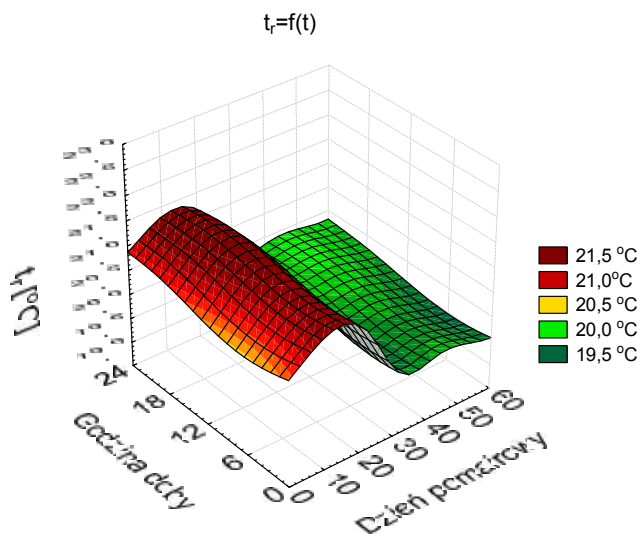
Rys. 3.17. Zmiany temperatury powietrza t_a zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne.



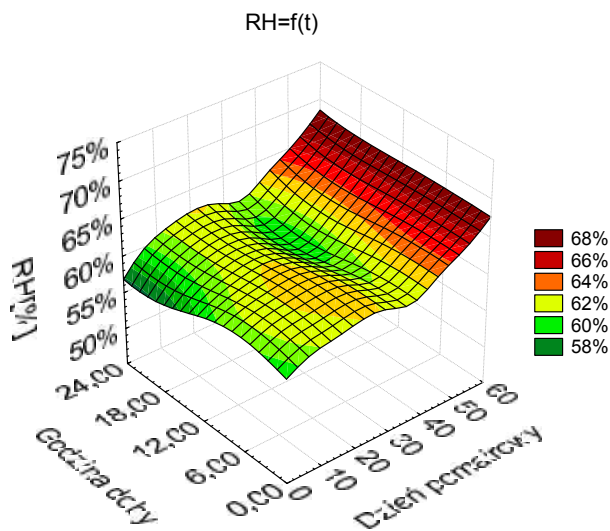
Rys. 3.18. Zmiany temperatury wilgotnej kuli t_g zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3.19. Zmiany temperatury poczwernionej kuli t_r zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3.20. Zmiany wilgotności względnej RH zarejestrowane w Katedrze Opolskiej w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne.

3.7. Wartości wskaźników WCI i IREQ oraz PMV i PPD wyznaczone dla Katedry Opolskiej

W obszarze poniżej strefy komfortu cieplnego, kiedy $PMV \leq -2$, równanie bilansu cieplnego, obliczone wyłącznie na podstawie wymiany ciepła przez konwekcję i promieniowanie, ma wartość ujemną. Oznacza to, że ciepło organizmu przekazywane jest do otoczenia. Następuje więc jego wychłodzenie. Warunki takie określa się jako stres termiczny zimny lub dyskomfort zimny ogólny. Opisana sytuacja może wystąpić w Katedrze Opolskiej w okresie od późnej jesieni do wczesnej wiosny, kiedy temperatura we wnętrzu spada poniżej 10°C . Wystąpienie stresu termicznego zimnego, czyli ujemnego bilansu cieplnego, może mieć również inne przyczyny. Mogą nimi być m.in.: obniżenie metabolizmu organizmu lub zmiana szybkości przepływu powietrza, gdy temperatura jego otoczenia jest niższa od średniej temperatury skóry. W skrajnych przypadkach przyczyny te mogą wystąpić równocześnie. Odpowiedzią termoregulacyjną ze strony ciała człowieka na stres termiczny zimny jest skurcz naczyń krwionośnych skóry, wywołujący mniej intensywny przepływ przez nie krwi, co powoduje zmniejszenie przewodności cieplnej tkanek powierzchniowych. Drugą reakcją jest zwiększenie wytwarzania ciepła przez organizm. W ten sposób następuje zmniejszenie różnicy temperatur pomiędzy skórą i organizmem ludzkim oraz środowiskiem, w efekcie czego może być zachowana stała temperatura wewnętrzna ciała. Istotny jest fakt, że organizm, broniąc się przed utratą ciepła, może sprostać tylko określonym warunkom środowiska. Jeśli różnica temperatur, a także inne, niekorzystne parametry mikroklimatu, będą zbyt duże lub zbyt długotrwałe, wówczas organizm ludzki nie jest w stanie przeciwdziałać tym niekorzystnym warunkom i może wystąpić zagrożenie dla jego bezpieczeństwa. Dlatego też takie objawy, jak spadek temperatury skóry, spadek temperatury wnętrza ciała i ogólny ubytek ciepła są sygnałem, że organizm może ulec zbyt dużemu obciążeniu termicznemu i może być wprowadzony w stres termiczny zimny. Objawy te wymuszają wyznaczenie zakresu niekorzystnego wpływu środowiska zimnego na organizm ludzki. Dopuszczalne, ujemne obciążenie termiczne organizmu określono w normie [43] oraz w rozdz. 3.5 niniejszej pracy. W normie [43] założono, że efekty chłodzenia człowieka poprzez obniżenie temperatury bądź poprzez promieniowanie mogą doprowadzić do ogólnego oziębienia całego ciała lub miejscowego, tylko niektórych jego części.

Dla wyznaczenia wskaźnika $IREQ$ występującego w badanym obiekcie, przyjęto wartość metabolizmu $M = 1,2 \text{ met} = 5,02 \text{ kJ/kg/godz.}$, co odpowiada niewielkiej aktywności człowieka przebywającego w pozycji siedzącej, natomiast oporność cieplną odzieży I_{cl} przyjęto na poziomie $1,2 \text{ clo}$. Wartości metabolizmu oraz oporności cieplnej odzieży zostały przyjęte na podstawie [40]. Na podstawie [45] wiadomo, że wartość oporności cieplnej dla typowego zestawu odzieży zimowej mieści się w zakresie od $0,8 \text{ clo}$ do $1,2 \text{ clo}$. Wyznaczone wartości wskaźników WCI i $IREQ$ przedstawiono w tab. 3.3.

Tabela 3.3

Maksymalne i minimalne wartości temperatury, wilgotności względnej, zarejestrowane w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006 występujące w obiekcie i poza nim oraz maksymalne i minimalne wartości wskaźników WCI i IREQ

	Wielkość fiz.	Jednostka	Wartość min.	Wartość maks.
Temp. i wilgotność występujące poza obiektem	t_{zewn}	°C	-19,7	14,0
	RH_{zewn}	%	32,0	100,0
	t_a	°C	4,4	11,8
Temp. i wilgotność występujące w obiekcie	t_g	°C	4,5	11,2
	t_r	°C	4,5	11,1
	RH	%	44,9	75,5
Wskaźniki charakteryzujące mikroklimat obiektu	WCI	W/m ²	256,6	360,3
	$IREQ$	clo	1,6	3,2

Źródło: opracowanie własne.

Wartości wskaźników PMV i PPD obliczono, wykorzystując program komputerowy InfoGAP ver. 2.0.4 firmy LSI – Lastem, przyjmując przeciętną wartość metabolizmu $M = 1,2 \text{ met}$ oraz oporność cieplną odzieży I_{cl} na poziomie $0,6 \text{ clo}$. W okresie letnim wartość oporności cieplnej odzieży wg [45] mieści się w granicach od $0,35 \text{ clo}$ do $0,6 \text{ clo}$.

Do obliczeń przyjęto wartość maksymalną oporności cieplnej ze względu na obowiązujące standardy odzieży osób przebywających w miejscach kultu religijnego oraz „chłodny” klimat, jaki jest charakterystyczny dla tego typu obiektów. Wyznaczone wartości wskaźników PMV i PPD przedstawiono w tab. 3.4.

Tabela 3.4

Maksymalne i minimalne wartości temperatury i wilgotności względnej powietrza zarejestrowane w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006 występujące w obiekcie i poza nim oraz maksymalne i minimalne wartości wskaźników PMV i PPD

	Wielkość fiz.	Jednostka	Wartość min.	Wartość maks.
Temp. i wilgotność wzg. występująca poza obiektem	T_{zewn}	°C	8,0	36,2
	RH_{zewn}	%	23,0	90,0
Temp. i wilgotność występujące w obiekcie	t_a	°C	18,3	23,2
	t_g	°C	18,8	22,8
	t_r	°C	18,9	22,7
	RH	%	49,2	73,3
Wskaźniki charakteryzujące mikroklimat obiektu	PMV	-	-2,0	-0,7
	PPD	%	16,1	79,5

Źródło: opracowanie własne.

4. Ocena wyników pomiarów parametrów mikroklimatu

W celu przeprowadzenia opisu liczbowego podstawowych własności rozkładów empirycznych zarejestrowanych wyników pomiarowych charakteryzujących klimat i mikroklimat przedstawionych w rozdz. 3, wyznaczono parametry statystyczne dające możliwości porównania różnych zbiorowości. Wyznaczono dwie grupy parametrów statystycznych będących miarami:

- położenia – dających możliwość określenia przeciętnego poziomu i rozmieszczenia wartości zmiennej,
- zmienności – pozwalających na określenie granic obszaru zmienności wartości zmiennej.

Przy badaniu populacji generalnej równocześnie ze względu na dwie lub więcej cech mierzalnych można posługiwać się pojęciami regresji i korelacji [46-49].

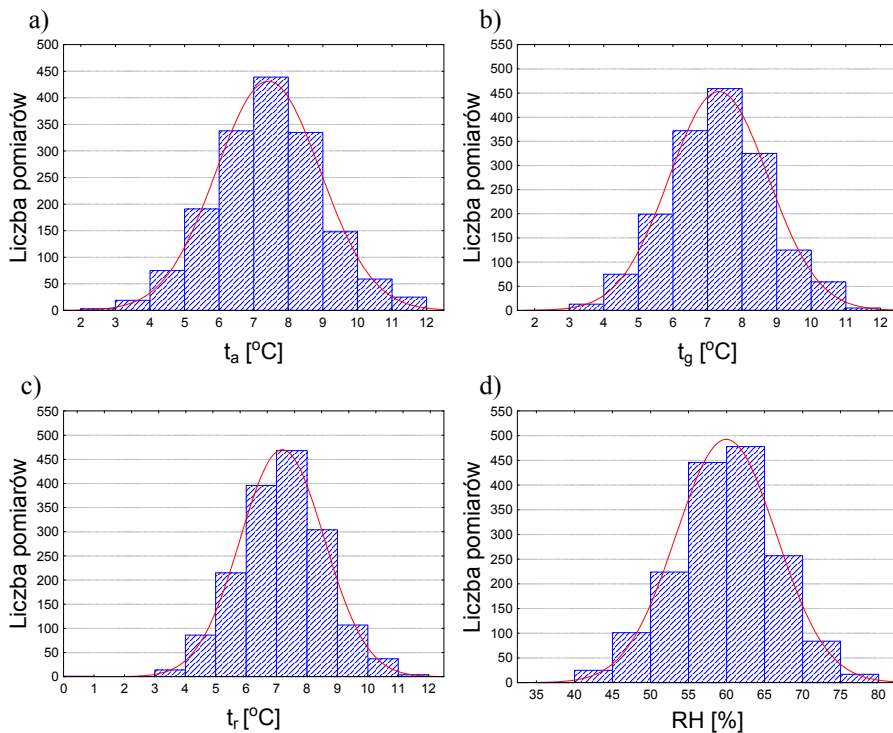
W monografii opisano zależność między zmianami temperatur i wilgotności zarejestrowanymi wewnątrz obiektu a wartościami klimatu występującymi w tym samym czasie poza obiektem. Jest to związek typu prostego, który charakteryzuje się jednostronnym oddziaływaniem przyczyn, jakimi są zmiany temperatury i wilgotności względnej klimatu zewnętrznego na skutek, jakim są zmiany temperatury oraz zmiany wilgotności względnej występujące wewnątrz obiektu. W rozpatrywanym przypadku wszystkie cechy są mierzalne, przy czym wartości wilgotności względnej i temperatury zewnętrznej są zmiennymi niezależnymi, czyli objaśniającymi X , a wartości temperatury i wilgotności względnej rejestrowane wewnątrz obiektu są zmiennymi zależnymi Y , czyli objaśnianymi. W celu określenia stopnia zależności między badanymi zmiennymi wykorzystano współczynnik korelacji oraz funkcję regresji.

4.1. Histogramy i funkcje gęstości rozkładów parametrów charakteryzujących klimat i mikroklimat

W przebiegach histogramów, jakie wykreślono (rys.: 4.1 ÷ 4.4) dla rozpatrywanych prób, umieszczono na osi odciętych przedziały klasowe, natomiast

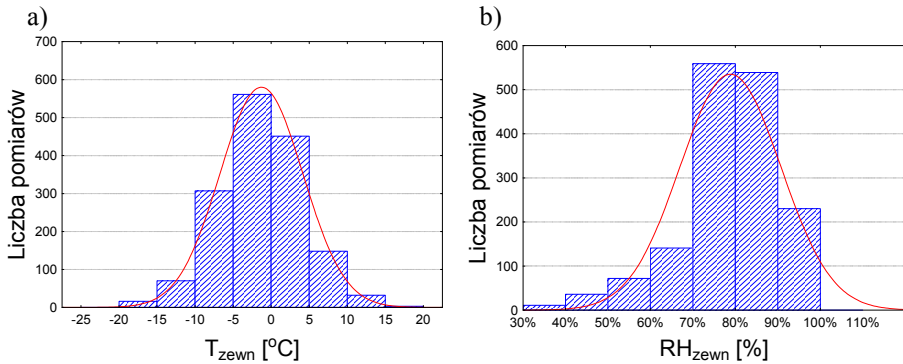
na osi rzędnych przedstawiono liczebność analizowanych parametrów mikroklimatu. Wysokość obliczonych słupków histogramów odpowiada w tym przypadku liczebności poszczególnych klas. Najistotniejszą cechą histogramu jest kształt jego przebiegu, który można syntetycznie opisać za pomocą zbliżonej do niego, ciągłej i regularnej krzywej [47, 50-54].

Uzyskane wartości zarejestrowanych parametrów mikroklimatu w okresie zimowym i letnim przedstawiono w postaci histogramów na rys. 4.1 i rys. 4.3, natomiast dla wartości klimatu odpowiednie histogramy przedstawiono na rys. 4.2 i rys. 4.4. Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramów i funkcji gęstości dla wybranych parametrów mikroklimatu Katedry Opolskiej oraz klimatu przedstawiono w załączniku A. Poza liczbą i granicą przedziałów klasowych oraz liczebnością poszczególnych klas w tablicach zamieszczonych w załączniku A, przedstawiono również liczebność skumulowaną, procent ważnych oraz skumulowany procent ważnych.



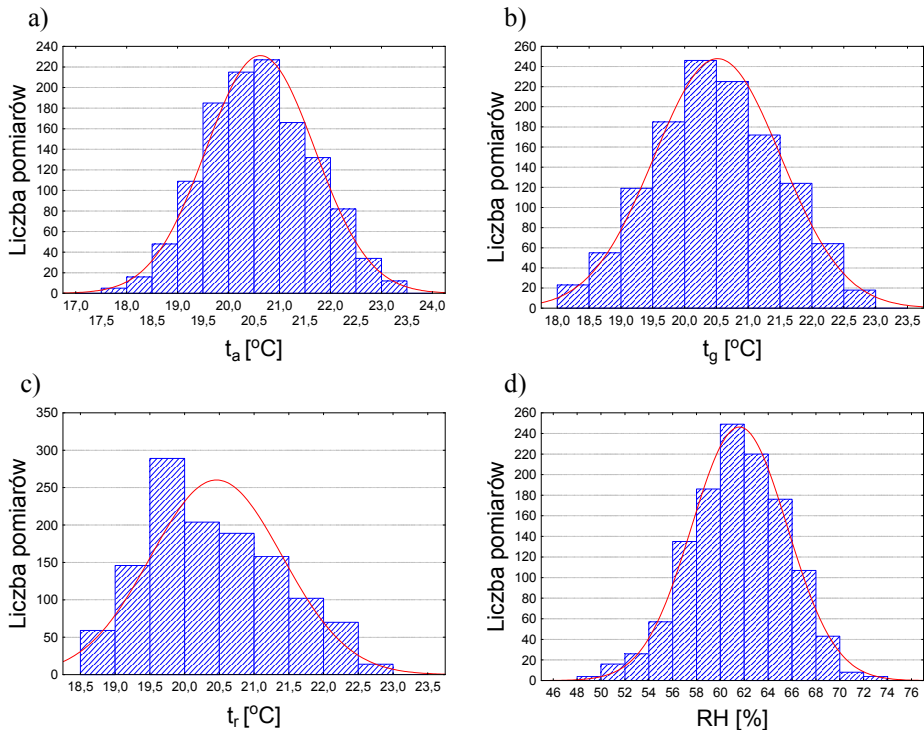
Rys. 4.1. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości poszczególnych parametrów mikroklimatu zarejestrowanych w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006. a) – temperatura powietrza, b) – temperatura wilgotna naturalna, c) – temperatura poczernionej kuli, d) – wilgotność względna

Źródło: opracowanie własne.



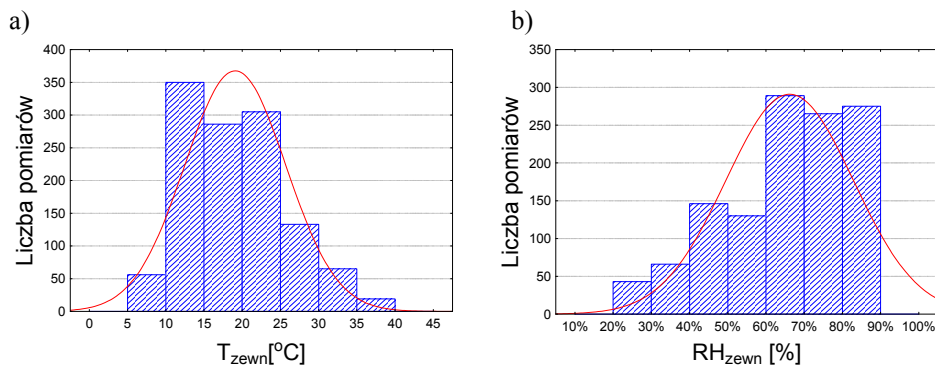
Rys. 4.2. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości poszczególnych parametrów klimatu zarejestrowanych w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006. a) – temperatura powietrza zewnętrzna, b) – wilgotność względna klimatu

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.3. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości poszczególnych elementów mikroklimatu zarejestrowanych w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006. a) – temperatura powietrza, b) – temperatura wilgotna naturalna, c) – temperatura poczerwionej kuli, d) – wilgotność względna

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.4. Histogramy i przebiegi funkcji gęstości poszczególnych elementów klimatu zarejestrowanych w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006. a) – temperatura powietrza zewnętrzna, b) – wilgotność względna klimatu

Źródło: opracowanie własne.

Liczba przedziałów klasowych została dobrana automatycznie przez pakiet STATISTICA 7.1 dla zadanych szeregów wyliczających. W pakiecie tym wykorzystywane są algorytmy obliczeniowe dobierające liczbę klas tak, aby w sposób optymalny dopasować parametry krzywej rozkładu normalnego Gaussa-Laplace'a do otrzymanych histogramów [46, 52, 55, 56].

4.1.1. Miary położenia elementów próby

Wartości miar położenia (średnia arytmetyczna, mediana, moda, liczebność mody) dla wybranych parametrów klimatu i mikroklimatu Katedry Opolskiej wyznaczone dla dwóch okresów roku (zima, lato) przedstawiono w tab. 4.1. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że rejestrowane wartości temperatury: powietrza, wilgotnej oraz promieniowania i wyznaczone na ich podstawie średnie: arytmetyczna, geometryczna i harmoniczna, charakteryzowały się większą rozbieżnością uzyskanych wyników dla okresu zimowego niż dla okresu letniego. Jest to wynik występowania szerokiego zakresu zmian temperatury zewnętrznej, charakterystyczny dla okresu zimowego, wpływający w sposób bezpośredni na wartości temperatur występujące w obiekcie oraz wynik pracy systemu grzewczego, zaopatrującego obiekt w ciepło w krótkich cyklach czasowych w ciągu doby.

Okres letni charakteryzował się większą stabilnością temperatur rejestrowanych wewnątrz Katedry Opolskiej. Widoczne jest to na podstawie liczebności *mod*, które dla temperatury: powietrza, promieniowania oraz wilgotności względnej wyznaczonej w okresie letnim, były większe od dwóch do czterech razy niż dla tych samych parametrów mikroklimatu zarejestrowanych w okresie zimowym. Porównywalna ilość *mod* wystąpiła jedynie dla temperatury wilgot-

nej. W ten sam sposób można również interpretować niewielkie różnice pomiędzy wartościami średnich: arytmetycznej, geometrycznej i harmonicznej dla okresu letniego i bardzo bliskim tym wartościom wartości mediany, przy stosunkowo dużych różnicach tych wartości dla okresu zimowego. Dla wilgotności względnej różnice pomiędzy wartościami średnich zmieniały się w podobnym zakresie.

Tabela 4.1

Zestawienie wartości miar położenia wybranych parametrów klimatu oraz mikroklimatu Katedry Opolskiej

Zmienna	Okres pomiarowy	Średnia arytmetyczna	Średnia geometryczna	Średnia harmoniczna	Mediana	Moda	Liczebność mody
t_a [°C]	zima	7,4	7,3	7,1	7,6	7,6	33
	lato	20,6	20,6	20,6	20,5	22,0	75
t_g [°C]	zima	7,3	7,2	7,0	7,5	7,5	83
	lato	20,5	20,5	20,5	20,5	20,0	86
t_r [°C]	zima	7,2	7,0	6,9	7,3	8,1	29
	lato	20,5	20,4	20,4	20,2	20,2	123
RH [%]	zima	60,0	59,6	59,2	60,3	54,1	26
	lato	60,5	61,4	61,2	61,5	63,9	49
T_{zewn} [°C]	zima	-1,3	-	-	-1,0	-5,0	85
	lato	19,0	17,9	16,8	17,1	17,1	40
RH _{zewn} [%]	zima	83	80	81	84	84	238
	lato	66	63	60	69	69	107

Źródło: opracowanie własne.

4.1.2. Miary zmienności elementów próby

Najprostszą miarą zmienności jest rozstęp $R = x_{max} - x_{min}$, będący różnicą między największą (x_{max}) i najmniejszą (x_{min}) wartością cechy statystycznej w zbiorze. Inaczej, jest to miara charakteryzująca empiryczny obszar zmienności badanej cechy. Omawiana miara nie jest doskonałą. W praktyce najczęściej stosuje się dwie miary: wariancję i odchylenie standardowe.

Wartości wariancji i odchylenia standardowego dla wybranych parametrów klimatu oraz mikroklimatu Katedry Opolskiej przedstawiono w tab. 4.2. W okresie zimowym temperatury zmieniały się w zakresie od $-19,7^{\circ}\text{C}$ do 14°C , co daje przedział zmian temperatury (rozstęp) wynoszący $33,7^{\circ}\text{C}$. Dla okresu letniego przedział ten wynosi $28,2^{\circ}\text{C}$. Analizując miary zmienności elementów próby, tj. rozstęp, wariancję i odchylenie standardowe można stwierdzić, że

podobnie jak w przypadku miar położenia elementów próby, wartości wariancji i odchylenia standardowego temperatury: powietrza, wilgotnej i promieniowania oraz wartość wilgotności względnej zarejestrowane w okresie letnim, są co najmniej o 50% mniejsze niż te same wartości wariancji i odchylenia standardowego wyznaczone dla wybranych parametrów mikroklimatu wyznaczone w oparciu o dane zarejestrowane w okresie zimowym.

Tabela 4.2

Zestawienie miar zmienności parametrów mikroklimatu Katedry Opolskiej oraz klimatu

Zmienna	Okres pomiarowy	Średnia arytmetyczna	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Wariancja	Odchyl. standard.
t_a [°C]	zima	7,4	3,0	11,8	2,3	1,5
	lato	20,6	17,9	23,2	1,1	1,0
t_g [°C]	zima	7,3	3,0	11,4	2,1	1,4
	lato	20,5	18,5	22,8	1,0	1,0
t_r [°C]	zima	7,2	3,7	11,1	1,9	1,4
	lato	20,5	18,9	22,7	0,9	0,9
RH [%]	zima	60,0	41,3	75,5	43,7	6,1
	lato	60,5	49,2	73,3	15,9	4,0
T_{zewn} [°C]	zima	-1,3	-19,7	14,0	29,8	5,5
	lato	19,0	7,2	35,4	43,4	6,6
RH _{zewn} [%]	zima	83	32	100	149	12
	lato	66	24	90	277	17

Źródło: opracowanie własne.

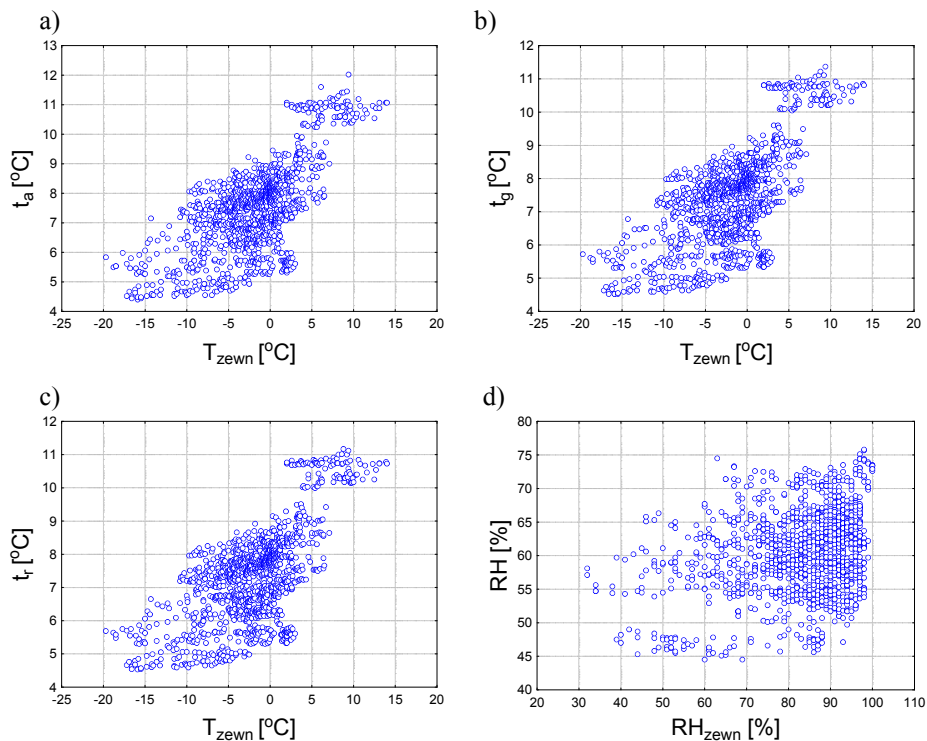
4.2. Zastosowanie analizy korelacyjnej i funkcji regresji do określenia współzależności rejestrowanych parametrów klimatu oraz mikroklimatu

W celu ustalenia zależności korelacyjnych i regresyjnych pomiędzy poszczególnymi parametrami mikroklimatu Katedry Opolskiej a temperaturą zewnętrzną oraz aby dokonać oceny komfortu cieplnego, należało w pierwszej kolejności zbadać, czy dane uzyskane z pomiarów parametrów charakteryzujących mikroklimat Katedry Opolskiej, mieszczą się w ramach rozkładu normalnego lub do niego zbliżonego. Na podstawie otrzymanych wyników wartości rozkładu χ^2 przedstawionych w załączniku B, obliczonych dla poszczególnych parametrów mikroklimatu i klimatu, wyznaczonych dla okresu zimowego i letniego określono, że są one mniejsze od wartości krytycznych χ^2_α dla

$\alpha=0,05$. Pozwoliło to na wyznaczenie zależności korelacyjnych i regresyjnych występujących pomiędzy poszczególnymi parametrami. W celu wstępnego stwierdzenia, czy między badanymi cechami istnieje korelacja i jaki jest jej znak, zastosowano metodę graficzną, polegającą na wykreśleniu diagramów punktowych (korelacyjnych) z wykorzystaniem pakietu STATISTICA 7.1. W prostokątnym układzie współrzędnych na osi odciętych zaznaczono pierwszą zmienną, jaką jest temperatura zewnętrzna w przypadku analizy korelacyjnej temperatur oraz w drugim przypadku wilgotność względna powietrza występującego na zewnątrz. Natomiast na osi rzędnych zaznaczono odpowiednie wartości temperatur charakteryzujących mikroklimat Katedry Opolskiej dla analizy korelacyjnej temperatur oraz wilgotność względną wewnętrzną dla drugiego przypadku analizy korelacyjnej. Punkty, odpowiadające poszczególnym wartościom cech, tworzą wykres korelacyjny rozrzutu. Dla okresu zimowego i letniego korelacyjne wykresy rozrzutu wyznaczone dla temperatur i wilgotności względnej przedstawiono na rys. 4.5 i rys. 4.6. Na tej podstawie można stwierdzić, że dla okresu zimowego istnieje silna korelacja, temperatury: powietrza, wilgotnej i pocernionej kuli, względem parametrów rejestrowanych poza katedrą. Podobny związek korelacyjny widoczny jest dla wilgotności względnej.

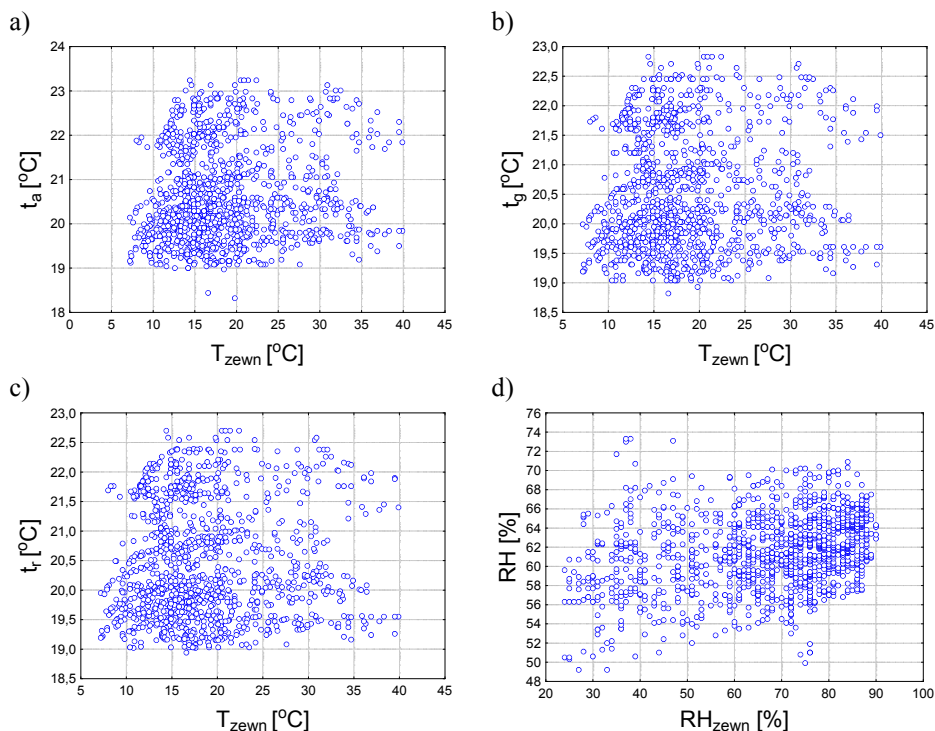
Na wykreślonych diagramach, widoczne są jednokierunkowe zmiany rozpatrywanych zmiennych, czyli wzrostowi temperatury zewnętrznej powietrza, towarzyszy wzrost temperatury powietrza wewnątrz obiektu oraz temperatury wilgotnej i pocernionej kuli. Podobne zmiany widoczne są dla wilgotności względnej powietrza.

Wzrostowi wilgotności względnej powietrza rejestrowanego poza katedrą, towarzyszy wzrost tego parametru w jej wnętrzu. Kierunek zmian rozpatrywanych zmiennych zarejestrowanych w okresie zimowym, świadczy o tym, że korelacja we wszystkich przypadkach ma znak dodatni. Dla wartości parametrów mikroklimatu wyznaczonych w okresie letnim nie można w sposób jednoznaczny określić znaku korelacji z parametrami klimatu. Otrzymano wykresy w kształcie smugi punktów, co może świadczyć o braku korelacji między tymi zmiennymi. Nieco silniejszy związek korelacyjny widoczny jest dla wilgotności względnej.



Rys. 4.5. Korelacyjne wykresy rozrzutu wyznaczone dla wartości wybranych elementów mikroklimatu Katedry Opolskiej zarejestrowanych w okresie zimowym. a) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura powietrza wewnętrznego, b) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura wilgotna naturalna, c) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura poczernionej kuli, d) – wilgotność względna zewnętrzna i wilgotność względna wewnętrzna

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.6. Korelacyjne wykresy rozrzutu wyznaczone dla wartości mikroklimatu Katedry Opolskiej zarejestrowanych w okresie letnim, a) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura powietrza wewnętrznego, b) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura wilgotna naturalna, c) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura poczemionej kuli, d) – wilgotność względna zewnętrzna i wilgotność względna wewnętrzna
Źródło: opracowanie własne.

4.2.1. Wyznaczenie wskaźnika korelacji liniowej Pearsona

Ponieważ na podstawie otrzymanych wykresów stwierdzono liniową zależność między zmianami parametrów klimatu a parametrami mikroklimatu Katedry Opolskiej, dlatego w dalszej ocenie zależności korelacyjnych posłużono się współczynnikiem korelacji liniowej Pearsona. Wykorzystując pakiet STATISTICA 7.1. wyznaczono współczynniki korelacji dla wartości temperatur oraz wilgotności względnej. Otrzymane wyniki przedstawiono w tab. 4.3 i 4.4.

Tabela 4.3

Wartości współczynników korelacji temperatur wyznaczone dla okresu zimowego i letniego

Temperatura wewn.		t_a	t_g	t_r
		[°C]	[°C]	[°C]
Temperatura zewn.				
Okres zimowy				
T_{zewn}	[°C]	0,67	0,66	0,66
Okres letni				
T_{zewn}	[°C]	0,1	0,05	0,03

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.4

Wartości współczynników korelacji wilgotności względnej wyznaczone dla okresu zimowego i letniego

Wilgotność wzg. wewn.		RH
		[%]
Wilgotność wzg. zewn.		
Okres zimowy		
RH_{zewn}	[%]	0,29
Okres letni		
RH_{zewn}	[%]	0,28

Źródło: opracowanie własne.

4.2.2. Ocena istotności współczynnika korelacji liniowej Pearsona

W celu sprawdzenia czy badane cechy mikroklimatu są skorelowane z odpowiednimi parametrami klimatu, wykorzystano test istotności współczynnika korelacji liniowej Pearsona, w którym założono, że badane cechy (X, Y) w populacji generalnej mają dwumiarowy rozkład normalny lub zbliżony do normalnego o nieznanym współczynniku korelacji ρ . Z losowo wybranej próby z populacji obliczono wartość współczynnika r_{xy} . Następnie na podstawie wyników utworzonej próby zweryfikowano hipotezę, że zmienne X i Y nie są skorelowane, tzn.:

$$H_0: \rho = 0,$$

wobec hipotezy alternatywnej

$$H_1: \rho \neq 0 \text{ (lub } H_1: \rho < 0 \text{ lub } H_1: \rho > 0).$$

Do sprawdzenia przyjętej hipotezy zerowej wykorzystano test istotności z dla $n > 100$ posługując się w obliczeniach następującą statystyką:

$$z = \frac{r_{xy}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}} \sqrt{n-2}, \quad (4.1)$$

gdzie: z – statystyka, n – liczebność próby, r_{xy} – estymator współczynnika korelacji ρ [57].

Dla każdego z przeprowadzonych testów statystycznych przyjęto poziom istotności równy 0,05, natomiast liczba stopni swobody wynosiła $n-2$. Dla założonych poziomów istotności i liczby stopni swobody odczytano z tablic rozkładów t -Studenta wartości krytyczne testów istotności i porównano je z wartościami pochodzącymi z obliczeń. Wyniki przeprowadzonych testów statystycznych przedstawiono w tab. 4.5.

Tabela 4.5

Wartości testu istotności wyznaczone dla parametrów mikroklimatu zarejestrowanych w okresie letnim i zimowym

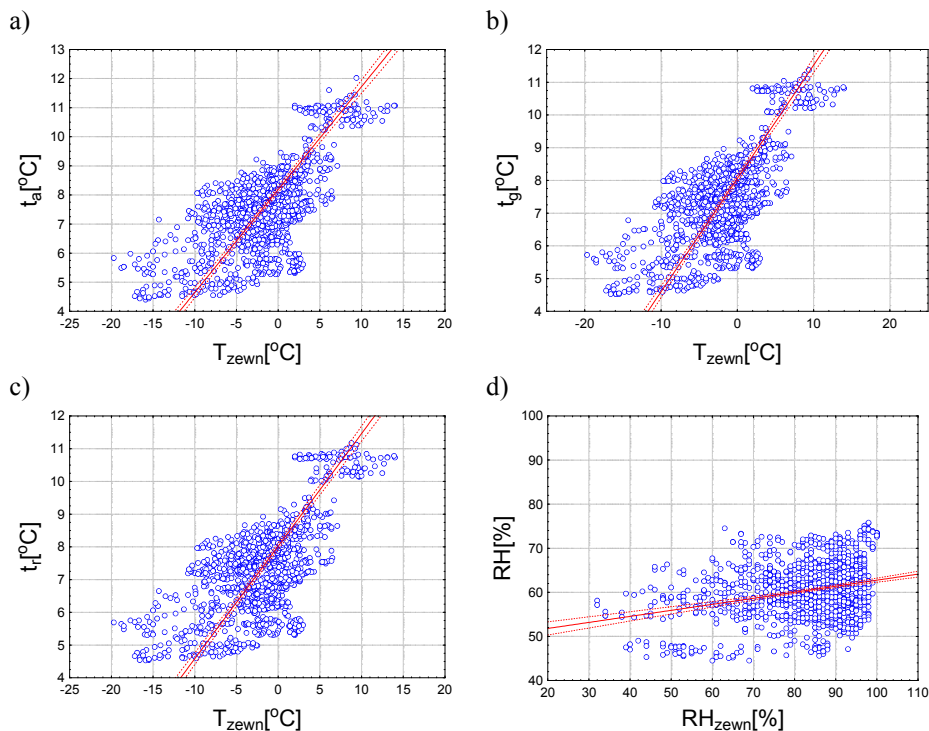
Parametr mikroklimatu		Ocena istotności wsp. korelacji		
		z	z_{α}	Korelacja
okres zimowy				
t_a	[°C]	35,117	1,960	Występuje
t_g	[°C]	34,183		Występuje
t_r	[°C]	34,183		Występuje
RH	[%]	11,790		Występuje
okres letni				
t_a	[°C]	3,910	1,960	Występuje
t_g	[°C]	1,948		Brak
t_r	[°C]	0,389		Brak
RH	[%]	11,349		Występuje

Źródło: opracowanie własne.

4.2.3. Zastosowanie liniowej funkcji regresji do określenia zależności między badanymi zmiennymi

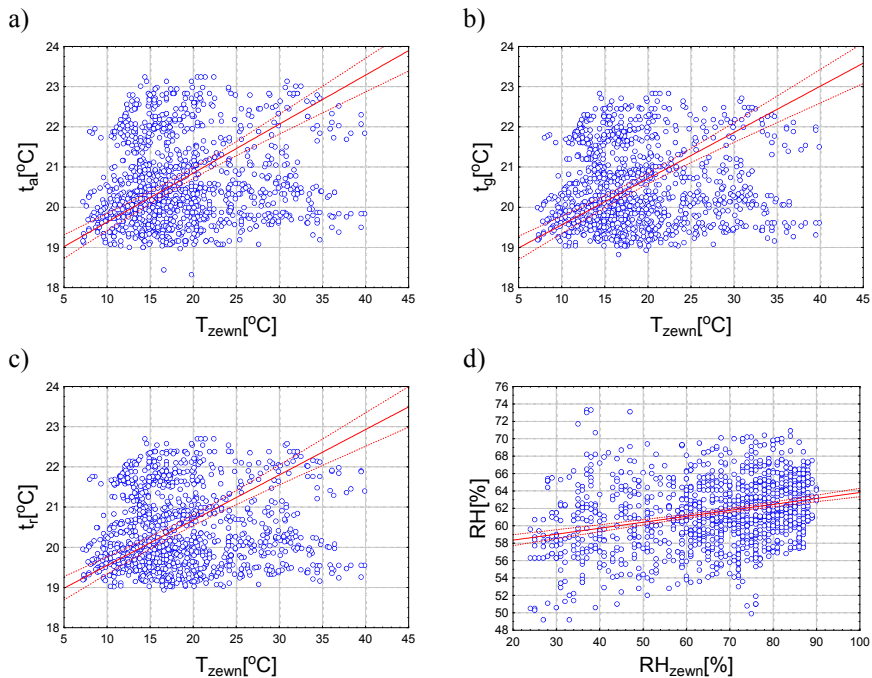
Przy badaniu zależności między różnymi cechami mierzalnymi w populacji generalnej wykorzystano funkcję regresji. Wyznaczone wartości współczynników regresji liniowej dla parametrów klimatu i mikroklimatu Katedry Opolskiej

przedstawiono w tab. 4.6. Na rys. 4.7 i 4.8 przedstawiono wykresy rozrzutu dla zmierzonych parametrów klimatu i mikroklimatu z zaznaczonymi przedziałami ufności wynoszącymi 95%.



Rys. 4.7. Korelacyjne wykresy rozrzutu z zaznaczonym 95% przedziałem ufności, wyznaczone dla wartości wybranych elementów mikroklimatu Katedry Opolskiej zarejestrowanych w okresie zimowym. a) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura powietrza wewnętrznego, b) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura wilgotna naturalna, c) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura pocernionej kuli, d) – wilgotność względna zewnętrzna i wilgotność względna wewnętrzna

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.8. Korelacyjne wykresy rozrzutu z zaznaczonym 95% przedziałem ufności, wyznaczone dla wartości wybranych elementów mikroklimatu Katedry Opolskiej zarejestrowanych w okresie letnim. a) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura powietrza wewnętrznego, b) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura wilgotna naturalna, c) – temperatura powietrza zewnętrznego i temperatura poczernionej kuli, d) – wilgotność względna zewnętrzna i wilgotność względna wewnętrzna

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 4.6

Wartości współczynników regresji liniowej wyznaczone dla wartości parametrów mikroklimatu zarejestrowanych w okresie letnim i zimowym

Parametr mikroklimatu		Wartości wsp. regresji liniowej		
		a	b	Korelacja
okres zimowy				
t_a	[°C]	0,193	7,852	Występuje
t_g	[°C]	0,183	7,721	Występuje
t_r	[°C]	0,179	7,682	Występuje
RH	[%]	0,135	49,23	Występuje
okres letni				
t_a	[°C]	0,015	20,34	Występuje
t_g	[°C]	0,007	20,37	Brak
t_r	[°C]	0,005	20,38	Brak
RH	[%]	0,064	57,18	Występuje

Źródło: opracowanie własne.

4.3. Analiza uzyskanych wyników

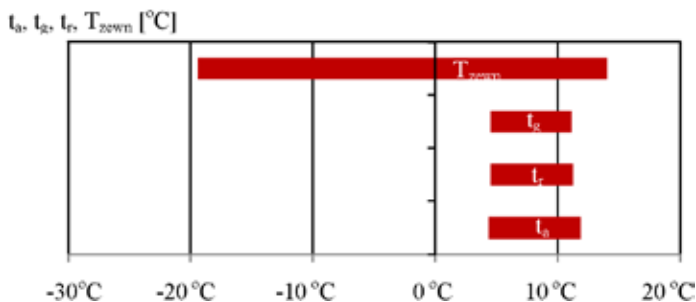
Dobrym sposobem do przedstawienia wyników pomiarów oraz częstości ich występowania są histogramy. Wartości stanowiące miary położenia elementów próby, takie jak: średnia, minimalna, maksymalna mówią tylko o zakresie, w którym znajduje się konkretny parametr. Występowanie minimalnych bądź maksymalnych wartości w bardzo krótkim czasie nie jest zagrożeniem i dla pewnych analiz czy obliczeń często takie wartości można pominąć. Natomiast jeżeli ich częstość występowania jest duża, to na pewno stanowią ważną informację.

Na podstawie histogramów przedstawionych na rys. 4.1 można stwierdzić, że dla okresu zimowego najczęściej występującymi wartościami temperatur: powietrza, wilgotnej naturalnej oraz poczernionej kuli jest temperatura mieszcząca się w przedziale ($7^{\circ}\text{C} \div 8^{\circ}\text{C}$), co stanowi 26,9% czasu obserwacji. Najniższe temperatury mieszczące się w przedziale ($2^{\circ}\text{C} \div 4^{\circ}\text{C}$) występują zaledwie przez 1,34% czasu obserwacji. Znajomość tych wartości jest niezbędna do wyznaczenia zapotrzebowania na moc cieplną. Z ekonomicznego punktu widzenia moc urządzeń grzewczych należy dobierać w taki sposób, aby przez jak najdłuższy okres swojej pracy obciążone były znamionowo. Przyjmując do obliczeń temperaturę, która występuje w sezonie grzewczym w krótkim przedziale czasowym, warunek ten spełniony nie będzie. Dlatego też w sytuacji, kiedy minimalna temperatura występuje wyłącznie przez okres czasu nie przekraczający 2% całkowitego okresu sezonu grzewczego, rezygnuje się z pokrycia strat energii cieplnej w 100% na rzecz poprawy wskaźników ekonomicznych. Dla wilgotności względnej najczęściej rejestrowane były wartości mieszczące się w przedziale ($60\% \div 65\%$). Na rys. 4.2 przedstawiono natomiast histogramy prezentujące wartości charakteryzujące klimat. Najczęściej w okresie pomiarowym, bo przez 42% czasu obserwacji, temperatura mieściła się w przedziale ($-5^{\circ}\text{C} \div 0^{\circ}\text{C}$). Najniższe temperatury mieszczące się w przedziale ($-20^{\circ}\text{C} \div -15^{\circ}\text{C}$) występowały jedynie przez 1,9% czasu obserwacji.

W tab. 3.3 przedstawiono wartości minimalne i maksymalne temperatury oraz wilgotności względnej zarejestrowane w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006 dla klimatu zewnętrznego oraz wartości temperatury: powietrza, wilgotnej, poczernionej kuli i wilgotności względnej zarejestrowanej w tym samym okresie dla mikroklimatu Katedry Opolskiej. Ponadto w tab. 3.3 przedstawiono wartości minimalne i maksymalne wskaźników *WCI* i *IREQ* wyznaczone na podstawie zarejestrowanych parametrów mikroklimatu obiektu. W okresie, w którym była prowadzona rejestracja wybranych parametrów, najniższa zanotowana temperatura zewnętrzna powietrza, wyniosła $T_{\text{zewn}} = -19,7^{\circ}\text{C}$, a najwyższa 14°C . W tym samym okresie wilgotność względna zmieniała się w szerokim zakresie od 32% do 100%. Natomiast w katedrze mieściła się odpowiednio w przedziale od 41,4% do 76,4%. Zarejestrowane temperatury charakteryzujące mikroklimat badanego obiektu, zmierzone w okresie od 20-01-

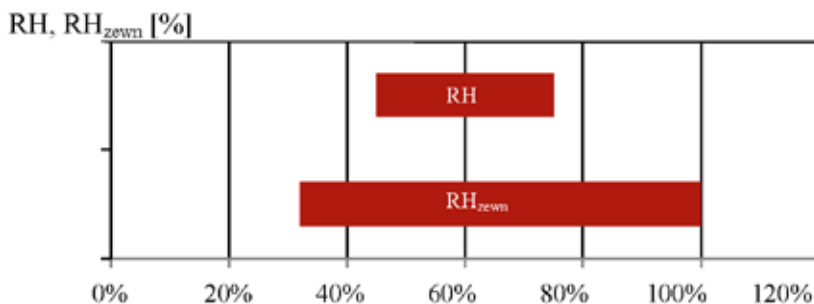
2006 do 30-03-2006, nie były niższe niż 3°C i wynosiły odpowiednio dla wartości minimalnych $t_a=3,39^{\circ}\text{C}$, $t_g=3,61^{\circ}\text{C}$ i $t_r=3,68^{\circ}\text{C}$. Wartości maksymalne temperatury wynosiły odpowiednio: $12,02^{\circ}\text{C}$, $11,37^{\circ}\text{C}$ i $11,17^{\circ}\text{C}$. Zakres zmian temperatur powietrza wewnątrz katedry mieścił się w granicach od $3,39^{\circ}\text{C}$ do $12,02^{\circ}\text{C}$. Fakt, że temperatura w katedrze nie spadała poniżej 3°C jest wynikiem działania ogrzewania oraz przede wszystkim dużej bezwładności termicznej, powodującej wygładzanie i niwelowanie wpływu zmian temperatury zewnętrznej na wartości temperatury występujące we wnętrzu obiektu. Dobowe zmiany amplitudy temperatury nie przekraczały 1°C .

Zakres zmienności rejestrowanych temperatur przedstawiono na rys. 4.9, natomiast zakres zmienności wilgotności względnej wewnętrznej i zewnętrznej przedstawiono na rys. 4.10. Na podstawie zarejestrowanych parametrów mikroklimatu, wyznaczono wartości wskaźników *WCI* i *IREQ*. Otrzymana maksymalna wartość wskaźnika siły chłodzącej powietrza *WCI*, wyznaczona dla skrajnych wartości parametrów mikroklimatu nie przekroczyła wartości granicznej $1200 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, dla której dopuszcza się ekspozycję ciągłą człowieka. Maksymalna wartość wskaźnika *WCI* w okresie wykonywania pomiarów wyniosła $516,3 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ i była prawie dwukrotnie mniejsza od wartości granicznej określonej dla ekspozycji ciągłej. Wartości wskaźnika *WCI* wyznaczone dla poszczególnych dni oraz godzin doby przedstawiono na rys. 4.11. W środowisku zimnym, które powoduje wychłodzenie ciała, czyli hipotermię, szczególnie istotne jest stosowanie właściwej odzieży utrzymującej ciepło. W okresie, w którym mierzono i rejestrowano parametry mikroklimatu Katedry Opolskiej, wartość ciepłochronności odzieży dla skrajnie niekorzystnych warunków mikroklimatycznych powinna wynosić $3,23 \text{ clo}$, co stanowi bardzo znaczącą wartość. Jednak, skrajnie niekorzystne warunki mikroklimatyczne występowały wyłącznie w badanym obiekcie w okresie doby, w którym obiekt był nieużytkowany, to znaczy od godziny 20.00 do godziny 8.00 dnia następnego, kiedy to nie działał system grzewczy oraz przez krótki przedział okresu pomiarowego, co ilustrują histogramy przedstawione na rys. 4.1.



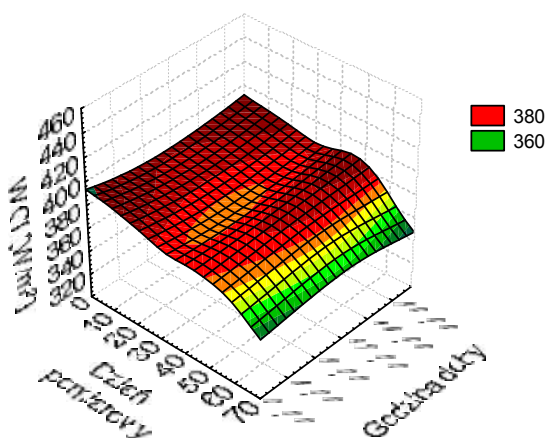
Rys. 4.9. Zakres zmienności temperatur wewnętrznych i temperatury zewnętrznej zarejestrowanych w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4.10. Zakres zmienności wilgotności względnej powietrza występującej w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006 we wnętrzu obiektu oraz na zewnątrz

Źródło: opracowanie własne.

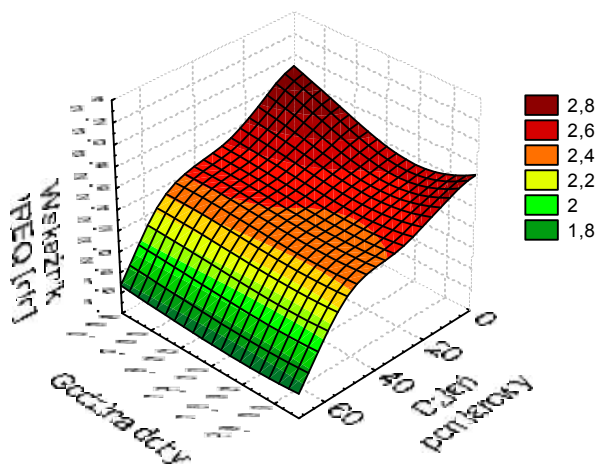


Rys. 4.11. Przebieg zmienności wartości wskaźnika siły chłodzącej WCI wyznaczony na podstawie zarejestrowanych wartości parametrów mikroklimatu katedry w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne.

W godz. pomiędzy 8.00 a 20.00 wartość wymaganego wskaźnika ciepłochronności odzieży w dniach najchłodniejszych, w których temperatura zewnętrzna spadała poniżej -10°C nie przekraczała 2,6 *clo*. Ilustruje to rys. 4.12, na którym przedstawiono wartości współczynnika $IREQ$ w funkcji czasu. Oś 0X reprezentuje kolejny dzień pomiarowy, w którym rejestrowano parametry klimatu i mikroklimatu obiektu, począwszy od dnia 20-01-2006. Oś 0Y reprezentuje kolejne godziny doby, w których dla poszczególnych dni pomiarowych, rejestrowano dane potrzebne do wyznaczenia wartości wskaźników charakteryzujących mikroklimat obiektu. Na osi 0Z przedstawiono wartości wskaźnika $IREQ$ wyznaczone w oparciu o uzyskane dane pomiarowe mikroklimatu Katedry Opolskiej. Wraz z upływem czasu, kiedy temperatura występująca na ze-

wnątrz podnosiła się, wartość wskaźnika *IREQ* uległa obniżeniu. Począwszy od 40 dnia pomiarowego, tj. 1-03-2006 wymagana wartość ciepłochronności odzieży nie przekraczała 2,2 *clo*. Krótki czas ekspozycji (<1h) człowieka na niekorzystne warunki klimatyczne rejestrowane w obiekcie oraz fakt, iż prędkość przepływu powietrza była zawsze powyżej 0,1 m/s, ludzie nie są narażeni na stres termiczny wywołany zbyt niską temperaturą oraz warunkami mikroklimatycznymi występującymi w okresie zimowym. Wyniki pomiarów i wyznaczone na tej podstawie wartości wskaźników charakteryzujących mikroklimat zimny, można traktować jako ekstremalnie niekorzystne. Zima z przełomu roku 2005/2006 należała do najchłodniejszych od 20 lat.

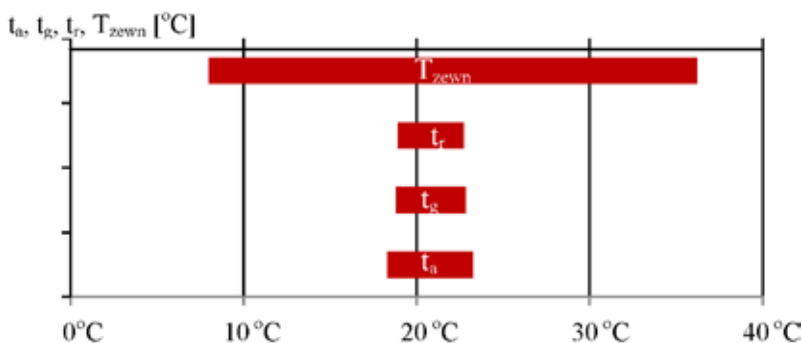


Rys. 4.12. Przebieg zmienności współczynnika *IREQ* przedstawionego w funkcji czasu wyznaczonego na podstawie danych zarejestrowanych w Katedrze Opolskiej w okresie od 20-01-2006 do 30-03-2006

Źródło: opracowanie własne.

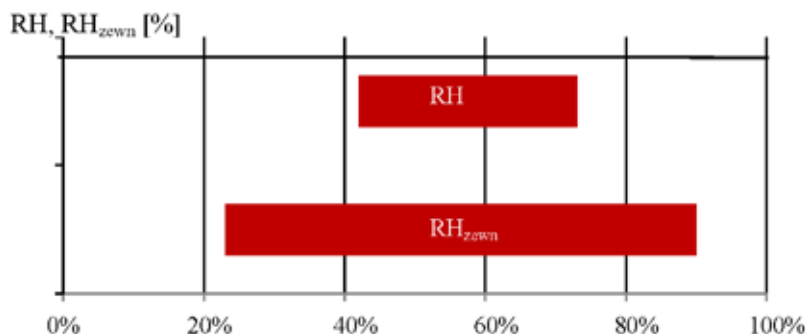
Histogramy przedstawione na rys. 4.3 pozwalają na stwierdzenie, że dla okresu letniego najczęściej występującymi wartościami temperatur: powietrza, wilgotnej naturalnej oraz poczernionej kuli jest temperatura mieszcząca się w przedziale ($20^{\circ}\text{C} \div 21^{\circ}\text{C}$), co stanowi 31,9% czasu obserwacji. Najniższe temperatury mieszczące się w przedziale ($17^{\circ}\text{C} \div 18^{\circ}\text{C}$) występują przez 1,7% czasu obserwacji. Dla wilgotności względnej najczęściej, bo przez 47% czasu obserwacji, rejestrowane były wartości mieszczące się w przedziale ($60\% \div 65\%$). Na rys. 4.4 przedstawiono natomiast histogramy prezentujące wartości charakteryzujące klimat. Najczęściej w okresie pomiarowym, bo przez 25,1% czasu obserwacji, temperatura mieściła się w przedziale ($20^{\circ}\text{C} \div 25^{\circ}\text{C}$), natomiast wilgotność względna mieściła się w przedziale ($60\% \div 70\%$) przez 23,8% czasu obserwacji.

W tab. 3.4 przedstawiono wartości minimalne i maksymalne temperatury oraz wilgotności względnej zarejestrowane w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006 dla klimatu zewnętrznego jak również wartości temperatury: powietrza, wilgotnej oraz poczerwionej kuli i wilgotności względnej zarejestrowanej w tym samym okresie dla mikroklimatu Katedry Opolskiej. W tab. 3.3 przedstawiono wartości minimalne i maksymalne wskaźników *PMV* i *PPD* wyznaczone na podstawie zarejestrowanych parametrów mikroklimatu. W okresie, w którym była prowadzona rejestracja wybranych parametrów klimatu i mikroklimatu, najniższa zanotowana temperatura zewnętrzna powietrza, wyniosła $T_{zewn} = 8,0^{\circ}\text{C}$, a najwyższa $36,2^{\circ}\text{C}$. Wilgotność względna powietrza wynosiła odpowiednio 23% i 90%. W tym samym okresie wilgotność względna zawierała się w szerokim przedziale od 23% do 90%. Zarejestrowane temperatury charakteryzujące mikroklimat Katedry Opolskiej, zmierzone w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006, mieściły się w przedziale od $18,32^{\circ}\text{C}$ do $23,24^{\circ}\text{C}$.



Rys. 4.13. Zakres zmienności temperatur wewnętrznych i temperatury zewnętrznej zarejestrowanych w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne.

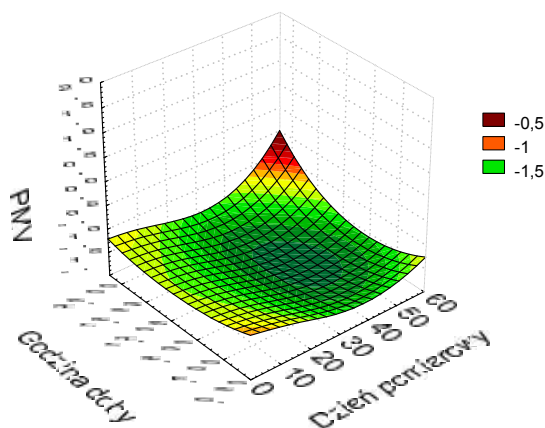


Rys. 4.14. Zakres zmienności wilgotności względnej powietrza występującej w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006 we wnętrzu obiektu oraz na zewnątrz

Źródło: opracowanie własne.

Fakt, że temperatura w badanym obiekcie w okresie pomiarowym zmieniała się w wąskim zakresie, wynoszącym $4,92^{\circ}\text{C}$, jest wynikiem buforowania ciepła. Dobowe zmiany amplitudy nie przekraczały 1°C . Zakres zmienności temperatury zarejestrowanej na zewnątrz katedry jak również w jej wnętrzu przedstawiono w postaci graficznej na rys. 4.13. Rys. 4.14 ilustruje zakresy zmienności występujące w okresie pomiarowym wartości wilgotności względnej klimatu i mikroklimatu katedry.

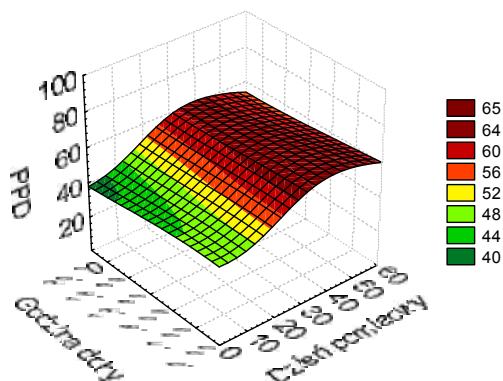
Na podstawie zarejestrowanych wartości mikroklimatu Katedry Opolskiej wyznaczono wartości współczynników charakteryzujących mikroklimat umiarkowany, tj. współczynnik *PMV* – przewidywanej oceny średniej oraz współczynnik, *PPD* – odsetka osób niezadowolonych. Wartość współczynnika *PMV* mieściła się w zakresie od $-2,06$ do $-0,76$, czyli w zakresie odczuwanym przez człowieka jako środowisko obojętne do chłodnego. W przeważającej części okresu, w którym wykonano pomiary mikroklimatu, w obiekcie występowało środowisko odbierane przez człowieka jako dość chłodne. Wówczas wartość współczynnika *PMV* spada poniżej wartości -1 , co przedstawiono na 4.15. W okresie między 30 a 50 dniem pomiarowym i w okresie doby między godz. 8.00 a 16.00 wartość współczynnika *PMV* spadała poniżej wartości $-1,5$. Wynikało to z faktu występowania w tym czasie niższych temperatur i mniejszego nasłonecznienia, niż w pozostałym okresie pomiarowym. Średnia temperatura doby w tym czasie nie przekraczała wartości $17,0^{\circ}\text{C}$. Dla najcieplejszych dni tego okresu pomiarowego średnia temperatura doby przekraczała 27°C .



Rys. 4.15. Przebieg zmienności współczynnika *PMV* przedstawionego w funkcji czasu wyznaczony na podstawie danych zarejestrowanych w Katedrze Opolskiej w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne.

Znajomość wartości PMV pozwala na wyznaczenie bardziej reprezentatywnego parametru, jakim jest współczynnik PPD , określający udział ludzi (wyrażony w procentach) uważających środowisko ciepłe, w którym się znajdują za zdecydowanie negatywne. Wartości PPD wyznaczone w oparciu o parametr PMV mieszczą się w szerokim przedziale od 16% do 79% osób niezadowolonych, przy czym skrajne wartości brzegowe występowały sporadycznie. Przeważający procent osób niezadowolonych mieścił się w zakresie od 40% do 65%, co ilustruje rys. 4.16. Wartości maksymalne procentu osób niezadowolonych mieszczą się w badanym okresie pomiędzy 30 a 50 dniem pomiarowym, co jest wynikiem występowania w tym okresie niższych temperatur charakteryzujących miejscowy klimat. Na wartość PPD istotny wpływ poza wartościami mikroklimatu ma również oporność cieplna odzieży noszonej przez ludzi. Obliczenia dla okresu letniego zostały wykonane przy założeniu oporności cieplnej odzieży wynoszącej $0,6 clo$. Podniesienie wartości oporności cieplnej odzieży w okresie chłodniejszym spowoduje zmniejszenie ilości osób niezadowolonych.



Rys. 4.16. Przebieg zmienności współczynnika PPD przedstawionego w funkcji czasu wyznaczony na podstawie danych zarejestrowanych w Katedrze Opolskiej w okresie od 10-08-2006 do 30-09-2006

Źródło: opracowanie własne.

Wykorzystując statystyki opisowe oraz analizę korelacji i regresji w rozdz. 4.2 dokonano oceny wyników pomiarów parametrów klimatu i mikroklimatu Katedry Opolskiej, które zostały wykorzystane do wyznaczenia wartości wskaźników charakteryzujących umiarkowane i zimne środowisko termiczne. W pierwszej kolejności wyznaczono histogramy zarejestrowanych parametrów mikroklimatu Katedry Opolskiej oraz klimatu. Na podstawie otrzymanych histogramów stwierdzono, że zarejestrowane wartości parametrów klimatu i mikroklimatu posiadają rozkład normalny lub zbliżony do normalnego. Następnie wyznaczono miary położenia oraz zmienności elementów próby. Okres

letni charakteryzował się większą stabilnością zarejestrowanych parametrów mikroklimatu badanego obiektu. Liczebności *mod* dla parametrów mikroklimatu takich jak: temperatura, temperatura promieniowania oraz wilgotność względna, zarejestrowanych w okresie letnim była od dwóch do czterech razy większa od liczebności *mod* dla tych samych parametrów zarejestrowanych w okresie zimowym. Podobne wartości *mod* uzyskano dla wartości temperatury mokrej. Odwrotna sytuacja jest zauważalna dla wartości parametrów charakteryzujących klimat. W okresie zimowym wartości *mod* dla temperatury zewnętrznej powietrza i wilgotności względnej są większe o ponad 45% (tab. 4.1). Okres zimowy charakteryzował się również większym przedziałem zmian temperatury wynoszącym 33,7°C. Dla okresu letniego, przedział ten wynosił 28,2°C. Analizując miary zmienności elementów próby wyznaczone dla klimatu i mikroklimatu można stwierdzić, że zarejestrowane wartości mikroklimatu charakteryzowały się mniejszymi o ponad 50% wartościami wariancji i odchylenia standardowego wyznaczonymi dla temperatur i wilgotności w okresie letnim. Dla parametrów klimatu, tj. temperatury zewnętrznej powietrza i wilgotności względnej widoczna jest sytuacja odwrotna.

Zastosowana analiza korelacyjna pozwoliła określić występowanie i siłę związku pomiędzy odpowiednimi wartościami klimatu a wartościami rejestrowanymi wewnątrz obiektu, charakteryzującymi mikroklimat Katedry Opolskiej. Na podstawie otrzymanych korelacyjnych wykresów rozrzutu można stwierdzić, że dla okresu zimowego istnieje silna korelacja między parametrami klimatu i mikroklimatu Katedry Opolskiej (rys. 4.5). Na podstawie otrzymanych wykresów stwierdzono liniową zależność między parametrami klimatu i mikroklimatu, co pozwoliło na wyznaczenie dla poszczególnych zależności współczynników korelacji liniowej Pearsona, które przedstawiono w tab. 4.3.

W obiektach, w których temperatura utrzymywana jest na stałym poziomie, procesy wymiany ciepła między nimi a otoczeniem mają charakter nieliniowy. Związane jest to przede wszystkim z zakłóceniami wywołanymi pracą systemu grzewczego oraz ze zmianą współczynników przejmowania ciepła na powierzchniach zewnętrznych i wewnętrznych przegród, powodowaną zmianami temperatury. W przypadku, kiedy system grzewczy nie jest dobrany właściwie, a jego moc jest niewystarczająca do pokrycia całkowitych strat energii cieplnej, wartość temperatury wewnętrznej zależeć będzie przede wszystkim od wartości temperatury zewnętrznej. Sytuacja taka występowała w przypadku Katedry Opolskiej, w której system grzewczy użytkowany był w sposób losowy w krótkich przedziałach czasowych w ciągu doby, a jego moc była niewystarczająca do pokrycia całkowitych strat energii cieplnej. Wyznaczone wartości współczynników korelacji liniowej Pearsona dla okresu zimowego, potwierdziły istnienie związku między wartościami klimatu i mikroklimatu Katedry Opolskiej.

Słaba lub praktycznie niezauważalna korelacja między temperaturą zewnętrzną a rejestrowanymi temperaturami wewnątrz obiektu występowała

w okresie letnim. Nawet znaczące zmiany temperatury zewnętrznej w ciągu doby nie wpływały w istotny sposób na temperatury występujące we wnętrzu obiektu. Dla wartości wilgotności względnej niezależnie od pory roku występowała słaba korelacja. Wartość współczynnika korelacji liniowej Pearsona wynosiła odpowiednio dla okresu zimowego 0,29, natomiast dla okresu letniego 0,28 (tab. 4.4).

Chcąc określić analityczny sposób przyporządkowania średnich wartości zmiennej zależnej wartościom zmiennych niezależnych, dla wartości parametrów klimatu i mikroklimatu, określono współczynniki pozwalające na uzyskanie równań regresji:

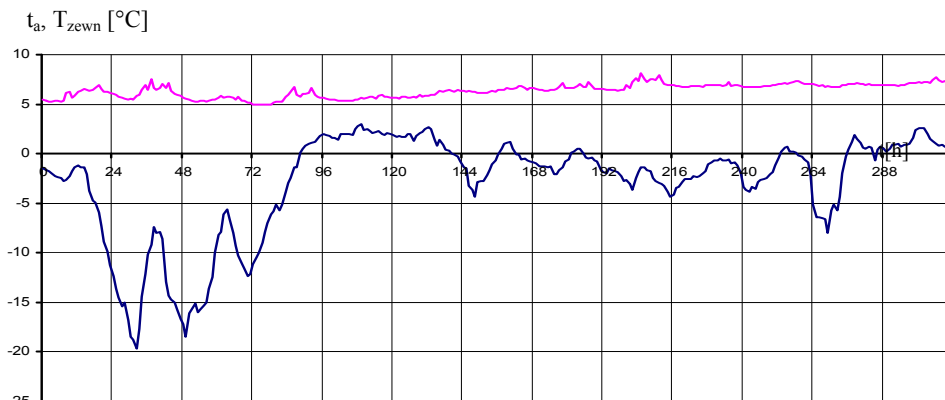
$$\begin{aligned} t_a &= 0,193 T_{zewn} + 7,852, \\ t_g &= 0,183 T_{zewn} + 7,721, \\ t_r &= 0,179 T_{zewn} + 7,682, \\ RH &= 0,135 RH_{zewn} + 49,231. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Równania (4.2) wyznaczono z użyciem pakietu STATISTICA 7.1.

Dla okresu letniego określono równania regresji dla dwóch wielkości charakteryzujących klimat i mikroklimat, tj. dla temperatury powietrza i wilgotności względnej. Wynika to z faktu występowania zależności korelacyjnych dla wartości temperatury powietrza wewnątrz obiektu w funkcji temperatury powietrza zewnętrznego oraz odpowiednich wartości wilgotności względnych. Natomiast dla wartości temperatury mokrej oraz temperatury promieniowania nie stwierdzono zależności korelacyjnych z wartościami temperatury powietrza zewnętrznego. Równania regresji wyznaczone z użyciem pakietu STATISTICA 7.1. dla wartości klimatu i mikroklimatu rejestrowane w okresie letnim przedstawiają się następująco:

$$\begin{aligned} t_a &= 0,015 T_{zewn} + 20,342, \\ RH &= 0,064 RH_{zewn} + 57,181. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Otrzymane wyniki potwierdzają słuszność zaklasyfikowania obiektu Katedry Opolskiej do grupy obiektów o stabilnym mikroklimacie, występującym w ciągu całego roku. Zmiany temperatury zewnętrznej charakteryzujące się dużą dynamiką, ale występujące przez stosunkowo krótki okres czasu, nie wpływają w sposób istotny na wartości temperatur rejestrowanych w tym samym czasie w obiekcie. Przypadek taki przedstawiono na rys. 4.17, na którym zaprezentowano przebieg zmienności temperatury powietrza wewnątrz obiektu, oznaczony na wykresie kolorem purpurowym i na zewnątrz obiektu oznaczony kolorem granatowym w funkcji czasu.



Rys. 4.17. Przebieg zmienności wartości temperatury powietrza występującej wewnątrz obiektu t_a [°C] (kolor purpurowy) oraz temperatury zewnętrznej T_{zewn} [°C] (kolor granatowy) w funkcji czasu, zarejestrowane w okresie między godz. 16.00 dnia 3-02-2007 a godz. 02.00 dnia 16-02-2007

Źródło: opracowanie własne.

Początek prezentowanych przebiegów czasowych przypada na dzień 4-02-2006 na godz. 00.00, a koniec na dzień 16-02-2007 na godz. 23.00. Gwałtowny spadek temperatury zewnętrznej, jaki zarejestrowano w okresie pomiędzy godz. 12.00 w dniu 04-02-2007 z poziomu $-1,2^{\circ}\text{C}$ do wartości $-19,7^{\circ}\text{C}$ zarejestrowanej w dniu następnym o godz. 08.00 i utrzymywanie się niskiej temperatury przez kolejne 48 godz. nie spowodowało żadnych istotnych zmian temperatury powietrza w obiekcie. W tym czasie widoczny jest wzrost temperatury wewnętrznej, spowodowany dostarczeniem energii cieplnej z istniejącego źródła ciepła.

Większy o ponad 50% zakres zmian temperatur występujących we wnętrzu obiektu w okresie zimowym w stosunku do okresu letniego, przy porównywalnym zakresie zmian temperatur występujących na zewnątrz obiektu w tym samym okresie, był wynikiem działania systemu grzewczego dostarczającego ciepło w sposób nieciągły i losowy. Wynikało to z faktu obsługi systemu grzewczego przez palacza, który zasiliał palenisko w paliwo wyłącznie wg własnego uznania. Dostarczanie ciepła do obiektu, za pośrednictwem kotła o bardzo niskiej sprawności zasilanego paliwem stałym, który w tym czasie był wykorzystywany do ogrzewania, powoduje chwilowe, dodatnie zmiany temperatury. Ilość dostarczonego ciepła nie była na tyle duża, aby możliwe było podniesienie temperatury w dłuższym okresie czasu. Wyłączenie systemu grzewczego spowodowało szybki spadek temperatury w obiekcie.

5. Dobór systemu grzewczego dla Katedry Opolskiej

5.1. Wyznaczenie zapotrzebowania energii cieplnej przez Katedrę Opolską

Obliczenie zapotrzebowania na energię cieplną oraz dobór systemów grzewczych w obiektach sakralnych natrafia na duże trudności. Głównymi przyczynami są:

- praca systemu grzewczego w części głównej obiektu wymagana jest tylko przez krótki czas,
- poza nawą główną, obiekty sakralne posiadają pomieszczenia pomocnicze, takie jak: kaplice, zakrystie, które wymagają ogrzewania ciągłego,
- cechą charakterystyczną starych kościołów jest duża grubość ścian, tak że ustalony proces ogrzewania, umożliwiający jednoznaczne obliczenie instalacji, nigdy nie występuje. Obliczenia oddają jedynie stan nagrzewania pomieszczeń, a nie stan ustalony.

Zapotrzebowanie ciepła dla obiektów sakralnych stanowiących budowle gotyckie, charakteryzujących się stabilnym klimatem można wyznaczyć na podstawie zależności podanej przez Krischera i Kasta [7]:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_F + \dot{Q}_W + \dot{Q}_L, \quad (5.1)$$

gdzie: \dot{Q}_F – zapotrzebowanie ciepła przez okna i inne elementy budowlane, nie akumulujące ciepła, \dot{Q}_W – zapotrzebowanie ciepła do potrzeb wentylacji, \dot{Q}_L – zapotrzebowanie ciepła do nagrzania elementów akumulujących ciepło, przy czym [7]:

$$Q_W = \sum \frac{A_W}{R_Z} \cdot (t_l - t_o), \quad (5.2)$$

gdzie: A_W – pole powierzchni elementów akumulujących ciepło [m^2], R_Z – opór nagrzania zależny od czasu trwania nagrzewania [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$], t_l – temperatura wewnętrzna po nagrzaniu, t_o – temperatura wewnętrzna przed nagrzaniem.

Przyjmując wysokość obiektu: $H = 18$ m, długość: $L = 50$ m, szerokość: $S = 24$ m, wyznaczono powierzchnię $F = 1200$ m² oraz kubaturę $V = 21\,600$ m³. Temperaturę w katedrze podczas pracy systemu przyjęto na poziomie 10°C. Na tej podstawie wyznaczono zapotrzebowanie na energię cieplną dla obiektu Katedry Opolskiej, wynoszące: $\dot{Q} = 150$ kW.

5.2. Kryteria wyboru systemów grzewczych dla obiektów sakralnych

Poszukując najlepszego rozwiązania między dążeniem do zaspokojenia ludzkiej potrzeby komfortu cieplnego a dbałością o warunki mikroklimatyczne występujące w obiekcie, przy doborze systemu grzewczego należy pamiętać, że zadaniem ogrzewania jest stworzenie warunków komfortu przebywającym w jej wnętrzu ludziom, a nie wyłącznie ogrzanie. Mając powyższe na uwadze, podczas projektowania instalacji grzewczej należy uwzględnić następujące założenia:

- ogrzewanie nie może wprowadzać zmian temperatury i wilgotności względnej charakteryzujących się dużą amplitudą,
- w okresie grzewczym, ogrzewanie powinno stabilizować mikroklimat, utrzymując stałą temperaturę nie niższą niż 6°C,
- eksploatacja systemu grzewczego nie może prowadzić do zawilgocenia ścian,
- nie należy uszczelniać obiektu w celu zwiększenia efektywności ogrzewania, gdyż stałe przewietrzanie usuwa nadmiar pary wodnej oddawanej przez wiernych i chroni ściany przed zagrzybieniem,
- w przypadku zastosowania grzejników centralnego ogrzewania, ich rozmieszczenie powinno przebiegać w taki sposób, aby nie były usytuowane w pobliżu cennych elementów wyposażenia, by ustrzec je przed punktowym przegrzaniem,
- ze względów bezpieczeństwa pożarowego nie należy stosować konwektorowych grzejników elektrycznych,
- stosowane systemy grzewcze powinny charakteryzować się małą bezwładnością i dobrą sterowalnością, dające możliwość natychmiastowego ograniczenia dostarczania ciepła w sytuacjach, kiedy w obiekcie wzrasta temperatura na skutek insolacji słonecznej [58] lub zgromadzenia wiernych.

Autorzy publikacji [59-64] wskazują, że właściwy wybór systemu grzewczego zależy od takich czynników jak:

- cechy architektury (rozwiązania konstrukcyjno-materiałowe, zabytkowy charakter),
- miejscowe warunki dostępności do określonych źródeł ciepła,
- koszty (instalacji, użytkowania i obsługi),

- możliwości finansowe parafii,
- czas użytkowania ogrzewanych pomieszczeń,
- wymagania w odniesieniu do komfortu cieplnego,
- względy estetyczne wnętrza,
- warunki klimatyczne,
- względy konserwatorskie,
- ingerencja w tkankę budowli,
- wpływ na środowisko naturalne,
- lokalna tradycja,
- indywidualne upodobania osób decydujących o wyborze systemu grzewczego,
- wymogi liturgii i sposób użytkowania obiektu.

Ze względu na dobór sposobu ogrzewania obiekty sakralne można sklasyfikować następująco [63]:

- niskie istniejące obiekty sakralne,
- średnie istniejące obiekty sakralne,
- wysokie istniejące obiekty sakralne,
- projektowane niskie obiekty sakralne,
- projektowane średnie obiekty sakralne,
- projektowane wysokie obiekty sakralne,
- projektowane z założenia oszczędnościowe obiekty sakralne,
- projektowane lub modernizowane obiekty sakralne o walorach muzealnych lub historycznych,
- projektowane lub modernizowane obiekty sakralne bez walorów muzealnych lub historycznych.

W literaturze dotyczącej prezentowanej tematyki można znaleźć informacje na temat konieczności ogrzewania kościołów, zwłaszcza o charakterze historycznym lub muzealnym. Autorzy tych publikacji mają na względzie przede wszystkim dobro zgromadzonych dzieł sztuki. W ich ocenie ogrzewanie jest przyczyną zwiększonej ich dewastacji [2, 3].

Mając powyższe na uwadze, można wyodrębnić obiekty o trzech zasadniczych typach mikroklimatycznych [2, 3]:

- kościoły ze stabilnym, bardzo dobrym mikroklimatem,
- kościoły ze zmiennym mikroklimatem,
- kościoły z bardzo złym mikroklimatem.

W obiektach sakralnych można wyróżnić następujące okresy funkcjonowania instalacji grzewczych [63]:

- obiekty ogrzewane w sezonie grzewczym całą dobę,
- obiekty ogrzewane w czasie dnia, z obniżeniem temperatury do dyżurnej w nocy,

- obiekty ogrzewane do temperatury dyżurnej powietrza wewnętrznego,
- obiekty ogrzewane okresowo w ciągu 24 godzin,
- obiekty ogrzewane okresowo wyłącznie ciepłem emitowanym przez ludzi.

Poza wyżej wymienionymi kryteriami wyboru systemów grzewczych dla obiektów sakralnych można wskazać inne, bardziej ogólne:

- ekonomiczne, obejmujące zarówno koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne,
- ekologiczne,
- funkcjonalne.

Na podstawie zaprezentowanych kryteriów przeprowadzono analizę możliwych do zastosowania rozwiązań technicznych systemów grzewczych oraz dokonano wyboru dla obiektu Katedry Opolskiej.

5.2.1. Rachunek ekonomiczny kosztów wykonania i eksploatacji systemu grzewczego

Rachunek ekonomiczny jest jednym z podstawowych etapów w każdym procesie inwestycyjnym, mającym na celu redukcję kosztów. Powinien on zawierać takie czynniki ekonomiczne jak koszty inwestycyjne oraz koszty związane z eksploatacją systemu. Wielkość kosztów eksploatacyjnych związana jest ściśle ze stratami energii cieplnej występującymi w obiekcie. Dla istniejących budynków wielkość tych strat można ograniczyć poprzez poprawienie izolacji termicznej w tych miejscach, w których te straty są największe. W tym celu można wykorzystać badania termograficzne, pozwalające na wskazanie miejsc i bezinwazyjne zdiagnozowanie usterek w konstrukcji czy instalacji budynku [15].

W celu przeprowadzenia rachunku ekonomicznego dowolnej inwestycji można zastosować różne metody. Wszelkie wskaźniki efektywności inwestycji można podzielić na: statyczne, gdy przyjmuje się, że wartość pieniądza jest taka sama niezależnie od momentu pozyskania tej kwoty oraz dynamiczne, uwzględniające zmiany wartości pieniądza w czasie [65].

W rachunku ekonomicznym inwestycyjnym mówi się o tzw. przepływach lub strumieniach pieniężnych. Jest to określenie charakteryzujące wszelkie wydatki oraz zyski związane z analizowaną inwestycją. Przyjmuje się zazwyczaj, że każdy wydatek jest przepływem pieniężnym ze znakiem minus (-), natomiast każdy zysk przepływem pieniężnym ze znakiem plus (+) [65].

Najczęściej spotykanym statycznym kryterium oceny efektywności ekonomicznej jest okres zwrotu nakładów (*PBT*). Definiuje się go jako czas potrzebny na odzyskanie początkowego kosztu projektu. Liczony jest on od momentu uruchomienia inwestycji aż do chwili, gdy suma korzyści brutto uzyskanych w wyniku realizacji inwestycji zrównoważy poniesione nakłady [65].

W przypadku, gdy roczne korzyści brutto oznaczane symbolem Z_i są stałe, wartość PBT można obliczyć z wyrażenia [65]:

$$PBT = \frac{-I}{Z_i} \quad (5.3)$$

gdzie: I oznacza wysokość poniesionych nakładów inwestycyjnych.

Znak minus wynika z przyjętej konwencji, gdzie wydatki określa się w postaci wartości ujemnych. Wskaźnik ten cechuje duża pogłębłość i prostota. Podstawową jego wadą jest to, że nie uwzględnia on całego okresu funkcjonowania przedsięwzięcia, lecz skupia uwagę inwestora na jego fazie początkowej. Służy on zazwyczaj do wstępnej oceny efektywności przedsięwzięcia, dając pogładową ocenę czasu zwrotu poniesionych nakładów.

W przypadku realizacji inwestycji stosuje się dwie metody oceny wartości projektów inwestycyjnych, na podstawie których podejmuje się decyzje o ich realizacji, tj.: metodę wartości zaktualizowanej netto (NPV) oraz metodę wewnętrznej stopy zwrotu (IRR). Szerzej opisano je m.in. w [65].

W rachunku ekonomicznym należy również określić wartość pieniądza w czasie. Wartość bieżąca określa, ile wynosi, wyrażona w wartości dzisiejszego środka płatniczego, wartość przyszłego przepływu pieniężnego. Do obliczenia bieżącej wartości przyszłego przepływu pieniężnego w chwili, gdy przepływ ten nastąpi, przy założonej stopie dyskontowej i dla danej liczby lat, można wykorzystać poniższe równanie [65]:

$$PV = \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (5.4)$$

gdzie: PV – wartość bieżąca, CF_t – przyszły przepływ pieniężny, który wystąpi za t lat od chwili obecnej, r – stopa procentowa lub dyskontowa, t – liczba lat.

W przypadku, gdy występuje strumień (więcej niż jeden) przepływów pieniężnych, jego wartość bieżąca stanowi sumę wartości bieżących pojedynczych zdyskontowanych przepływów pieniężnych.

Przy porównaniu całkowitych kosztów systemów ogrzewania należy również uwzględnić koszty późniejszej jego eksploatacji. W zdecydowany sposób koszty te zależą od ceny, po jakiej nabywany jest nośnik energii. Na całkowite koszty eksploatacji systemu ogrzewania budynku składają się dwa elementy: koszty inwestycji oraz koszty energii i obsługi w założonym okresie jego działania.

Istotnym zagadnieniem przy projektowaniu instalacji grzewczych budynków sakralnych jest wybór źródła ciepła pracującego na potrzeby ogrzewania, jak

również przygotowania ciepłej wody użytkowej. Wybór paliwa wykorzystywanego do celów grzewczych w dużej mierze zależy od dostępności danego nośnika energii, komfortu wykorzystania jak również jego ceny. Aktualne ceny paliw mogą zależeć od takich czynników jak:

- źródło pochodzenia nośnika (Polska, kraje UE, Afryka, Bliski Wschód),
- aktualne i przyszłe możliwości jego stosowania,
- możliwe zakłócenia w dostawach mające swe źródło zarówno w przyczynach naturalnych (huragany, trzęsienia ziemi), jak i wywołanych działalnością człowieka (konflikty zbrojne, ataki terrorystyczne itp.).

Poza tym, cena energii to tylko część kosztów, jakie ponosi użytkownik w związku z zastosowaniem danego nośnika. Innym, równie ważnym składnikiem jest koszt instalacji grzewczej (kocioł, pompa, automatyka, skład paliwa). Kolejnym składnikiem są koszty osobowe związane z obsługą źródła ciepła i instalacji.

Poniżej przeanalizowano koszty energii związane z ogrzewaniem Katedry Opolskiej. Do analizy przyjęto:

- zapotrzebowanie na moc szczytową po stronie instalacji wynoszącą 150 kW,
- czas wykorzystania mocy szczytowej w trzech wielkościach, tj.: 1600, 1300 i 1000 h/a (różny sposób użytkowania obiektu oraz różne średnie temperatury zewnętrzne w poszczególnych latach).

Analizie poddano takie nośniki energii cieplnej jak: węgiel kamienny, ciepło sieciowe, gaz ziemny, olej opałowy, energię elektryczną i LPG.

Wyznaczenie ceny 1 GJ energii cieplnej uzyskanego z wykorzystaniem różnych nośników energii oraz całkowitych kosztów zakupu paliwa w okresie jednego roku, przeprowadzono w oparciu o zależności matematyczne przedstawione poniżej. Energię zużywaną do ogrzewania w okresie rocznym można wyznaczyć na podstawie zależności (5.5):

$$E = \dot{Q} \cdot \tau \quad (5.5)$$

gdzie: E – energia zużyta do ogrzewania, kWh/a, \dot{Q} – moc nominalna cieplna instalacji grzewczej (wyznaczona dla $t_w = +10^\circ\text{C}$ i $t_z = -20^\circ\text{C}$), kW, τ – czas wykorzystania mocy szczytowej w roku, h/a.

Energię zużytą do ogrzewania w okresie rocznym zawartą w paliwie E_{pal} można wyznaczyć na podstawie zależności (5.6):

$$E_{pal} = \frac{E}{\eta} \quad (5.6)$$

gdzie: E_{pal} – energia zużyta do ogrzewania, zawarta w paliwie, kWh/a, η – sprawność całkowita źródła ciepła (jednostki kotłowej).

Natomiast masę paliwa zużytego w ciągu roku M_{pal} można wyznaczyć z zależności:

$$M_{pal} = \frac{E_{pal}}{W_u}, \quad (5.7)$$

gdzie: W_u – wartość opałowa (dolne ciepło spalania), GJ/t; GJ/Nm³; GJ/dm³.

Koszt jednego GJ ciepła oznaczonego symbolem KC wyznaczonego po stronie instalacji, można obliczyć z zależności (5.8).

$$KC = \frac{M_{pal} \cdot C_{pal}}{E}, \quad (5.8)$$

gdzie: C_{pal} – cena paliwa PLN/t; PLN/Nm³; PLN/dm³.

Po podstawieniu do (5.8) zależności (5.6) i (5.7) otrzymuje się:

$$KC = \frac{C_{pal}}{\eta \cdot W_u} \quad (5.9)$$

Na podstawie zależności (5.9) wykonano obliczenia, a wyniki przedstawiono w formie wykresu zmian ceny jednostkowej ciepła (po stronie instalacji), jako funkcji ceny nośnika energii i sprawności źródła ciepła (rys.: 5.1 ÷ 5.6). Przedstawione poniżej wykresy umożliwiają wyznaczenie cen jednostkowych ciepła w szerokim zakresie zmian cen nośników energii. Jeżeli cena danego nośnika wzrośnie ponad wielkości pokazane na osi odciętych, należy wówczas wykres wykonać, rozszerzając zakres analizowanych cen jednostkowych danego nośnika.

5.2.2. Określenie cen poszczególnych nośników energii

Cena węgla jest wielkością zmienną i zależy od wielu czynników, m.in. od: rodzaju, kaloryczności, zawartości siarki i popiołu, sposobu transportu, rejonu kraju i okresu roku, w którym dokonuje się zakupu.

Wartości opałowe oraz przykładowe ceny różnych gatunków węgla oraz koksu podane w oparciu o cennik firmy IMEX-PIECHOTA sp. z o.o. [66] przedstawiono w tab. 5.1. Podane ceny obowiązywały w dniu 31-12-2007. Do dalszej analizy cenę węgla przyjęto w zakresie (450 ÷ 600) PLN/tonę z VAT. Dla podanego zakresu ceny węgla, przyjętej jego kaloryczności oraz przyjętych sprawności można określić zakres zmienności cen energii cieplnej. Na wykre-

sach rys. 5.1 oraz rys. 5.2 pokazano zmienność cen dla sprawności kotłów węglowych od 50% do 75%. Ceny 1 GJ energii cieplnej zamieszczone w tab. 5.2 oraz tab. 5.3 można również odczytać odpowiednio z rys. 5.1 i rys. 5.2.

Tabela 5.1

Wartości opałowowe oraz przykładowe ceny węgla i koksu aktualne na dzień 31-12-2007

Gatunek węgla	Wartość opałowowa [GJ/t]	Cena netto [PLN/t]	Cena brutto [PLN/t]
Eko-groszek	25	498,00	607,56
Miał kl. 19	19	309,00	376,98
Koks gruby	27,5	782,00	954,04

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5.2

Ceny 1 GJ ciepła z węgla o $W_u=23\text{GJ/t}$

Lp.	Cena węgla [PLN/t]	Sprawność kotła		
		$\eta=50\%$	$\eta=65\%$	$\eta=75\%$
1	450	39,13	30,1	26,09
2	500	43,48	33,44	28,99
3	550	47,83	36,79	31,88
4	600	52,17	40,13	34,78

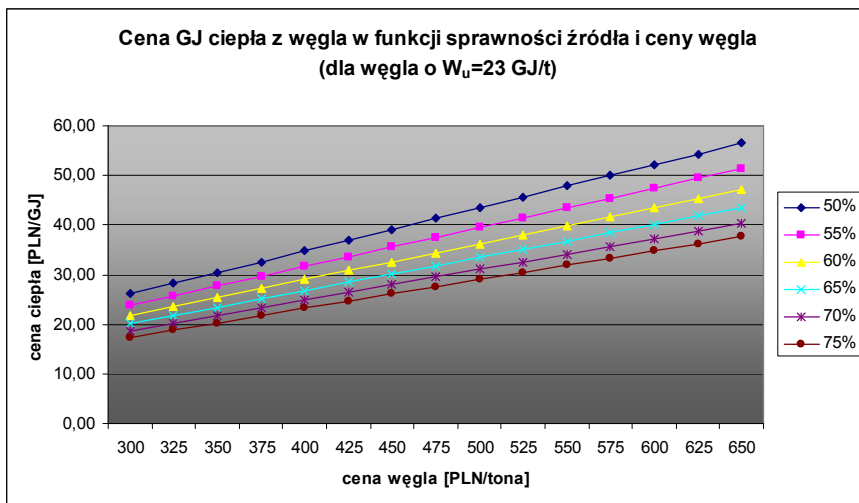
Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5.3

Ceny 1 GJ ciepła z węgla o $W_u=25\text{GJ/t}$

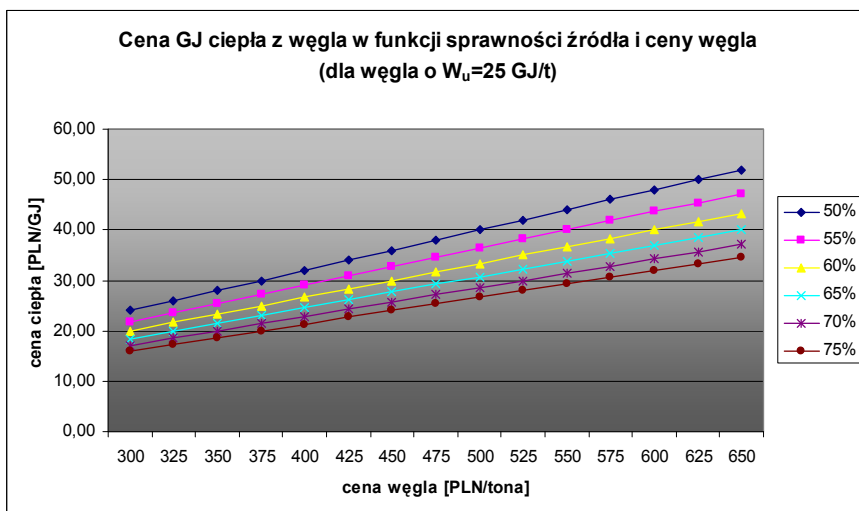
Lp.	Cena węgla [PLN/t]	Sprawność kotła		
		$\eta=50\%$	$\eta=65\%$	$\eta=75\%$
1	450	36,00	27,69	24,00
2	500	40,00	30,77	26,67
3	550	44,00	33,85	29,33
4	600	48,00	36,92	32,00

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.1. Cena 1 GJ ciepła uzyskanego z węgla o wartości opałowej 23 GJ/t, w zależności od sprawności kotła i ceny węgla

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.2. Cena 1 GJ ciepła uzyskanego z węgla o wartości opałowej 25 GJ/t, w zależności od sprawności kotła i ceny węgla

Źródło: opracowanie własne.

Ceny oleju opałowego zależą od wielu czynników, do których można zaliczyć: światowy bilans popytu i podaży, spekulacje giełdowe, pogodę, sytuację polityczną decyzje fiskalne państwa oraz wartość walut. Obecnie ceny oleju

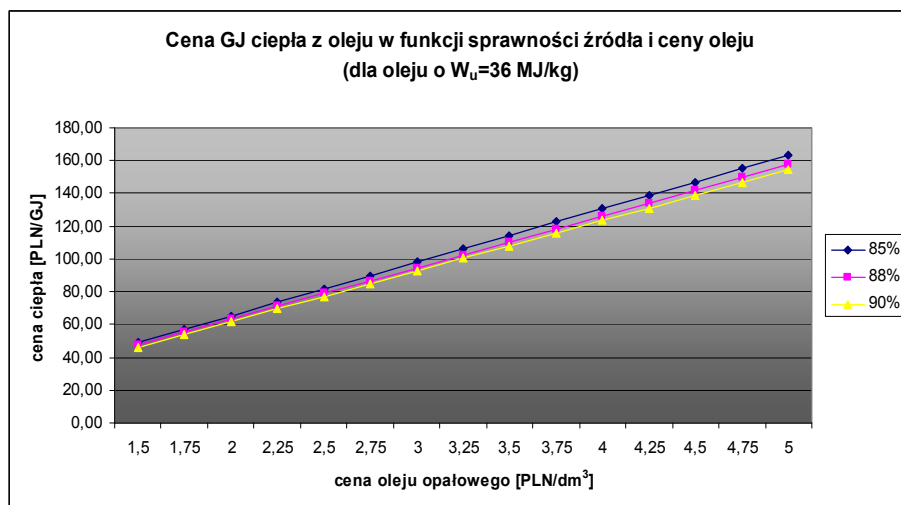
opałowego zależą głównie od wahań cen ropy na rynkach światowych. Natomiast dzięki istnieniu kilku firm dystrybucyjnych i rozgałęzionej sieci dostawców, ceny są dosyć stabilne na terenie kraju, a wahania sezonowe są nieznaczające. W połowie grudnia 2007 ceny brutto w Polsce wahały się od 2,71 do 2,81 PLN/dm³ [67,68], w zależności od regionu. Przyjmując te wartości do analizy można określić koszt 1 GJ energii cieplej. Wyliczoną zmienność tych kosztów w zależności od ceny oleju i sprawności kotłowni pokazano w tab. 5.4. Wartości te można również odczytać z rys. 5.3.

Tabela 5.4

Ceny 1GJ ciepła uzyskanego z oleju opałowego wyznaczone dla różnych sprawności urządzeń grzewczych

Lp.	Cena oleju [PLN/dm ³]	Sprawność kotła		
		$\eta=85\%$	$\eta=88\%$	$\eta=90\%$
1	2,71	88,56	85,54	83,64
2	2,81	91,83	88,7	86,73

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.3. Cena 1 GJ ciepła uzyskanego z oleju opałowego o wartości opałowej 36 MJ/kg, w zależności od sprawności kotła i ceny oleju

Źródło: opracowanie własne.

Do określenia ceny LPG wykorzystano stronę internetową największego dostawcy LPG na rynku krajowym – firmy Gaspol [69]. Ceny na dzień 28-12-2007 w zależności od regionu kraju wahały się w granicach od 2,31 PLN/dm³

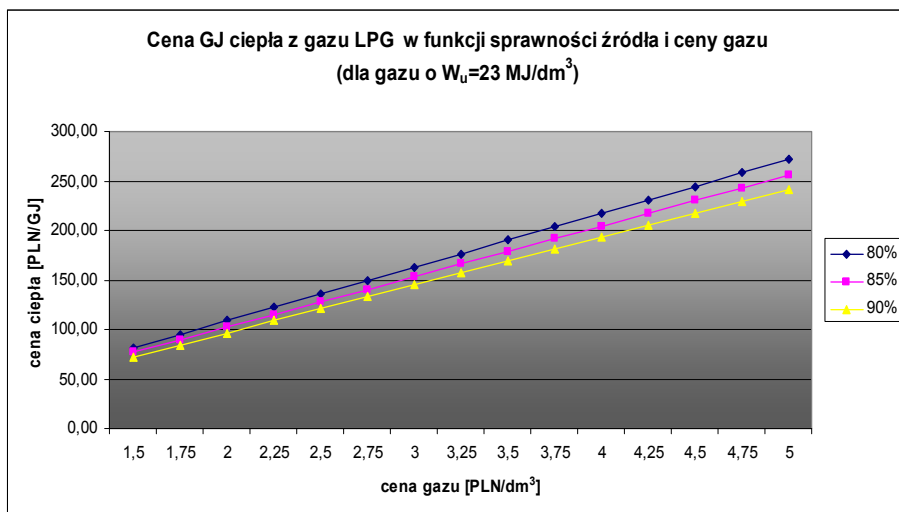
brutto do 2,38 PLN/dm³ brutto. Wyliczony koszt 1 GJ energii cieplnej w zależności od sprawności kotła przedstawiono w tab. 5.5 oraz można je również odczytać z rys. 5.4.

Tabela 5.5

Ceny 1GJ ciepła uzyskanego z LPG wyznaczone dla różnych sprawności urządzeń grzewczych

Lp.	Cena gazu LPG [PLN/dm ³]	Sprawność kotła		
		$\eta=80\%$	$\eta=85\%$	$\eta=90\%$
1	2,31	125,54	118,16	111,59
2	2,38	129,35	121,74	114,98

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.4. Cena 1 GJ ciepła uzyskanego z gazu LPG o wartości opałowej 23 MJ/dm³, w zależności od sprawności kotła i ceny gazu

Źródło: opracowanie własne.

W celu wyznaczenia ceny energii elektrycznej przeznaczonej do celów grzewczych, wykorzystano dane zawarte na stronie internetowej firmy ENERGIAPRO [70]. Analizując oferowane taryfy zdecydowano, że przy zapotrzebowaniu mocy przez Katedrę Opolską w wysokości 150 kW, energia elektryczna może zostać zakupiona w oparciu o następujące grupy taryfowe:

- C21 – z rozliczeniem jednostrefowym (jednakowa opłata w ciągu doby),
- C22a, w której rozliczenie za zużytą energię odbywa się z podziałem na strefy: a) szczytową (droższą), b) pozaszczytowa (tańszą),

- C22b, w której rozliczenie za zużyta energię odbywa się z podziałem na strefy: a) dzienną (droższą) obowiązującą w godzinach 06:00-21:00, b) nocną (tańszą) obowiązującą w godzinach 21:00-06:00.

Dla grupy taryfowej C21 opłaty wynoszą:

- opłata stała (abonamentowa i stawka sieciowa dla mocy 150KW): 1.140,48 PLN/m-c,
- suma opłat zmiennych – 0,3066 PLN/kWh.

Dla grupy taryfowej C22a opłaty wynoszą:

- opłata stała (abonamentowa i stawka sieciowa dla mocy 150KW): 1.140,48 PLN/m-c,
- suma opłat zmiennych w strefie szczytowej – 0,3646 PLN/kWh,
- suma opłat zmiennych w strefie pozaszczytowej – 0,3456 PLN/kWh,

Dla grupy taryfowej C22b opłaty wynoszą:

- opłata stała (abonamentowa i stawka sieciowa dla mocy 150KW): 930,48 PLN/m-c,
- suma opłat zmiennych w strefie dziennej – 0,3306 PLN/kWh,
- suma opłat zmiennych w strefie nocnej – 0,2086 PLN/kWh.

Do podanych cen należy doliczyć podatek VAT w wysokości 22%.

Tabela 5.6

Koszt 1 kW·h dla różnych grup taryfowych z uwzględnieniem opłat stałych i VAT

Czas wykorzystania mocy szczytowej, h/a	Cena energii elektrycznej, PLN/kWh				
	C21	C22a (50/50)	C22a (40/60)	C22b (50/50)	C22b (40/60)
1600	0,3799	0,5028	0,5004	0,3985	0,3836
1300	0,3811	0,5189	0,5164	0,4146	0,3997
1000	0,3833	0,5445	0,5422	0,4402	0,4253

Źródło: opracowanie własne.

Wielkość zużycia energii elektrycznej ma wpływ na cenę 1 kWh energii. Im więcej zużywa się energii elektrycznej, tym cena jednostkowa maleje. W celu zbadania wpływu ilości zużywanej energii na cenę jednostkową do analizy przyjęto różne wielkości energii, wynikające z przyjętych czasów wykorzystania mocy szczytowej (w wysokości: 1600, 1300 i 1000 h/a). W celu zbadania wpływu wyboru taryfy na koszt ciepła, obliczenia przeprowadzono dla taryfy C21, C22a oraz C22b. Dla taryfy C22a i C22b przeanalizowano koszt ciepła, gdy:

- zużycie energii wynosi po 50% w każdej ze stref,
- zużycie energii wynosi 40% w strefie droższej (diennej lub szczytowej) i 60% w strefie tańszej (nocnej lub pozaszczytowej).

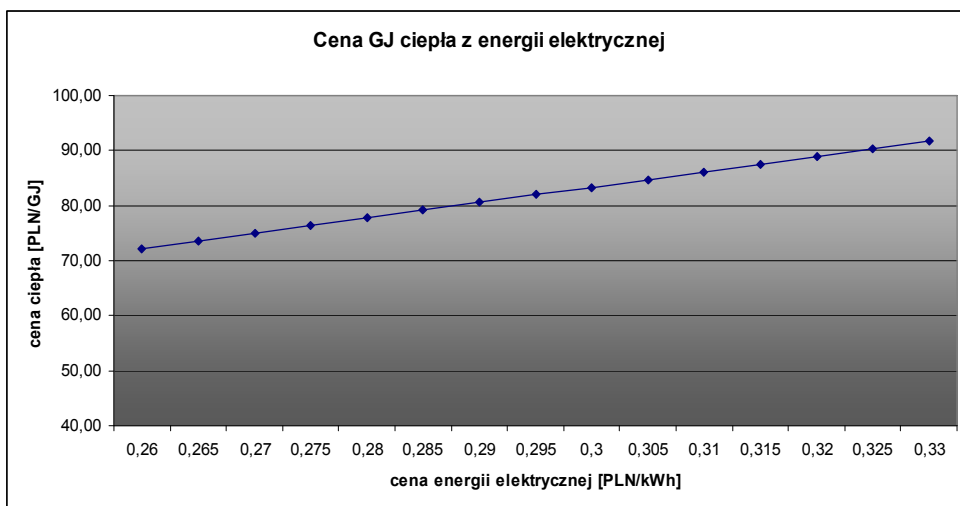
W tab. 5.6 podano wyniki obliczeń ceny ciepła dla analizowanych grup taryfowych i różnych czasów wykorzystania mocy szczytowej (czyli dla różnej konsumpcji energii w okresie roku). Koszt wytworzenia 1 GJ energii cieplnej dla różnych cen za energię elektryczną i różnych czasów wykorzystania mocy szczytowej można również odczytać z rys. 5.5.

Tabela 5.7

Cena 1 GJ ciepła z energii elektrycznej dla wybranych grup taryfowych

Czas wykorzystania mocy szczytowej, h/a	Cena ciepła, PLN/GJ				
	C21	C22a (50/50)	C22a (40/60)	C22b (50/50)	C22b (40/60)
1600	105,53	139,66	139,01	110,68	106,55
1300	105,87	144,13	143,45	115,15	111,02
1000	106,48	151,25	150,60	122,27	118,14

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.5. Cena 1 GJ ciepła uzyskanego z energii elektrycznej

Źródło: opracowanie własne.

Aby wyznaczyć koszt ogrzewania Katedry Opolskiej gazem GZ 50, wykorzystano informacje zawarte na stronie internetowej Górnośląskiej Spółki Gazowniczej w Opolu [71]. Do celów ogrzewczych w obiekcie o zapotrzebowaniu mocy w wysokości 150 kW wybrano taryfę W4. Jest to taryfa, o tzw. mocy umownej $< 10 \text{ Nm}^3/\text{h}$ i rocznym zużyciu gazu do $24000 \text{ Nm}^3/\text{a}$. Wysokość cen i stawek opłat dla odbiorców zasilanych z sieci gazowej zaczerpnięto z [72].

Stawki dla odbiorców kwalifikowanych do grupy taryfowej W-4 na dzień 31-12-2007 kształtowały się następująco:

- cena za paliwo gazowe – 0,8122 zł/m³,
 - stawka opłaty abonamentowej – 11,00 zł/m-c,
 - stawka opłat za usługi dystrybucyjne, stała – 119,12 zł/m-c,
 - stawka opłat za usługi dystrybucyjne, zmienna – 0,3484 zł/m³.
- Do podanych cen należy doliczyć podatek VAT (22%).

Tabela 5.8

Ceny brutto 1 Nm³ gazu ziemnego GZ-50 o wartości opałowej 35 MJ/m³ wyznaczone dla różnych sprawności urządzeń grzewczych i różnego czasu użytkowania mocy szczytowej

Czas wykorzystania mocy szczytowej, h/a	Cena gazu GZ50, PLN/Nm ³			
	η=75%	η=80%	η=85%	η=90%
1600	1,4755	1,4794	1,4834	1,4874
1300	1,4892	1,4941	1,4990	1,5039
1000	1,5112	1,5175	1,5239	1,5302

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 5.9

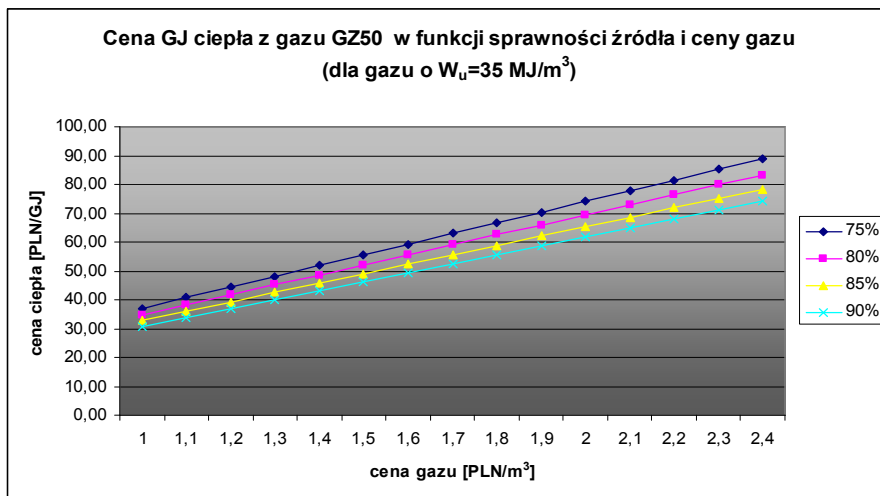
Cena brutto 1 GJ energii cieplnej uzyskana z gazu ziemnego o wartości opałowej 35 MJ/m³ dla różnych sprawności urządzeń grzewczych i różnego czasu użytkowania mocy szczytowej

Czas wykorzystania mocy szczytowej, h/a	Cena ciepła, PLN/GJ			
	η=75%	η=80%	η=85%	η=90%
1600	33,59	33,68	33,78	33,87
1300	33,91	34,02	34,13	34,24
1000	34,41	34,55	34,70	34,84

Źródło: opracowanie własne.

Zmienność kosztów gazu ziemnego GZ50 wyznaczonych dla różnych sprawności urządzeń grzewczych i różnego czasu użytkowania mocy szczytowej przedstawiono w tab. 5.8. W tab. 5.9 przedstawiono koszty 1 GJ energii cieplnej wyznaczone dla różnych sprawności urządzeń grzewczych oraz dla różnych czasów użytkowania mocy szczytowej. Wartości te można również odczytać z rys. 5.6.

W celach porównawczych wykonano także obliczenie kosztów ogrzewania dla Katedry Opolskiej, w przypadku podłączenia do miejskiej sieci ciepłowniczej.



Rys. 5.6. Cena 1 GJ ciepła uzyskanego z gazu ziemnego GZ50 o wartości opałowej 35 MJ/m^3 , w zależności od sprawności kotła i ceny gazu

Źródło: opracowanie własne.

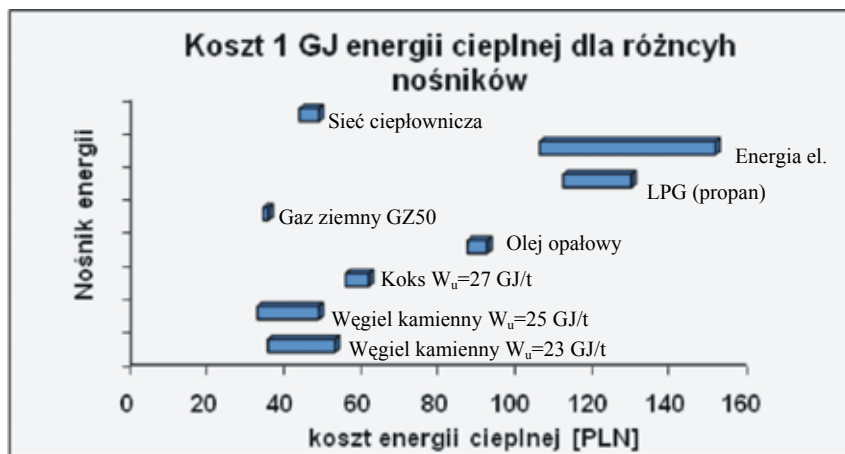
Do analizy przyjęto dane URE na temat średnioważonej ceny energii cieplnej w kraju i średnioważonej stawki opłaty za usługi przesyłowe. Stawki te, uśrednione dla wszystkich 379 przedsiębiorstw ciepłowniczych w 2007 roku wyniosły [73]:

- średnioważona cena ciepła – 23,43 PLN/GJ,
- średnioważona stawka opłaty za usługi przesyłowe – 10,25 PLN/GJ,
- łącznie daje to 33,68 PLN/GJ netto,
- po uwzględnieniu VAT (22%) otrzymuje się 41,0896 PLN/GJ.

Przy uwzględnieniu sprawności wężła (przyjęto do analizy w wysokości 95%), koszt 1 GJ w ciepłe skonsumowanym w obiekcie wyniesie średnio 43,1441 PLN/GJ.

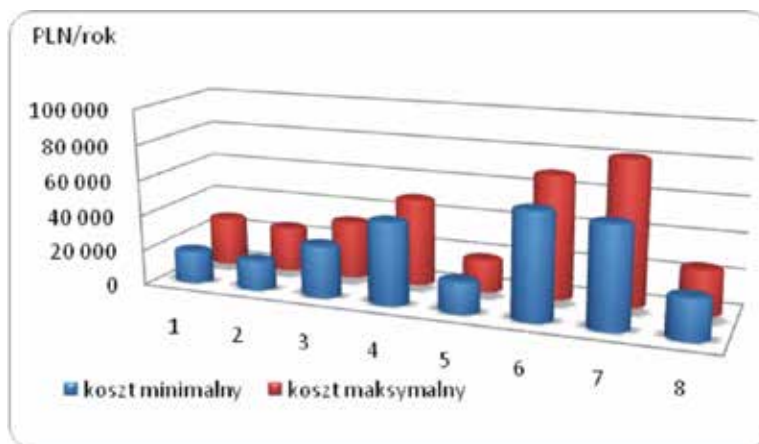
Jeśli wykonać dokładne obliczenia dla konkretnego przypadku lokalizacji (konkretna taryfa), to ze względu na istnienie opłaty stałej (tak dla produkcji, jak i dla przesyłu) cena ciepła będzie zmienna i będzie rosła przy danej (stałej) mocy zamówionej wraz ze spadkiem ilości zakupionej energii (ze spadkiem czasu wykorzystania mocy szczytowej). Dla analizowanego obiektu wzrost ceny wyniósłby ok. 4 – 5 PLN/GJ (np. cena ciepła $43 \div 44 \text{ PLN/GJ}$, przy $T = 1600 \text{ h/a}$, wzrasta do ok. $47 \div 48 \text{ PLN/GJ}$, przy $T = 1300 \text{ h/a}$). Porównanie jednostkowych kosztów ciepła pozyskanego z różnych nośników energii przedstawiono na rys. 5.7. Na rys.: 5.8, 5.9 i 5.10 przedstawiono wykresy słupkowe ilustrujące minimalne i maksymalne roczne koszty związane z zakupem nośników energii cieplnej dla różnego czasu wykorzystania mocy szczytowej wynoszącej odpowiednio 1000, 1300 i 1600 h/a.

Na rys. 5.11 i 5.12 przedstawiono odpowiednio zestawienie minimalnych i maksymalnych kosztów zakupu nośników energii cieplnej dla różnych czasów użytkowania mocy szczytowej. Biorąc pod uwagę najniższe koszty zakupu nośników energii cieplnej (rys. 5.11) roczne koszty zakupu paliwa są najniższe w przypadku węgla kamiennego o wartości opałowej $W_u=25\text{GJ/t}$. W sytuacji, gdy analizuje się koszty maksymalne zakupu nośników energii cieplnej (rys. 5.12), najtańszym nośnikiem jest gaz ziemny GZ50.



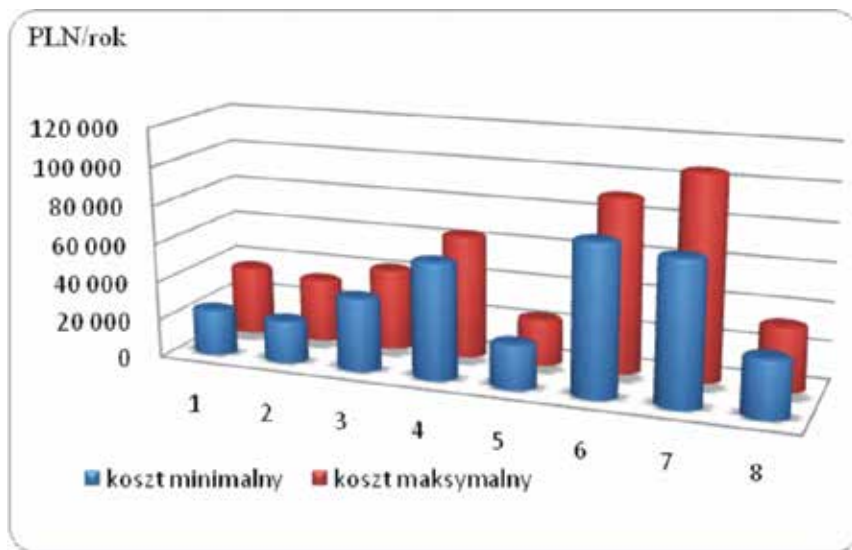
Rys. 5.7. Porównanie cen jednostkowych ciepła

Źródło: opracowanie własne.



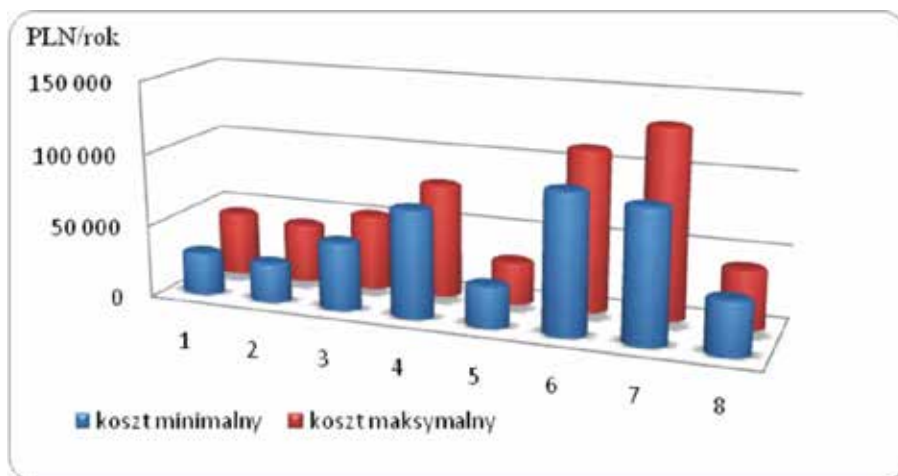
Rys. 5.8. Minimalny i maksymalny koszt zakupu nośników energii dla czasu wykorzystania mocy szczytowej $\tau = 1000\text{ h/a}$: 1 – węgiel kamienny $W_u=23\text{ GJ/t}$, 2 – węgiel kamienny $W_u=25\text{ GJ/t}$, 3 – koks $W_u=27\text{ GJ/t}$ 4 – olej opałowy, 5 – gaz ziemny, 6 – LPG (propan), 7 – energia elektryczna (ENERGIA PRO), 8 – sieć ciepłownicza

Źródło: opracowanie własne.



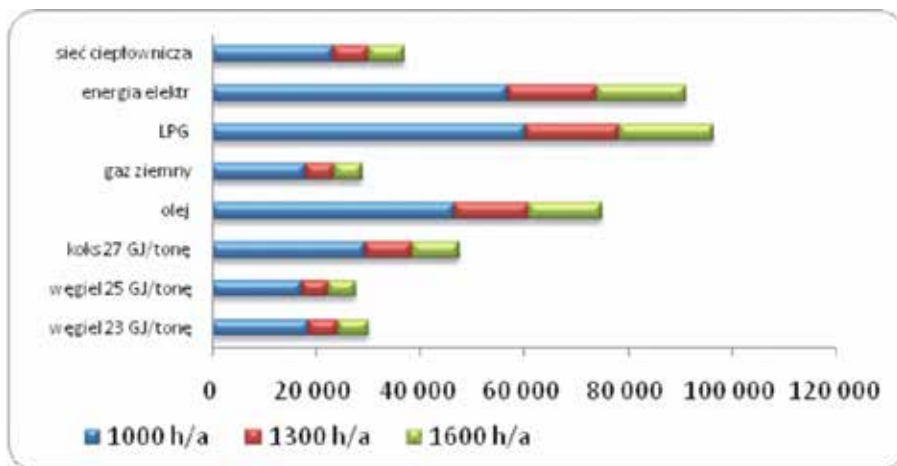
Rys. 5.9. Minimalny i maksymalny koszt zakupu nośników energii dla czasu wykorzystania mocy szczytowej $\tau = 1300$ h/a: 1 – węgiel kamienny $W_u=23$ GJ/t, 2 – węgiel kamienny $W_u=25$ GJ/t, 3 – koks $W_u=27$ GJ/t 4 – olej opałowy, 5 – gaz ziemny, 6 – LPG (propan), 7 – energia elektryczna (ENERGIA PRO), 8 – sieć ciepłownicza

Źródło: opracowanie własne.

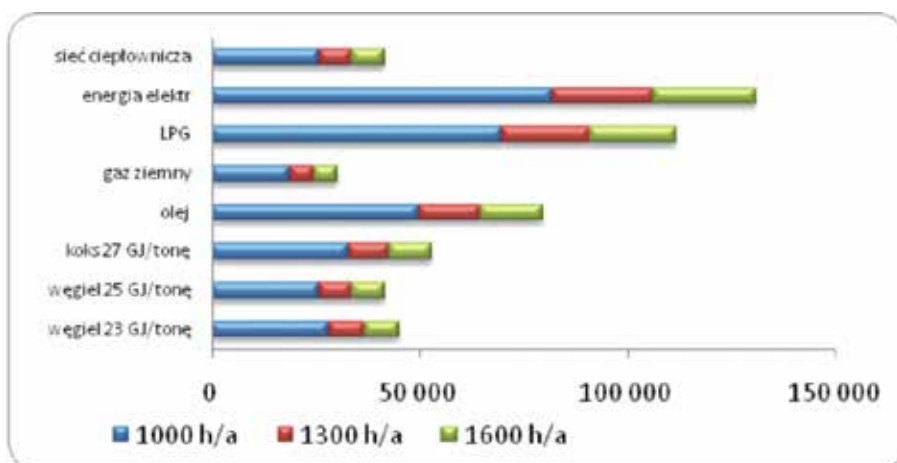


Rys. 5.10. Minimalny i maksymalny koszt zakupu nośników energii dla czasu wykorzystania mocy szczytowej $\tau = 1600$ h/a: 1 – węgiel kamienny $W_u=23$ GJ/t, 2 – węgiel kamienny $W_u=25$ GJ/t, 3 – koks $W_u=27$ GJ/t 4 – olej opałowy, 5 – gaz ziemny, 6 – LPG (propan), 7 – energia elektryczna (ENERGIA PRO), 8 – sieć ciepłownicza

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.11. Zestawienie minimalnych kosztów rocznych zakupu różnych nośników energii ciepłej dla czasów wykorzystania energii szczytowej wynoszących 1000, 1300, 1600 h/a
 Źródło: opracowanie własne.



Rys. 5.12. Zestawienie maksymalnych kosztów rocznych zakupu różnych nośników energii ciepłej dla czasów wykorzystania energii szczytowej wynoszących 1000, 1300, 1600 h/a
 Źródło: opracowanie własne.

5.2.3. Wyznaczenie nakładów inwestycyjnych związanych z wykonaniem systemu grzewczego

W stosowanych systemach grzewczych wykorzystywanych do zaopatrzenia obiektów sakralnych w energię ciepłą, różni się obecnie trzy sposoby ogrzewania: brak ogrzewania (ciepło występujące w obiekcie jest efektem bezwładności termicznej budowli), ogrzewanie ciągłe oraz ogrzewanie dorywcze.

Obiekty sakralne, w których nie zainstalowano systemu grzewczego charakteryzują się brakiem komfortu cieplnego oraz występowaniem problemów konserwatorskich takich jak: możliwość wystąpienia kondensacji pary wodnej na skutek nagłych zmian termiczno-wilgotnościowych (wychłodzenie, wietrzenie) na zimnych powierzchniach w całym obiekcie. Zaletą braku ogrzewania jest naturalnie stabilny mikroklimat.

Obiekty posiadające systemy ogrzewania ciągłego charakteryzuje komfort, stabilność mikroklimatu, teoretycznie stała temperatura w całym wnętrzu. Do wad takiego rozwiązania należy zaliczyć: bardzo kosztowną eksploatację, niezależnie od źródła energii oraz negatywny wpływ na zgromadzone we wnętrzach dzieła sztuki. Ponadto może w nich wystąpić przesuszanie objawiające się pękaniem drewna, odspajaniem się warstw malarskich. Są to klasyczne problemy konserwatorskie obserwowane w muzeach, gdzie pracują systemy grzewcze w trybie ciągłym.

Stosowanie ogrzewania dorywczego działającego przed i podczas nabożeństw, zapewnia wymaganą temperaturę efektywną, zapewniając tym samym komfort cieplny przebywających we wnętrzu osób oraz pozwala w znaczący sposób ograniczyć koszty eksploatacyjne. Może powodować jednak znaczne fluktuacje temperatury i wilgotności względnej wewnątrz obiektu, co niekorzystnie wpływa na zgromadzone dzieła sztuki. Problem ten dotyczy przede wszystkim obiektów, w których użytkowanie systemu grzewczego powoduje gwałtowne i duże zmiany temperatury w ciągu doby.

Obecnie do ogrzewania obiektów sakralnych wykorzystuje się następujące rozwiązania techniczne systemów grzewczych:

- ogrzewanie ciepłym powietrzem,
- ogrzewanie z wykorzystaniem promienników: gazowych, elektrycznych i wodnych,
- elektryczne ogrzewanie podnóżkowe i podławkowe,
- ogrzewanie podłogowe elektryczne i wodne,
- ogrzewanie elektryczne z wykorzystaniem bloków grzejnych,
- centralne ogrzewanie wodne lub parowe niskoprężne z grzejnikami miejscowymi.

W załączniku C szczegółowo scharakteryzowano systemy grzewcze wykorzystywane obecnie do ogrzewania obiektów sakralnych.

Podczas wyboru systemu grzewczego dla Katedry Opolskiej przeanalizowano cztery rozwiązania:

- ogrzewanie ciepłym powietrzem wykorzystującym do zasilania obiektu w energię cieplną istniejące kanały nadmuchowe,
- ogrzewanie promiennikami gazowymi,
- ogrzewanie energią elektryczną z wykorzystaniem ogrzewaczy podławkowych oraz strefowego ogrzewania podłogowego,

- ogrzewanie podłogowe z wykorzystaniem pompy ciepła jako źródła energii.
Koszty związane z wykonaniem poszczególnych systemów grzewczych przedstawiono w tab. 5.10.

Tabela 5.10

Szacunkowe koszty inwestycyjne związane z wykonaniem systemu grzewczego w Katedrze Opolskiej

Lp.	Opis systemu grzewczego	Szacunkowe koszty inwestycyjne [PLN] z VAT
1	Ogrzewanie ciepłym powietrzem z wykorzystaniem nagrzewnicy gazowej o mocy 150 kW	100 000,00
2	Ogrzewanie ciepłym powietrzem z wykorzystaniem nagrzewnicy wodnej o mocy 150 kW	100 000,00
3	Ogrzewanie elektryczne podławkowe i podłogowe o łącznej mocy 70kW	210 000,00
4	Ogrzewanie promiennikami gazowymi	310 000,00
5	Ogrzewanie podłogowe zasilane energią ciepłą z wykorzystaniem pompy ciepła	1 000 000,00

Źródło: opracowanie własne.

5.2.4. Kryteria funkcjonalne i techniczne wyboru systemu grzewczego

Przy wyborze systemu grzewczego poza czynnikami ekonomicznymi należy również zwrócić uwagę na funkcjonalność rozwiązań oraz możliwości techniczne wykonania instalacji. Dotyczy to zarówno samego systemu grzewczego, jak też nośnika energii cieplnej. W przypadku Katedry Opolskiej należy rozważyć możliwość wykonania systemu grzewczego, w którym źródłem ciepła będzie: gaz ziemny GZ50, gaz płynny LPG, olej opałowy, energia elektryczna, paliwo stałe (koks lub węgiel), energia cieplna pozyskana z odnawialnych źródeł energii (pompa ciepła) oraz ciepło zdalaczynne pochodzące z miejskiej sieci ciepłowniczej. Każde z rozwiązań posiada swoje zalety, ale również wady i ograniczenia.

W przypadku wyboru kotłowni gazowej należy zwrócić uwagę na konieczność wykonywania corocznych konserwacji urządzeń i przeglądów instalacji gazowej. Kotłownia gazowa wymaga również specjalnego pomieszczenia charakteryzującego się odpowiednią kubaturą, a w przypadku instalacji kotłów spalających gaz płynny, również usytuowania powyżej powierzchni gruntu. Gaz jako paliwo wykorzystany do celów grzewczych charakteryzuje się następującymi cechami:

- nie wymaga magazynowania u użytkownika,
- jest ekologiczny,

- prosta obsługa urządzeń gazowych,
- łatwość regulacji i automatyzacji procesu spalania,
- wysoka sprawność energetyczna urządzeń,
- brak stałych odpadów przy jego spalaniu, stałość dostaw gazu.

Podstawowe zalety wykorzystania oleju opałowego jako paliwa do celów grzewczych są następujące:

- ekologiczność,
- łatwość regulacji i automatyzacji procesu spalania,
- wysoka sprawność energetyczna urządzeń,
- brak stałych odpadów przy jego spalaniu.

Do podstawowych wymogów stawianych kotłom olejowym należy zaliczyć:

- konieczność stosowania zbiorników na olej opałowy (większy koszt inwestycyjny),
- konieczność wydzielenia pomieszczenia magazynowego dla zbiorników na olej lub miejsca przed budynkiem na zbiorniki podziemne lub naziemne,
- konieczność kontrolowania terminu dostawy paliwa,
- konieczność corocznej konserwacji,
- ograniczony wybór miejsca na kotłownię ze względu na większe natężenie dźwięku towarzyszące pracy palników olejowych w porównaniu z palnikami gazowymi.

Podstawowe zalety wykorzystania energii elektrycznej jako paliwa do celów grzewczych są następujące:

- nie wymaga wydzielenia osobnych pomieszczeń kotłowni, składu opału,
- ekologiczny,
- bardzo wygodny w użytkowaniu,
- bezgłośna praca kotła,
- w przypadku ogrzewania akumulacyjnego znikają atrybuty centralnego ogrzewania, tj.: kocioł, pompa, naczynie wzbiorcze, armatura.

Do podstawowych wymogów stawianych kotłom elektrycznym należy zaliczyć:

- konieczność uzyskania pozwolenia od dostawcy na zwiększony pobór energii,
- konieczność ponadnormatywnego okablowania pomieszczeń,
- niezawodność sieci energetycznej.

Podstawowe zalety wykorzystania węgla jako paliwa do celów grzewczych są następujące:

- niższy w stosunku do innych nośników energii koszt zakupu paliwa,
- niższy koszt zakupu urządzeń grzewczych,
- bezgłośna praca kotłowni.

Do podstawowych wymogów stawianych kotłom opalanych węglem należy zaliczyć:

- konieczność wydzielenia pomieszczenia magazynowego dla węgla,
- konieczność kontrolowania terminów dostaw paliwa,
- konieczność zatrudnienia stałego personelu obsługującego kotłownię,
- konieczność częstej konserwacji urządzeń,
- niska sprawność energetyczna urządzeń,
- konieczność magazynowania i wywozu odpadów stałych powstałych w procesie spalania.

W przypadku wykorzystania pompy ciepła jako źródła energii cieplnej należy wskazać takie zalety jak:

- niski koszt wytworzenia energii cieplnej,
- brak konieczności wykonywania komina i dodatkowego systemu wentylacji,
- pełna automatyzacja,
- jest bezpieczna dla środowiska, nie emituje sadzy lub spalin,
- pozwala uniezależnić się od wzrostu cen paliw (gazu, oleju opałowego) spowodowanych na przykład wyczerpywaniem się zasobów naturalnych czy międzynarodowymi konfliktami gospodarczymi,
- sprawność pompy ciepła w miarę upływu czasu nie spada – jest stała w całym okresie jej eksploatacji.

Do wad systemów grzewczych wykorzystujących pompę ciepła należy zaliczyć:

- sprężarka będąca częścią urządzenia wykorzystuje energię elektryczną – brak zasilania i instalacji wspomagającej (agregat prądowórczy, baterie słoneczne) powoduje przerwanie pracy układu,
- jest droga – ponad 30% droższa od tradycyjnego układu kotłowego,
- niewielu specjalistów potrafi zaprojektować układ z pompą ciepła tak, aby w pełni zaspokajał potrzeby użytkowników – dostarczał ciepłą wodę i zapewniał komfort termiczny w pomieszczeniach,
- niski parametr wody zasilającej powoduje konieczność montażu większych grzejników w stosunku do grzejników wymaganych przez kotłownie tradycyjne, lub wykonania instalacji ogrzewania podłogowego, co w przypadku obiektów oddanych do eksploatacji znacznie podnosi koszty inwestycyjne.

Zalety stosowania ogrzewania zdalczego:

- wyeliminowanie konieczności transportu paliwa i popiołu do pojedynczych budynków,
- możliwość zastosowania tańszych paliw, np. węgla brunatnego,
- bardziej ekonomiczne wykorzystanie paliwa,
- niezawodność działania dzięki zastosowaniu kilku kotłów,
- oszczędność miejsca u poszczególnych odbiorców (nie występuje kotłownia, pomieszczenie na paliwo i komin),

- zminimalizowanie obsługi, podwyższona ochrona przeciwpożarowa,
- zmniejszenie zanieczyszczenia atmosfery.

5.2.5. Aspekty ekologiczne

Dokonując wyboru źródła energii cieplnej należy również uwzględnić aspekt ekologiczny. Obecnie, największym zagrożeniem dla środowiska naturalnego nie jest perspektywa wyczerpania się naturalnych zasobów paliw konwencjonalnych, lecz globalne zanieczyszczenie środowiska naturalnego produktami ich spalania: pyłami, tlenkami siarki, azotu i węgla. Dlatego też coraz częściej przy wyborze nośnika energii, obok argumentów ekonomicznych i funkcjonalnych zwraca się również uwagę na względy ekologiczne [74,75].

W wyniku spalania paliw naturalnych, oprócz pożądanego przez człowieka ciepła, powstają również szkodliwe gazy oraz w przypadku spalania paliw stałych, dodatkowo popioły i żużle. Najważniejsze negatywne skutki oddziaływania produktów spalania paliw nieodnawialnych, głównie węgla kamiennego i brunatnego, to pogłębienie się efektu cieplarnianego, powstawanie dziury ozonowej oraz powiększanie się stref występowania smogu. Skażenie wody, ziemi i powietrza wpływa na wzrost zachorowań i zaburzeń genetycznych wśród ludności zamieszkującej regiony o silnie rozwiniętym przemyśle. Obserwowana jest również wzmożona korozja konstrukcji żelbetonowych (mosty, budowle wielkopłytkowe, hale i stadiony sportowe) oraz coraz szybciej postępujące niszczenie dorobku kultury materialnej [76].

W Polsce na potrzeby energetyczne wykorzystuje się głównie paliwa stałe, które pozostaną przez najbliższe lata najważniejszym źródłem energii. Paliwa te jednak są przyczyną największego skażenia środowiska naturalnego dlatego też tam gdzie jest to możliwe, należy zastępować je ekologicznymi źródłami energii [77-79].

5.3. Wybór systemu grzewczego dla Katedry Opolskiej

Analizując możliwości techniczne, funkcjonalne i ekologiczne wykonania systemu grzewczego dla Katedry Opolskiej, zdecydowano się na zastosowanie ogrzewania ciepłym powietrzem, wykorzystując do tego celu wytwornicę ciepłego powietrza VarioVent U160 firmy Heylo zasilaną gazem ziemnym GZ50. Podstawowe parametry techniczne nagrzewnicy powietrza przedstawiono w tab. 5.11.

Przyjęte rozwiązanie pozwoliło na uniknięcie ingerencji w tkankę budynku. Do wprowadzenia ciepłego powietrza wykorzystano istniejące kanały nawiewno-wywiewne. Zastosowanie innych rozwiązań np. promienników gazowych, ogrzewania elektrycznego, czy pomp ciepła wiązało się z koniecznością głębo-

kiej ingerencji w strukturę budowli, co nie znalazło akceptacji ze strony osób odpowiedzialnych za obiekt. Innym argumentem przemawiającym za wyborem takiego sposobu ogrzewania były względy ekonomiczne. Przyjęty i zaimplementowany system generował najmniejsze koszty inwestycyjne i gwarantował jedno z niższych kosztów eksploatacyjnych, zapewniając jednocześnie wysoki komfort użytkowania i sterowania.

Tabela 5.11

Podstawowe parametry techniczne wytwornicy ciepłego powietrza VarioVent U160

Lp.	Parametr	j.m.	Wartość
1	Znamionowe obciążenie grzewcze	kW	140 ÷ 160
2	Znamionowa moc grzewcza	kW	130 ÷ 150
3	Objętość strumienia powietrza przy 20°C	m ³ /h	10000
4	Objętość strumienia przy $\Delta t=45K$	m ³ /h	11500
5	Dostępny spręż	Pa	50 ÷ 400
6	Zużycie gazu ziemnego	m ³ /h	17,8
7	Waga	kg	300
8	Poziom ciśnienia akustycznego	dB	64 ÷ 71
9	Współczynnik sprawności	%	93,4 ÷ 93,8

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych podanych przez producenta.

6. Pomiary rozkładu pól temperaturowych w Katedrze Opolskiej

6.1. Charakterystyka systemu pomiarowego

W celu określenia skuteczności przyjętych rozwiązań technicznych dotyczących wyboru systemu grzewczego, po jego zamontowaniu, przeprowadzono pomiary rozkładu temperatur w Katedrze Opolskiej wykorzystując zaprojektowany i wykonany przez autora system pomiarowy, umożliwiający rejestrację oraz archiwizację danych [80,81]. Podstawowe wymagania, jakie system pomiarowy musiał spełnić to:

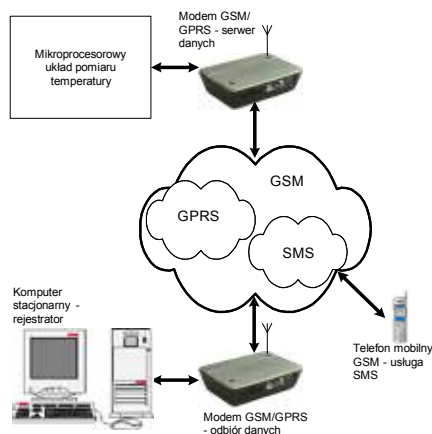
- możliwość umiejscowienia układu pomiarowego w trudno dostępnym miejscu, jakim jest poddasze Katedry Opolskiej,
- możliwość dokonywania jednoczesnych pomiarów w punktach oddalonych od siebie o kilkadziesiąt metrów przy jednoczesnym zachowaniu odporności systemu na zakłócenia elektromagnetyczne,
- praca w szerokim zakresie temperatur otoczenia od -20°C do 50°C występujące w środowisku poddasza,
- praca w środowisku o dużym stopniu zakurzenia, szczególnie w czasie okresu grzewczego,
- sakralny charakter obiektu, w którym należało wykonać pomiary, wymagający ukrycia podstawowych elementów systemu, jakim są czujniki,
- wymagana dokładność pomiaru temperatury powinna wynosić poniżej 1°C ,
- szybkość pomiaru temperatury powinna zagwarantować kompletny pomiar w czasie kilku minut,
- praca bezobsługowa – ze względu na długi czas pracy zainstalowanego systemu pomiarowego wymagana jest możliwość pracy bezobsługowej, odporność na brak zasilania, automatyczne uruchomienie układu pomiarowego po powrocie napięcia zasilającego,
- możliwość archiwizacji danych – układ pomiarowy powinien zagwarantować łatwy i szybki dostęp do zgromadzonych danych oraz umożliwić ich archiwizację,

- funkcja samokontroli poprawności działania wszystkich elementów systemu oraz możliwość powiadamiania poprzez wiadomości SMS o wszelkich nieprawidłowościach związanych z ich pracą takich jak uszkodzenie czujnika, brak zasilania itp.

6.1.1. Ogólna koncepcja rozwiązania technicznego systemu pomiarowego

Struktura systemu pomiarowego, którą przedstawiono na rys. 6.1 spełniającego postawione w specyfikacji wymagania składa się z następujących elementów [82, 83]:

- mikroprocesorowy układ pomiaru temperatury – oparty na mikrokontrolerze AVR. Do podstawowych zadań mikroprocesorowego układu pomiarowego należy: przeprowadzenie pomiaru za pomocą zestawu cyfrowych czujników temperatury oraz komunikacja interfejsem szeregowym z modemem GPRS pełniącym rolę serwera danych pomiarowych, telemetryczny system transmisji danych – oparty na pakietowej transmisji danych GPRS, system przesyłu danych z modemu GPRS pełniącego rolę serwera do oddalonego modemu pełniącego rolę odbiornika danych pomiarowych,



Rys. 6.1. Ogólny schemat telemetrycznego systemu pomiaru temperatury

Źródło: opracowanie własne.

- system komputerowy wykorzystywany do prezentacji, rejestrowania i archiwizacji danych pomiarowych połączony za pomocą interfejsu szeregowego z modemem GPRS odbierającym dane z serwera,
- serwisowy telefon mobilny GSM będący w posiadaniu osoby nadzorującej pracę systemu pomiarowego, do którego wysyłane są automatycznie wiadomości tekstowe SMS o wszelkich nieprawidłowościach związanych z pracą całego systemu.

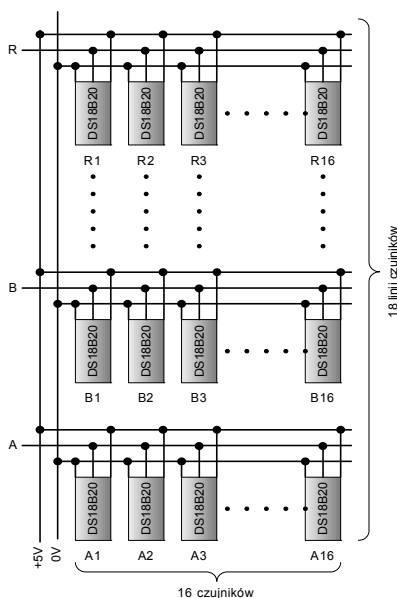
6.1.2. Mikroprocesorowy układ pomiaru temperatury

W zbudowanym mikroprocesorowym układzie do pomiaru temperatury wykorzystano cyfrowy czujnik temperatury DS18B20 firmy Maxim (Dallas) [84]. Czujnik ten charakteryzuje się maksymalnym błędem pomiaru temperatury rzędu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ w zakresie temperatur pracy od -20°C do 85°C , posiada przetwornik analogowo-cyfrowy z konfigurowalną rozdzielczością przetwarzania w zakresie od 9 do 12 bitów, a maksymalny czas przetwarzania temperatury dla 12-bitowej rozdzielczości wynosi 750 ms.



Rys. 6.2. Wyprowadzenia czujnika DS18B20

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.3. Schemat połączeń matrycy czujników temperatury

Źródło: opracowanie własne.

Układ DS18B20 zapewnia komunikację z zewnętrznym układem kontrolera za pomocą magistrali 1-Wire (rys. 6.2). Zasilany może być z osobnego przewodu zasilającego jak również z samej linii danych [84].

Zastosowaną konfigurację połączeń matrycy czujników temperatury przedstawiono na rys. 6.3. Składała się ona z 18 linii oznaczonych symbolami litero-

wymi (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R). Na każdej linii umieszczono po 16 czujników DS18B20.

Magistrala 1-Wire umożliwia pracę wielu czujników temperatury na jednej linii danych. Każdy ze znajdujących się na linii czujników jest identyfikowany za pomocą fabrycznie przyporządkowanego niepowtarzalnego 64-bitowego kodu (ROM Code).

Tabela 6.1

Dane techniczne czujnika temperatury DS18B20

Parametr	Wartość
Napięcie zasilania	3,0 – 5,5V
Pobór prądu	1 mA
Błąd pomiaru temperatury w przedziale (-20°C – 85°C)	±0,5°C
Błąd pomiaru temperatury w przedziale (-55°C – 125°C)	±2°C
Interfejs komunikacji	Magistrala 1-Wire
Rozdzielczość przetwornika	9-12 bitów
Maksymalny czas pomiaru temperatury	750 ms (12 bitów)

Źródło: [84].

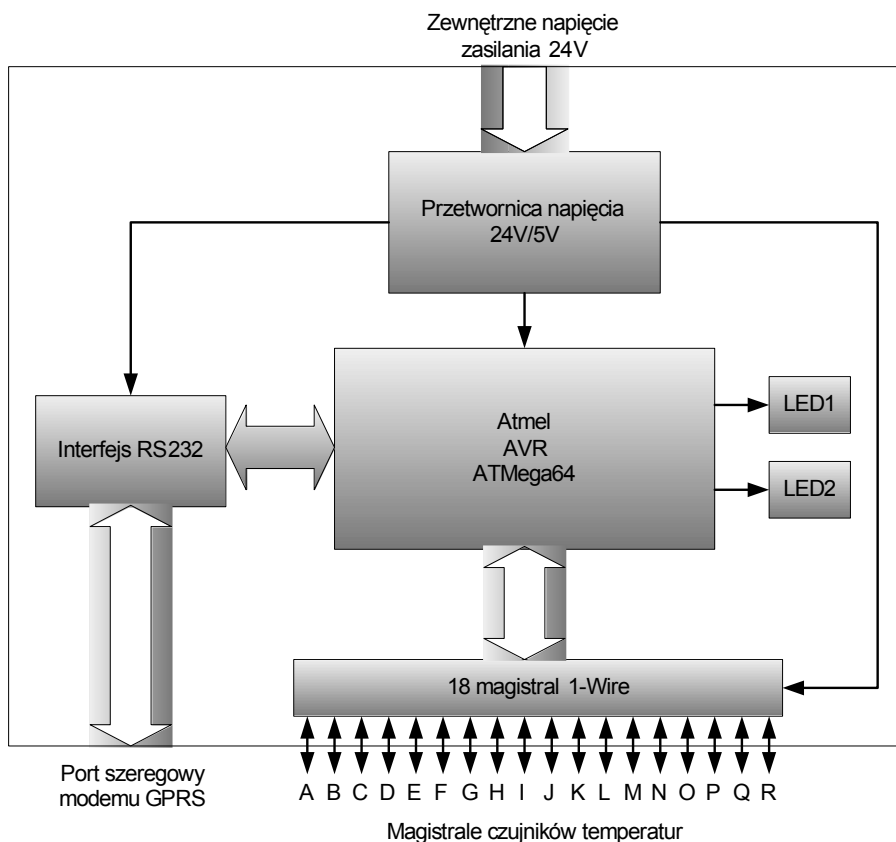
Na rys. 6.4 przedstawiono schemat blokowy mikroprocesorowego układu pomiaru temperatury opartego na mikrokontrolerze z rodziny AVR firmy Atmel – ATmega64. Do najważniejszych składników układu pomiarowego należą:

- mikrokontroler ATmega64 pracujący przy częstotliwości taktowania 11,0592 MHz, zasilany napięciem 5 V;
- 18 magistral obsługujących protokół 1-Wire do wszystkich linii czujników (linie A-R);
- interfejs RS232 – konwerter sygnałów pomiędzy standardami TTL a RS232C umożliwiający komunikację z zewnętrznym modemem GPRS
- 2 sygnalizacyjne diody LED;
- układ zasilania oparty na przetwornicy napięcia 24V/5V o prądzie znamionowym 1 A wymagający zewnętrznego zasilacza o napięciu 24 V.

ATmega64 jest 8-bitowym mikrokontrolerem opartym na technologii RISC i architekturze harwardzkiej o rozdzielonej pamięci programu i danych. Dzięki pracy potokowej jednostki arytmetyczno-logicznej charakteryzuje się dużą wydajnością obliczeniową dochodzącą do 16 MIPS. Procesor ma do dyspozycji 64 kB pamięci kodu w postaci pamięci Flash oraz 2 kB pamięci EEPROM i 4 kB roboczej pamięci SRAM. Mikrokontroler charakteryzuje szeroki zakres temperatur pracy: od -55 °C do 125 °C. Posiadał on dwa wbudowane interfejsy

szeregowe umożliwiające komunikację z urządzeniami zewnętrznymi za pomocą dowolnego protokołu [85].

Oprogramowanie mikrokontrolera ATMega64 powstało przy wykorzystaniu środowiska WinAVR, czyli zestawu narzędzi programistycznych typu *open source* pracujących pod systemem operacyjnym Microsoft Windows i przeznaczonych dla układów z rodziny AVR firmy Atmel. W skład środowiska wchodzi kompilator języka C i C++ (avr-gcc), narzędzie programujące (avrdude), debugger (avr-gdb). Rdzeniem oprogramowania jest biblioteka standardowa języka C avr-libc oparta o standard ANSI-C (ANSI X3.159-1989 i ISO/IEC 9899:1990), jego następcę C99 (ISO/IEC 9899:1999) oraz rozszerzenia specyficzne dla architektury AVR [86].



Rys. 6.4. Schemat blokowy mikroprocesorowego układu pomiaru temperatury

Źródło: opracowanie własne.

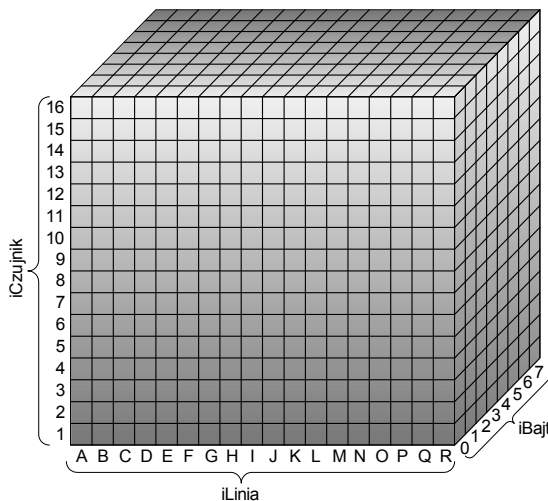
Tabela 6.2

Dane techniczne mikrokontrolera AVR ATmega64

Lp.	Parametr	Wartość
1	Maksymalna częstotliwość pracy	16 MHz
2	Maksymalna wydajność	16 MIPS
3	Rozmiar pamięci Flash	64 kB
4	Rozmiar pamięci EEPROM	2 kB
5	Rozmiar pamięci SRAM	4 kB
6	Interfejs programowania	SPI, JTAG
7	Liczba wbudowanych interfejsów szeregowych	2
8	Napięcie zasilania	4,5 – 5,5V
9	Zakres temperatury pracy	-55°C – 125°C
10	Obudowa	64-pin TQFP

Źródło: [85].

Podstawowym zadaniem realizowanym przez system mikroprocesorowy jest komunikacja protokołem 1-Wire z 288 czujnikami połączonymi w 18 linii po 16 czujników każda. Do realizacji tego zadania stworzono trójwymiarową tablicę kodów ROM identyfikującą jednocześnie lokalizację czujnika w przestrzeni (rys. 6.5).



Rys. 6.5. Trójwymiarowa tablica kodów ROM matrycy czujników

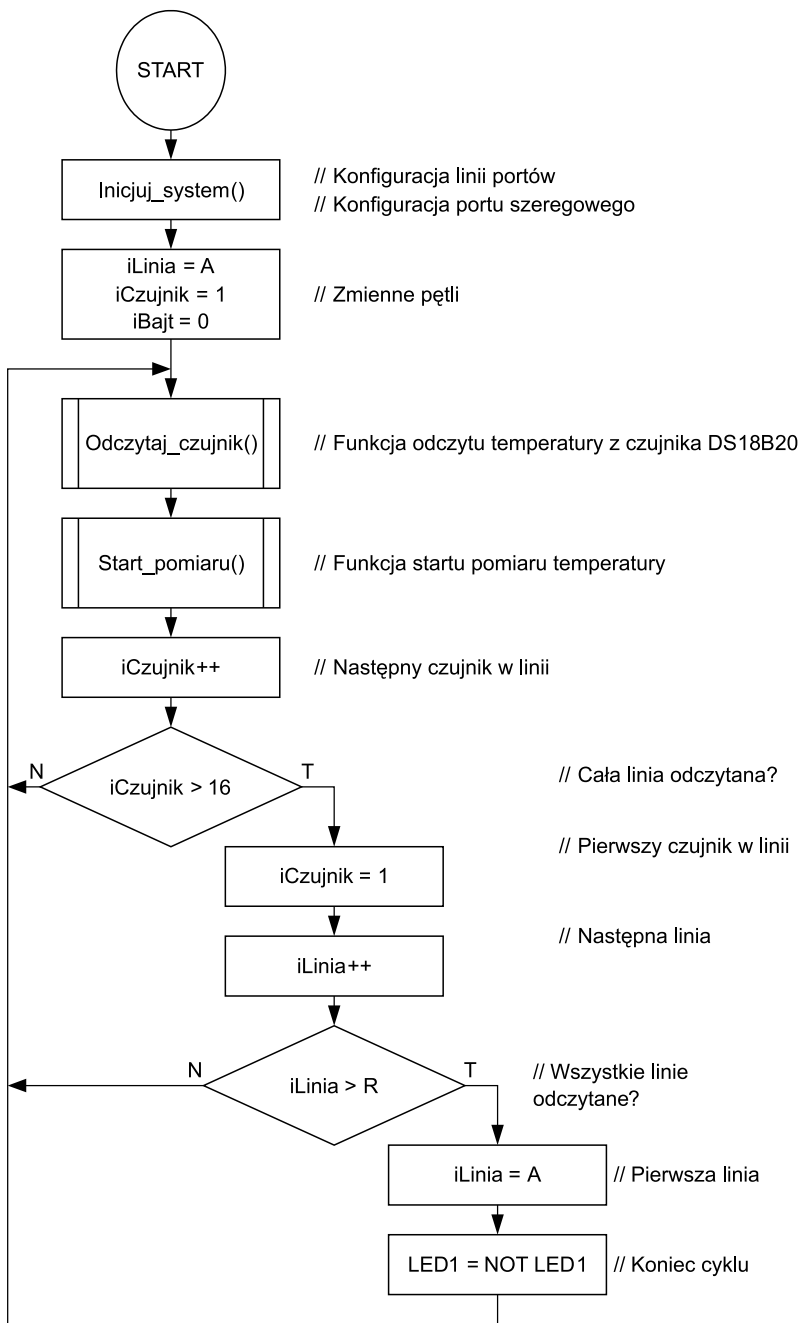
Źródło: opracowanie własne.

Na indeksy tablicy składają się: numer linii (A-R), numer czujnika (1-16) oraz numer bajtu dla 64-bitowego kodu ROM czujników.

Realizacja zadania opiera się na sekwencyjnym skanowaniu wszystkich czujników za pomocą dwóch zagnieżdżonych pętli indeksowanych zmiennymi $iLinia$ i $iCzujnik$. W ramach zadania następuje etap odczytania stanu czujnika, czyli pobranie wartości zmierzonej temperatury (procedura *Odczytaj_czujnik*) oraz etap rozpoczęcia kolejnego cyklu pomiarowego czujnika DS18B20 (procedura *Start_pomiaru*). Na rys. 6.6 przedstawiono algorytm realizowanego zadania odczytywania matrycy czujników temperatury. Natomiast na rys. 6.7 przedstawiono algorytm odczytania danych czujnika DS18B20, składający się z następujących etapów:

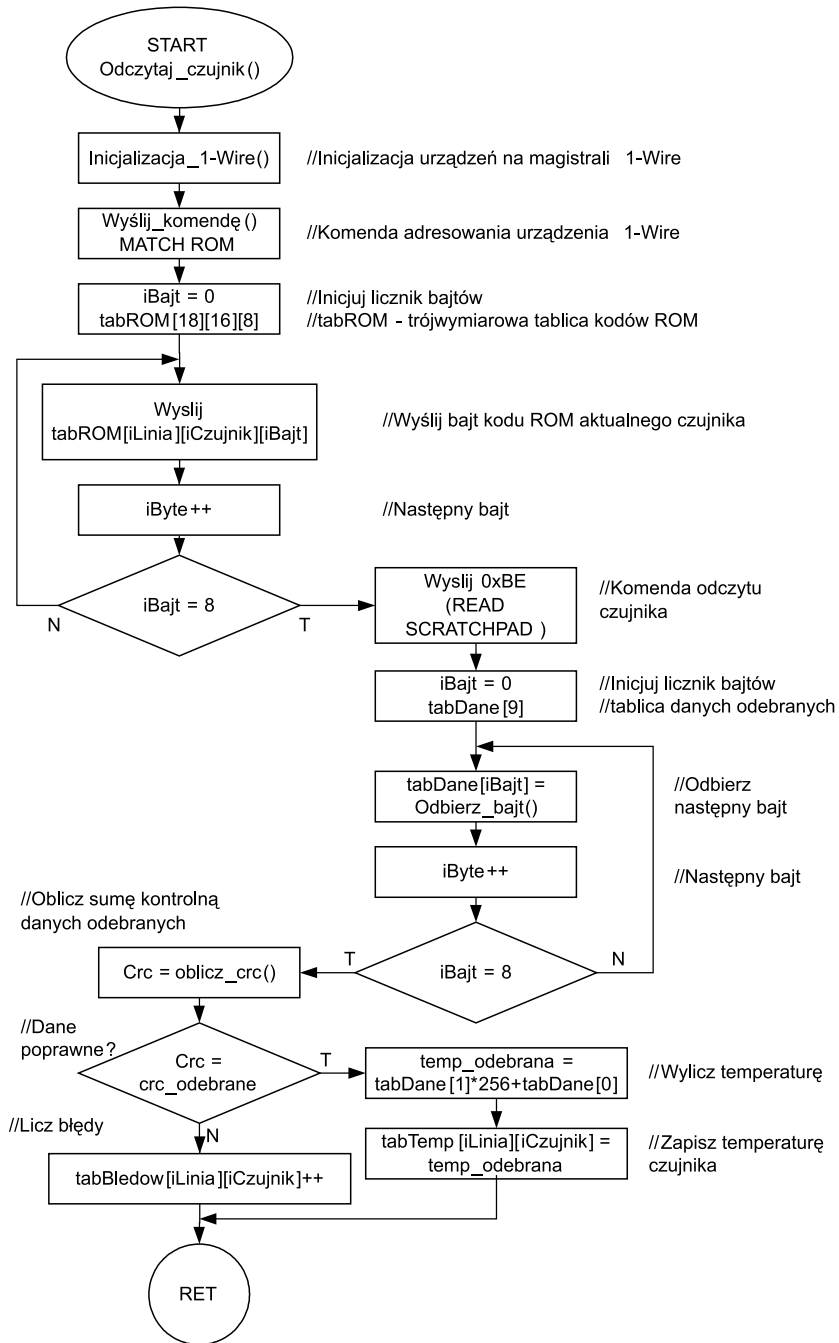
- inicjalizacja magistrali 1-Wire zgodnie z sekwencją producenta [87],
- uaktywnienie wybranego czujnika poprzez jego zaadresowanie komendą MATCH ROM i identyfikującym go kodem ROM,
- odczytanie danych czujnika komendą READ SCRATCHPAD i odebranie 9 bajtów danych,
- wyznaczenie cyklicznej sumy kontrolnej CRC odebranych danych za pomocą wielomianu $f(X)=X^8 + X^5 + X^4 + 1$,
- sprawdzenie poprawności odebranych danych poprzez porównanie wyliczonej i odebranej sumy kontrolnej,
- w przypadku stwierdzenia poprawności danych zapis temperatury do tablicy temperatur (*tabTemp*).
- inicjalizacja magistrali 1-Wire zgodnie z sekwencją producenta,
- uaktywnienie wybranego czujnika poprzez jego zaadresowanie komendą MATCH ROM i identyfikującym go kodem ROM,
- rozpoczęcie pomiaru komendą CONVERT T,
- po upływie maksymalnie 750 ms układ DS18B20 jest gotowy do następnego cyklu odczytu temperatury [84].

Rys. 6.8 przedstawia szczegółowy algorytm rozpoczęcia pomiaru temperatury.



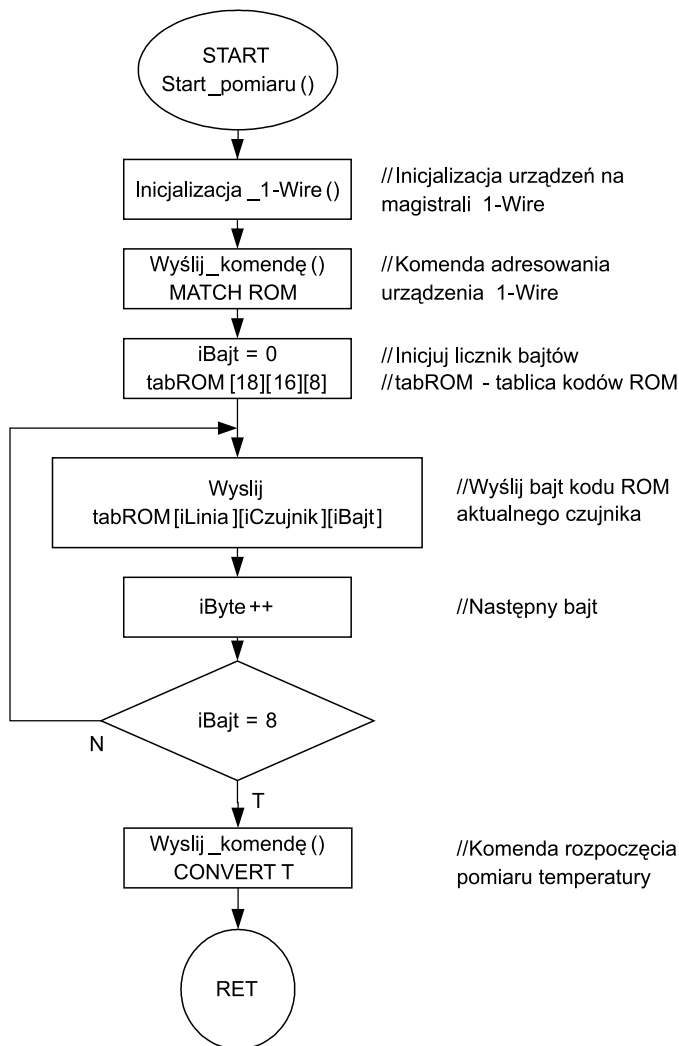
Rys. 6.6. Algorytm odczytywania matrycy czujników temperatury

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.7. Algorytm odczytania danych czujnika DS18B20

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.8. Algorytm rozpoczęcia pomiaru temperatury

Źródło: opracowanie własne.

6.1.3. Telemetryczny system transmisji danych

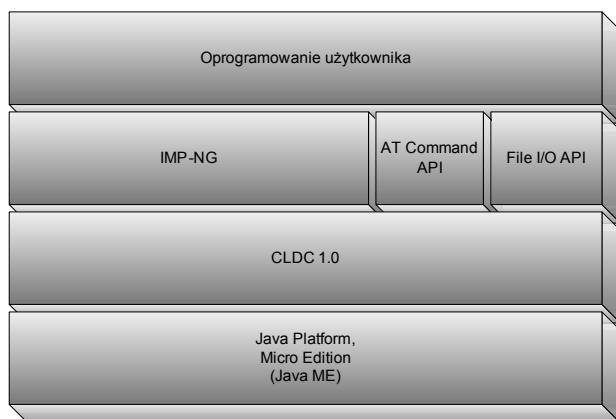
Na rys. 6.9 przedstawiono ogólny widok wykorzystanego do pracy telemetrycznej czterozakresowego (850/900/1800/1900) MHz modemu Siemens TC65 Terminal w wersji 2.0. Modem jest oparty na 32-bitowym mikroprocesorze ARM7 o architekturze RISC. Posiada 400 kB dostępnej dla maszyny wirtualnej Java pamięci RAM oraz 1,7 MB nielotnej pamięci Flash zawierającej system plików.



Rys. 6.9. Modem telemetryczny GSM/GPRS Siemens TC65T v2.000

Źródło: [88].

Wbudowany interfejs RS232 dostępny z poziomu maszyny wirtualnej Java umożliwia komunikację z zewnętrznym systemem pomiarowym. Wbudowany stos TCP/IP dostępny poprzez polecenia AT jak również z opartej na konfiguracji CLDC 1.0 maszyny wirtualnej Java pozwala na transmisję danych telemetrycznych [89]. Modem TC65T jest terminalem GPRS klasy B, obsługującym oba rodzaje transmisji (klasyczna GSM oraz GPRS), ale nie jednocześnie. Charakteryzuje się ponadto wysoką klasą transmisji wielokanałowej (GPRS multislotted class 12). Modem ten zapewnia również dużą szybkość transmisji danych, wykorzystując po 4 szczeliny czasowe do i ze stacji bazowej [90].



Rys. 6.10. Architektura platformy Java ME dla modemu Siemens TC65T

Źródło: [90].

Architektura programowa platformy Java ME modemu opiera się na CLDC 1.0 HI (ang: HotSpot Implementation) oraz profilu IMP-NG (ang. Information Module Profile Next Generation), czyli pokrywającego się z profilem MIDP 2.0

za wyjątkiem pakietu interfejsu graficznego LCDUI [91]. Dodatkowymi interfejsami maszyny wirtualnej Java wykraczającymi poza profil IMP-NG są pakiety AT Command API oraz File I/O API. Rys. 6.10 przedstawia hierarchiczną strukturę platformy Java terminala Siemens TC65T [90]. Istotną z punktu widzenia pracy bezobsługowej systemu pomiarowego temperatury jest funkcja jego samokontroli, polegająca na sprawdzaniu poprawności pracy wszystkich jego elementów.

Diagnostyka podzespołów systemu w połączeniu z automatycznym powiadomianiem osoby nadzorującej poprzez wiadomości tekstowe SMS o nieprawidłowościach związanych z ich pracą, pozwala na ograniczenie do minimum czasu braku poprawnych danych pomiarowych. Do najważniejszych sygnalizowanych przez SMS nieprawidłowości pracy systemu należą:

- awaria dowolnego czujnika temperatury,
- brak zasilania układu,
- brak komunikacji przez GPRS,
- brak komunikacji modemu z układem pomiaru temperatury,
- brak komunikacji modemu z komputerem rejestrującym,
- brak poprawnej pracy procesu rejestracji danych.

Do komunikacji pomiędzy modemem TC65T a mikroprocesorowym układem pomiaru temperatury zastosowano protokół MODBUS. Jest to przemysłowy protokół komunikacyjny warstwy aplikacji bazujący na warstwie 7 modelu OSI, zapewniającym komunikację typu klient-serwer pomiędzy urządzeniami podłączonymi do różnych magistral i sieci takich jak EIA/TIA-232-E, EIA-422, EIA/TIA-485-A, światłowód, TCP/IP oparty na sieci Ethernet [92].

Z licznej grupy funkcji zdefiniowanych przez specyfikację protokołu MODBUS zaimplementowano tylko wybrane, niezbędne do komunikacji funkcje operujące na rejestrach 16-bitowych:

- READ HOLDING REGISTERS (Funkcja 0x03),
- WRITE REGISTER (Funkcja 0x06),
- WRITE MULTIPLE REGISTERS (Funkcja 0x16).

Lista obsługiwanych przez oprogramowanie mikrokontrolera ATmega64 funkcji MODBUS pozwala na komunikację z układem i dostęp do wartości mierzonych temperatur przez dowolne urządzenie lub oprogramowanie obsługujące popularny przemysłowy protokół MODBUS.

Tab. 6.3 zawiera przestrzeń adresową dostępnych 608 rejestrów MODBUS układu pomiaru temperatury. Podstawowym założeniem wykorzystanego sposobu transmisji danych pomiędzy modemami jest istnienie prywatnego punktu dostępu GPRS (ang. APN – Access Point Name). W odróżnieniu od APN publicznych operatorów sieci komórkowych, których podstawowym celem jest dostarczenie usługi dostępu do Internetu za pomocą pakietowej transmisji danych GPRS dla wielomilionowej rzeszy użytkowników, prywatny APN ukierunkowany na specyficzne wymagania systemów telemetrycznych pozwala na

statyczne przydzielanie konkretnego numeru IP dla wybranej karty SIM. Statyczny adres IP zapewnia jednoznaczność adresowania i identyfikowania użytkowników sieci transmisji danych [93].

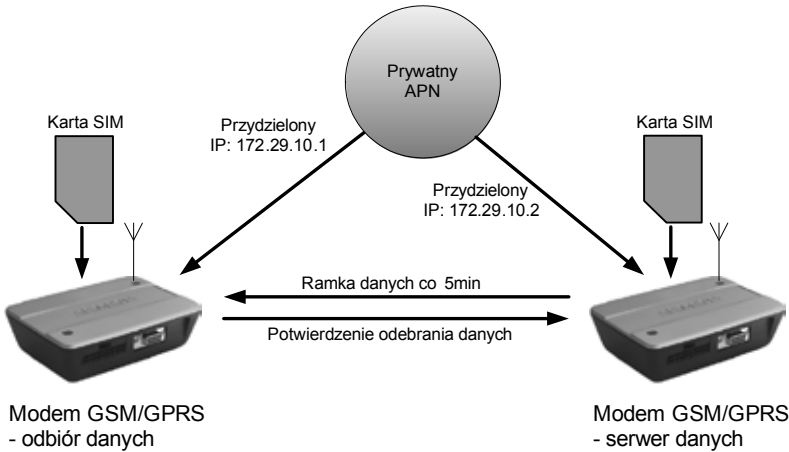
Tabela 6.3

Przestrzeń adresowa rejestrów MODBUS układu pomiaru temperatury

Adres rejestru początkowego	Liczba rejestrów	Znaczenie
1	32	Dane diagnostyczne transmisji
32	16	Linia A – wartości temperatury
48	16	Linia A – dane diagnostyczne
64	16	Linia B – wartości temperatury
80	16	Linia B – dane diagnostyczne
96	16	Linia C – wartości temperatury
112	16	Linia C – dane diagnostyczne
128	16	Linia D – wartości temperatury
144	16	Linia D – dane diagnostyczne
160	16	Linia E – wartości temperatury
176	16	Linia E – dane diagnostyczne
192	16	Linia F – wartości temperatury
208	16	Linia F – dane diagnostyczne
224	16	Linia G – wartości temperatury
240	16	Linia G – dane diagnostyczne
256	16	Linia H – wartości temperatury
272	16	Linia H – dane diagnostyczne
288	16	Linia I – wartości temperatury
304	16	Linia I – dane diagnostyczne
320	16	Linia J – wartości temperatury
336	16	Linia J – dane diagnostyczne
352	16	Linia K – wartości temperatury
368	16	Linia K – dane diagnostyczne
384	16	Linia L – wartości temperatury
400	16	Linia L – dane diagnostyczne
416	16	Linia M – wartości temperatury
432	16	Linia M – dane diagnostyczne
448	16	Linia N – wartości temperatury
464	16	Linia N – dane diagnostyczne
480	16	Linia O – wartości temperatury
496	16	Linia O – dane diagnostyczne
512	16	Linia P – wartości temperatury
528	16	Linia P – dane diagnostyczne
544	16	Linia Q – wartości temperatury
560	16	Linia Q – dane diagnostyczne
576	16	Linia R – wartości temperatury
592	16	Linia R – dane diagnostyczne

Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 6.11 przedstawiono schemat komunikacji dla dwóch modemów GPRS z wykorzystaniem prywatnego punktu dostępu APN. Dwa modemy wyposażone w karty SIM jednego operatora o znanych dla APN numerach otrzymują stałe adresy IP przy każdym rozpoczęciu sesji GPRS [94]. Dzięki temu komunikacja z wykorzystaniem protokołów opartych na TCP/IP nie wymaga korzystania z usługi DNS [95].



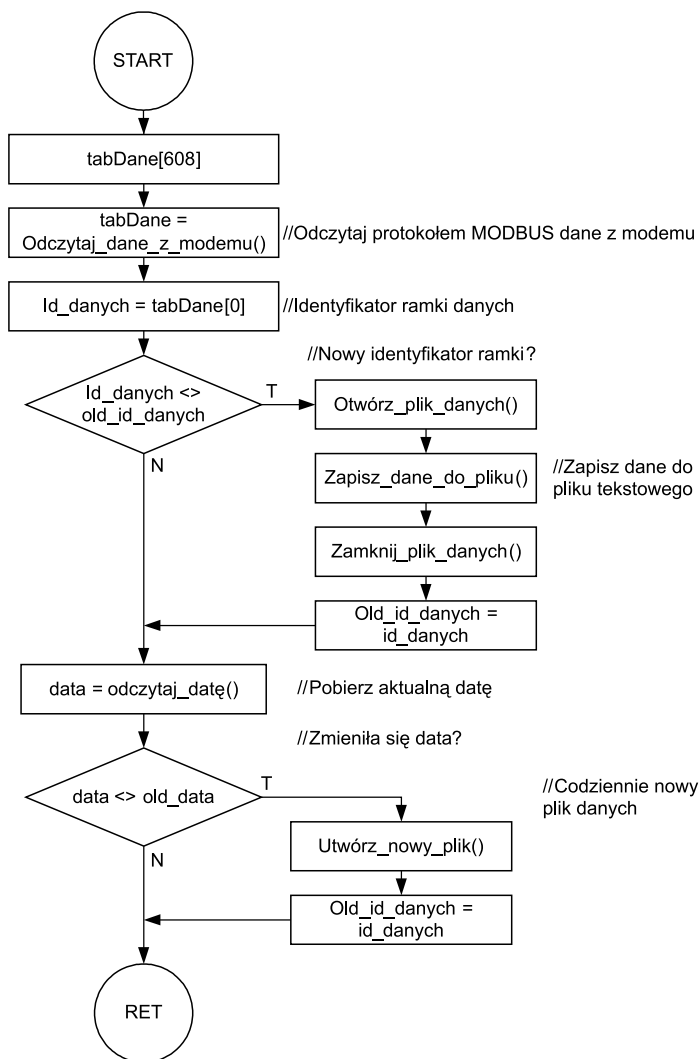
Rys. 6.11. Schemat komunikacji GPRS z wykorzystaniem prywatnego APN

Źródło: opracowanie własne.

6.1.4. System komputerowy do rejestracji i archiwizacji danych

System komputerowy komunikuje się protokołem MODBUS z modemem odbiorczym za pomocą interfejsu RS232C, dzięki czemu może on śledzić na bieżąco wszelkie zmiany danych odebranych przez GPRS. Proces ich rejestracji polega na cyklicznym porównywaniu wartości identyfikatora odebranych danych z wartością poprzednią i ich zapisywaniu do pliku tekstowego w przypadku stwierdzenia zmiany. Każdego dnia o północy był tworzony nowy plik tekstowy i następowała archiwizacja bieżącego pliku danych.

Rys. 6.12 przedstawia realizowany algorytm zapisu danych pomiarowych do pliku tekstowego. Odebrane dane po procesie kontroli poprawności i przetwarzania wartości temperatury były zapisane do pliku tekstowego.

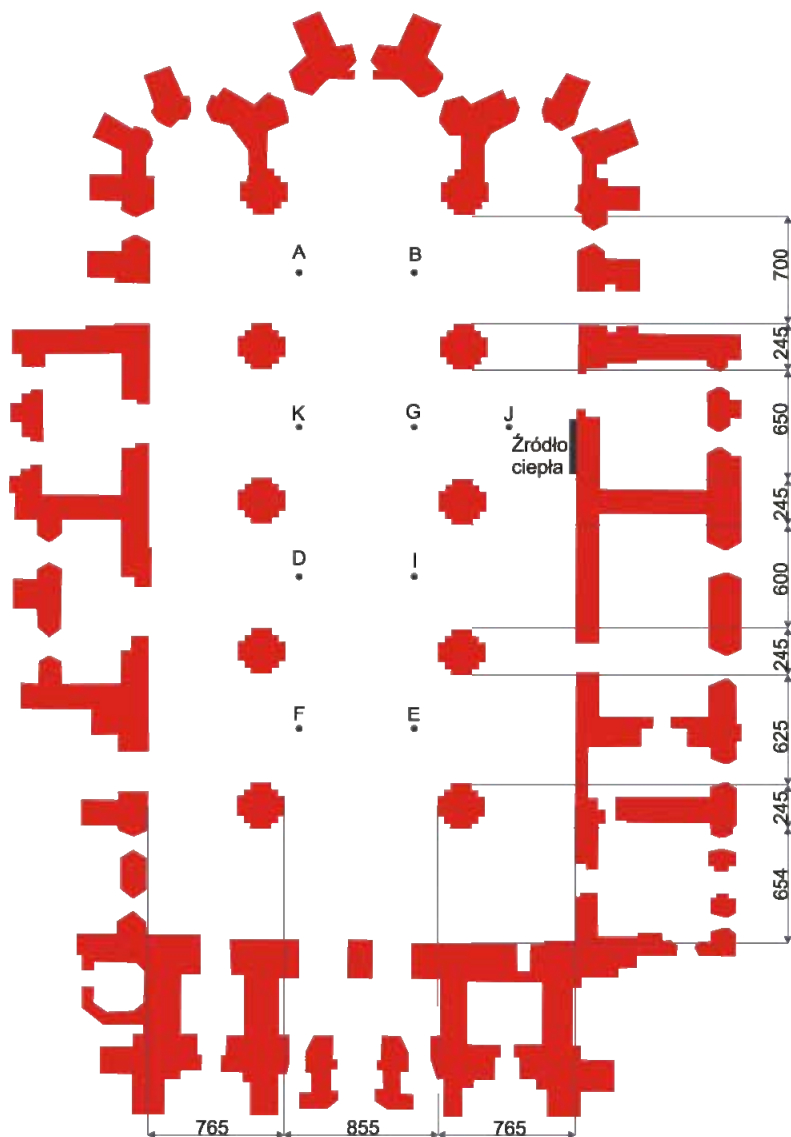


Rys. 6.12. Algorytm zapisu danych pomiarowych

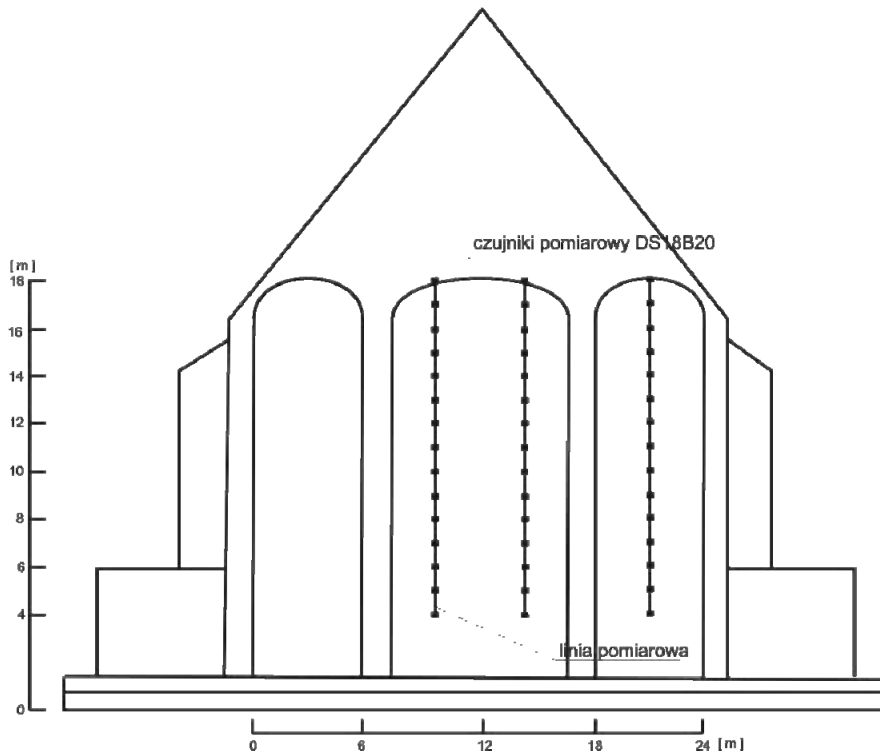
Źródło: opracowanie własne.

6.2. Wyniki pomiarów rozkładu temperatur

W celu wyznaczenia rozkładu temperatur występujących w Katedrze Opolskiej, zainstalowano mikroprocesorowy układ pomiarowy scharakteryzowany w rozdz. 6.1. Do pomiaru wykorzystano cyfrowe czujniki DS18B20 firmy Maxim (Dallas), które zainstalowano na liniach pomiarowych. Na każdej z nich znajdowało się po 16 czujników temperatury rozmieszczonych co jeden metr.



Rys. 6.13. Poziomy szkic rozmieszczenia linii pomiarowych w Katedrze Opolskiej
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.14. Pionowy szkic rozmieszczenia linii pomiarowych zainstalowanych w Katedrze Opolskiej

Źródło: opracowanie własne.

Do pomiarów przygotowano 18 linii pomiarowych oznaczonych kolejno literami A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R. Względy techniczne uniemożliwiły zainstalowanie wszystkich 18 linii, dlatego też układ ograniczono do 9, co pozwoliło na dokonywanie pomiaru temperatury jednocześnie w 144 punktach. W celu zainstalowania linii pomiarowych w Katedrze Opolskiej wykorzystano istniejące otwory w stropie, przez które zasilane są punkty oświetleniowe. Ich rozmieszczenie przedstawiono na rys. 6.13 i 6.14.

Pomiary temperatury wykonywano w szesnastu płaszczyznach poziomych począwszy od wysokości 4 m, a skończywszy na wysokości 19 m, przy czym ostatni czujnik pomiarowy znajdował się już poza strefą bezpośrednio ogrzewaną, pomiędzy stropem i dachem katedry. Poziom zera przyjęto na płaszczyźnie posadzki. Względy techniczne i architektoniczne zadecydowały o tym, że najniższy punkt pomiarowy usytuowano na wysokości 4 m. Katedra Opolska jest obiektem często odwiedzanym przez wiernych, jak również często odprawiane są nabożeństwa, dlatego też układ pomiarowy należało rozmieścić w taki sposób, aby w jak najmniejszym stopniu została zakłócona wewnętrzna architekту-

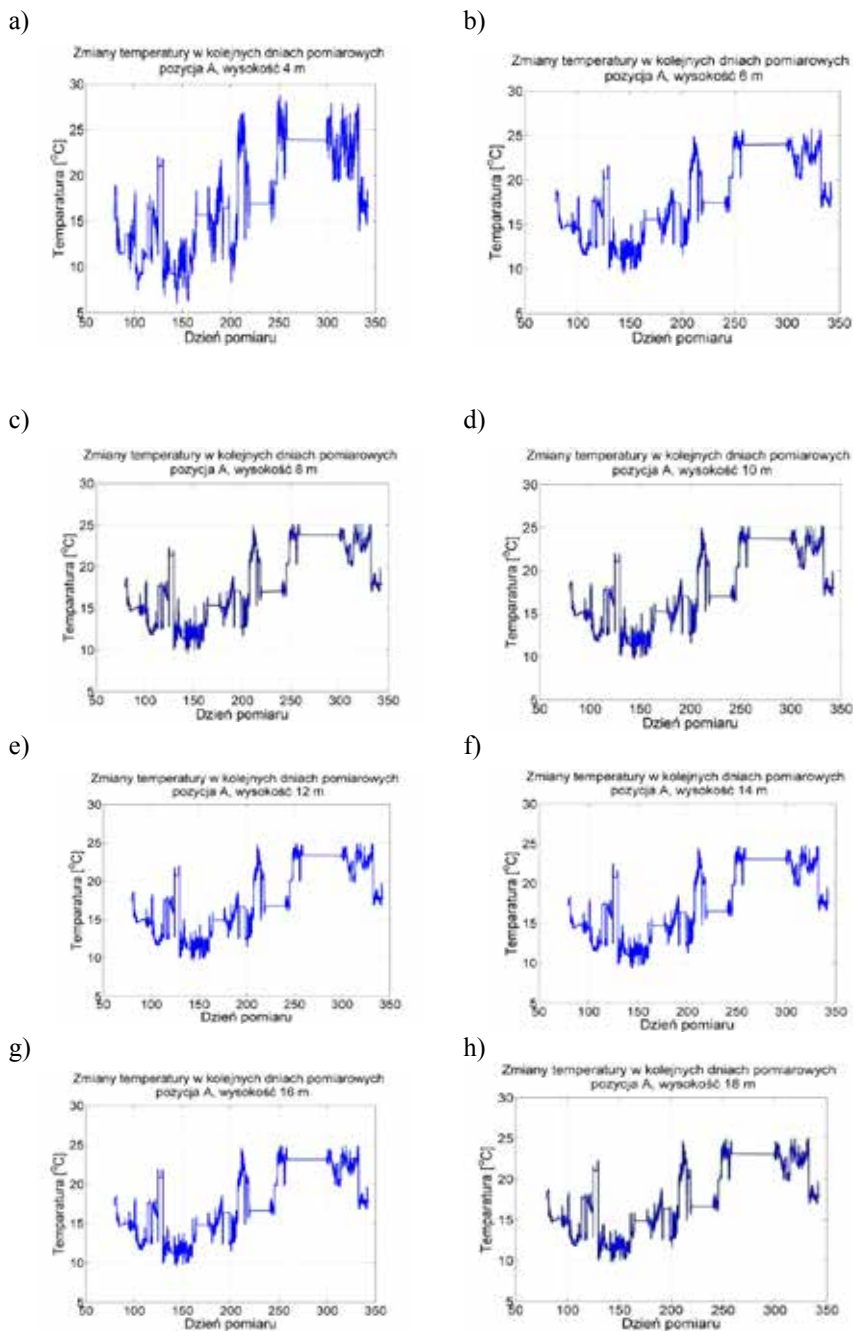
ra obiektu. Przykład zainstalowanych linii oraz układu pomiarowo-przesyłowego, jak również układu odbiorczo-archiwizującego przedstawiono na rys. 6.15. Pomiaru wykonywano co 5 minut w okresie od 01-03-2007 do dnia 31-12-2007, odczytując i rejestrując temperaturę z każdego czujnika.



Rys. 6.15. Widok ogólny poszczególnych elementów układu do pomiaru, rejestracji, przesyłu i archiwizacji danych pomiarowych. a) linia z zainstalowanymi czujnikami DS18B20, b) układ pomiarowo-nadawczy, c) mikroprocesorowy układ pomiaru i rejestracji danych, d) stanowisko odbioru i archiwizacji danych

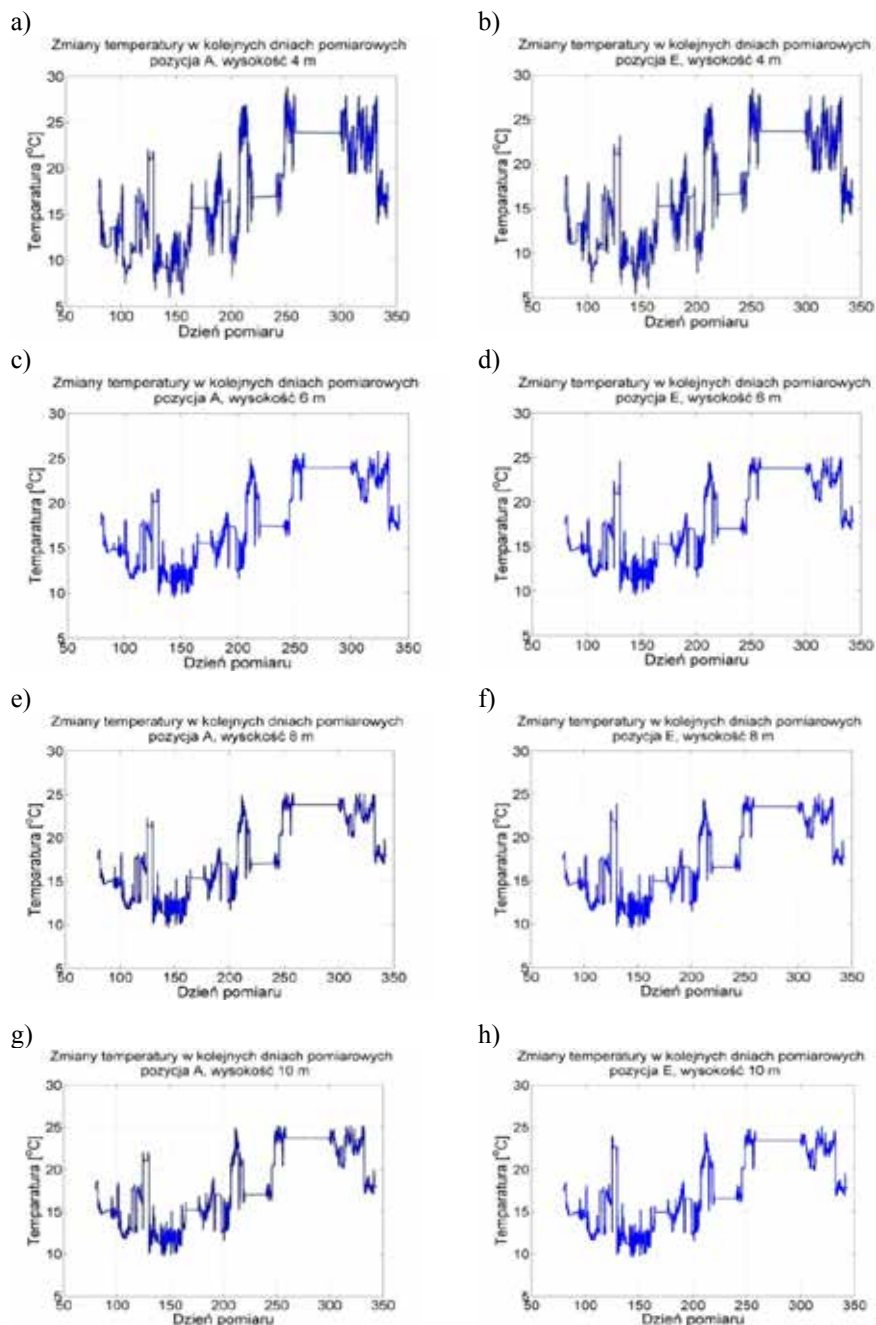
Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 6.16 przedstawiono wykresy zmian temperatury, jakie występowały w kolejnych dniach pomiarowych zarejestrowane przez linię A, odpowiednio na wysokościach: 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, i 18 m.



Rys. 6.16. Zmiany w czasie wartości temperatur występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane w punkcie pomiarowym A na wysokości od 4 do 18 m

Źródło: opracowanie własne.



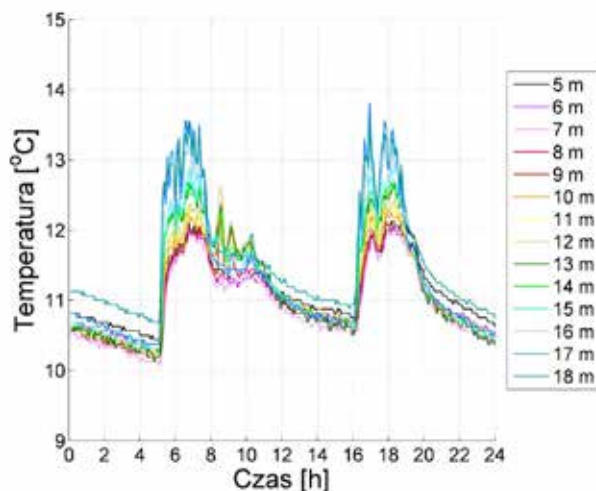
Rys. 6.17. Zmiany w czasie wartości temperatur występujące w ciągu okresu pomiarowego zarejestrowane w punkcie pomiarowym A i E na wys. od 4 do 10 m

Źródło: opracowanie własne.

Charakter zmian temperatury rejestrowany w punktach pomiarowych w ciągu całego okresu na poszczególnych wysokościach jest bardzo zbliżony i zmienia się w zależności od pory dnia. Największa amplituda zmian temperatury zachodzi na wysokości 4 m. Wraz ze wzrostem wysokości, dynamika zmian temperatury zmniejsza się. Spowodowane jest to m.in. działaniem systemu grzewczego oraz częstością otwierania drzwi wejściowych, które to ze względu na swoją lokalizację, w sposób najbardziej istotny wpływają na temperaturę występującą w dolnych strefach obiektu.

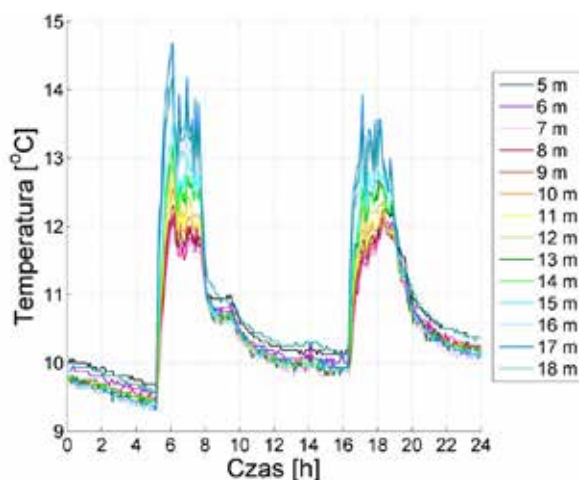
Wartości temperatury zmierzone w różnych punktach dla jednej wysokości są zbliżone. Przykładowe przebiegi temperatury zarejestrowane w ciągu okresu pomiarowego w punktach A i E odpowiednio na wysokościach: 4, 6, 8 i 10 m, przedstawiono na rys. 6.17. Na rys. 6.18 i 6.19 przedstawiono wykresy dobowe zmian temperatury zmierzone w pkt. G dla wybranych dni pomiarowych, przypadających na dzień roboczy. Widoczne gwałtowne przyrosty temperatury spowodowane są zadziałaniem systemu grzewczego, który w krótkim okresie czasu nie przekraczającym 1 h zwiększa temperaturę występującą w obiekcie o min. 2°C . W ciągu doby przypadającej na dzień pracy, system grzewczy uruchamiany jest dwukrotnie. W okresie doby świątecznej lub niedzielnej częstość włączeń systemu grzewczego jest większa w porównaniu do doby przypadającej na dzień roboczy. Wynika to z większej liczby mszy odprawianych w tym okresie. Przykładowe przebiegi temperatury zarejestrowanych w ciągu doby przypadającej na niedzielę, przedstawiono na rys. od 6.20 do 6.22. Zarówno na rys. 6.18 jak i na rys. 6.19 oraz na rys. od 6.20 do 6.22 widoczne są różnice temperatury rejestrowane na poszczególnych wysokościach, sięgające do $0,5^{\circ}\text{C}$ w okresie przerwy w pracy systemu grzewczego oraz przekraczające 2°C w okresie pracy systemu grzewczego. Wartości temperatury zarejestrowane w dniu 8-04-2007 roku, przedstawione na rys. 6.22, charakteryzują się małymi, nie przekraczającymi $0,5^{\circ}\text{C}$ różnicami występujących w poszczególnych punktach pomiarowych. Na taki rozkład wpływa praca systemu grzewczego, wymuszając obieg powietrza, co powoduje równomierne rozłożenie temperatury w całej jego objętości. Znacznie większe różnice, przekraczające $1,5^{\circ}\text{C}$, pomiędzy wartościami temperatury mierzone w tym samym momencie przez poszczególne czujniki umieszczone na jednej linii pomiarowej, ale na różnych wysokościach, widoczne są na rys. 6.23. W dniu 29-04-2007, system grzewczy już nie pracował, co skutkowało wystąpieniem różnic wartości temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych. Największe różnice temperatury mierzone w tym samym czasie na poszczególnych wysokościach, w okresie pomiarowym, wystąpiły w miesiącu maju. Różnica wartości temperatury mierzone przez skrajne czujniki umieszczone na wysokości 4 m i 18 m przekraczała 3°C , podczas gdy w pozostałych miesiącach okresu pomiarowego różnice temperatury nie przekraczały 2°C . Przykładowe, zarejestrowane w dniu 22-05-2007 wartości temperatury występujące w różnych punktach pomiarowych, przedstawiono na rys. od 6.24. do 6.27.

Na rys. od 6.28 do 6.31 zamieszczono wykresy dobowe prezentujące zmiany wartości temperatury występujące w dniu 4-03-2007 w obiekcie na tej samej wysokości, zarejestrowane przez czujniki umieszczone w poszczególnych liniach pomiarowych. Różnice wskazań wartości temperatury zarejestrowane przez poszczególne czujniki mieszczą się w przedziale od 0,5 do 1,0°C, co jest charakterystyczne dla całego okresu pomiarowego.



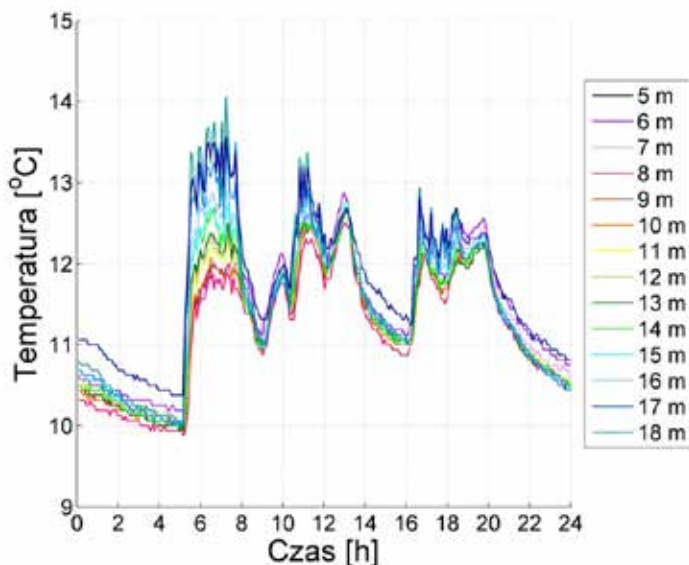
Rys. 6.18. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. G zmierzone w dniu 9-03-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



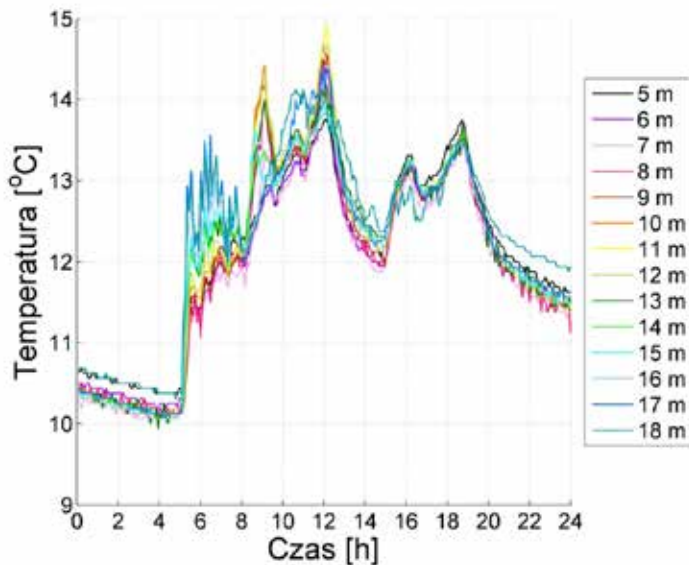
Rys. 6.19. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. G zmierzone w dniu 23-03-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



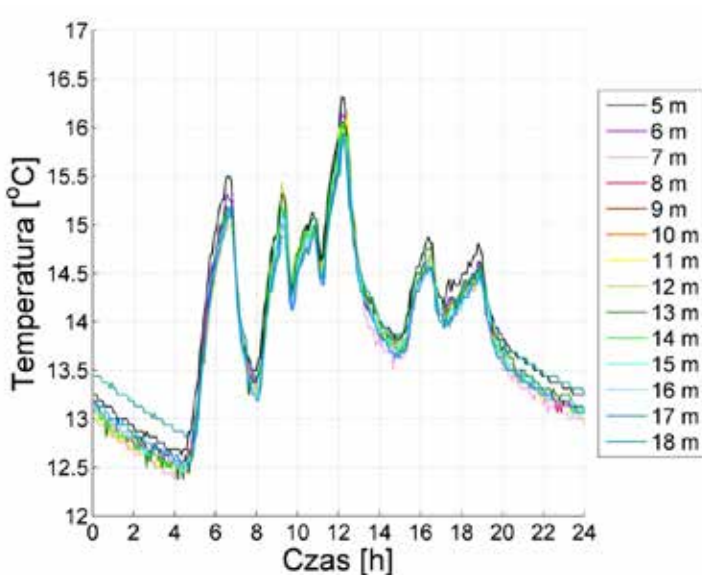
Rys. 6.20. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. G zmierzone w dniu 4-03-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



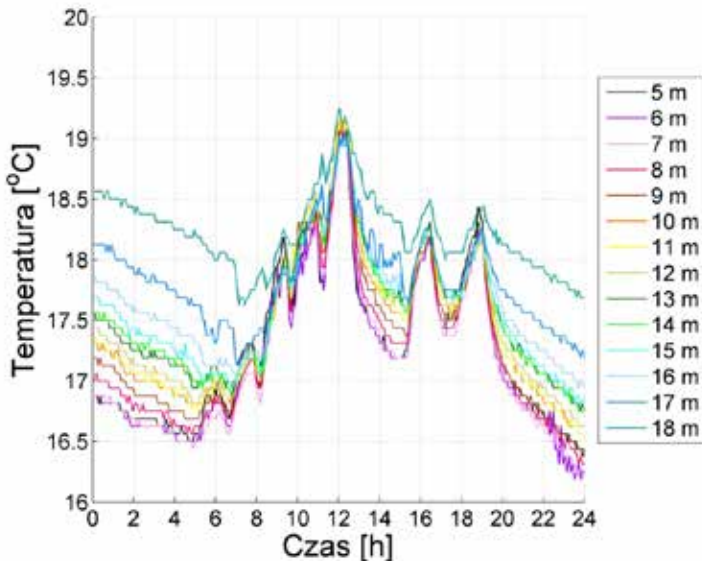
Rys. 6.21. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. G zmierzone w dniu 25-03-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



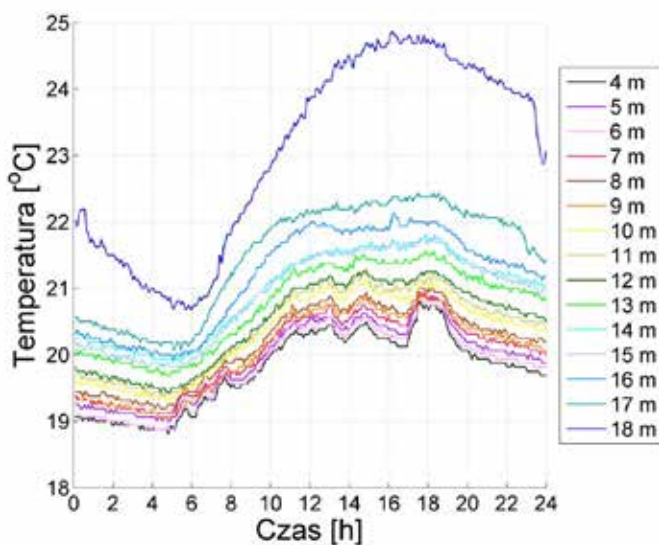
Rys. 6.22. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. G zmierzone w dniu 8-04-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



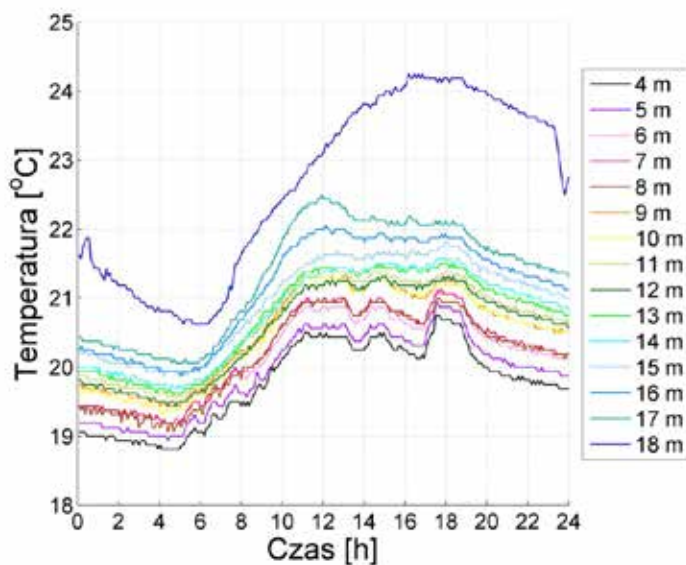
Rys. 6.23. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. G zmierzone w dniu 29-04-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



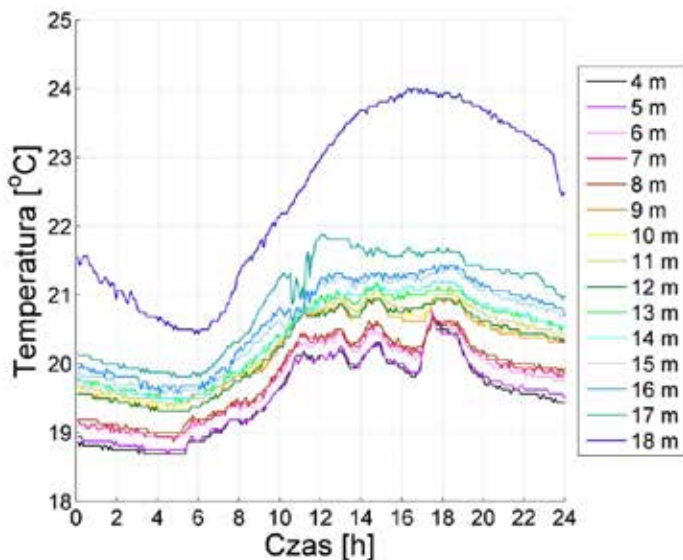
Rys. 6.24. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. A zmierzone w dniu 22-05-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



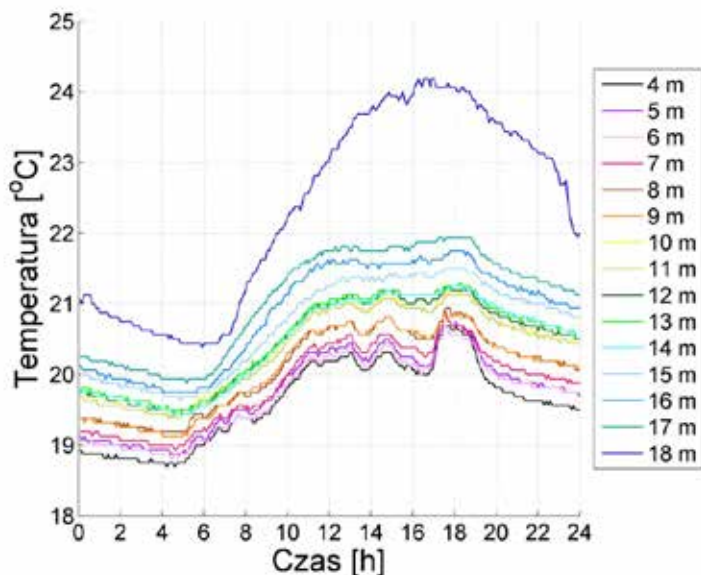
Rys. 6.25. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. B zmierzone w dniu 22-05-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.



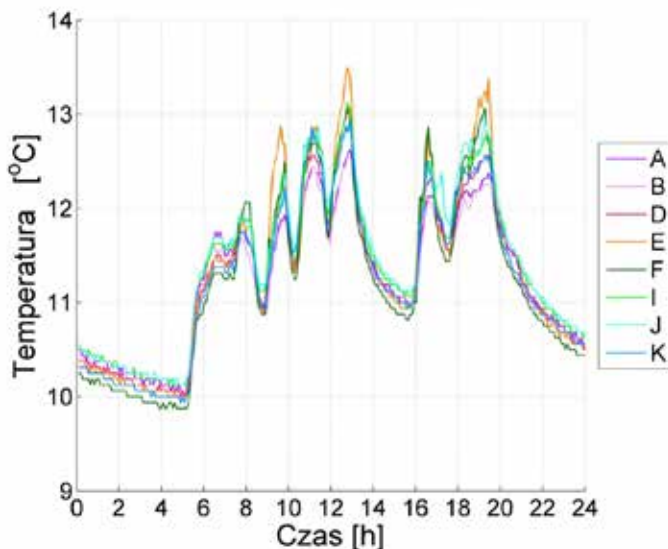
Rys. 6.26. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. E
zmierzone w dniu 22-05-2007 na różnych wysokościach

Źródło: opracowanie własne.

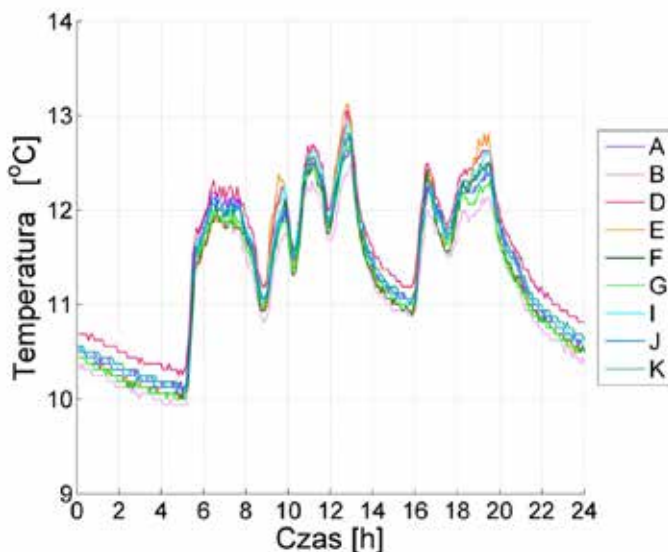


Rys. 6.27. Przykładowe zmiany temperatury występujące w pkt. K
zmierzone w dniu 22-05-2007 na różnych wysokościach

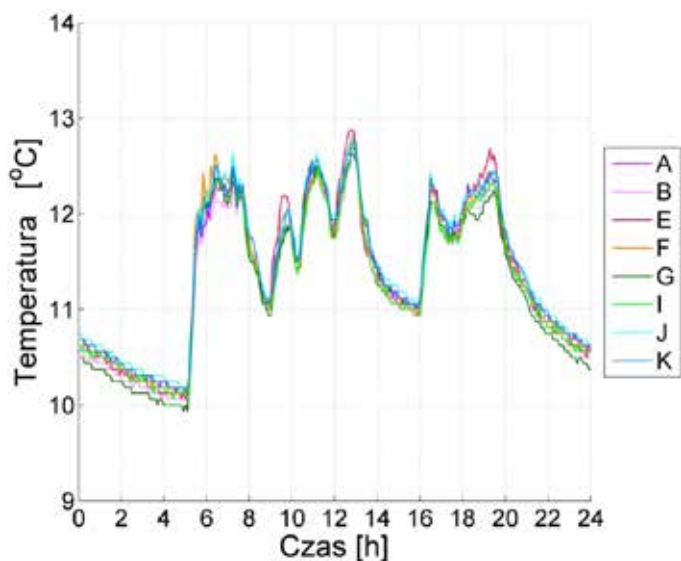
Źródło: opracowanie własne.



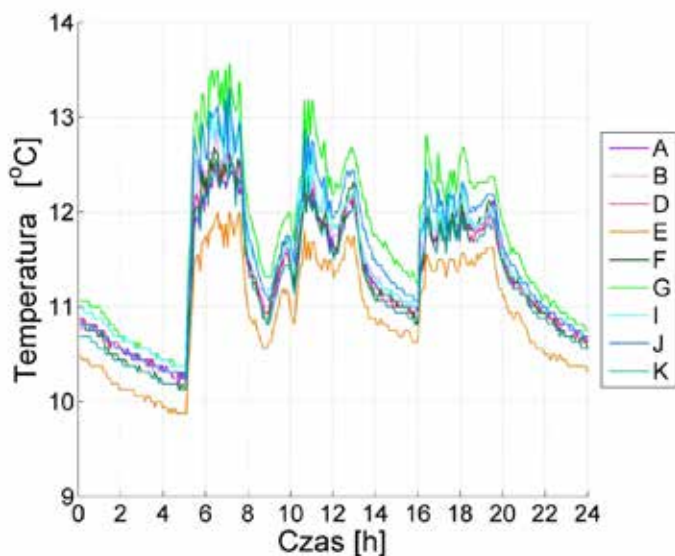
Rys. 6.28. Wykresy dobowe temperatur zarejestrowanych w dniu 4-03-2007 przez czujniki umieszczone na poszczególnych liniach pomiarowych na tej samej wysokości: 4 m
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.29. Wykresy dobowe temperatur zarejestrowanych w dniu 4-03-2007 przez czujniki umieszczone na poszczególnych liniach pomiarowych na tej samej wysokości: 8 m
Źródło: opracowanie własne.



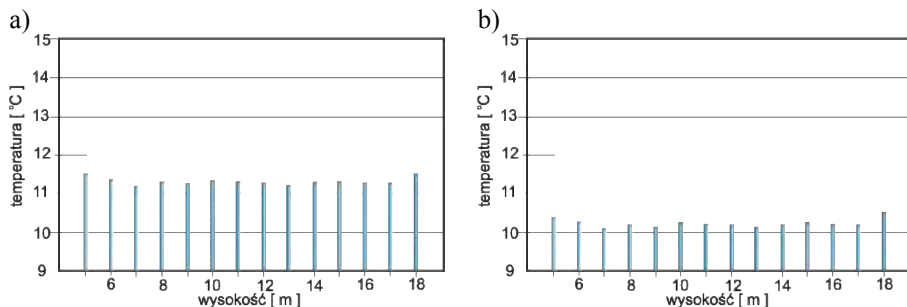
Rys. 6.30. Wykresy dobowe temperatur zarejestrowanych w dniu 4-03-2007 przez czujniki umieszczone na poszczególnych liniach pomiarowych na tej samej wysokości: 12 m
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.31. Wykresy dobowe temperatur zarejestrowanych w dniu 4-03-2007 przez czujniki umieszczone na poszczególnych liniach pomiarowych na tej samej wysokości: 18 m
Źródło: opracowanie własne.

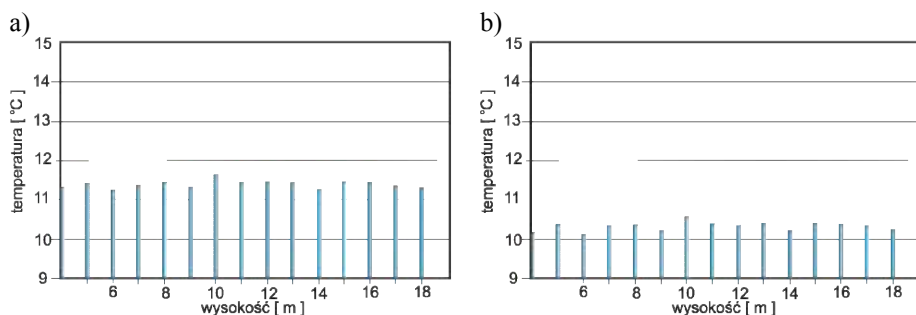
Na rys. od 6.32, do 6.34 przedstawiono przykładowe wykresy ilustrujące wartości temperatury zarejestrowane w dniu 10-03-2007 o godz. 18.05 oraz w dniu 11-03-2007 o godz. 03.28 dla poszczególnych wysokości w punktach pomiarowych: G, K oraz I. W sytuacji, kiedy system grzewczy jest wyłączony temperatura zmierzona w tym samym czasie w poszczególnych punktach w płaszczyźnie poziomej jest bardzo zbliżona, a rejestrowane różnice nie przekraczają $0,5^{\circ}\text{C}$. Podobna sytuacja występuje w przypadku analizy rozkładu temperatury w płaszczyźnie pionowej. Widoczne różnice również nie przekraczają $0,5^{\circ}\text{C}$.

Dla doby roboczej ogrzewanie uruchamiane jest dwukrotnie, tj. w okresie porannym i popołudniowym. Po upływie ok. 30 min od wyłączenia znikają lokalne ekstrema wywołane działaniem systemu grzewczego, a temperatura stabilizuje się na poszczególnych wysokościach. Sytuacja taka widoczna jest na rys. od 6.32a, do 6.34a. W okresie nocnym temperatura na poszczególnych wysokościach obniża się o ok. 1°C , co ilustrują rys. 6.32b, 6.33b oraz 6.34b.



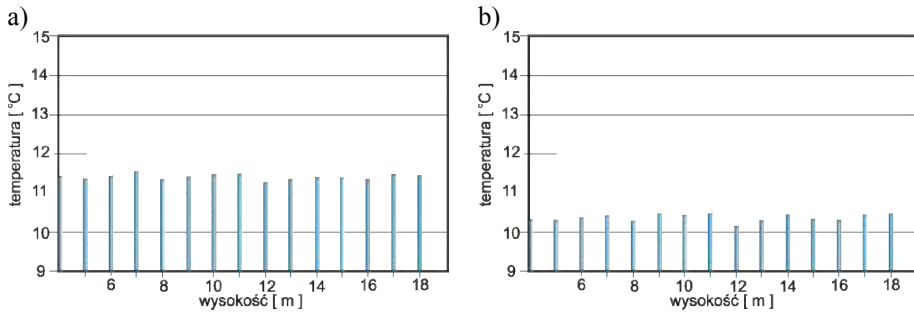
Rys. 6.32. Wykresy zależności temperatury od wysokości zarejestrowane przez linię pomiarową G w dniu: a) 10-03-2007 o godz. 18.05, b) 11-03-2007 o godz. 03.28

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.33. Wykresy zależności temperatury od wysokości zarejestrowane przez linię pomiarową K w dniu: a) 10-03-2007 o godz. 18.05, b) 11-03-2007 o godz. 03.28

Źródło: opracowanie własne.

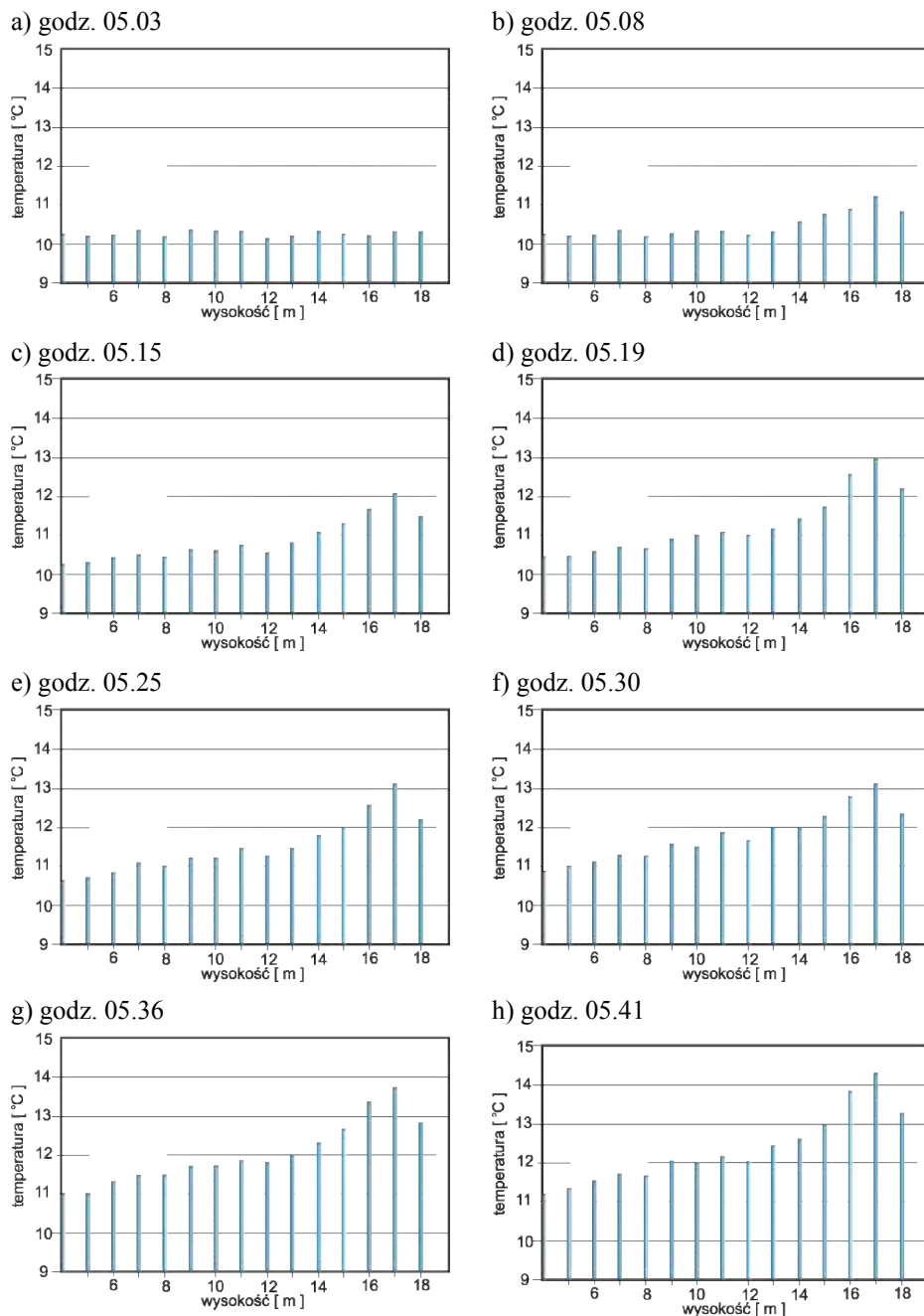


Rys. 6.34. Wykresy zależności temperatury od wysokości zarejestrowane przez linię pomiarową I w dniu: a) 10-03-2007 o godz. 18.05, b) 11-03-2007 o godz. 03.28

Źródło: opracowanie własne.

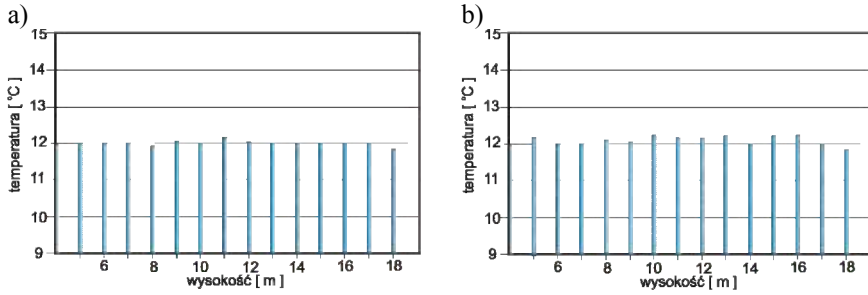
Każdego dnia w sezonie grzewczym, po godz. 5.00 uruchamiany był w Katedrze Opolskiej system grzewczy na okres ok. 2,5 godz. Dynamikę zmian temperatury w arbitralnie wybranym punkcie pomiarowym przedstawiono na rys. 6.35. Wykresy słupkowe ilustrują wartości temperatury zarejestrowane w dniu 11-03-2007 od godz. 05.03 do 05.41 przez linię I. Pierwszy pomiar (rys. 6.35a) wykonano bezpośrednio przed zadziałaniem systemu grzewczego. W tym czasie, różnica wartości temperatury dla poszczególnych wysokości nie przekracza $0,5^{\circ}\text{C}$, oscylując wokół wartości $10,2^{\circ}\text{C}$. O godz. 05.08 system grzewczy już pracował, co widoczne jest na rys. 6.35b. W wyniku ruchu konwekcyjnego powietrza, ciepło szybko przemieszcza się w górę i po 5 min pracy ogrzewania, na wysokości 17 m, temperatura wzrasta o 1°C . Podczas kolejnych minut pracy widoczny jest wzrost temperatury w pozostałych punktach. Po upływie 3 godz. od momentu włączenia ogrzewania, a po 30 min od momentu jego wyłączenia, temperatura stabilizuje się, oscylując wokół wartości 12°C w całym obiekcie. Ilustruje to rys. 6.36.

Na rys. 6.37 przedstawiono wykresy powierzchniowe przedstawiające dynamikę zmian temperatury w całym obiekcie bezpośrednio przed włączeniem systemu grzewczego oraz w czasie jego pracy. Przedstawione wyniki zarejestrowano w dniu 21-03-2008 w okresie od godz. 4.40 do godz. 6.44. Poszczególne płaszczyzny widoczne na wykresach, reprezentują wartości występujące na kolejnych wysokościach, na których zainstalowano czujniki temperatury, począwszy od 4 m, aż do 18 m. Przed zadziałaniem systemu grzewczego (rys. 6.37a) temperatura na poszczególnych wysokościach ma zbliżone wartości w całym obiekcie. Różnice nie przekraczają $0,5^{\circ}\text{C}$. Natomiast różnica temperatury pomiędzy najniższym punktem pomiarowym a najwyższym nie przekraczała 1°C i mieściła się w przedziale od $9,5^{\circ}\text{C}$ do $10,5^{\circ}\text{C}$.



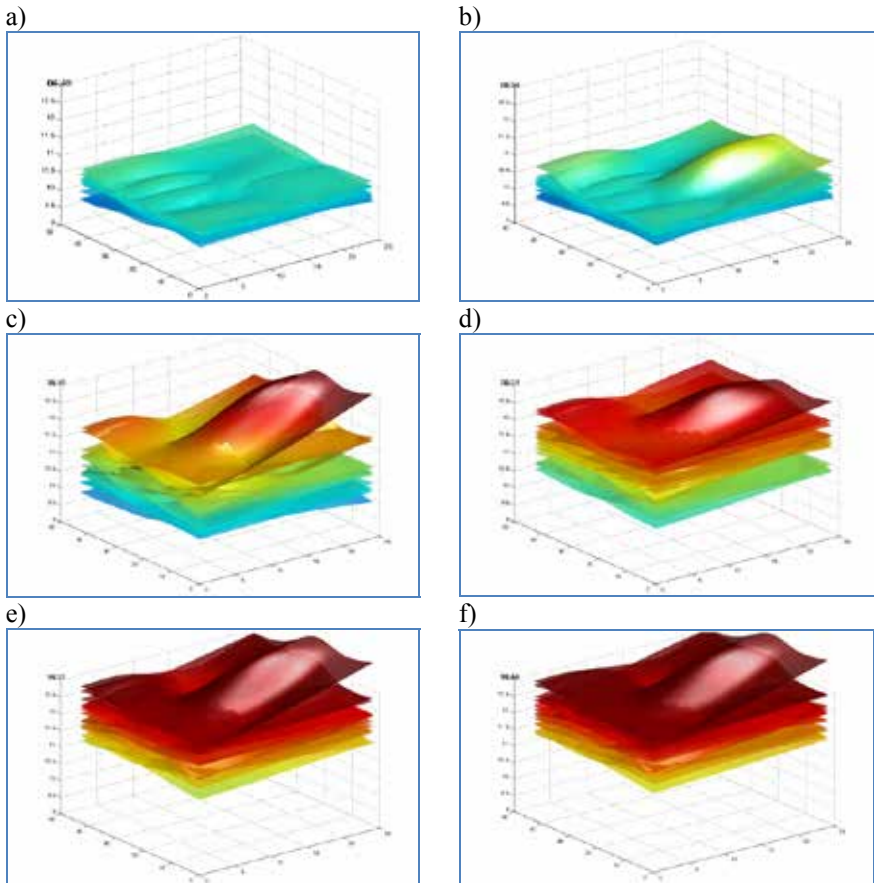
Rys. 6.35. Wykresy zależności temperatury od wysokości zarejestrowane przez linię pomiarową I w dniu 11-03-2007 o godz. od 05.03 do 05.41

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.36. Wykresy zależności temperatury od wysokości zarejestrowane w dniu 11-03-2007 o godz. 07.55 przez linię pomiarową: a) I, b) K

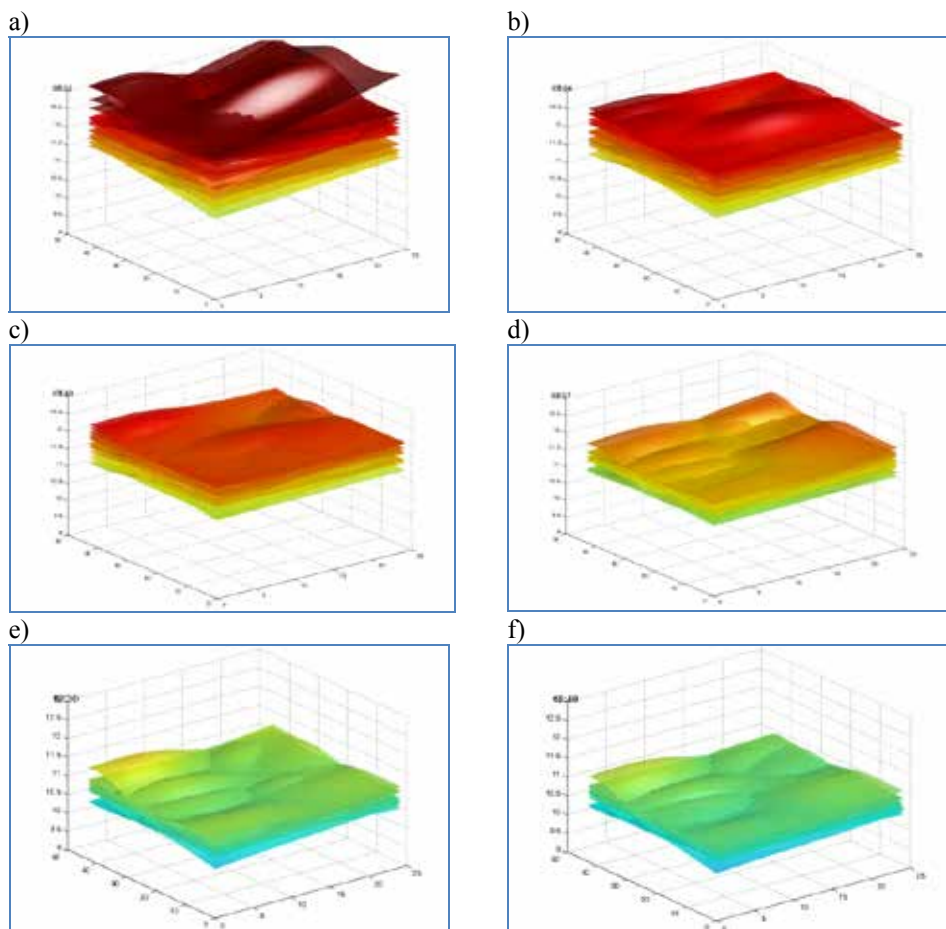
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.37. Dynamika zmian temperatury powietrza wewnątrz obiektu spowodowana zadziałaniem systemu grzewczego zarejestrowana w dniu 21-03-2008 w godz. pomiędzy 4.40 a 6.44

Źródło: opracowanie własne.

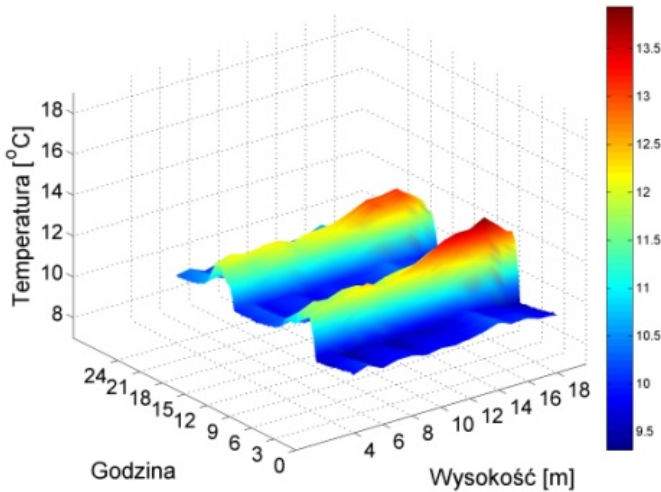
Podczas pracy systemu grzewczego widoczne jest lokalne ekstremum temperatury. Jest ono spowodowane usytuowaniem punktu, którym strumień ciepłego powietrza dostarczany jest do obiektu. Najwyższą, bo po upływie 11 min, temperatura wzrasta na wysokości 18 m, uzyskując lokalnie wartość $12,9^{\circ}\text{C}$ (rys. 6.37c), co jest wynikiem konwekcyjnego ruchu mas powietrza. Dalsza praca systemu grzewczego powoduje wzrost temperatury na niższych wysokościach. Po upływie 2 godz. od momentu włączenia systemu grzewczego, temperatura wzrasta o ponad 2°C na wysokości 4 m, uzyskując wartość 11°C , natomiast na wysokości 18 m wzrasta o 4°C , uzyskując $13,5^{\circ}\text{C}$ (rys. 6.37e,f). Wyłączenie systemu grzewczego powoduje zanik lokalnych ekstremów i ustabilizowanie się temperatury w całym obiekcie, co przedstawiono na rys. 6.38.



Rys. 6.38. Dynamika zmian temperatury powietrza wewnątrz obiektu po wyłączeniu systemu grzewczego zarejestrowana w dniu 21-03-2008 w godz. pomiędzy 07.12 a 13.48
Źródło: opracowanie własne.

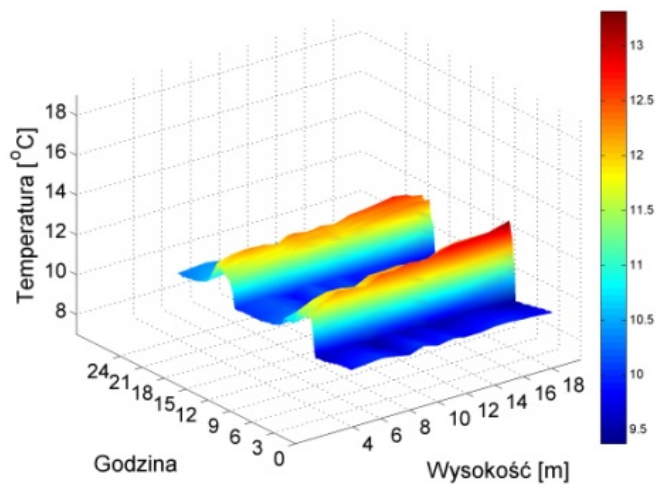
Na kolejnych rys. począwszy od 6.39 do 6.46 przedstawiono wykresy sporządzone na podstawie pomiarów wykonanych w dniu 23-03-2007 ilustrujące wartości temperatury w wybranych punktach pomiarowych w zależności od wysokości dla całej doby. Widoczne są dwa ekstrema będące efektem okresowej pracy systemu grzewczego. Najwyższa temperatura występowała w strefach górnych na wysokości 16 oraz 17 m w okresie od godz. 6.00 do 9.00. Różnice pomiędzy wskazaniem w dolnych i górnych strefach pomiarowych nie przekraczały $2,5^{\circ}\text{C}$.

Odmienne przebiegi zmienności temperatury w ciągu doby widoczne są w okresie, kiedy system grzewczy był wyłączony. W tym czasie występuje jedno ekstremum w godzinach pomiędzy 15.00 a 19.00, wywołane bezpośrednim oddziaływaniem insolacji słonecznej i temperatury zewnętrznej. Przykładowe przebiegi zależności temperatury w funkcji czasu dla doby wiosennej, przedstawiono na kolejnych rys. od 6.47 do 6.52.



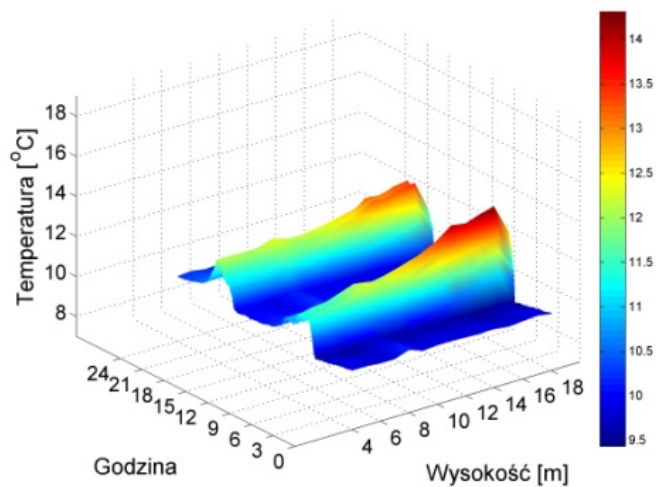
Rys. 6.39. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego A

Źródło: opracowanie własne.



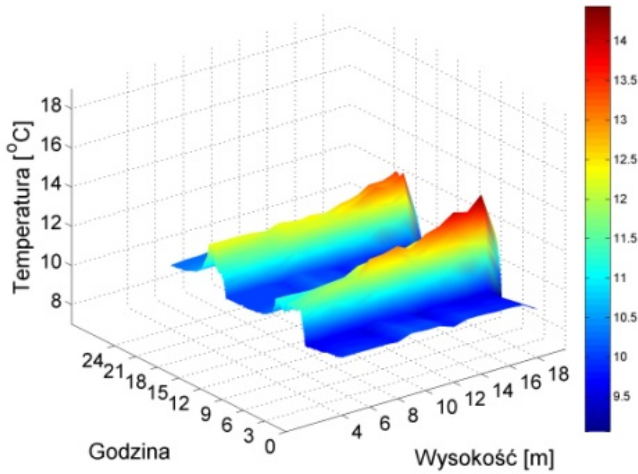
Rys. 6.40. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego B

Źródło: opracowanie własne.



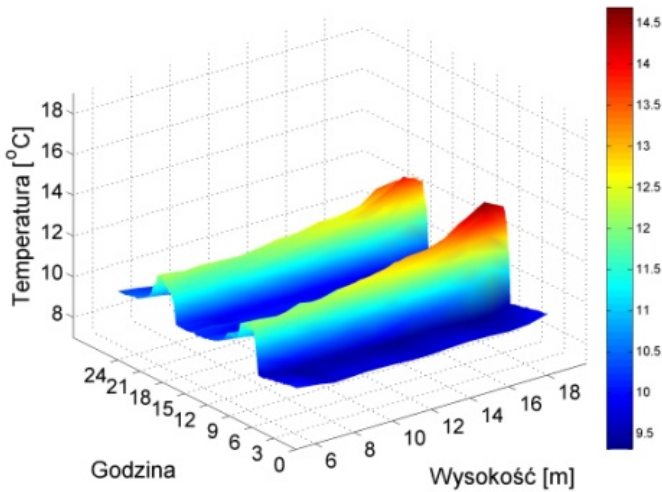
Rys. 6.41. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego D

Źródło: opracowanie własne.



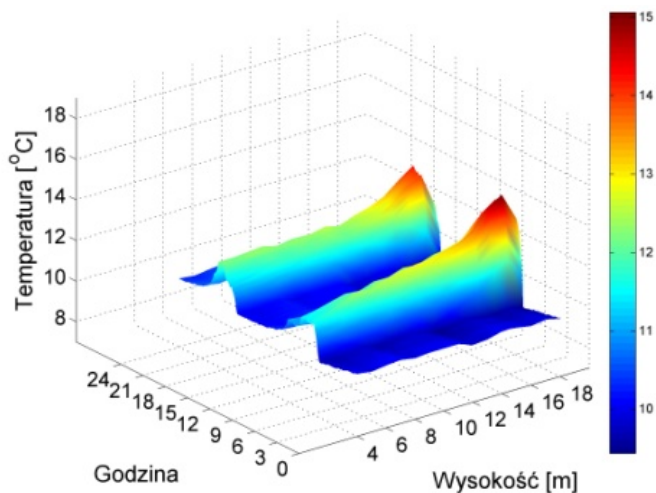
Rys. 6.42. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego E

Źródło: opracowanie własne.



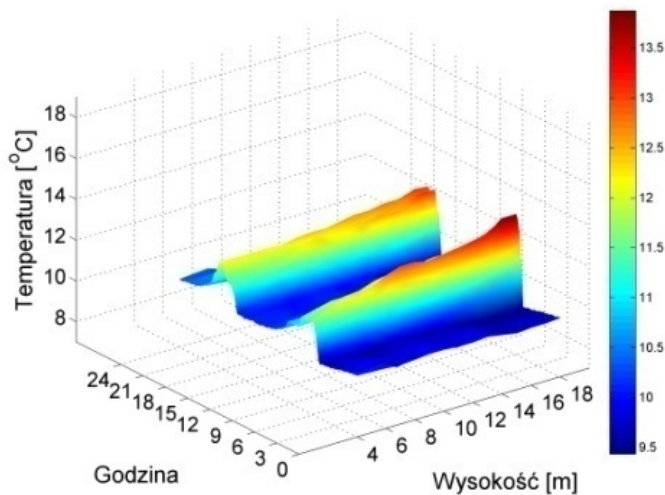
Rys. 6.43. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego G

Źródło: opracowanie własne.



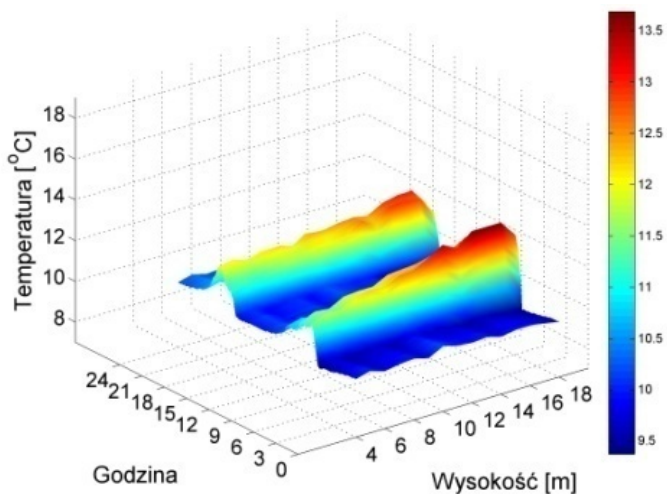
Rys. 6.44. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego I

Źródło: opracowanie własne.



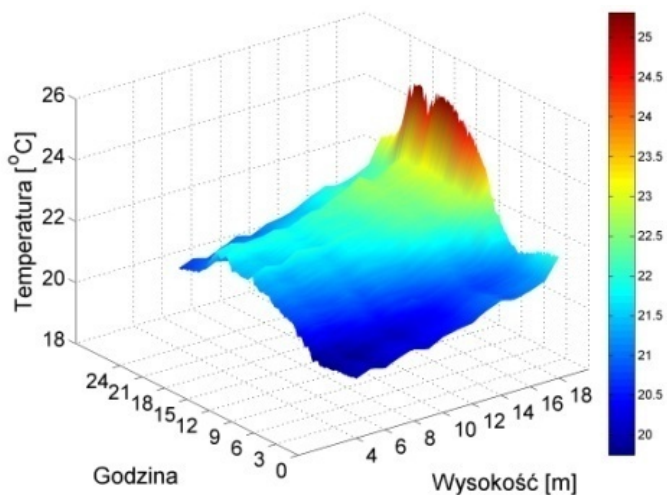
Rys. 6.45. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego J

Źródło: opracowanie własne.



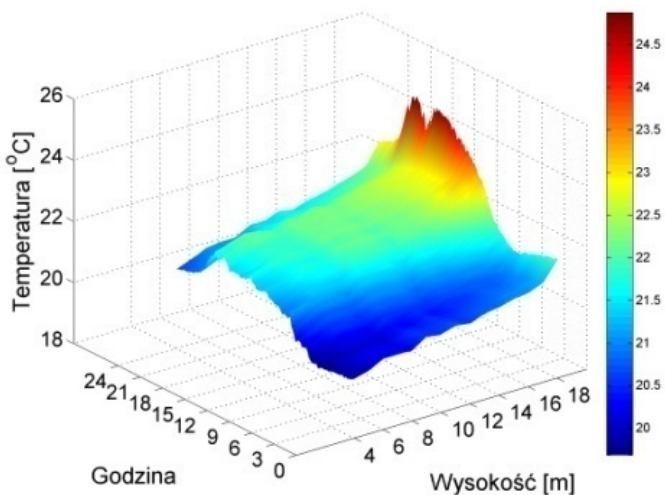
Rys. 6.46. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 23-03-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego K

Źródło: opracowanie własne.



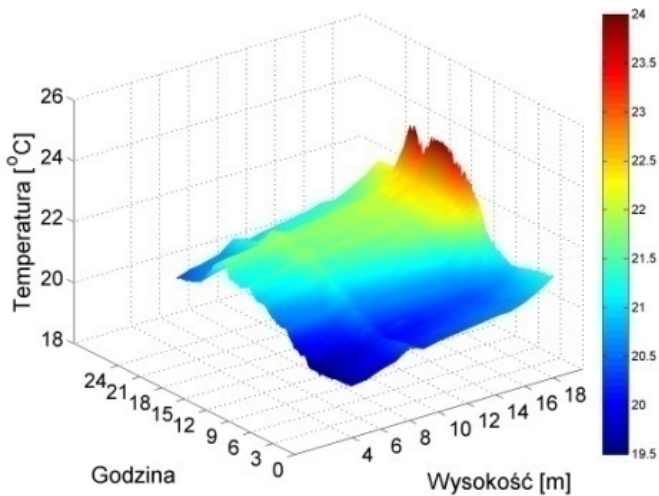
Rys. 6.47. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 25-05-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego A

Źródło: opracowanie własne.



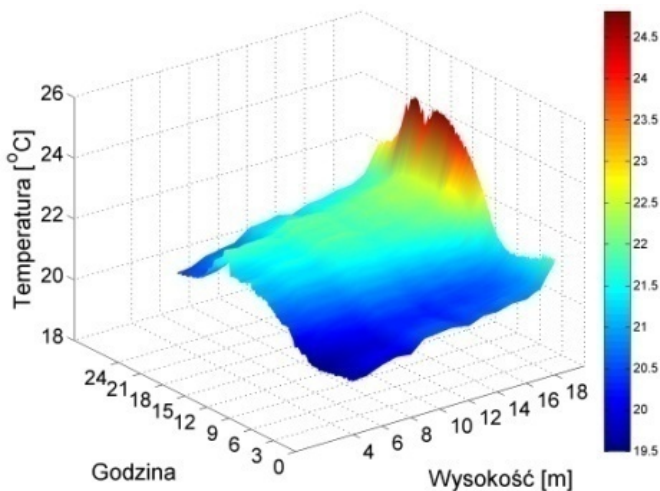
Rys. 6.48. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 25-05-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego B

Źródło: opracowanie własne.



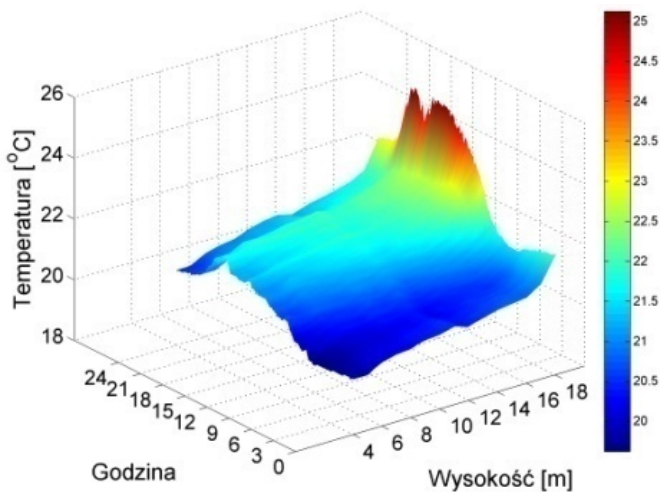
Rys. 6.49. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 25-05-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego D

Źródło: opracowanie własne.



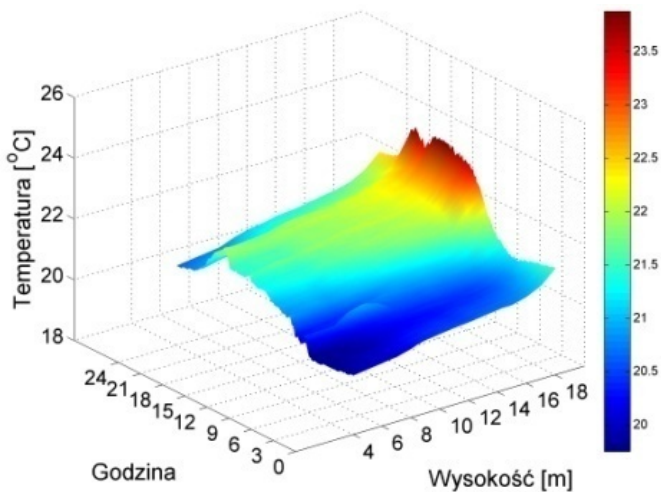
Rys. 6.50. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 25-05-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego E

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.51. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 25-05-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego I

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6.52. Wykresy zależności temperatury rejestrowanej w ciągu doby w dniu 25-05-2007 w funkcji wysokości wyznaczonej dla punktu pomiarowego J

Źródło: opracowanie własne.

7. Zastosowanie modelowania numerycznego do prognozowania rozkładu temperatury w obiekcie sakralnym ogrzewanym ciepłym powietrzem

Rozwój metod analizy niestacjonarnych procesów wymiany ciepła oraz techniki obliczeniowej umożliwił modelowanie dynamiki cieplnej całych budynków oraz wybranych pomieszczeń. Modele te najczęściej wykorzystuje się w celu:

- określenia obciążenia dynamicznego, czyli wyznaczenia wielkości zmiennego strumienia ciepła niezbędnego do utrzymania wymaganych parametrów termicznych w pomieszczeniu lub budynku,
- symulacji przebiegów temperatury w pomieszczeniach budynku dla konkretnych, zadanych parametrów klimatu zewnętrznego,
- określania całkowitego zapotrzebowania budynku w energię cieplną w dowolnie wybranym okresie [14].

W literaturze można znaleźć publikacje dotyczące modelowania numerycznego pozwalającego wyznaczyć teoretyczny rozkład temperatury, wilgotności czy przepływu powietrza w pomieszczeniach. Niektórzy autorzy analizują komfort cieplny w danym pomieszczeniu, dążąc do wyboru najbardziej właściwego systemu wentylacji, klimatyzacji lub ogrzewania [96-107]. Inni badają wpływ różnych czynników na zniszczenie ścian, murów czy też obiektów znajdujących się we wnętrzach analizowanych pomieszczeń [108,109]. Motywacją prowadzonych badań bywa deficyt teorii zagadnień oraz wyników eksperymentalnych, szczególnie w obiektach o znacznych wymiarach, a dotyczących badanych parametrów fizycznych mikroklimatu, wpływających na komfort cieplny osób przebywających w pomieszczeniach. Na przykład w [96] autorzy mierzą rozkład temperatury oraz wektorów prędkości powietrza w pomieszczeniu ogrzewanym ciepłym powietrzem. Źródło ciepła umieszczane jest w różnych miejscach obiektu w celu wyznaczenia różnic oraz znalezienia optymalnej lokalizacji. Autorzy rozwiązują równania Naviera-Stokesa oraz równania energii metodą numeryczną za pomocą programu SIMPLE(C). W modelu badany jest przepływ gazu nieściśliwego, w czasie przepływu laminarnego w stanie ustalonym.

W artykule [110] autorzy przedstawili wyniki symulacji z wykorzystaniem metody CFD (ang: Computational Fluid Dynamics) mającej na celu predykcję przepływu powietrza w budynku o bardzo dużej powierzchni. Wyniki zweryfikowano z danymi pochodzącymi z eksperymentów. Motywacją dla stworzenia modelu matematycznego były problemy z nowo zainstalowanym systemem grzewczo-wentylacyjnym, które postanowiono rozwiązać za pomocą symulacji przepływu turbulentnego zamodelowanego w programie FLUENT. Natomiast w pracy [111] autorzy przedstawili wyniki pomiarów oraz modelowania przepływu powietrza w małym pomieszczeniu. W innym artykule [100] autorzy zbadali wpływ geometrii pomieszczenia na przepływ powietrza pompowanego z systemu wentylacyjnego. Porównane zostały wyniki trzech metod symulacji numerycznych CFD w przestrzeni trójwymiarowej. Szczególnie interesującym było określenie wpływu przeszkód (mebli, wyposażenia, ścianek) w pomieszczeniu na rozkład wektorów przepływu powietrza oraz na rozkład temperatur. Badano zarówno przepływ laminarny jak również turbulentny. Wyniki symulacji zweryfikowano z pomiarami otrzymanymi za pomocą eksperymentów. Wyniki modelowania przepływu powietrza dla obiektów o nietypowym kształcie jakim jest kopia, przedstawili autorzy w pracy [112].

W innych publikacjach [113-119] autorzy badają rozkłady temperatury, prędkość przepływającego powietrza, wilgotność lub koncentrację pyłów w budynkach wyposażonych w klasyczne oraz podziemne systemy wentylacji i ogrzewania.

W wielu publikacjach można znaleźć informacje dotyczące pomiaru: strat ciepła, wydajności cieplnej lub zapotrzebowania na energię cieplną. Tematyka ta poruszana jest między innymi w pracach [122-127].

Niektórzy autorzy w obliczeniach uwzględniają otwory okienne oraz zastosowanie szklanej architektury. Na przykład wpływ dużej liczby otworów okiennych na temperaturę wewnętrzną pomieszczenia został przedstawiony w pracy [128]. Pomiar przepływu ciepła przez otwór okienny (ang: double pane window with screen and siphon) przeprowadzono eksperymentalnie oraz wyliczono numerycznie metodą CFD w pracy [129]. Wyniki modelowania dużych otworów okiennych przedstawili autorzy w artykule [130] przy zastosowaniu metody COMIS. Wpływ stosowania szklanych elewacji w budynkach na temperaturę wewnętrzną przedstawiono również w publikacjach [131, 132]. Autorzy pracy [132] zajmowali się pomiarami eksperymentalnymi oraz rozwiązaniem numerycznym modelu mocno oszklonego budynku. Do tego celu opracowali metodę AIRGLAZE, która miała na celu poprawienie zdolności przewidywania zachowania się ciepła w badanych obiektach. Metoda ta zawiera moduł do obliczania przewodności i promieniowania ciepła w szklanych murach budynku. Dodatkowo został uwzględniony ruch powietrza w pomieszczeniu. Wyniki modelowania zweryfikowano z rezultatami pomiarów eksperymentalnych.

Wpływ różnego rodzaju materiałów PCM (ang. Phase Change Material), stosowanych do budowy ścian i sufitów, przedstawiono m.in. w pracach [98, 133-138]. Natomiast w publikacjach [139-143] określono wpływ fasady budynków i różnego rodzaju izolacji na straty ciepła. W artykule [144] autorzy prezentują wyniki badań przepływu ciepła przez mury i izolacje w budynkach podziemnych. Badają przepływ ciepła do ziemi, stosując metodę Interzone Temperature Profile Estimation – analityczne rozwiązanie rozkładu temperatury w izolacji. Metodę elementów skończonych stosują autorzy publikacji [98] w celu obliczenia przepływu ciepła i rozkładu temperatury w dwuwymiarowym modelu cegły, która zawiera materiał PCM. Celem prac była redukcja strat poprzez absorpcję ciepła w cegle przed jego przeniknięciem na zewnątrz (lub do wewnątrz, np. w upalne dni). Efektywność cieplna obliczana jest dla różnych sposobów umieszczenia PCM w cegle.

W artykułach [99, 145-154] przedstawiono badania dotyczące rozkładu temperatury oraz innych fizycznych parametrów określających komfort cieplny w budynkach z naturalną lub pasywną wentylacją. Przykładowo praca [145] opisuje wyniki badań skuteczności działania wentylacji naturalnej w specjalnie do tego celu zbudowanym pomieszczeniu. Badany obiekt ogrzewany był za pomocą gorącej płyty umieszczonej na dachu. Autorzy mierzyli temperaturę oraz obserwowali przepływ powietrza, który następnie wizualizowano za pomocą dymu. Obraz był nagrywany na wideo i analizowany. Symulacja CFD modelu turbulენტnego, przeprowadzona w programie FLUENT, zweryfikowana została dla stanu ustalonego oraz przejściowego z wynikami pomiarów eksperymentalnych. Wejścia i wyjścia mas powietrza oraz położenie gorącej płyty było zmieniane. Wyniki eksperymentu potwierdzone zostały w modelu matematycznym. Autorzy w publikacji [148] prezentują wyniki pomiaru jakości działania dwóch różnych systemów chłodzenia pasywnego w sześciopiętrowym budynku. Przepływ powietrza oraz ciepła, symulowany był w stanie przejściowym. Wentylacja modelowana była metodą CFD, a komfort cieplny osób przebywających w pomieszczeniu symulowano przy użyciu modelu Fanger'a. W pracy [146] badany był 100-letni klasztor buddystów znajdujący się w Tajlandii. Analizowano rozkład ciepła oraz przepływ powietrza w budynku. Motywacją wykonanych badań była chęć określenia komfortu cieplnego w klasztorze, gdzie nie istnieje żaden, oprócz naturalnego, system wentylacji. Naukowcy symulowali parametry w stanie przejściowym metodą CFD przy użyciu oprogramowania DOE-2. Autorzy artykułu [99] badali wpływ struktury kopułowej dachów w budynkach nie posiadających systemów wentylacji wymuszonej, na zużycie energii cieplnej. Zastosowany został termiczno-powietrzny trójwymiarowy model (3D-TAF) do predykcji rozkładu ciepła w budynku. Wyniki porównano z rezultatami otrzymanymi na drodze symulacji metodą CFD otrzymaną w programie COMSOL oraz z pomiarami.

Wymienione pozycje literaturowe uwzględniają prace dotyczące pomiarów oraz symulacji komputerowych czynników fizycznych jakie mogą wpływać na komfort cieplny, odczuwany przez osoby przebywające w różnego rodzaju pomieszczeniach. Przedstawiono również prace omawiające systemy wentylacji i ogrzewania oraz opisujące pomiary strat, wydajności i zużycia energii w budynkach.

W celu określenia rozkładu temperatury w obiekcie Katedry Opolskiej, jakie wystąpią po zainstalowaniu zaprojektowanego systemu grzewczego, opisanego w rozdz. 5.3, w monografii przeprowadzono modelowanie zjawisk cieplnych w środowisku COMSOL Multiphysics.

7.1. Modelowanie rozkładu pól temperaturowych w Katedrze Opolskiej

W badaniach komfortu cieplnego wymagana jest znajomość rozkładów temperatury i prędkości powietrza w analizowanym obszarze oraz rozkładu temperatury na powierzchni przegród budowlanych. Do ich opisu wykorzystuje się modele oparte na równaniach ciągłości przepływów, równaniu ruchu oraz transportu energii.

W celu wyznaczenia teoretycznego rozkładu temperatury w Katedrze Opolskiej w czasie pracy zaprojektowanego systemu grzewczego, zbudowano model matematyczny obiektu i przeprowadzono analizę numeryczną. Modelowanie przeprowadzono w środowisku COMSOL Multiphysics, wykorzystując moduł Heat Transfer Module, uwzględniając zjawisko kondukcji i konwekcji.

Podstawowe prawo przewodzenia (kondukcji) ciepła zdefiniował Fourier. Prawo to określa zależność gęstości strumienia ciepła \vec{q} od gradientu temperatury $\vec{\nabla}T$ i dla ciał izotropowych wyraża się wzorem [155,156]:

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T \quad (7.1)$$

gdzie: k – współczynnik przewodzenia ciepła.

Znak minus w równaniu (7.1) oznacza, że strumień energii rozchodzi się w kierunku przeciwnym do gradientu temperatury, czyli z miejsc o wyższej do miejsc o temperaturze niższej.

Dla ośrodka, który jest nieruchomy i znajduje się pod stałym ciśnieniem, bilans energii cieplnej wyraża się równaniem ciągłości:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}\vec{q} = 0 \quad (7.2)$$

gdzie: ρ – gęstość ośrodka, C_p – ciepło właściwe przy stałym ciśnieniu [155].

Podstawiając (7.1) do (7.2), otrzymuje się równanie przewodnictwa cieplnego [155]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(-k\vec{\nabla}T) = 0. \quad (7.3)$$

Jeżeli w ośrodku znajdują się źródła ciepła opisane poprzez ich wydajność, to równanie przewodnictwa ciepła można zapisać:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(-k\vec{\nabla}T) = Q \quad (7.4)$$

gdzie: Q – gęstość mocy źródeł ciepła [155].

Przenoszenie ciepła w ośrodkach ciekłych i gazowych może odbywać się na skutek konwekcji. Jeżeli w ośrodku zachodzą dwa sposoby przenoszenia ciepła (kondukcja i konwekcja), to gęstość strumienia ciepła można opisać równaniem:

$$\vec{q} = -k\vec{\nabla}T + \rho C_p T\vec{u}, \quad (7.5)$$

gdzie: \vec{u} – pole prędkości przepływu przy konwekcyjnej wymianie ciepła [155].

Po uwzględnieniu kondukcji i konwekcji równanie przewodnictwa ciepła przybiera następującą postać [155]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \operatorname{div}(-k\vec{\nabla}T + \rho C_p T\vec{u}) = Q \quad (7.6)$$

W jedno- i dwuwymiarowych modelach rozchodzenia się ciepła oprócz jego źródeł, można uwzględnić wymianę ciepła z otoczeniem przez promieniowanie. Przy takich mechanizmach, kierunki rozchodzenia się ciepła są prostopadłe do powierzchni ośrodka. Strumień ciepła wskutek wymiany z otoczeniem poprzez promieniowanie, można uwzględniać jako istnienie źródła na powierzchni ciała. Wymiana ciepła z otoczeniem opisana jest prawem Newtona, zgodnie z którym gęstość źródła jest proporcjonalna do różnicy temperatur ciała i otoczenia [155,156]:

$$Q = t_{trans}(T_{ext} - T) \quad (7.7)$$

gdzie: t_{trans} – współczynnik opisujący wymianę ciepła z otoczeniem, T_{ext} – temperatura otoczenia [157].

Wymianę ciepła na skutek promieniowania z powierzchni można uwzględnić wprowadzając do równania przewodnictwa cieplnego gęstość źródeł:

$$Q = C_{trans}(T_{ambtrans}^4 - T^4) \quad (7.8)$$

gdzie: C_{trans} – współczynnik przenoszenia ciepła przez promieniowanie, $T_{ambtrans}$ – temperatura zrównoważonego promieniowania elektromagnetycznego w otoczeniu [157].

Podstawiając gęstości źródeł (7.7) i (7.8) do równania (7.4) otrzymuje się zależność przewodnictwa cieplnego dla zadań jednowymiarowych i dwuwymiarowych w najbardziej ogólnej postaci [157]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(-k\vec{\nabla}T) = Q + t_{trans}(T_{ext} - T) + C_{trans}(T_{ambtrans}^4 - T^4). \quad (7.9)$$

Dla zadań trójwymiarowych, wymianę ciepła z otoczeniem poprzez zjawisko konwekcji oraz promieniowania można uwzględnić poprzez warunki brzegowe na powierzchni ciała.

W środowisku COMSOL Multiphysics model matematyczny przekazywania ciepła przez przewodzenie opisano równaniem [157,158]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\vec{\nabla}T) = Q \quad (7.10)$$

gdzie: T – temperatura w rozpatrywanym punkcie, ρ – gęstość ośrodka, C – pojemność cieplna, k – współczynnik przenikania ciepła, Q – strumień ciepła [157].

W stanie ustalonym, temperatura nie zmienia się w czasie, co powoduje, że wartości pojemności cieplnej C i gęstości ośrodka ρ w równaniu (7.10) nie występują. Jeżeli przewodność cieplna jest anizotropowa, współczynnik k staje się tensorem przewodności cieplnej o następującej postaci [157]:

$$k = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}. \quad (7.11)$$

W modelu przewodzenia i konwekcji, równanie opisujące strumień ciepła Q zawiera również człon konwekcyjny. W środowisku COMSOL Multiphysics

funkcja ta dostępna jest w module General Heat Transfer, a wyznaczana na podstawie zależności [157,158]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\nabla T + \rho C_p T \mathbf{u}) = Q \quad (7.12)$$

gdzie: C_p – pojemność cieplna przy stałej wartości ciśnienia, \mathbf{u} – wektor prędkości przepływu.

W zależności (7.12) wyrażenie $(-k\nabla T + \rho C_p T \mathbf{u})$ definiowane jest jako wektor przepływu ciepła i oznaczane symbolem \dot{q} . W przypadku transportu ciepła równocześnie przez przewodzenie i konwekcję, q można wyznaczyć na podstawie zależności [157,158]:

$$\dot{q} = (-k\nabla T + \rho C_p T \mathbf{u}). \quad (7.13)$$

Jeżeli przekazywanie ciepła odbywa się wyłącznie na drodze przewodzenia, \dot{q} można wyznaczyć na podstawie zależności [157,158]:

$$\dot{q} = -k\nabla T. \quad (7.14)$$

W procesie modelowania rozkładu temperatur w obiekcie Katedry Opolskiej, przyjęto wymianę ciepła w oparciu o konwekcję oraz przewodzenie, - opisaną w środowisku COMSOL Multiphysics następującym równaniem [157,158]:

$$-\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T + C_p \mathbf{u} T) = q_0 + h(T_{\text{inf}} - T) \quad (7.15)$$

gdzie: \mathbf{n} – wektor jednostkowy prostopadły do powierzchni, h – współczynnik przewodnictwa cieplnego, k – współczynnik przenikania ciepła wynoszący 8 W/m²K, T_{inf} – temperatura otoczenia na granicy ośrodka równa 0°C.

W modelu przyjęto, że ściany, sufit i podłoga wykonane są z betonu o współczynniku przewodnictwa cieplnego λ wynoszącym 1,8 W/m²K oraz gęstości ρ równej 2300 kg/m³. Ciepło właściwe C_p przy stałym ciśnieniu wynosi 385 J/kg·K. Parametry powietrza wypełniającego obiekt zależą od temperatury oraz ciśnienia p , które ma wartość 1000 hPa. Temperatura początkowa w ośrodku wynosi 10°C. Zależności ciepła właściwego C_p i gęstości ρ od temperatury zdefiniowano następująco:

$$C_p(T) = 0,0769 * T + 1076,9, \quad (7.16)$$

$$\rho(p, T) = p * \frac{0,0288}{\frac{8,314}{T}}. \quad (7.17)$$

Model matematyczny składa się z szeregu równań różniczkowych cząstkowych, które w środowisku COMSOL Multiphysics rozwiązywane są za pomocą metody elementów skończonych przy zadanych warunkach brzegowych. Metoda elementów skończonych (MES) jest jedną z metod przybliżonych rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych przy zadanych warunkach brzegowych. Została rozwinięta w latach sześćdziesiątych dwudziestego wieku do celów obliczeń wytrzymałości konstrukcji. Szerokie jej wykorzystanie w różnych dziedzinach nauki nie byłoby możliwe bez szybkich obliczeń numerycznych z zastosowaniem komputerów. MES rozwinęła się w oparciu o metody przybliżone rozwiązywania zagadnień brzegowych z wykorzystaniem rachunku wariacyjnego oraz metod aproksymacji funkcji.

W obliczeniach wariacyjnych tworzone są funkcjonały, dla których wyznacza się ekstrema. Rozważane funkcjonały są określone na zbiorach funkcji, i zależą od jednej lub kilku funkcji oraz ich pochodnych, pełniących rolę argumentów funkcjonału. Wiele zjawisk fizycznych lub stanów obiektów czy systemów może być opisanych za pomocą funkcjonału, z warunkiem, aby funkcjonał przyjmował najmniejszą (lub największą) wartość (zasada wariacyjna). Matematyczne sformułowanie zasady wariacyjnej sprowadza się do warunku, aby całka charakterystyczna (funkcjonał) dla danego układu przy rzeczywistej zmianie zmiennej przyjmowała najmniejszą (lub największą) wartość, w porównaniu z wszystkimi możliwymi wartościami przy zadanych warunkach brzegowych.

Przyjmując oznaczenie L dla funkcji podcałkowej zależnej od pewnej liczby funkcji $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, charakteryzujących system oraz ich pochodnych $\partial\varphi_r/\partial x_s$. Zmienne, względem których wykonuje się całkowania, oznaczono przez x_1, \dots, x_m . Całkę, której minimum należy znaleźć można zapisać w postaci [155]:

$$\Lambda = \int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_n}^{b_n} L \left(\varphi_1, \dots, \varphi_n, \frac{\partial\varphi_1}{\partial x_1}, \dots, x_1, \dots, x_m \right) dx_1, \dots, dx_m. \quad (7.18)$$

Funkcja L występująca w wyrażeniu (7.18) nazywana jest gęstością funkcji Lagrange'a, gdzie $[a_i, b_i]$ – są przedziałami całkowania dla zmiennych x_i , a ($i = 1, \dots, m$).

Funkcje, poprzez które wyraża się funkcja L , powinny być wybrane w sposób szczególny tak, aby spełnić warunki osiągania przez całkę Λ najmniejszej (lub największej) wartości.

Oznaczmy wybrane funkcje przez $\varphi_1, \dots, \varphi_n$, a ich pochodne przez $\partial\varphi_r/\partial x_s$, natomiast odpowiadającą im wartość funkcjonału przez Λ . Niech zmiana funkcji φ_r (wariacja funkcji), zapisana zostanie jako $\delta\varphi_r = \varepsilon_r \eta_r$, gdzie ε_r – jest dostatecznie małą wielkością, a η_r – jest dowolną funkcją. Wariacje funkcji $\delta\varphi_r$ powodują zmiany pochodnych funkcji [155]:

$$\delta \frac{\partial\varphi_r}{\partial x_p} = \frac{\partial\delta\varphi_r}{\partial x_p} = \varepsilon_r \frac{\partial\eta_r}{\partial x_p}. \quad (7.19)$$

Po rozwinięciu funkcjonału Λ w szereg Taylora względem wariacji $\delta\varphi_r$, z uwzględnieniem tylko składników liniowych, otrzymuje się wyrażenie dla wariacji funkcjonału (przy założeniu niezmienności przedziałów całkowania). Dodatkowo wymagane jest spełnienie warunku, aby wariacje funkcji na granicach przedziałów całkowania przyjmowały wartości zerowe. Wówczas [155]:

$$\delta\Lambda = \int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_m}^{b_m} \sum_{r=1}^n \varepsilon_r \left(\frac{\partial L}{\partial\varphi_r} \eta_r + \sum_{s=1}^m \frac{\partial L}{\partial\left(\frac{\partial\varphi_r}{\partial x_s}\right)} \frac{\partial\eta_r}{\partial x_s} \right) \quad (7.20)$$

W wyniku całkowania drugiego składnika wyrażenia (7.20) względem zmiennej x_s (całkowanie przez części) uzyskuje się [155]:

$$\int_{a_s}^{b_s} \frac{\partial L}{\partial\left(\frac{\partial\varphi_r}{\partial x_s}\right)} \frac{\partial\eta_r}{\partial x_s} dx_s = \eta_r \frac{\partial L}{\partial\left(\frac{\partial\varphi_r}{\partial x_s}\right)} \Bigg|_{a_s}^{b_s} - \int_{a_s}^{b_s} \eta_r \frac{\partial}{\partial x_s} \left(\frac{\partial L}{\partial\left(\frac{\partial\varphi_r}{\partial x_s}\right)} \right) dx_s. \quad (7.21)$$

Pierwszy składnik wyrażenia (7.21) przyjmuje wartość zero. Wtedy pierwszą wariację funkcjonału (7.20) można zapisać [155]:

$$\delta\Lambda = \int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_m}^{b_m} \sum_{r=1}^n \varepsilon_r \eta_r \left(\frac{\partial L}{\partial\varphi_r} - \sum_{s=1}^m \left(\frac{\partial L}{\partial\left(\frac{\partial\varphi_r}{\partial x_s}\right)} \frac{\partial\eta_r}{\partial x_s} \right) \right) dx_1 \dots dx_m. \quad (7.22)$$

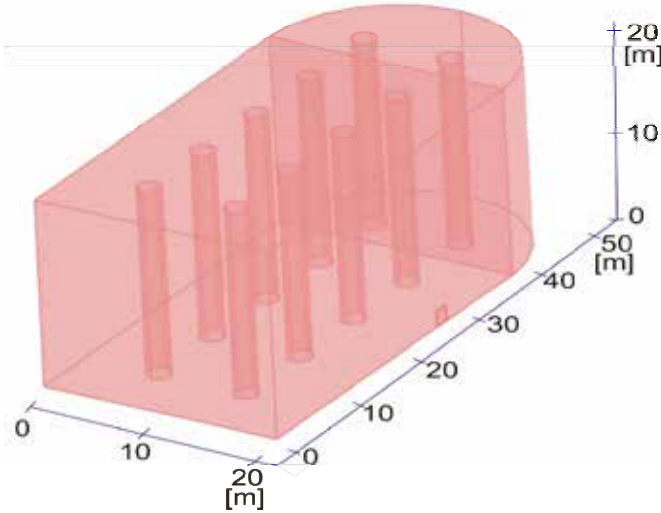
Aby funkcjonał Λ posiadał ekstremum, funkcje $\varphi_1, \dots, \varphi_n$ należy wybierać tak, by współczynniki przy wszystkich ε_r były równe zero (warunek ko-

nieczny istnienia ekstremum). Warunek ten prowadzi do następującego układu równań [155]:

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi_r} - \sum_{s=1}^m \frac{\partial}{\partial x_s} \left(\frac{\partial L}{\partial \left(\frac{\partial \varphi_r}{\partial x_s} \right)} \right) = \mathbf{0}, \quad (r = 1, \dots, n). \quad (7.23)$$

Równania powyższe noszą nazwę równań Eulera–Lagrange'a, a rozwiązania nazywa się ekstremalami funkcjonału Λ .

Geometria modelu matematycznego została tak skonstruowana, aby była zbliżona do rzeczywistego obiektu, dając jednocześnie możliwość przeprowadzenia obliczeń w akceptowalnym przedziale czasowym. Katedrę Opolską zamodelowano jako prostopadłościan o wymiarach zbliżonych do rzeczywistych: (24 m x 50 m x 18 m) z zaokrągloną ścianą przednią, co przedstawiono na rys. 7.1.



Rys. 7.1. Geometria Katedry Opolskiej przyjęta w modelu matematycznym

Źródło: opracowanie własne.

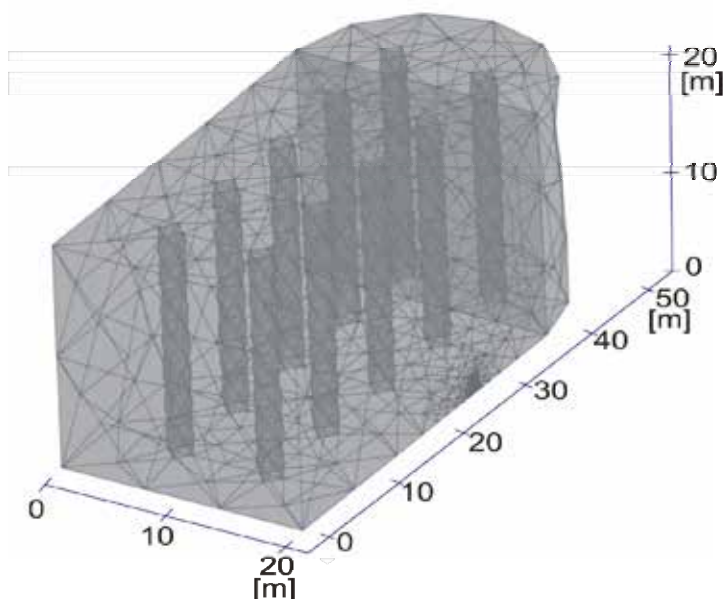
W modelu uwzględniono kolumny dzielące obiekt na część główną oraz dwie nawy boczne. Po prawej stronie bezpośrednio przy posadźce, zamodelowano punkt, którym ciepłe powietrze dostarczane jest do obiektu z systemu grzewczego.

Przy konstrukcji modelu matematycznego Katedry Opolskiej przyjęto następujące założenia:

- w geometrii nie uwzględniono otworów okiennych oraz drzwiowych,
- rzeczywista, skomplikowana geometria obiektu została uproszczona do prostej figury geometrycznej,

- system grzewczy zamodelowano jako źródło ciepła o gęstości strumienia wynoszącym $q_{\theta} = 80 \text{ kW/m}^2$,
- w modelu przyjęto stałą temperaturę ścian wynoszącą 10°C ,
- w każdym punkcie grubość ścian przyjęto na poziomie 0,5 m,
- przyjęto stałą temperaturę sufitu i podłogi równą 10°C ,
- w modelu założono całkowity brak ruchu powietrza wywołany innymi czynnikami niż w wyniku działania systemu grzewczego.

Na rys. 7.2 przedstawiono rozkład siatki składającej się z 3456 punktów, co daje 5184 stopni swobody.



Rys. 7.2. Siatka modelu matematycznego Katedry Opolskiej

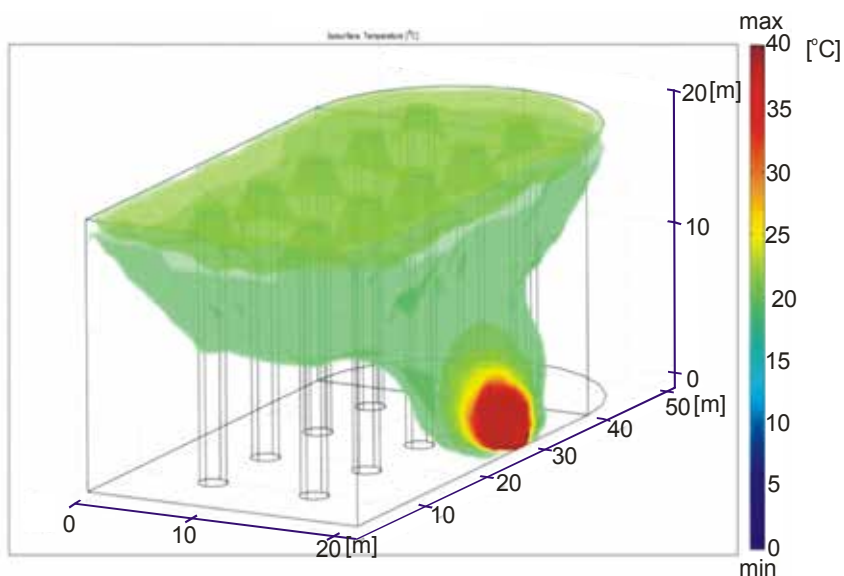
Źródło: opracowanie własne.

7.2. Wyniki modelowania numerycznego

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano teoretyczny rozkład temperatury w przyjętym modelu Katedry Opolskiej, który przedstawiono w formie przestrzennej na rys. 7.3. Najwyższa temperatura występuje w rejonie punktu zasilającego obiekt w ciepłe powietrze.

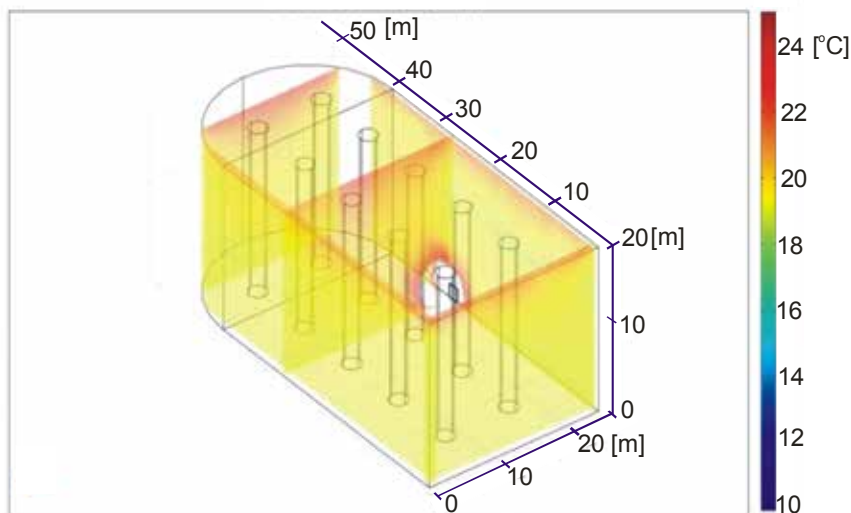
Ruch powietrza w modelowanym obiekcie jest w tym przypadku naturalnym ruchem konwekcyjnym, wywołanym zmianami gęstości poszczególnych cząstek, spowodowanej działaniem systemu grzewczego. Efektem tego jest występowanie wyższej temperatury w strefach pod sufitem, z wyłączeniem

punktu zasilającego oraz najbliższego obszaru oddziaływania systemu grzewczego, w stosunku do temperatury rejestrowanej przy posadźce w innych punktach obiektu.



Rys. 7.3. Rozkład temperatury w przyjętym modelu Katedry Opolskiej

Źródło: opracowanie własne.

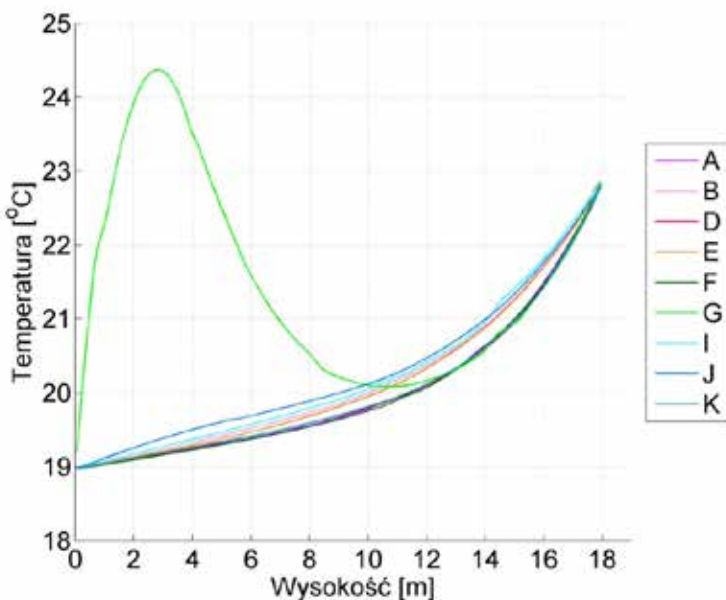


Rys. 7.4. Rozkład temperatury w wybranych płaszczyznach pionowych modelu Katedry Opolskiej

Źródło: opracowanie własne.

Rys. 7.4 przedstawia rozkład temperatury występujący na wybranych płaszczyznach pionowych modelu. Widoczne różnice temperatury w poszczególnych miejscach z wyłączeniem powierzchni, która zasila obiekt w ciepło, są niewielkie i nie przekraczają 2°C . Natomiast najwyższa rejestrowana temperatura występuje w strefie podsufitowej.

Na rys. 7.5 przedstawiono rozkład temperatury wyznaczony numerycznie w zależności od wysokości dla charakterystycznych punktów, wybranych zgodnie z miejscami, w których rozmieszczono linie pomiarowe w czasie badań empirycznych. Widoczna jest ścisła zależność temperatury od wysokości we wszystkich punktach pomiarowych z wyłączeniem punktu pomiarowego oznaczonego literą G (na rys. 7.5 krzywa oznaczona kolorem zielonym). Wraz ze wzrostem wysokości, rośnie również temperatura. W punkcie G, przebieg krzywej rozkładu temperatury jest różny w stosunku do krzywych, wyznaczonych w pozostałych punktach pomiarowych. Temperatura dla tego punktu jest najwyższa pomiędzy drugim a szóstym metrem, co spowodowane jest usytuowaniem kanału doprowadzającego ciepłe powietrze do obiektu i działaniem systemu grzewczego.



Rys. 7.5. Rozkład temperatury w zależności od wysokości dla poszczególnych punktów, w których zainstalowano linie pomiarowe, wyznaczony metodą numeryczną

Źródło: opracowanie własne.

7.3. Interpolacja danych pomiarowych rozkładów pól temperaturowych

W rozdz. 6.2 przedstawiono wyniki pomiarów temperatury w wybranych punktach. W celu zobrazowania temperatury na całej powierzchni poprzecznej w badanym obiekcie, dane pochodzące z dziewięciu linii pomiarowych, poddano interpolacji, stosując metodę RBF (ang. Radial Basis Function) [159, 160].

Wyniki pomiarów zebranych w dziewięciu różnych punktach pomiarowych oznaczono jako serię $t(h)$, gdzie $t=(t_1, t_2, \dots, t_9)$ są funkcjami temperatury w poszczególnych punktach pomiarowych $X=\{x_1, x_2, \dots, x_9\} \subset \mathbb{R}^2$ (x_i posiada dwie współrzędne w układzie kartezjańskim, dlatego określony jest poprzez \mathbb{R}^2). Serię $t(h)$ poddano interpolacji przy użyciu gausowskiej radialnej funkcji bazowej (RBF) $s(x)$, opisanej równaniami (7.25) i (7.26). Funkcja RBF jest znana i szeroko stosowaną, szczególnie w sieciach neuronowych, metodą wykorzystywaną do interpolacji danych w przestrzeniach wielowymiarowych.

Funkcja $s(x)$ określona jest następującym równaniem [160]:

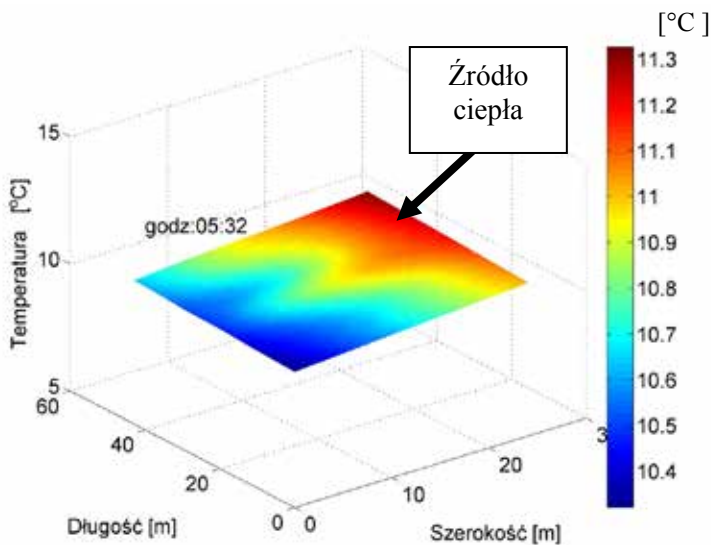
$$s(x) = p(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(|x - x_i|), \quad x \in \mathbb{R}^2, \quad (7.25)$$

gdzie: p – wielomian k -tego stopnia, λ_i – waga, $|x - x_i|$ – odległość pomiędzy x a x_i , $\phi: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ – gausowska funkcja bazowa, określona następującym równaniem [160]:

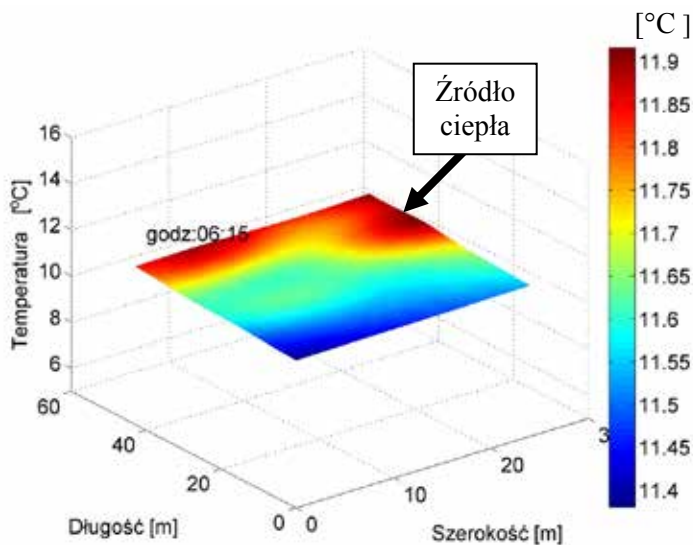
$$\phi(|x - x_i|) = \exp(-c(|x - x_i|)^2) \quad (7.26)$$

W pracy do obliczania interpolantów metodą RBF zastosowano moduł dostępny w pakiecie MATLAB 2008b.

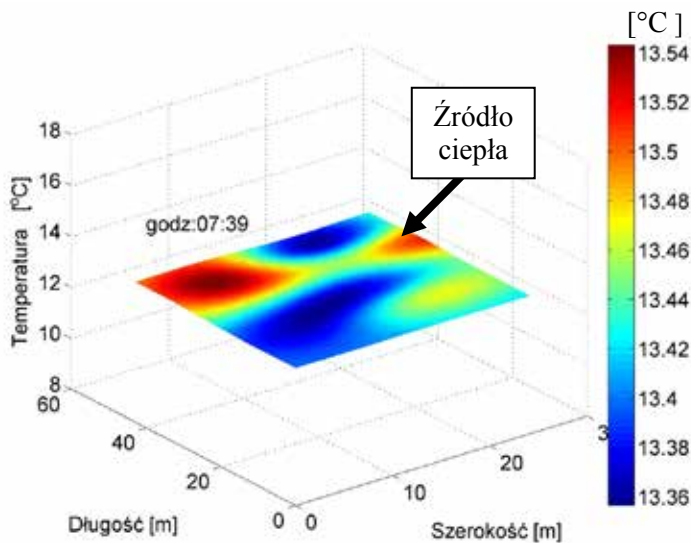
Na rys. od 7.6 do 7.9 przedstawiono przykładowe wyniki interpolacji danych pomiarowych przeprowadzone metodą RBF. Różnice temperatur są niewielkie i nie przekraczają 1°C. Najwyższa temperatura w okresie sezonu grzewczego występuje w miejscu usytuowania wylotu ciepłego powietrza z kanału nawiewnego. Podobny rozkład temperatur widoczny jest w okresie sezonowej przerwy w pracy systemu grzewczego (rys. 7.8 i 7.9). Wynika to z faktu ułożenia obiektu względem stron świata. Najwyższa temperatura występuje przy ścianie skierowanej na południe.



Rys. 7.6. Wartości temperatury zarejestrowane na wysokości 4 m w dniu 5-03-2007 o godz. 5.32 w funkcji położenie po przeprowadzeniu interpolacji metodą RBF
 Źródło: opracowanie własne.

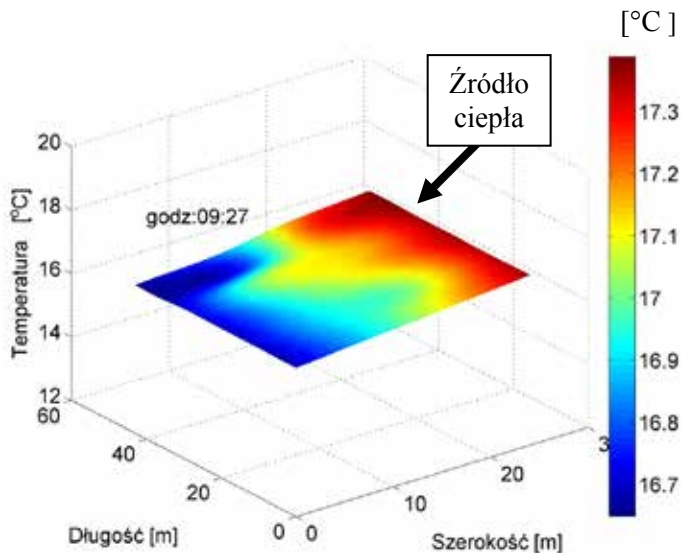


Rys. 7.7. Wartości temperatury zarejestrowane na wysokości 5 m w dniu 11-03-2007 w funkcji położenie, po przeprowadzeniu interpolacji metodą RBF
 Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7.8. Wartości temperatury zarejestrowane na wysokości 5 m w dniu 8-04-2007 w funkcji położenie po przeprowadzeniu interpolacji metodą RBF

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7.9. Wartości temperatury zarejestrowane na wysokości 4 m w dniu 7-10-2007 w funkcji położenie po przeprowadzeniu interpolacji metodą RBF

Źródło: opracowanie własne.

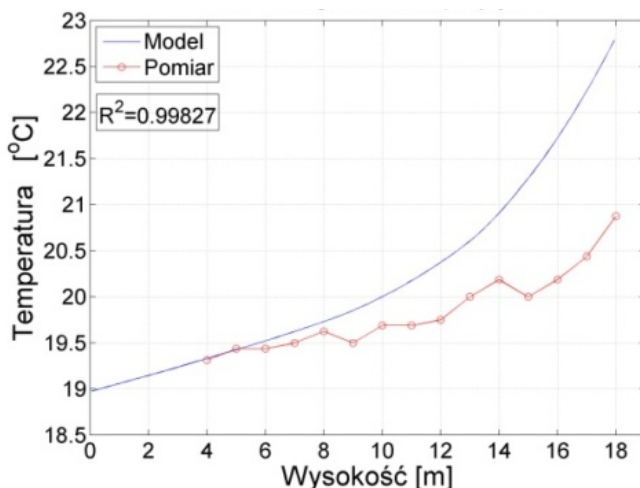
7.4. Analiza uzyskanych wyników

Zaprezentowane w rozdziale 7.2 na rys. 7.5 wyniki modelowania matematycznego wskazują na istnienie zależności wartości temperatury od wysokości. Na rys. od 7.10 do 7.22 przedstawiono przykładowe wykresy, na których zestawiono wyniki pomiarów eksperymentalnych z wybranymi dniami pomiarowymi, z rezultatami obliczeń numerycznych wykonanych za pomocą pakietu COMSOL Multiphysics. Na wykresach umieszczono w lewym górnym rogu wartość współczynnika determinacji R^2 , obliczonego dla danych prezentowanych na wykresie. Współczynnik determinacji wyznaczono na podstawie zależności [161]:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (7.27)$$

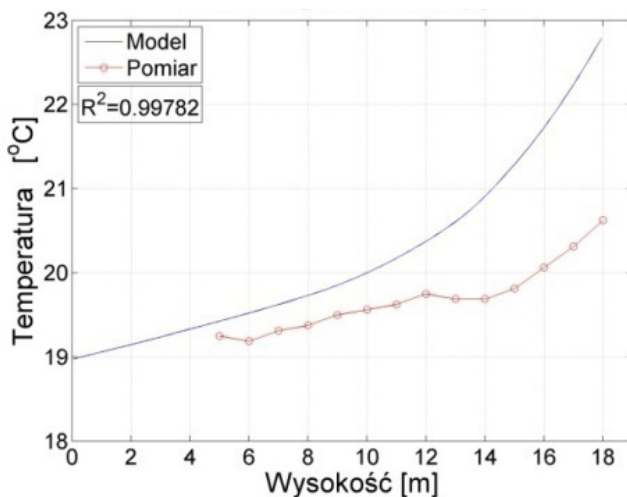
gdzie: y_t – rzeczywista wartość zmiennej Y w chwili czasowej t , \hat{y}_t – wartość teoretyczna zmiennej objaśniającej wyznaczona w oparciu o model, \bar{y} – średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej objaśniającej.

Współczynnik determinacji przyjmuje wartości z przedziału $[0;1]$. Dopasowanie modelu jest tym lepsze, im wartość R^2 jest bliższa jedności.



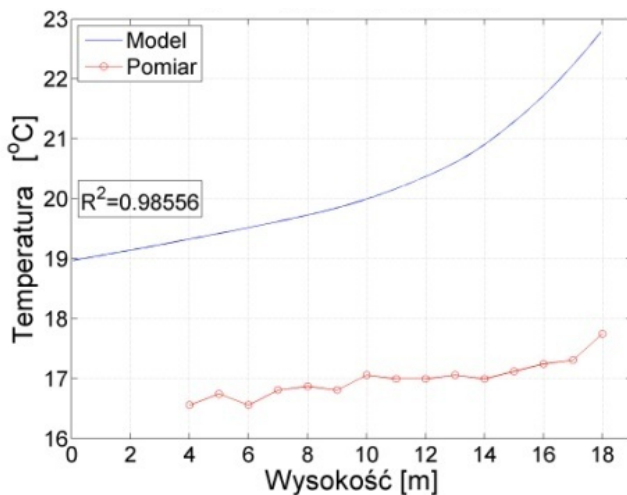
Rys. 7.10. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 22-05-2007 o godzinie 6:25 w punkcie pomiarowym A

Źródło: opracowanie własne.



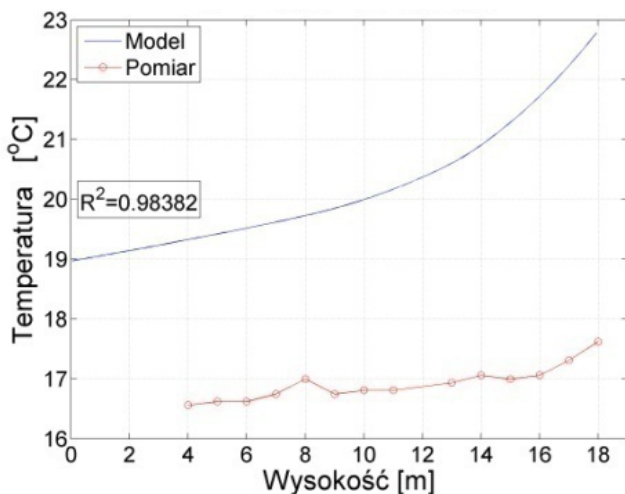
Rys. 7.11. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 22-05-2007 o godzinie 6:25 w punkcie pomiarowym G

Źródło: opracowanie własne.



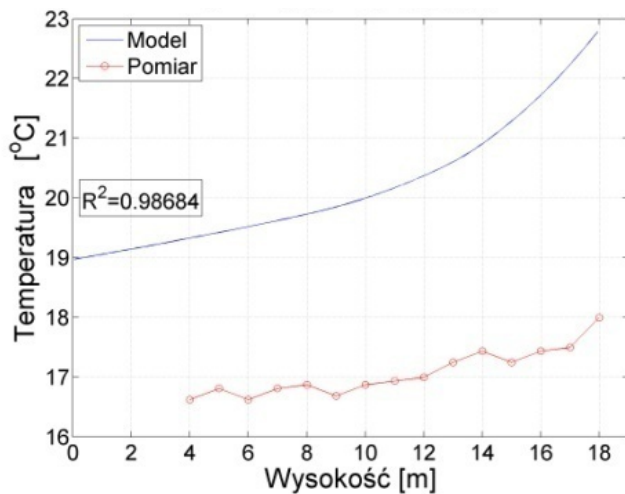
Rys. 7.12. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym K

Źródło: opracowanie własne.



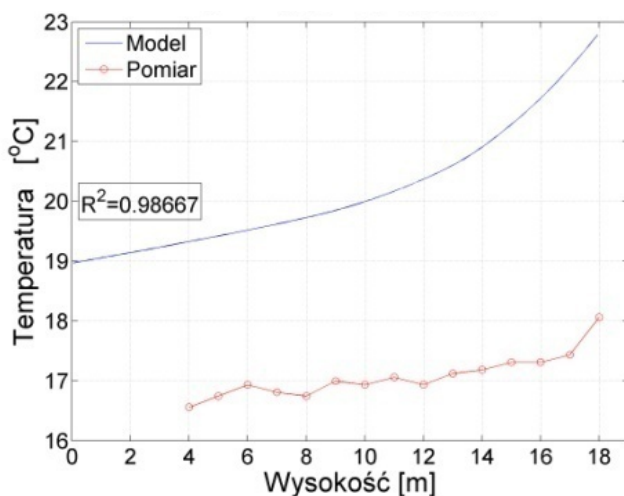
Rys. 7.13. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym D

Źródło: opracowanie własne.



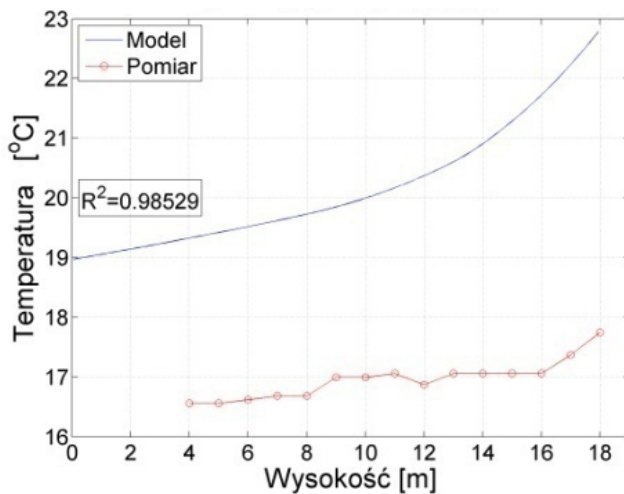
Rys. 7.14. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym A

Źródło: opracowanie własne.



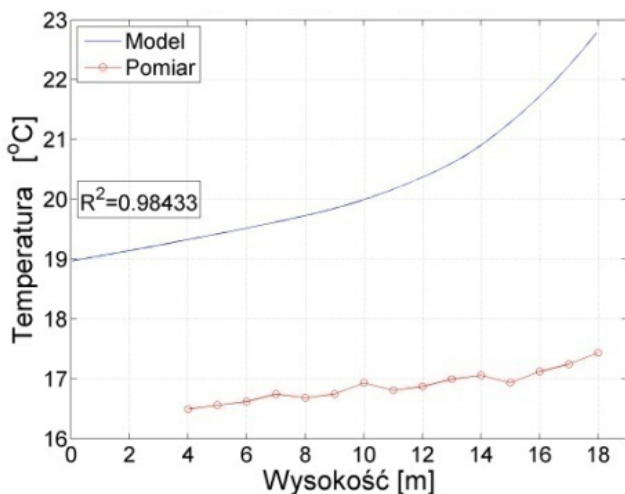
Rys. 7.15. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym B

Źródło: opracowanie własne.



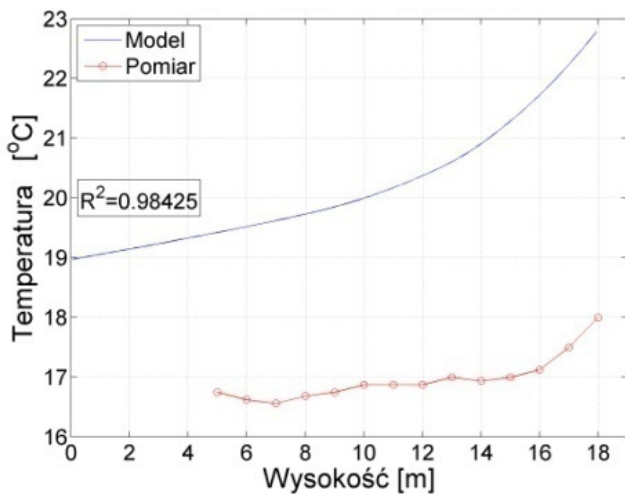
Rys. 7.16. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanymi w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym E

Źródło: opracowanie własne.



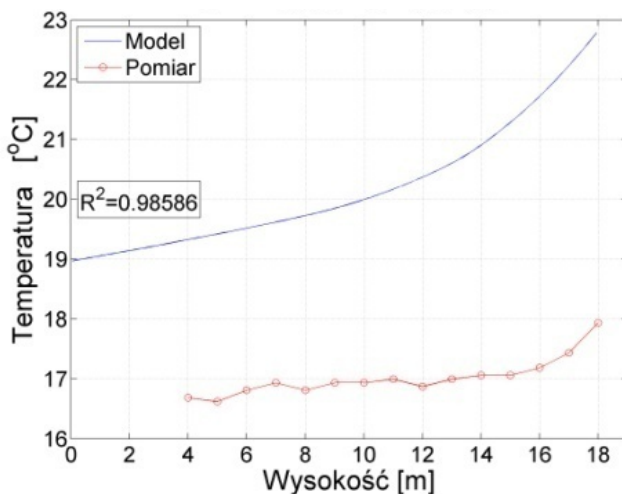
Rys. 7.17. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym F

Źródło: opracowanie własne.



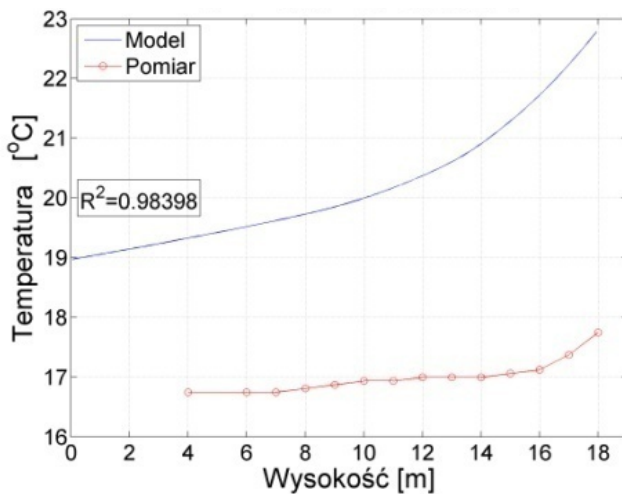
Rys. 7.18. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym G

Źródło: opracowanie własne.



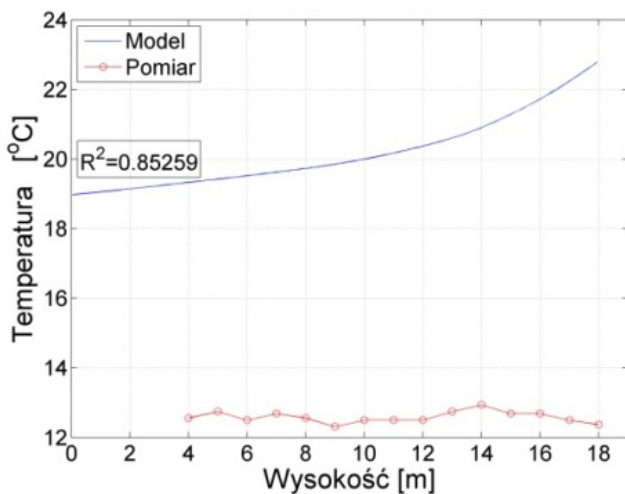
Rys. 7.19. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym I

Źródło: opracowanie własne.



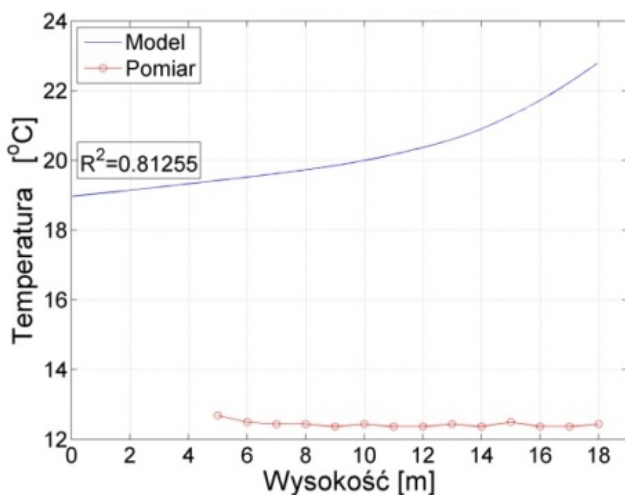
Rys. 7.20. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 29-04-2007 o godzinie 6:23 w punkcie pomiarowym J

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7.21. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 28-10-2007 o godzinie 6:29 w punkcie pomiarowym A

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7.22. Zależność temperatury od wysokości obliczona numerycznie (linia ciągła) oraz wynikająca z pomiarów (linia u dołu) zarejestrowanych w dniu 28-10-2007 o godzinie 6:29 w punkcie pomiarowym G

Źródło: opracowanie własne.

Dla większości przypadków wartość współczynnika R^2 jest większa od 0,98, co świadczy o bardzo dużej korelacji wyników pomiarów oraz rezultatów modelowania.

Wartości temperatury zarejestrowane w dniu 28-10-2007, przedstawione na rys. 7.21 i 7.22, ilustrują istnienie dużej korelacji pomimo występowania istotnej różnicy w wartościach temperatury zmierzonej i obliczonej numerycznie, przekraczającej 6°C. Różnica temperatury wynika z założeń modelu, gdzie jej wartości zależą od przyjętych warunków brzegowych. Wiosną, latem i jesienią temperatury otoczenia i wewnątrz obiektu zmieniają się wolno, lecz w dość szerokim zakresie, dlatego też w zestawionych wynikach występują wspomniane różnice.

Tabela 7.1

Wartości współczynnika korelacji i determinacji wyznaczone dla wybranych dni w dwóch punktach pomiarowych A i G

Dzień pomiarowy	Współczynnik korelacji		Współczynnik determinacji R^2	
	Pozycja A	Pozycja G	Pozycja A	Pozycja G
04-03-2007	0,710	0,679	0,843	0,824
10-03-2007	0,702	0,669	0,838	0,818
23-03-2007	0,702	0,660	0,838	0,812
25-03-2007	0,687	0,634	0,828	0,796
08-04-2007	0,914	0,895	0,895	0,946
29-04-2007	0,973	0,968	0,986	0,984
22-05-2007	0,996	0,995	0,998	0,997
25-05-2007	0,996	0,995	0,998	0,997
01-07-2007	0,992	0,990	0,996	0,995
05-08-2007	0,992	0,991	0,996	0,995
07-10-2007	0,955	0,950	0,977	0,974
28-10-2007	0,726	0,660	0,852	0,812

Źródło: opracowanie własne.

W tab. 7.1 przedstawiono obliczone wartości współczynnika korelacji i determinacji między wynikami obliczonymi numerycznie a pomiarami pochodzącymi z wybranych dni. W wyniku obliczeń otrzymano wartość $p < 0,0001$, co wskazuje na dużą signifikancję wyliczonych współczynników.

8. Metodologia postępowania przy projektowaniu i wyborze systemów grzewczych dla obiektów sakralnych

Zadaniem systemu grzewczego jest dostarczenie odpowiedniego strumienia ciepła do pomieszczeń, w których człowiek przebywa w czasie zimy. Inaczej mówiąc, polega na ogrzewaniu otoczenia w celu uzyskania równowagi cieplnej między ciałem ludzkim a otoczeniem. Ponadto, ma za zadanie stworzenie dla ludzi, szukających ochrony przed wpływami klimatu zewnętrznego, odpowiednich warunków w pomieszczeniu.

Realizacja systemów grzewczych dla istniejących obiektów sakralnych, pozwalających zapewnić z jednej strony właściwy komfort cieplny osobom przebywającym w ich wnętrzach, a z drugiej strony odpowiedni mikroklimat dla przechowywanych dzieł sztuki, powinna przebiegać wg podanej poniżej procedury, która składa się z 3 faz i 15 etapów:

Faza I – przygotowawcza (konceptualna):

1. Określenie wymiarów oraz kubatury obiektu.
2. Ocena izolacyjności przegród budowlanych.
3. Klasyfikacja mikroklimatu obiektu do jednej z trzech grup:
 - a) o stałym, stabilnym mikroklimacie,
 - b) o zmiennym mikroklimacie,
 - c) o bardzo złym mikroklimacie.
4. Określenie wymagań w odniesieniu do komfortu cieplnego ludzi oraz parametrów mikroklimatu właściwego dla zebranych w obiekcie dzieł sztuki.
5. Analiza możliwych do implementacji rozwiązań systemów grzewczych z uwzględnieniem takich czynników jak: dostępność i ekologiczność rozpatrywanych nośników energii cieplnej, możliwości techniczne realizacji zadania inwestycyjnego oraz funkcjonalność i estetyka przyjętych rozwiązań.
6. Określenie oczekiwań formułowanych przez inwestora dotyczących: komfortu cieplnego, estetyki, funkcjonalności, a przede wszystkim przyszłych kosztów (inwestycyjnych i eksploatacyjnych) proponowanych rozwiązań technicznych,
7. Opracowanie koncepcji rozwiązania technicznego systemu grzewczego.

Faza II – projektowa:

1. Wyznaczenie zapotrzebowania na energię ciepłą przez obiekt.
2. Analiza cen nośników energii cieplnej.

3. Analiza kosztów związanych z wykonaniem i eksploatacją systemu grzewczego.
4. Uzgodnienie przyjętych koncepcji projektowych z inwestorem.
5. Wykonanie dokumentacji projektowej.

Faza III – wykonawcza:

1. Techniczna realizacja projektu.
2. Przeprowadzenie prób wykonanych instalacji oraz próbnny rozruch systemu grzewczego.
3. Szkolenie personelu i oddanie systemu grzewczego do użytkowania.

Poszczególne działania podstawowe obejmujące fazę I i II są powiązane pętlami iteracyjnymi. Oznacza to, że w przypadku otrzymania niesatysfakcjonującego wyniku cząstkowego, z każdego etapu procedury (opisanego działaniem podstawowym) można wrócić do dowolnego wcześniejszego działania dowolną ilość razy i kontynuować procedurę projektowania. Również faza III może zostać powiązana pętlą iteracyjną z pozostałymi. Jednak z ekonomicznego punktu widzenia działanie takie nie ma sensu ze względu na wysokość kosztów, jakie należałoby ponieść. Właściwe decyzje projektowe dotyczące wyboru źródła ciepła oraz przyjętych rozwiązań technicznych należy podjąć w II fazie realizacji zadania inwestycyjnego.

9. Podsumowanie

Celem prowadzonych przez autora prac naukowo-badawczych było wypracowanie metodologii postępowania przy projektowaniu systemów grzewczych zaopatrujących obiekty sakralne w ciepło. W okresie ostatnich kilku lat podjęto na szeroką skalę próby remontów lub modernizacji systemów grzewczych, zarówno w starych, zabytkowych obiektach sakralnych, jak też w nowo powstałych. Podłoże tych działań jest różne. W wielu przypadkach o zmianie systemu grzewczego decydują względy ekonomiczne związane z kosztami eksploatacyjnymi czy też remontowymi, jakie należy ponieść, aby system grzewczy dalej poprawnie funkcjonował, ekologiczne, funkcjonalne, a niekiedy względy bezpieczeństwa. W takich sytuacjach dalsza eksploatacja ogrzewania mogłaby doprowadzić do awarii grożącej katastrofą budowlaną, co z kolei mogłoby narazić osoby przebywające w jej wnętrzu na utratę zdrowia lub nawet śmierć. W związku z tym projektowanie i budowa systemów grzewczych dla tego typu obiektów, stało się częstym zadaniem inwestycyjnym, powodując wzmożone zapotrzebowanie na realizację nowoczesnych rozwiązań. Różnorodność kryteriów jakie należy uwzględnić w fazie projektowania, nie ułatwia zadania zaimplementowania odpowiedniego systemu grzewczego dla danego obiektu. Można nawet stwierdzić, że nie ma rozwiązania uniwersalnego, dającego się zastosować w każdych warunkach i dla każdego obiektu. Analizując literaturę przedmiotu można jednoznacznie zaobserwować, że dla większości kategorii obiektów sakralnych, brak jest danych i wytycznych pozwalających na poprawne projektowanie ogrzewania kościołów, a te które istnieją są niepełne. Dlatego też podjęto próbę opracowania metodologii postępowania przy projektowaniu systemów grzewczych dla obiektów sakralnych, wykorzystując zebrane przez autora doświadczenia i wiedzę, w szczególności nabyte podczas prac koncepcyjnych, projektowych i wdrożeniowych prowadzonych w Katedrze Opolskiej.

Celem szczegółowym przeprowadzonych przez autora prac było wykorzystanie nowoczesnych metod modelowania matematycznego, narzędzi statystycznych i pomiarów do doboru oraz weryfikacji prawidłowości projektowanych systemów grzewczych dla obiektów sakralnych. Dla realizacji tak postawionego celu przeprowadzono serię pomiarów w Katedrze Opolskiej pozwalających na określenie wybranych parametrów klimatu oraz mikroklimatu wystę-

pujących w okresie zimowym i letnim jak również dokonano rejestracji rozkładu temperatury w czasie, kiedy system grzewczy był włączony oraz wyłączony.

Zastosowane narzędzia statystyczne pozwoliły na wyznaczenie położenia elementów próby (temperatury i wilgotności względnej) oraz charakteru ich zmian. Ustalenie zależności występujących pomiędzy wybranymi parametrami klimatu i mikroklimatu przeprowadzono z wykorzystaniem analizy korelacyjnej i funkcji regresji. Znajomość tych wielkości pozwala na właściwą klasyfikację obiektu do jednej z trzech podstawowych grup obiektów sakralnych. Otrzymane wyniki analizy statystycznej potwierdziły słuszność klasyfikacji Katedry Opolskiej do grupy obiektów charakteryzujących się stabilnym mikroklimatem, co było pomocne przy wyznaczaniu zapotrzebowania na energię cieplną.

Dobrym sposobem do przedstawienia wyników pomiarów są histogramy. Wartości średnie, minimalne i maksymalne mówią tylko o zakresie, w którym znajduje się konkretny parametr. Występowanie maksymalnych bądź minimalnych wartości w bardzo krótkim czasie często nie jest zagrożeniem i dla pewnych analiz i obliczeń takie wartości można pominać. Natomiast jeżeli ich częstość jest duża, to na pewno stanowią ważną informację. Dlatego też przy wyznaczaniu zapotrzebowania na energię cieplną, histogramy pozwalają na określenie czasu występowania poszczególnych zakresów temperatury w całym sezonie grzewczym. Obliczając zapotrzebowanie przez obiekty sakralne na moc cieplną, wartości minimalne, które występują nie dłużej niż przez okres stanowiący 5% czasu okresu grzewczego w obliczeniach nie powinny być uwzględniane. Wynika to z faktu, iż najniższa temperatura występuje przede wszystkim w okresie nocnym, wtedy gdy obiekt nie jest używany. Dlatego też z ekonomicznego punktu widzenia nie ma potrzeby uwzględnienia tych temperatur w obliczeniach.

W całym procesie inwestycyjnym polegającym na wymianie lub budowie systemu grzewczego w obiektach sakralnych, odpowiednia klasyfikacja budowli do jednej z trzech grup oraz określenie wymogów komfortu cieplnego, są najistotniejsze z punktu widzenia procesu projektowego, gdyż determinują rodzaj systemu grzewczego. W sytuacji, kiedy obiekt charakteryzuje się stabilnym mikroklimatem w ciągu całego roku, a dobowe zmiany temperatury nie przekraczają 1°C , należy stosować rozwiązania, w których ciepło dostarczane jest jedynie w okresach bezpośrednio poprzedzających użytkowanie obiektu, jak również w czasie jego krótkiej eksploatacji. Taki sposób ogrzewania wpływa bezpośrednio na koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, nie destabilizując występującego we wnętrzu mikroklimatu. Daje natomiast poczucie komfortu cieplnego osobom okresowo użytkującym obiekt. Dla tego typu budowli należy stosować urządzenia, które pozwalają w krótkim czasie na dostarczenie dużej ilości energii cieplnej. Na podstawie wniosków wynikających z przeprowadzonych prac naukowo-badawczych podjęto decyzję o zainstalowaniu w Katedrze Opol-

skiej gazowej, kanałowej nagrzewnicy powietrza o mocy znamionowej równej 150 kW.

W sytuacji, kiedy obiekt charakteryzuje się zmiennym mikroklimatem, należy stosować rozwiązania, w których występuje ogrzewanie dyżurne, stabilizujące temperaturę w okresie nocy, kiedy temperatury są najniższe i nie występuje insolacja słoneczna. Poza ogrzewaniem dyżurnym, obiekty te należy wyposażać w ogrzewanie właściwe, pozwalające na uzyskanie temperatury dającej poczucie komfortu cieplnego użytkownikom. Funkcje te mogą być połączone w jednym systemie grzewczym. Dla trzeciej grupy obiektów, które charakteryzują się bardzo złym mikroklimatem, należy stosować rozwiązania, w których system jest użytkowany w całym okresie grzewczym. W każdym przypadku należy stosować automatyzację instalacji pozwalających na minimalizację zużycia ciepła.

Weryfikację słuszności wyboru sposobu ogrzewania dla Katedry Opolskiej przeprowadzono empirycznie, wykonując serię pomiarów z zastosowaniem specjalnie do tego celu zaprojektowanym i wykonanym przez autora mikroprocesorowego systemu pomiarowego, dającego możliwość jednoczesnego pomiaru i rejestracji temperatury w 288 punktach. Względy techniczne umożliwiły przeprowadzenie pomiarów jedynie w 144 punktach, które to prowadzono w okresie od 1-03-2007 do 31-12-2007, rejestrując wartości temperatur co 5 min. Pomiary przeprowadzono w 9 miejscach obiektu, na różnych wysokościach począwszy od 4 m aż do 19 m, umieszczając czujniki pomiarowe co 1 m. Na tej podstawie wyznaczono rozkłady pól temperaturowych występujących w obiekcie. Otrzymane wyniki potwierdziły słuszność zaprojektowanego i wykonanego systemu grzewczego oraz skuteczność jego działania.

W badaniach komfortu cieplnego wymagana jest znajomość rozkładów temperatury: przegród budowlanych, powietrza oraz prędkości jego przepływu. W celu wyznaczenia teoretycznego rozkładu temperatury w obiekcie w czasie pracy zaprojektowanego systemu grzewczego, zbudowano model matematyczny katedry i przeprowadzono analizę numeryczną. Modelowanie przeprowadzono w środowisku COMSOL Multiphysics, wykorzystując moduł Heat Transfer Module, uwzględniając zjawisko kondukcji i konwekcji. Otrzymane wyniki porównano z rezultatami otrzymanymi podczas eksperymentu, uzyskując dla większości rozpatrywanych przypadków współczynnik determinacji przekraczający wartość 0,9.

Modelowanie matematyczne i symulacja komputerowa należą obecnie do podstawowych metod badawczych w wielu dziedzinach. Pozwalają na skrócenie czasu projektowania w porównaniu z metodami tradycyjnymi, powodując wzrost globalnej mocy twórczej projektantów, ułatwiają wprowadzanie zmian i modyfikacji do projektów już istniejących, a przede wszystkim umożliwiają wariantowanie rozwiązań i ich symulację komputerową, która jest zdecydowanie tańsza niż prace doświadczalne. Obecnie, narzędzia te powinny być również

szerzej wykorzystywane w procesie projektowania systemów grzewczych dla obiektów sakralnych, wymagających ze względu na swoją specyfikę i różnorodność, każdorazowo indywidualnego podejścia projektowego.

Zaprezentowane w monografii procedury numeryczne, metody statystycznego opracowania wyników oraz powstała w oparciu o uzyskane rezultaty i zebrane doświadczenia metodologia postępowania w procesie projektowania i realizacji zadania, umożliwiają dokonanie właściwego doboru systemu grzewczego dla obiektów sakralnych, zapewniającego komfort cieplny przebywających w ich wnętrzu osobom oraz właściwy mikroklimat zebranych dzieł sztuki.

Rozwiązanie problemu zapewnienia komfortu cieplnego jest zagadnieniem wielopłaszczyznowym i złożonym, dlatego też zaproponowana metodologia postępowania powinna być wykorzystywana przez osoby realizujące podobne zadania.

Literatura

- [1] RECKNAGEL-SPRENGER: „*Ogrzewanie i klimatyzacja. Poradnik*”. Gdańsk: EWFE, 1994.
- [2] ROUBA B.J.: „*Ogrzewanie w kościołach – z punktu widzenia konserwatora dzieł sztuki*”. Warszawa: Polski Instalator 9/1999.
- [3] ROUBA B.J.: „*Problemy ogrzewania w kościołach zabytkowych*”. Warszawa: Polski Instalator 5/2003.
- [4] BALDY S.: „*Katedra św. Krzyża w Opolu*”. Opole: Wydawnictwo św. Krzyża, 1994.
- [5] ARENDT C.: „*Kirchenheizung und Denkmalschutz*”. HLH, vol 27, 1976 nr. 12. pp. 435-441.
- [6] ENDE G.: „*Planung und Berechnung von Kirchenheizungen, Sanitar-und Heizungstechnik*”. nr 5, 1968. pp. 267-271.
- [7] KRISCHER O., KAST W.: „*Ges.-Ing*”. 1957. pp. 321-325.
- [8] FRANKIEWICZ P.: „*Przewodnik po Katedrze Opolskiej*”. Opole: Wydawnictwo św. Krzyża, 1971.
- [9] BALDY S.: „*Matka Boska Opolska*”. Opole: wyd II, 1984.
- [10] BALDY S.: „*Wpływ kultu obrazu Matki Bożej Opolskiej na dynamikę życia parafialnego w latach 1810-1933*”. Opole: MPS, 1984.
- [11] DZIEWULSKI H., HAWRANEK F.: „*Opole – monografia miasta*”. Opole: 1975.
- [12] FRANKIEWICZ E.: „*Odkrycia w prokatedrze opolskiej*”. *Rocznik Teologiczny Śląska Opolskiego*. Opole: T1, 1968. strony 203-237.
- [13] ŚLIWOWSKI, L. „*Mikroklimat wewnątrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach*”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Pol. Wrocławskiej, 2000.
- [14] Praca zbiorowa pod red. Dytczak M.: „*Modelowanie matematyczne procesów zaopatrzenia w ciepło i energię*”. Warszawa-Opole: Wyd. Federacji Stowarzyszeń Naukowo-Technicznych Energetyka i Środowisko, 2006.
- [15] MINKINA W.: „*Pomiary termowizyjne: przyrządy i metody*”. Częstochowa: Wyd. Pol. Częst., 2004.
- [16] KOZŁOWSKI S., NAZAR K.: „*Wprowadzenie do fizjologii klinicznej*”. Warszawa: PZW, 1995.
- [17] KORADECKA D.: „*Bezpieczeństwo pracy i ergonomia*”. Warszawa: CIOP, 1997.
- [18] FANGER P.O.: „*Thermal comfort*”. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [19] MORSE R.N., KOWALCZEWSKI J.J.: „*Rational basis for human thermal comfort*”. ASHARE: Jour. 9,72, 1967.
- [20] LUSTINEC K.: „*The working mikroklimat and its evaluation. Informational news from the Branch of industrial hygiene and occupational disease and radiation hygiene*”. Prague: Suppl. 2,13 Inst of ind. Occup. Dis., 1967.
- [21] CENA K., CLARC J. A.: „*Bioengineering. Thermal physiology and comfort*”. Wrocław: Tehnical University Press, 1980.

- [22] BRAGER G.S., DE DEAR R.: „*Thermal adaptation in the build environment: a literature review*”. Energy and Buildings, 27, 1998. pp. 83-96.
- [23] BRAGER G.S., i inni.: „*Thermal comfort: post, present and future, proceedings*”. Gaston: 9-10 June, 1993. pp. 17-36.
- [24] SCHILLER G.E., ARENS, E.A.: „*Thermal comfort in office buildings*”. October: ASHARE Journal, 1988. pp. 26-32.
- [25] TOFTUM J., FANGER O.: „*Air humidity requirements for human comfort*”. ASHARE Trans., 1999.
- [26] FANGER P.O.: „*Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*”. New York: McGraw-Hill, 1973.
- [27] BURSE R.L.: „*Sex differences in human thermoregulatory response to heat and cold stress*”. Human Factor 21(6), 1979. pp. 678-699.
- [28] SZŁĄZAK J. I SZŁĄZAK N.: „*Bezpieczeństwo i higiena pracy*”. Kraków: AGH, 2005.
- [29] KABZA Z., KOSTYRKO K.: „*Metrologia mikroklimatu pomieszczenia i środowiskowych wielkości fizycznych*”. Opole: OW PO, 2003/2004. Tomy: 1, 2.
- [30] PN-EN, 12792:2006. *Wentylacja i klimatyzacja*.
- [31] ASHARE. *Fundamentals Handbook*, Atlanta: 14.1, 2001.
- [32] SMT4-CT96-2094, Projekt: „*Harmonisation of Air Quality Measurement in Europe (HAMAQ)*”. NPL Report COEM S31: 1996.
- [33] 62-1996.; ANSI/ASHRAE. „*Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality*”. 1996.
- [34] Scov P., Valbjorn O., Pedersen B.V.: „*Influence of indoor climate on the sick building syndrome in an office environment*”. Scand. J. Work Environ Health, 1990. pp. 363-371. No. 16.
- [35] SCOV P., VALBJORN O., PEDERSEN B.V.: „*Influence of personal characteristic job-related factors and psychosocial factors on the sick building syndrome*”. Scand. J. Work Environ Health, 1989. pp. 286-295. No. 15.
- [36] KLONOWICZ S., KOZŁOWSKI S.: „*Człowiek a środowisko termiczne*”. Warszawa: PZW, 1970.
- [37] LORSCH H.G., ABDUO, O.A.: „*The impact of the building indoor environment on occupant productivity*”. Part 3 – *Effects of indoor air quality*”. ASHARE Trans., 1994.
- [38] LORSCH H.G., ABDUO, O.A.: „*The impact of the building indoor environment on occupant productivity*”. Part 1 – *Recent studies, measures and costs*. ASHARE Trans., 1994.
- [39] LORSCH H.G. I ABDUO O.A. „*The impact of the building indoor environment on occupant productivity*”. Part 2 – *Effects of temperature*. ASHARE Trans., 1994.
- [40] PN-85/N-08013. „*Ergonomia. Środowiska termiczne umiarkowane. Określenie wskaźników PMV, PPD i wymagań dotyczących komfortu termicznego*”.
- [41] PN-87/N-08016. „*Ergonomia. Środowiska termiczne. Przyrządy i metody pomiaru wielkości fizycznych*”.
- [42] PN-EN, 27243:2005. „*Środowiska gorące. Wyznaczanie obciążenia termicznego działającego na człowieka podczas pracy, oparte na wskaźniku WBGT*”.
- [43] PN-87/N-08009. „*Ergonomia. Środowiska zimne. Metoda oceny ujemnego obciążenia termicznego oparta na wskaźnikach WCI i IREQ*”.
- [44] www.lsi-lastem.it. (2006)
- [45] ANSI/ASHRAE „*Standard 55-1992 Thermal Environmental conditions for human occupancy*”. 1994, Atlanta, 1992, ASHRAE Addendum 55a.
- [46] ADAMKIEWICZ H.: „*Statystyka. Zastosowania w ekonomii*”. Gdańsk: Wyd. ODiDK, 1996.

- [47] GREŃ J.: „*Statystyka matematyczna. Modele i zadania*”. Warszawa: PWN, 1994.
- [48] SOBCZYK M.: „*Statystyka*”. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN, 2002.
- [49] STANISZ A.: „*Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*”. Kraków: StatSoft Polska Sp.z o.o., 2006.
- [50] DOMAŃSKI C., PLUSKA K.: „*Nieklasyczne metody statystyczne*”. Warszawa: WNT, 2000.
- [51] Greń J.: „*Statystyka matematyczna podręcznik programowy*”. Warszawa: PWN, 1987.
- [52] KLONECKI W.: „*Statystyka dla inżynierów*”. Warszawa: PWN, 1999.
- [53] KORONACKI J., MIELNICZUK J.: „*Statystyka dla studentów kierunków technicznych przyrodniczych*”. Warszawa: WNT, 2001.
- [54] KRYSICKI W. i inni: „*Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna*”. Warszawa: PWN, 1998.
- [55] „*Statistica – Opis systemu*”. Warszawa: StatSoft Polska sp. z o.o., 2002.
- [56] DOBOSZ M.: „*Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań*”. Warszawa: Akademicka Oficyna Wyd. EXIT, 2001.
- [57] BOCZAR T.: „*Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wyladowań niezupełnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów*” *Studia i Monografie*. Opole: OW PO, 2003.
- [58] PLUTA, Z.: „*Słoneczne instalacje energetyczne*”. Warszawa: OW PW, 2003.
- [59] BOGUSŁAWSKI W.N.: „*Fizyka budowli. Podatki fizyczne ogrzewania, wentylacji i klimatyzacji*”. Warszawa: Wyd. Arkady, 1975.
- [60] CHMIEŁOWSKI A.: „*Ogrzewanie w kościołach francuskich*”. *Polski Instalator*, 1/1999.
- [61] CHMIEŁOWSKI A.: „*Energooszczędne ogrzewanie i wentylacja w kościołach*”. *Polski Instalator*, 5/1998.
- [62] CHMIEŁOWSKI A.: „*Ogrzewanie w kościołach*”. *Polski Instalator*, 3/1998.
- [63] WOLSKI L.: „*Założenia do bilansu energetycznego obiektów sakralnych*”. Wydawnictwo ECO-TECH Wrocław: Materiały z IX Międzynarodowej Konferencji Air Conditioning & District Heating w Szklarskiej Porębie, 1998.
- [64] Projekt Badawczy Unii Europejskiej. „*Właściwe ogrzewanie zapewniające komfort ludzi i ochronę dzieł sztuki przechowywanych w kościołach*”. Padwa, Włochy: Instytut Nauki o Atmosferze i Ocenach CNR, 200-2005.
- [65] LAUDYN D.: „*Rachunek ekonomiczny w elektroenergetyce*”. Warszawa: OW PW, 1999.
- [66] www.imexpiechota.pl. (2006)
- [67] www.olej-opalowy.2mhost.pl. (2006)
- [68] www.petrol.pl. (2006)
- [69] www.gaspol.pl. (2006)
- [70] www.energiapro.pl. (2006)
- [71] www.gaz.zabrze.pl. (2006)
- [72] Górnośląska Spółka Gazownictwa sp. z o.o.: „*Wyciąg z taryfy dla paliw gazowych nr 2*”. Zabrze: styczeń 2007.
- [73] www.ure.gov.pl. (2006)
- [74] JAROSIŃSKI J.: „*Technika czystego spalania*”. Warszawa: WNT, 1996.
- [75] ETSU. „*Fuel Cycle Atmospheric Emissions and Global Warming Impacts from UK Electricity Generation*”. London: ETSU-R-88. HMSO, 1998.
- [76] O'NEILL P.: „*Chemia środowiskowa*”. Warszawa: PWN, 1998.
- [77] MAŁKO J., WOJCIECHOWSKI H.: „*Problemy modernizacji rejonowych ciepłowni wynikające z przystosowania ich do dopuszczalnych norm emisji gazów i pyłów*”.

- Trzecia Konferencja „Racjonalizacja Użytkowania Energii i Środowiska, 16-18 X 1995, 1995. strony 87-90.
- [78] GAJDA A., BARC W.: „*Problemy związane z dostosowaniem energetyki krajowej do wymogów ekologicznych Unii Europejskiej*”. Biuro Rozwoju, PSE SA Biuletyn Miesięczny, 11 (101), listopad 1999.
- [79] PSE SA: *Analiza pt. „Optymalizacja procesów redukcji emisji NOx w energetyce zawodowej”*. MODELPOL, wrzesień 1996.
- [80] LORENC M.: „*Charakterystyka systemu pomiarowego rozkładu pól temperaturowych występujących w obiektach wielkokubaturowych*”. PAK. 2008, nr. 2.
- [81] LORENC M.: „*Metody i wyniki pomiarów pól temperaturowych w obiektach wielkogabarytowych*”. 2009, nr. 2.
- [82] NAWROCKI W.: „*Komputerowe systemy pomiarowe*”. Warszawa: WKiŁ, 2002.
- [83] NAWROCKI W.: „*Rozproszone systemy pomiarowe*”. Warszawa: WKiŁ, 2006.
- [84] www.maxim-ic.com, dokumentacja techniczna czujnika DS18B20, 2003.
- [85] www.atmel.com, dokumentacja techniczna ATmega64, (2006).
- [86] www.savannah.nongnu.org/projects/avr-libc, Strona domowa biblioteki avr-libc, (2006).
- [87] www.winavr.sourceforge.net/index.html, Strona domowa środowiska WinAVR, (2006).
- [88] www.automation.siemens.com. (2006)
- [89] Siemens AG, Siemens TC65 Java User's Guide v08, 2006.
- [90] 3GPP TS 23.060 v3.16.0, GPRS; Service description; Stage 2, 2003.
- [91] www.jcp.org, JSR-228, Information Module Profile 2.0, (2005).
- [92] www.modbus.org, MODBUS protocol specification v1.1b, (2006).
- [93] www.telemetry.pl. (2006)
- [94] 3GPP TS 23.03 v3.15.0, Numbering, addressing and identification, 2006.
- [95] RFC 1180, A TCP/IP Tutorial, 1991.
- [96] SINNHA S.L., ARORA R.C., ROY, S.: „*Numerical simulation of two-dimensional room air flow with and without buoyancy*”. Energy and Building 32, 2000. pp. 121-129.
- [97] SRESHTHAPUTRA A., HABERL J., ANDREWS, M.J.: „*Improving building design and operation of a Thai Buddhist temple*”. Energy and Building 36, 2004. pp 481-494.
- [98] ALWANDHI E.M.: „*Thermal analysis of a building brick containing phase change material*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 351-357.
- [99] LIN Y., ZMEUREANU R.: „*Computer model of the air flow and thermal phenomena inside a large dome*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 1287-1296.
- [100] POSNER D.J., BUCHANAN C.R., DUNN-RANKIN D.: „*Measurement and prediction of indoor air flow in a model room*”. Energy and Building 35, 2003. pp 515-526.
- [101] REN Z., STEWART J.: „*Simulating air flow and temperature distribution inside buildings using a modified version of COMIS with sub-zonal divisions*”. Energy and Buildings 35, 2003. pp. 257-271.
- [102] CHEN Q., XU W.: „*A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation*”. Energy and Buildings 28, 1998. pp 137-144.
- [103] KARTHIKEYAN C.P., SAMUEL A.A." „*CO₂ – dispersion studies in an operation theatre under transient conditions*”. Energy and Buildings 40, 2008. pp 231-239.
- [104] PAPAKONSTANTINOOU K.A., KIRANOUDIS C.T., MARKATOS, N.C.: „*Mathematical modeling of environmental conditions inside historical buildings. The case of the archaeological museum of Athens*”. Energy and Buildings 31, 2000. pp. 211-220.
- [105] DRORI U., ZISKIND G.: „*Induced ventilation of an one-story real-size building*”. Energy and Buildings 36, 2004. pp 881-890.

- [106] CARRILHO DA GRACA, G., i inni: „*Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai*”. Energy and Buildings 34, 2002. pp. 1-11.
- [107] BOJIC M., LEE M., YIK, F.: „*Influence of a depth of a recessed space to flow due to air-conditioner heat rejection*”. Energy and Building 34, 2002. pp 33-43.
- [108] SCHELLEN H.L., AARLE M.A.: „*Contamination of a church ceiling due to the burning of candles in combination with floor heating*”. Royal Institute of Technology, Stockholm: 2005.
- [109] SPOLNIK Z., i inni: „*Influence of different types of heating systems on particulate air pollutant deposition: The case of churches situated in a cold climate*”. Journal of Cultural Heritage 8. 2007, pp. 7-12.
- [110] DENG T., i inni: „*CFD simulation and measurement validation of air distribution at the human international exhibition center*”. International Conference for Enhanced Building Operations. Shenzhen, China: 2006.
- [111] POSNER J.D., BUCHANAN C.R., DUNN-RANKIN D.: „*Measurement and prediction of indoor air flow in a model room*”. Energy and Building 35, 2003. pp 515-526.
- [112] LIN Y., ZMEUREANU R.: „*Computer model of the air flow and thermal phenomena inside a large dome*”. Energy and Buildings 40, 2008. pp. 1287-1296.
- [113] ZUKOWSKI M.: „*Modeling and designing heating and ventilation system with underfloor air distribution*”. Energy and Building 38, 2006. pp. 600-609.
- [114] XU H., NIU J.: „*Numerical procedure for predicting annual energy consumption of the under-floor air distribution system*”. Energy and Building 38, 2006. pp. 641-647.
- [115] FRANCISCO P.W., i inni: „*Measuring residential duct efficiency with the short-term coheat test methodology*”. Energy and Building 38, 2006. pp. 1076-1083.
- [116] KONG Q., Yu B.: „*Numerical study on temperature stratification in a room with underfloor air distribution system*”. Energy and Buildings 40, 2008. pp 495-502.
- [117] WANG F., i inni: „*Model-based commissioning for filters in room air-conditioners*”. Energy and Buildings 37, 2005. pp. 1225-1233.
- [118] KITAGAWA K., i inni: „*Effect of humidity and small air movement on thermal comfort under a radiant cooling ceiling by subjective experiments*”. Energy and Building 30, 1999. pp. 185-193.
- [119] ESEN H., i inni: „*Artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy assessments for ground-coupled heat pump system*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 1074-1083.
- [120] CUI P., YANG H. I FANG Z.: „*Numerical analysis and experimental validation of heat transfer in ground heat exchangers in alternative operation modes*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 1060-1066.
- [121] LIN Y.J.P., LINDEN, P.F.: „*A model for an under floor air distribution system*”. Energy and Buildings 37, 2005. pp. 399-409.
- [122] FISK W.J., i inni: „*Duct systems in large commercial buildings: physical characterization, air leakage, and heat conduction gains*”. Energy and Buildings 32, 2000. pp. 109-119.
- [123] TSILINGIRIS P.T.: „*Wall heat loss from intermittently conditioned spaces – The dynamic influence of structural and operational parameters*”. Energy and Buildings 38, 2006. pp. 1022-1031.
- [124] SANTAMOURIS M., i inni: „*Using intelligent clustering techniques to classify the energy performance of school buildings*”. Energy and Buildings 30, 2007. pp. 45-51.
- [125] YIK F.W.H., BURNETT J. I PRESCOTT I.: „*Predicting air-conditioning energy consumption of a group of buildings using different heat rejection methods*”. Energy and Building 33, 2001. pp. 151-166.

- [126] CORGNATI S.P., CORRADO V., FILIPPI M.: „*A method for heating consumption assessment in existing buildings: A field survey concerning 120 Italian schools*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 801-809.
- [127] NIU J.L., ZAHNG L.Z., ZUO H.G.: „*Energy savings potential of chilled-ceiling combined with disiccant cooling in hot and humid climates*”. Energy and Building 34, 2002. pp. 487-495.
- [128] FRACASTORO G.V., MUTANI G., PERINO M.: „*Experimental and theoretical analysis of natural ventilation by window opening*”. Energy and Building 34, 2002. pp. 817-827.
- [129] MEDVED S., NOVAK P.: „*Heat transfer through a double pane window with an insulation screen open at the top*”. Energy and Buildings 28, 1998. pp. 257-268.
- [130] DASCALAK E., i inni: „*Modeling large openings with COMIS*”. Energy and Buildings 30, 1999. pp. 105-115.
- [131] KONTOLEON K.J., BIKAS D.K.: „*Modeling the influence of glazed openings percentage and type of glazing on the thermal zone behavior*”. Energy and Buildings 34, 2002. pp. 389-399.
- [132] VOELTZEL A., CARRIE F.R. i GUARRACINO G.: „*Thermal and ventilation modeling of large highly-glazed spaces*”. Energy and Buildings 33, 2001. pp. 121-132.
- [133] KOSSECKA E. I KOSNY J.: „*Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building*”. Energy and Buildings 34, 2002. pp. 321-331.
- [134] KUZNIK F., VIRGONE J., ROUX J.: „*Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation*”. Energy and Buildings 40, 2008. pp. 148-156.
- [135] STRITI U.: „*Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage system for buildings*”. Energy and Buildings 35, 2003. pp. 1097-1104.
- [136] KOSCHENZ M., LEHMANN B.: „*Development of thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings*”. Energy and Building 36, 2004. pp. 567-578.
- [137] PASUPATHY A., VELRAJ R.: „*Effect of double layer phase change material in building roof for year round thermal management*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 193-203.
- [138] WANG X., NIU J., VAN PAASSEN A.H.C.: „*Raising evaporative cooling potentials using combined cooled ceiling and MPCM slurry storage*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 1691-1698.
- [139] EICKER U., i inni: „*Facades and summer performance of buildings*”. Energy and Buildings 40, 2008. pp. 600-611.
- [140] QIU K., HAGHIGHAT Q.: „*Modeling the combined conduction – Air infiltration through diffusive building envelope*”. Energy and Buildings 39, 2007. pp. 1140-1150.
- [141] TSILINGIRIS P.T.: „*Parametric space distribution effects of wall heat capacity and thermal resistance on the dynamic thermal behavior of walls and structures*”. Energy and Buildings 38, 2006. pp. 1200-1211.
- [142] SAELENS D., ROELS S., HENS H.: „*The inlet temperature as a boundary condition for multiple-skin facade modelling*”. Energy and Building 36, 2004. pp. 825-835.
- [143] PAVLIK Z., CERNY R.: „*Experimental assessment of hygrothermal performance of an interior thermal insulation system using a laboratory technique simulating on-site conditions*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 673-678.
- [144] CHOI S., KRARTI M.: „*Thermally optional insulation distribution for underground structures*”. Energy and Buildings 32, 2000. pp. 251-165.

- [145] ZISKIND G., DUBOVSKY V., LETAN R.: „*Ventilation by natural convection of a one-story building*”. Energy and Buildings 34, 2002. pp. 91-102.
- [146] SRESHTHAPUTRA A., HABERL J., ANDREWS M.J.: „*Improving building design and operation of a Thai Buddhist temple*”. Energy and Building 36, 2004. pp. 481-494.
- [147] ONMURA S., MATSUMOTO M., HOKOI S.: „*Study on evaporative cooling effect of roof with lawn gardens*”. Energy and Buildings 33, 2001. pp. 653-666.
- [148] CARRILHO DA GRACA G., i inni: „*Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai*”. Energy and Buildings 34, 2002. pp. 1-11.
- [149] DRORI U., ZISKIND G.: „*Induced ventilation of a one-story real-size building*”. 2004, Energy and Buildings 36, pp. 881-890.
- [150] LEE K.H., STRAND R.K.: „*The cooling and heating potential on an earth tube system in buildings*.. Energy and Buildings 40, 2008. pp. 486-494.
- [151] AKBARI H., i inni: „*Peak power and cooling energy savings of shade trees*”. Energy and Buildings 25, 1997, pp. 139-148.
- [152] MIGUEL A. F.: „*Constructural design of solar energy-based systems for buildings*”. Energy and Building 40, 2008. pp. 1020-1030.
- [153] GERMANO M.: „*Assessing the natural ventilation potential of the Basel region*”. Energy and Building 39, 2007. pp. 1159-1166.
- [154] TAN G., GLICKSMAN L.R.: „*Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction*”. Energy and Building 37, 2005. pp. 1049-1057.
- [155] KAIM S., ROJEK R., WRZUSZCZAK M.: „*Wybrane zagadnienia fizyki matematycznej. Modelowanie*”. Opole: OW PO, 2008.
- [156] SZARGUT J.: „*Termodynamika*”. Warszawa: Wyd. Naukowe PWN, 2000.
- [157] Multiphysics, Comsol. „*Modeling Guide Version 3.3*”. (2006)
- [158] Multiphysics, Comsol. „*User's Guide Version 3.3*”. (2006)
- [159] CARR J.C., FRIGHT W.R., BEASTON R.K.: „*Surface interpolation with radial basis functions for medical imaging*”. IEEE Transactions on Medical Imaging 16, 1997. pp. 96-107.
- [160] MASON J.C., COX M. G.: „*Algorithms for approximation*”. New York: Clarendon Press, 1987.
- [161] JÓŹWIAK J., PODGÓRSKI J.: „*Statystyka od podstaw*”. Warszawa: Państwowe Wyd. Ekonomiczne, 1994.
- [162] KRYGER K., KLINKE T., SEWERYNIK J.: „*Ogrzewnictwo wentylacja klimatyzacja*”. Warszawa: WSiP, 1991.
- [163] KOWALCZYK M.: „*Nowoczesne systemy grzewcze. Promienniki podczerwieni*”. Gdańsk: Solaren-Bis, 2002.
- [164] KOWALCZYK M.: „*Ogrzewanie obiektów promiennikami podczerwieni*”. Gdańsk: Solaren-Bis, 1999.
- [165] www.ogrzewaniehal.info. (2008)
- [166] www.teotherm.com.pl. (2008)
- [167] www.commonswikimedia.org. (2008)
- [168] JANUSZKIEWICZ K.: „*Elektryczne akumulacyjne ogrzewanie pomieszczeń*”. Warszawa: Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, 1998.
- [169] www.eneakomfort.pl. (2008)

Streszczenie

Tematyka monografii dotyczy problematyki ogrzewania obiektów sakralnych. Głównym celem poznawczym było wypracowanie metodyki postępowania przy projektowaniu systemów grzewczych zaopatrujących tego typu obiekty w energię ciepłą, która byłaby użyteczna dla całej grupy budowli sakralnych.

Dla realizacji założonego celu przeprowadzono kolejno pomiary wybranych parametrów mikroklimatu oraz wyznaczono rozkład temperatury w Katedrze Opolskiej. Pomiary wybranych parametrów mikroklimatu przeprowadzono z wykorzystaniem cyfrowego miernika mikroklimatu BABUC M.

Otrzymane wartości parametrów środowiska termicznego umożliwiły wyznaczenie wskaźników charakteryzujących komfort cieplny przebywających w obiekcie osób oraz na określenie zależności korelacyjnych i regresyjnych występujących pomiędzy wybranymi parametrami mikroklimatu i klimatu zewnętrznego. Znajomość tych wielkości jest pomocna przy wyznaczaniu zapotrzebowania na moc ciepłą przez obiekty sakralne.

Po wyznaczeniu wielkości zapotrzebowania na moc ciepłą Katedry Opolskiej, przeprowadzeniu analiz porównawczych cen podstawowych nośników energii oraz funkcjonalności możliwych do zastosowania rozwiązań technicznych systemu grzewczego, określeniu kosztów inwestycyjnych związanych z instalacją, wybrano najbardziej korzystne rozwiązanie, a następnie je zaimplementowano.

Do oceny efektów zastosowanego systemu grzewczego w monografii zaproponowano badanie rozkładu temperatury wewnątrz Katedry Opolskiej. W tym celu, zaprojektowano i zbudowano system pomiarowy pozwalający na jednoczesny pomiar temperatury w 288 punktach.

Ponadto w monografii przedstawiono wyniki modelowania numerycznego w środowisku COMSOL *Multiphysics Module* pozwalające na wyznaczenie teoretycznego rozkładu temperatury wewnątrz obiektu podczas pracy systemu grzewczego. Wyniki badań symulacyjnych porównano z wynikami uzyskanymi podczas eksperymentu, otrzymując zadowalającą zgodność dopasowania modelu charakteryzującą się wysokim współczynnikiem determinacji.

Rezultaty prac potwierdziły fakt, że badania symulacyjne mogą być przydatne w procesie projektowania systemów grzewczych dla obiektów sakralnych.

Rozwiązanie problemu zapewnienia komfortu cieplnego jest zagadnieniem wielopłaszczyznowym i złożonym, dlatego też zaproponowana metodologia postępowania powinna być wykorzystywana przez osoby realizujące podobne zadania.

Summary

The measurements and numerical modeling thermal comfort in sacred buildings

The field of inquiry of this monograph concerns heating of sacred buildings. The main aim was to work out a methodological procedure in creating projects of heating systems providing thermal energy for the like types of objects. Such energy would be useful in a wide range of sacred buildings. In order to accomplish such an aim the measurements of the selected parameters of microclimate were conducted. What is more, a temperature layout in the Cathedral of the Diocesan of Opole was determined. The measurements of the selected parameters of microclimate were conducted with use of Digital Microclimate Meter BABUC M. The obtained values of the thermal environment enabled to determine indicators characterising the thermal comfort of people staying inside the building. Moreover, it also enabled to determine the correlational and regressive dependencies appearing among the selected microclimate and outdoor climate parameters. Knowing these numbers is helpful in determining the demand of thermal power in sacred buildings. Having determined the level of the demand for thermal power of Opole Cathedral and having analysed the prices of the basic carriers of energy and technical functionalities of potential heating system, the costs of investment were estimated and the most beneficial solution was chosen and implemented.

To assess the effects of the implemented heating system the author of the monograph proposed research of the temperature layout inside Opole Cathedral. For this purpose, a measurement system allowing for measuring, at the same time, of temperature in 288 points was designed and constructed. Furthermore, the author presented the results of numerical modelling in the COMSOL *Multiphysics Module*, which allows for determining a theoretical temperature layout inside the building while the heating system is working. The results of simulational research were compared to the results obtained in the course of the experiment and the author reached satisfactory accordance of the model adjustment, which was characterised by a high determination factor. The results supported the idea that simulational research maybe useful in a process of designing heating systems for sacred buildings. Solving the problems of providing the thermal comfort is a multilevel and complex issue. Therefore, the proposed methodological procedure should be employed by the researchers conducting similar studies.

Załącznik A

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla parametrów opisujących klimat i mikroklimat Katedry Opolskiej

Tabela A.1

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury powietrza t_a wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1a, 4.3a)

Tabela A.2

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury wilgotnej naturalnej t_g wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1b, 4.3b)

Tabela A.3

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury poczernionej kuli t_r wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1c, 4.3c)

Tabela A.4

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla wilgotności względnej powietrza RH wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1d, 4.3d)

Tabela A.5

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury zewnętrznej T_{zewn} wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.2a, 4.4a)

Tabela A.6

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla wilgotności względnej RH_{zewn} wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.2b, 4.4b)

Tabela A.1

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury powietrza t_a wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1a, 4.3a)

Liczba klas	Dolna granica klasy	Górna granica klasy	Liczebność klasy	Liczebność skumulowana	Procent ważnych	Skumulowany % ważnych
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[%]	[%]
okres zimowy						
1	2	3	3	3	0,18	0,18
2	3	4	19	22	1,16	1,35
3	4	5	75	97	4,60	5,94
4	5	6	191	288	11,70	17,65
5	6	7	338	626	20,71	38,36
6	7	8	439	1065	26,90	65,26
7	8	9	335	1400	20,53	85,78
8	9	10	148	1548	9,07	94,85
9	10	11	59	1607	3,62	98,47
10	11	12	25	1632	1,53	100,00
okres letni						
1	17,0	17,50	5	5	0,41	0,41
2	17,5	18,00	16	21	1,30	1,71
3	18,0	18,50	48	69	3,90	5,61
4	18,5	19,00	109	178	8,85	14,46
5	19,0	19,50	185	363	15,03	29,49
6	19,5	20,00	215	578	17,47	46,95
7	20,0	20,50	227	805	18,44	65,39
8	20,5	21,00	166	971	13,48	78,88
9	21,0	21,50	132	1103	10,72	89,60
10	21,5	22,00	82	1185	6,66	96,26
11	22,0	22,50	34	1219	2,76	99,03
12	22,5	23,00	12	1231	0,97	100,00

Źródło: opracowanie własne.

Tabela A.2

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury wilgotnej naturalnej t_g wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1b, 4.3b)

Liczba klas	Dolna granica klasy	Górna granica klasy	Liczebność klasy	Liczebność skumulowana	Procent ważnych	Skumulowany % ważnych
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[%]	[%]
okres zimowy						
1	2	3	0	0	0,0	0,0
2	3	4	13	13	0,8	0,8
3	4	5	75	88	4,6	5,4
4	5	6	199	287	12,2	17,6
5	6	7	372	659	22,8	40,4
6	7	8	459	1118	28,1	68,5
7	8	9	325	1443	19,9	88,4
8	9	10	125	1568	7,7	96,1
9	10	11	59	1627	3,6	99,7
10	11	12	5	1632	0,3	100,0
okres letni						
1	18,0	18,5	23	23	1,9	1,9
2	18,5	19,0	55	78	4,5	6,3
3	19,0	19,5	119	197	9,7	16,0
4	19,5	20,0	185	382	15,0	31,0
5	20,0	20,5	246	628	20,0	51,0
6	20,5	21,0	225	853	18,3	69,3
7	21,0	21,5	172	1025	14,0	83,3
8	21,5	22,0	124	1149	10,1	93,3
9	22,0	22,5	64	1213	5,2	98,5
10	22,5	23,0	18	1231	1,5	100,0

Źródło: opracowanie własne.

Tabela A.3

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury poczernionej kuli t_r wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1c, 4.3c)

Liczba klas	Dolna granica klasy	Górna granica klasy	Liczebność klasy	Liczebność skumulowana	Procent ważnych	Skumulowany % ważnych
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[%]	[%]
okres zimowy						
1	1,0	2,0	0	1	0,00	0,06
2	2,0	3,0	14	15	0,86	0,92
3	3,0	4,0	86	101	5,27	6,19
4	4,0	5,0	215	316	13,17	19,36
5	5,0	6,0	396	712	24,26	43,63
6	6,0	7,0	468	1180	28,68	72,30
7	7,0	8,0	304	1484	18,63	90,93
8	8,0	9,0	107	1591	6,56	97,49
9	9,0	10,0	37	1628	2,27	99,75
10	10,0	11,0	4	1632	0,25	100,00
okres letni						
1	18,0	18,5	0	0	0,00	0,00
2	18,5	19,0	59	59	4,79	4,79
3	19,0	19,5	146	205	11,86	16,65
4	19,5	20,0	289	494	23,48	40,13
5	20,0	20,5	204	698	16,57	56,70
6	20,5	21,0	189	887	15,35	72,06
7	21,0	21,5	158	1045	12,84	84,89
8	21,5	22,0	102	1147	8,29	93,18
9	22,0	22,5	70	1217	5,69	98,86
10	22,5	23,0	14	1231	1,14	100,00

Źródło: opracowanie własne.

Tabela A.4

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla wilgotności względnej powietrza RH wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.1d, 4.3d)

Liczba klas	Dolna granica klasy	Górna granica klasy	Liczebność klasy	Liczebność skumulowana	Procent ważnych	Skumulowany % ważnych
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[%]	[%]
okres zimowy						
1	35,0	40,0	0	0	0,00	0,00
2	40,0	45,0	25	25	1,53	1,53
3	45,0	50,0	101	126	6,19	7,72
4	50,0	55,0	224	350	13,73	21,45
5	55,0	60,0	446	796	27,33	48,77
6	60,0	65,0	478	1274	29,29	78,06
7	65,0	70,0	257	1531	15,75	93,81
8	70,0	75,0	84	1615	5,15	98,96
9	75,0	80,0	17	1632	1,04	100,00
okres letni						
1	45,0	50,0	4	4	0,32	0,32
2	50,0	55,0	67	71	5,44	5,77
3	55,0	60,0	353	424	28,68	34,44
4	60,0	65,0	578	1002	46,95	81,40
5	65,0	70,0	217	1219	17,63	99,03
6	70,0	75,0	12	1231	0,97	100,00

Źródło: opracowanie własne.

Tabela A.5

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla temperatury zewnętrznej T_{zewn} wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.2a, 4.4a)

Liczba klas	Dolna granica klasy	Górna granica klasy	Liczebność klasy	Liczebność skumulowana	Procent ważnych	Skumulowany % ważnych
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[%]	[%]
okres zimowy						
1	-25	-20	0	0	0,00	0,00
2	-20	-15	30	30	1,89	1,89
3	-15	-10	56	86	3,53	5,42
4	-10	-5	227	313	14,29	19,71
5	-5	0	670	983	42,19	61,90
6	0	5	431	1414	27,14	89,04
7	5	10	126	1540	7,93	96,98
8	10	15	45	1585	2,83	99,81
9	15	20	3	1588	0,19	100,00
okres letni						
1	0	5	0	0	0,00	0,00
2	5	10	56	56	4,61	4,61
3	10	15	350	406	28,83	33,44
4	15	20	286	692	23,56	57,00
5	20	25	305	997	25,12	82,13
6	25	30	133	1130	10,96	93,08
7	30	35	65	1195	5,35	98,43
8	35	40	19	1214	1,57	100,00

Źródło: opracowanie własne.

Tabela A.6

Zestawienie wartości wielkości wykorzystanych do utworzenia histogramu i funkcji gęstości dla wilgotności względnej RH_{zewn} wyznaczonej w okresie letnim i zimowym (rys. 4.2b, 4.4b)

Liczba klas	Dolna granica klasy	Górna granica klasy	Liczebność klasy	Liczebność skumulowana	Procent ważnych	Skumulowany % ważnych
[-]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[%]	[%]
okres zimowy						
1	20	30	0	0	0,00	0,00
2	30	40	11	11	0,69	0,69
3	40	50	36	47	2,27	2,96
4	50	60	72	119	4,53	7,49
5	60	70	135	254	8,50	15,99
6	70	80	229	483	14,42	30,42
7	80	90	539	1022	33,94	64,36
8	90	100	566	1588	35,64	100,00
okres letni						
1	10	20	0	0	0,00	0,00
2	20	30	43	43	3,54	3,54
3	30	40	66	109	5,44	8,98
4	40	50	146	255	12,03	21,00
5	50	60	130	385	10,71	31,71
6	60	70	289	674	23,81	55,52
7	70	80	265	939	21,83	77,35
8	80	90	275	1214	22,65	100,00

Źródło: opracowanie własne.

Załącznik B

Ocena normalności rozkładów empirycznych zarejestrowanych wybranych wartości mikroklimatu Katedry Opolskiej

Na podstawie histogramów przedstawionych na rys. od 4.1 do 4.4. można stwierdzić, że zarejestrowane wartości mikroklimatu i klimatu posiadają rozkład normalny lub zbliżony do niego. W celu określenia normalności rozkładów parametrów charakteryzujących mikroklimat Katedry Opolskiej, przyjęto nieparametryczną hipotezę zerową H_0 , zakładającą, że zmierzone wartości parametrów mikroklimatu mają rozkład, który można opisać za pomocą dystrybuanty $F(x)$ odpowiadający funkcji gęstości rozkładu normalnego sformułowanej przez Gaussa-Laplace'a. Natomiast w hipotezie alternatywnej H_1 założono, że otrzymane pomiary nie należą do zbioru dystrybuant normalnych. Przyjęte hipotezy można zapisać w postaci [51, 52]:

$H_0: F(x) \in \Omega$; gdzie Ω jest klasą wszystkich dystrybuant normalnych

$H_1: F(x) \notin \Omega$

Weryfikację założonej hipotezy zerowej wykonano przy zastosowaniu nieparametrycznego testu zgodności χ^2 , który jest najczęściej wykorzystywany przy sprawdzaniu hipotez o równoważności doświadczalnej gęstości prawdopodobieństwa zmierzonych parametrów mikroklimatu z założoną teoretyczną gęstością prawdopodobieństwa. Obliczenia przeprowadzono dla wartości poziomu istotności $\alpha = 0,05$, standardowo przyjmowanej w tego typu analizach [50-52,56].

Ujęte w tab. B.1 wielkości wyznaczono za pomocą procedur numerycznych pakietu komputerowego STATISTICA 7.1. Wyniki przeprowadzonych weryfikacji przedstawione w tab. B.1 zawierają porównanie sumarycznej wartości χ^2 rozkładu obliczonej dla wartości temperatur i wilgotności mikroklimatu i klimatu dla okresu zimowego i letniego, z wartością krytyczną χ^2_α , jaka została odczytana z tabeli rozkładu dla poprawionej liczby stopni swobody oraz zadanej wartości poziomu istotności. Skorygowana liczba stopni swobody uwzględnia

liczbę przedziałów klasowych, których liczność jest większa lub równa 5, pomniejszoną o liczbę parametrów charakteryzujących rozkład normalny, która wynosiła dwa.

Tabela B.1

Zestawienie porównawcze wartości rozkładu χ^2 obliczone dla parametrów klimatu i mikroklimatu Katedry Opolskiej wyznaczone w okresie zimowym i letnim i odczytane z tabeli rozkładu χ^2_α , dla poprawionej liczby stopni swobody oraz zadanej wartości poziomu istotności

Parametr mikro-klimatu	α	Stopnie swobody r-1	Poprawiony stopień swobody $r (\geq 5) - s (=2) - 1$	χ^2	χ^2_α
okres zimowy					
t_a	0,05	9	6	12,508	12,592
t_g	0,05	9	6	12,565	12,592
t_r	0,05	8	5	6,638	11,070
RH	0,05	8	5	8,442	11,070
T_{zewn}	0,05	9	6	8,524	12,592
RH_{zewn}	0,05	10	7	8,412	14,067
okres letni					
t_a	0,05	12	9	11,240	16,919
t_g	0,05	11	8	13,508	15,507
t_r	0,05	9	6	11,771	15,592
RH	0,05	12	9	16,800	16,919
T_{zewn}	0,05	10	7	12,529	14,067
RH_{zewn}	0,05	10	7	13,598	14,067

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie otrzymanych wyników wartości rozkładu χ^2 obliczonych dla parametrów mikroklimatu Katedry Opolskiej, jak również klimatu, które wyznaczono w okresie zimowym i letnim, są mniejsze od wartości krytycznych χ^2_α dla $\alpha=0,05$. Nie należą zatem do obszaru krytycznego testu określonego:

$$\{\chi^2; \chi^2_\alpha \geq \chi^2_{0,05}\} \quad (2.1)$$

Na tej podstawie można przyjąć, że zmienne: t_a , t_g , t_r , RH oraz T_{zewn} i RH_{zewn} mają rozkłady normalne. Parametry rozkładów badanych wielkości przedstawiono w tab. B.2.

Tabela B.2

Wartości parametrów rozkładu wybranych elementów mikroklimatu
Katedry Opolskiej

Parametr mi- kroklimatu	Okres	Parametry rozkładu	
		średnia	wariancja
t_a	zimowy	7,4	2,3
	letni	20,6	1,1
t_g	zimowy	7,3	2,1
	letni	20,5	1,0
t_r	zimowy	7,2	1,9
	letni	20,5	0,9
RH	zimowy	60,0	43,4
	letni	61,5	15,9

Ź r ó ł o: opracowanie własne.

Załącznik C

Charakterystyka aktualnie stosowanych systemów do ogrzewania obiektów sakralnych

C.1. Ogrzewanie ciepłym powietrzem

W ogrzewaniu powietrznym nośnikiem ciepła, dostarczającym energię cieplną do ogrzewanego pomieszczenia, jest powietrze o wysokiej temperaturze ($60\div 80$)°C, które nawiewane miesza się z powietrzem znajdującym się w pomieszczeniu, podwyższając jego temperaturę i pokrywając w ten sposób straty powstałe wskutek przenikania i infiltracji. Ogrzewanie powietrzne można podzielić na dwa podstawowe typy:

- powietrzne grawitacyjne,
- powietrzne z pobudzeniem mechanicznym.

Ogrzewanie powietrzne grawitacyjne było znane i wykorzystywane już w starożytności i średniowieczu. Współcześnie zastąpił je wydajniejszy i bardziej ekonomiczny system ogrzewania powietrznego z pobudzeniem mechanicznym.

Urządzenia, w których powietrze ogrzewa się bezpośrednio w źródle ciepła są nazywane ogrzewaniem bezpośrednim. Do grupy tej należy ogrzewanie ogniowo-powietrzne. W ogrzewaniu powietrznym pośredni nośnik ciepła (woda lub para) jest dostarczany do wymiennika ciepła znajdującego się w nagrzewnicy, gdzie oddaje moc cieplną przepływającemu powietrzu. Rozwiązaniem tego typu jest ogrzewanie wodno-powietrzne lub parowo-powietrzne. Tego typu ogrzewanie stosowane jest jedynie w budownictwie przemysłowym. Ma ono wszystkie zalety i wady ogrzewania wodnego, parowego i powietrznego.

Zasada działania grawitacyjnego ogrzewania powietrznego jest taka sama jak wodnego ogrzewania grawitacyjnego. Powietrze przepływające przez piec ogrzewa się od jego powierzchni, zmniejszając swoją gęstość. Gorące, lżejsze powietrze jest wypychane do przewodów rozprowadzających przez chłodniejsze (cięższe) powietrze dopływające innym kanałami z ogrzewanych pomieszczeń do dolnej części pieca.

Siła wyporu, która powoduje przepływ powietrza przez kanały, od pieca do ogrzewanego pomieszczenia i z powrotem, zależy, podobnie jak w ogrzewaniu wodnym grawitacyjnym, od różnicy gęstości powietrza zimnego i gorącego oraz różnicy wysokości między środkiem kratki nawiewnej. Ponieważ różnica gęstości powietrza gorącego i zimnego jest bardzo mała ($\rho_{p20^{\circ}\text{C}} = 1,20 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{p70^{\circ}\text{C}} = 1,03 \text{ kg/m}^3$), więc by uzyskać ciśnienie grawitacyjne wynoszące ok. 5 Pa konieczne jest obniżenie pieca w stosunku do ogrzewanego pomieszczenia o co najmniej 3,0 m. Ze względu na małą wartość ciśnienia grawitacyjnego trzeba stosować krótkie przewody powietrzne o dużych przekrojach i izolować je przed stratami ciepła, zmniejszającymi siłę wyporu. Wskutek tych ograniczeń grawitacyjne ogrzewanie powietrzne znalazło zastosowanie jedynie w dużych podpiwnicznych halach i kościołach.

Ogrzewanie powietrzne z pobudzeniem mechanicznym ma w porównaniu z ogrzewaniem powietrzem grawitacyjnym następujące zalety:

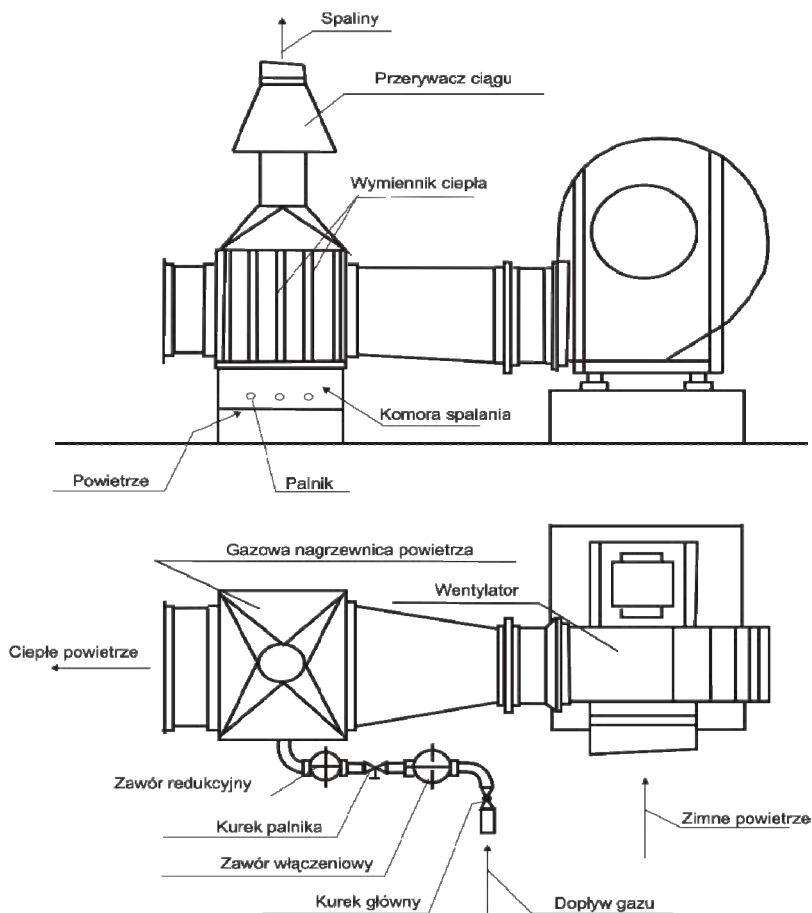
- mniejsze wymiary przewodów, przy tej samej wydajności cieplnej,
- większą dowolność w prowadzeniu przewodów,
- większą moc cieplną źródła ciepła, przy tej samej powierzchni grzejnej,
- mniejszą bezwładność cieplną,
- większą możliwość regulacji temperatury i strumienia objętości powietrza,
- możliwość zastosowania urządzeń do obróbki powietrza, takich jak: filtry, chłodnice, nawilżacze itp.

Wadami ogrzewania powietrznego z pobudzeniem mechanicznym, w porównaniu z ogrzewaniem powietrzem grawitacyjnym, są:

- większe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne związane z poborem energii elektrycznej przez wentylator,
- bardziej kłopotliwa obsługa,
- hałaśliwa praca wentylatora.

W ogrzewaniu ogniowo-powietrznym źródłem ciepła jest piec, który w zależności od konstrukcji może być opalany węglem, olejem opałowym lub gazem.

Starsze konstrukcje pieców węglowych (koksowych), stosowanych do ogrzewania grawitacyjnego dużych pomieszczeń (najczęściej kościołów), miały rozbudowaną powierzchnię zewnętrzną. Było to niezbędne do zwiększenia przejmowania mocy cieplnej przez przepływające powietrze. Zastąpienie paliwa stałego gazem lub olejem opałowym oraz wprowadzenie wymuszonego przepływu powietrza bardzo zmieniło konstrukcję pieców. Powstały agregaty grzewcze składające się z wymiennika ciepła – nagrzewnicy (najczęściej gazowej, choć mogą być olejowe lub elektryczne), palnika i armatury regulacyjno-zabezpieczającej oraz wentylatora (rys. C.1).



Rys. C.1. Schemat aparatu grzewczego z gazową nagrzewnicą powietrza i wentylatorem
 Źródło: [162].

Podobne urządzenia o mniejszej mocy cieplnej mają estetyczną obudowę – są to zespoły ogrzewcze. Ogrzane w zespole ogrzewczym powietrze jest przesyłane do pomieszczeń przewodami, wykonanymi z blachy stalowej czarnej lub ocynkowanej. Jeśli stropy są grube, to można wykonywać kanały murowane. Wszystkie przewody znajdujące się w pomieszczeniach bez ogrzewania powinny być izolowane. Układ przewodów zależy przede wszystkim od konstrukcji budynku. Ogrzewania wodno-powietrzne i parowo-powietrzne różnią się między sobą jedynie rodzajem nośnika ciepła. W ogrzewaniach wodno-powietrznych nośnikiem ciepła może być woda o niskich parametrach, tj. o temperaturze nie przekraczającej 95°C , jak również woda o wysokich parametrach, tj. o temperaturze powyżej 115°C . W parowo-wodnych systemach grzewczych,

nośnikiem ciepła może być zarówno para niskoprężna, jak i para wysokoprężna. W obu przypadkach niezbędne jest doprowadzenie do nagrzewnicy powietrza nośnika ciepła, siecią wodną lub parową. Ogrzewania wodno-powietrzne i parowo-powietrzne stosowane są jedynie w budownictwie przemysłowym, gdzie występuje technologiczny nośnik ciepła o wysokich parametrach, a hałas wywołany pracą wentylatora oraz wypływem powietrza z agregatu grzewczo-wentylacyjnego jest niewielki w stosunku do hałasu powstającego w toku produkcyjnym.

Wymiarowanie instalacji ogrzewania ogniowo-powietrznego z pobudzeniem mechanicznym polega na:

- określeniu ilości nawiewanego powietrza,
- doborze mocy cieplnej pieca lub nagrzewnicy,
- doborze wentylatora oraz przekrojów kanałów powietrznych.

Ilość nawiewanego powietrza – strumień objętości \dot{V} – określa się na podstawie strat mocy cieplnej ogrzewanego pomieszczenia – \dot{Q} oraz różnicy między temperaturą powietrza nawiewanego – t_n i temperaturą powietrza wewnętrznego – t_i wg wzoru [162]:

$$\dot{V} = \frac{3600 \dot{Q}}{(t_n - t_i)c_p \cdot \rho_p}, \quad (\text{C.1})$$

gdzie: c_p – ciepło właściwe powietrza w temperaturze $t_s = (t_n - t_i)/2$, [kJ/(kg·K)],
 ρ_p – gęstość powietrza w temperaturze $t_s = (t_n + t_i)/2$, [kg/m³].

Wartość temperatury nawiewanego powietrza zależy od miejsca i sposobu doprowadzania energii cieplnej do obiektu. W pomieszczeniach mieszkalnych, gdzie powinna być zachowana równomierna temperatura powietrza w całej jego masie i nieduża prędkość wypływu z kratki, zalecana jest temperatura nawiewanego powietrza $t_n = (30 \div 45)^\circ\text{C}$. Im jest ona wyższa, tym różnica $\Delta t = t_n - t_i$ jest większa, a strumień objętości nawiewanego powietrza \dot{V} mniejszy. Wraz ze zwiększeniem temperatury nawiewanego powietrza zmniejszają się niezbędne wymiary przewodów i powierzchni wymiany w źródle ciepła, ale równocześnie zwiększa się zróżnicowanie rozkładu temperatury powietrza w ogrzewanym pomieszczeniu. Jeżeli w ogrzewanym pomieszczeniu nie są wymagane warunki komfortu cieplnego, np. w pomieszczeniach przemysłowych, temperatura nawiewanego powietrza może być znacznie wyższa. Zalecane wartości temperatury nawiewanego powietrza wynoszą $t_n = (50 \div 60)^\circ\text{C}$, a w ogrzewaniu parowo-powietrznym mogą być jeszcze wyższe.

Powierzchnię ogrzewalną pieca lub nagrzewnicy dobiera się wg katalogów producentów tych urządzeń, znając moc cieplną równą sumie zapotrzebowania

ze wszystkich ogrzewanych pomieszczeń z uwzględnieniem strat mocy cieplnej przewodów przesyłowych.

W ogrzewaniach wodno-powietrznych i parowo-powietrznych aparaty grzewczo-wentylacyjne dobiera się na podstawie tabel opracowanych przez ich producenta. Można odczytać z nich moc cieplną uzyskiwaną przy różnych wartościach temperatury powietrza przed i za nagrzewnicą.

C.2. Ogrzewanie z wykorzystaniem promienników gazowych, elektrycznych i wodnych

Zasada ogrzewania za pomocą promienników jest bardzo zbliżona do ogrzewania słonecznego. Długość fali elektromagnetycznej emitowanej przez urządzenie leży w zakresie promieniowania podczerwonego. Maksymalna długość fali $\lambda = 3 \text{ mm}$, zatem należy ona do rodzaju promieniowania długofalowego. Fale o większej długości są mniej narażone (mają mniejszą zdolność) na rozpraszanie w powietrzu na cząsteczkach kurzu, pyłu, itp.

Strumień ciepła przenikający z pomieszczenia na zewnątrz (straty ciepła) jest wprost proporcjonalny do różnicy temperatur. Redukcja temperatury o 1°C pozwala zaoszczędzić energię o około 5%. Ogrzewanie za pomocą fal podczerwieni minimalizuje stopień nagrzewania powietrza, co ma bezpośredni wpływ na powstałą różnicę temperatur pomiędzy strefami powietrza przy suficie i przy podłodze. W ten sposób zminimalizowana jest "ucieczka" ciepłego powietrza w wyższe partie pomieszczeń.

Promieniowanie zamienia się w ciepło dopiero przy natrafieniu na osobę lub przedmiot i nagrzewa je: w związku z powyższym przebywając w pomieszczeniu nagrzewanym przez promiennik odczuwamy wysoki komfort cieplny, pomimo że powietrze znajdujące się wokół nas ma niższą temperaturę w porównaniu z ogrzewaniem konwencjonalnym. Z niższą temperaturą powietrza w pomieszczeniu wiąże się bardzo ważny fakt, a mianowicie: różnica temperatury w pomieszczeniu i na zewnątrz jest mniejsza niż przy stosowaniu ogrzewania konwencjonalnego. Zatem w przypadku ogrzewania promiennikami uzyskuje się mniejsze straty ciepła. Dlatego znajdują one zastosowanie w pomieszczeniach posiadających duże otwory okienne lub dużą liczbę drzwi np. szklarnie, magazyny, kościoły, hale przemysłowe i sportowe, jak również pomieszczenia mieszkalne. Promiennik podczerwieni jest jednym z niewielu sztucznych źródeł ciepła, które można wykorzystać do ogrzewania na zewnątrz.

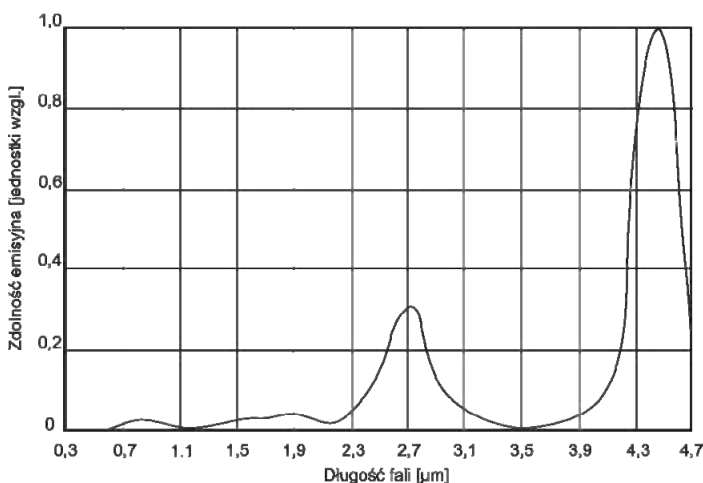
Pod względem fizycznej natury promieniowania, promienniki podczerwieni można podzielić na cztery grupy [163,164]:

- pierwsza, do której zalicza się źródła promieniowania temperaturowego, występuje wtedy, gdy promienniki wysyłają energię promieniowania na skutek ogrzewania ciał do określonej temperatury lub w wyniku spalania gazów (promienniki gazowe),

- druga to promienniki elektroluminescencyjne, w których promieniowanie podczerwone powstaje na zasadzie elektroluminescencji, czyli świecenia gazów lub par metali, w których zachodzi wyładowanie elektryczne,
- trzecia to promienniki typu kombinowanego, gdzie obok promieniowania temperaturowego, wykorzystuje się zjawisko elektroluminescencji,
- czwarta to promienniki działające na zasadzie wymuszonej emisji promieniowania podczerwonego. Urządzenia te noszą nazwę kwantowych wzmacniaczy promieniowania lub maserów. Wytwarzają one spójną, małorozbieżną wiązkę promieniowania.

Promieniowanie podczerwone (temperaturowe) występuje wtedy, gdy temperatura ciała promieniującego jest wyższa od zera bezwzględnego. Jest to promieniowanie typu selektywnego, ponieważ w tzw. pasmach pochłaniania produktów spalania ma największą moc dla odpowiadających im zakresów długości fal. Płomień palnika bunsenowskiego, stanowiący podstawowy element każdego promiennika gazowego, daje selektywne promieniowanie w paśmie pochłaniania dwutlenku węgla i pary wodnej, ponieważ woda i dwutlenek węgla są głównymi produktami spalania gazu [163,164].

Na rys. C.2 przedstawiono widmowy rozkład mocy promieniowania palnika bunsenowskiego, gdzie widoczne są dwa wyraźne pasma, w których płomień promieniuje duże ilości energii. Pierwsze pasmo odpowiada długości fali 2,8 μm (pasmo pochłaniania wody). Drugie – przy długości fali 4,4 μm – odpowiada pasmu pochłaniania cząsteczek dwutlenku węgla [162].



Rys. C.2. Widmowy rozkład mocy promieniowania palnika bunsenowskiego

Źródło: [162].

Promieniowanie podczerwone nie powoduje żadnego chemicznego działania w tkankach. Energia promieniowania wnika do wnętrza tkanki zostaje

pochłonięta przez składniki organizmu żywego i zamienia się w ciepło. Dzięki temu może zmienić temperaturę ogrzewanego ciała. Jej wielkość i rozkład w organizmie żywym zależą od długości fali promieniowania [163,164].

Promieniowanie podczerwone o dużej długości fali jest pochłaniane przez zewnętrzne warstwy skóry, natomiast krótkofalowe (0,76 do 1,5 μm) oraz promieniowanie widzialne przenikają głębiej, przy czym promieniowanie o długości fali powyżej 5 μm nie jest przepuszczane.

Ilość promieniowania przechodzącego przez ludzką skórę zależy do jej grubości, koloru i stopnia zawilgocenia, oraz przede wszystkim od długości fali promieniowania jak również od innych czynników znajdujących się w ciele człowieka, takich jak: protoplazma, woda, hemoglobina itd. Tak więc wszystkie one dają dopiero ostateczną charakterystykę widmową przepuszczalności promieniowania przez skórę [163, 164].

Inny podział promienników podczerwieni wynika z rodzaju zasilania. Mogą one być zasilane gazem płynnym lub ziemnym (promienniki gazowe), energią elektryczną (promienniki elektryczne) oraz promienniki ogrzewane ciepłą wodą (promienniki wodne). Wśród promienników gazowych można wyróżnić dwa rodzaje:

- promienniki rurowe niskotemperaturowe (rys. C.3), zwane także czarnymi, w których proces spalania odbywa się wewnątrz rury grzejnej, a jej powierzchnia nagrzewa się do temperatury (350÷600) $^{\circ}\text{C}$. Powietrze do spalania może być pobierane z ogrzewanego pomieszczenia lub doprowadzane jest osobnym przewodem zasilającym z zewnątrz obiektu. Spaliny wydalone są zawsze poza ogrzewane pomieszczenie. Promienniki te stosowane są głównie tam, gdzie względy technologiczne lub inne wymogi, powodują konieczność instalowania ogrzewania „zakrytego”.

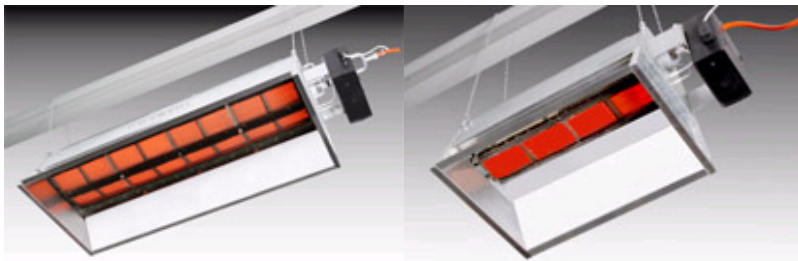


Rys. C.3. Widok ogólny promiennika rurowego niskotemperaturowego

Źródło: [165].

- promienniki panelowe, ceramiczne zwane również promiennikami wysokotemperaturowymi (rys. C.4), w których spalanie gazu odbywa się na powierzchni panelu złożonego z płytek ceramicznych nagrzewanych do temperatury (900÷1000) $^{\circ}\text{C}$. Powietrze do spalania pobierane jest z otoczenia,

a produkty spalania rozprzestrzeniają się wewnątrz pomieszczenia. Ich ilość i jakość nie stwarza zagrożenia dla ludzi przy założeniu istnienia właściwej wentylacji grawitacyjnej oraz odpowiedniej kubatury obiektu ogrzewanego. Promienniki wysokotemperaturowe mogą być instalowane na wysokościach przekraczających 25 m, ale nie niżej niż 4 m.



Rys. C.4. Widok ogólny promienników gazowych wysokotemperaturowych

Źródło: [165].

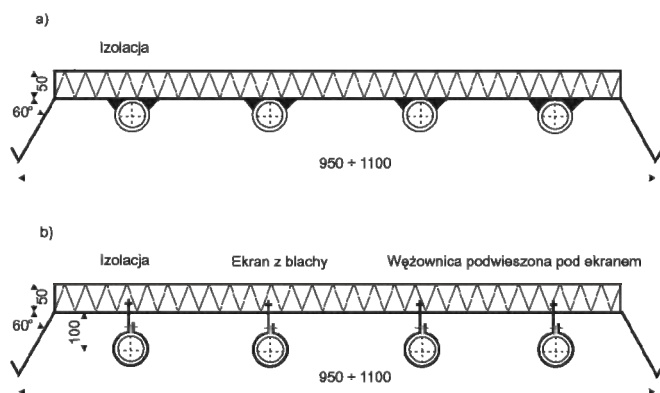
W promiennikach elektrycznych częścią grzejącą jest element ceramiczny, który rozgrzany do temperatury ok. 600°C emituje promieniowanie w zakresie długości fal ($3 \div 4$) μm . Do zalet promienników elektrycznych można zaliczyć:

- użytkowanie bezobsługowe, bezpieczne i niewybuchowe w odróżnieniu od gazu,
- działa „pośrednio” i „bezpośrednio”, emitując ciepło od promiennika do podłogi, ścian i sprzętów, a następnie ogrzewa powietrze,
- można ogrzewać pojedyncze strefy lub miejsca pracy w odróżnieniu od centralnego ogrzewania i nawiewów, które ogrzewają niepotrzebnie całą, często dużą kubaturę,
- można akumulować energię w podłodze i ścianach w nocy, gdy energia jest tańsza, korzystając z ciepła oddawanego w dzień,
- ciepło jest skoncentrowane w niższej, użytkowej części pomieszczenia, a nie pod sufitem w odróżnieniu od centralnego ogrzewania i nawiewów,
- promienniki posiadają minimum 30-letnią trwałość, o wiele dłuższą od każdego pieca lub kotła,
- zajmują miejsce tylko na stropie lub można je mocować wysoko na ścianach,
- powietrze jest czyste – kurz nie krąży w pomieszczeniach,
- promienniki posiadają małą bezwładność cieplną, która powoduje ich szybkie rozgrzewanie, co zapewnia szybki wzrost temperatury w pomieszczeniu,
- posiadają estetyczne i ekologiczne wykonanie,
- wykorzystanie promienników elektrycznych pozwala zaoszczędzić koszt budowy kotłowni i komina,
- posiadają 100% sprawność [163,164].

Promienniki wodne zwane inaczej taśmami promieniującymi stosuje się przeważnie w wysokich halach przemysłowych, gdzie odległość płaszczyzny grzejnej od strefy przebywania ludzi wynosi kilka metrów. Przy takim usytuowaniu promienników możliwe jest znaczne zwiększenie temperatury powierzchni grzejnej. Jako nośnika ciepła w taśmach promieniujących używa się wody o wysokich parametrach, tj. temperaturze powyżej 115°C , lub wysoko-
prężnej o ciśnieniu absolutnym do 1,6 MPa.

Promienniki wodne składają się z ekranu z blachy stalowej o grubości $(1 \div 1,5)$ mm, do którego przymocowana jest wężownica. Jego zadaniem jest zwiększenie powierzchni wypromieniowującej moc ciepłą oraz utrudnienie i przeciwdziałanie niepożądanym w tego typu systemach grzewczych, prądom konwekcyjnym. Krawędzie blachy służące do zwiększania skuteczności ekranu i ukierunkowywania promieniowania tworzą małe skrzydełka odgięte o 60° do dołu. Aby zmniejszyć przekazywanie mocy ciepła taśmy promieniującej do góry, na ekranie umieszcza się warstwę izolacyjną o grubości ok. 50 mm. Wężownica, którą przepływa nośnik ciepła, jest wykonana z rur stalowych bez szwu o średnicy nominalnej $(15 \div 32)$ mm [162].

W rozwiązaniach technicznych spotyka się dwa typy konstrukcji taśm promieniujących różniące się połączeniami ekranu z wężownicą. Typ angielski (rys. C.5a) ma wężownicę ściśle połączoną (zespawaną) z ekranem. Tak ożebrowany ekran ma temperaturę niewiele różniącą się od temperatury rur wężownicy, wskutek czego powierzchnia promieniowania zwiększa się wielokrotnie. Typ francuski (rys. C.5b) ma wężownicę zawieszoną na specjalnych obejmach, w pewnej odległości od ekranu. Tak umieszczona wężownica oddaje ciepło w wyniku promieniowania, a jednocześnie ogrzewa konwekcyjnie powietrze, które ją otacza i jest zatrzymywane przez ekran. Powietrze to ogrzewa ekran (konwekcja), który z kolei przekazuje moc ciepłą do obiektu (promieniowanie).



Rys. C.5. Przykładowy schemat budowy taśm promieniujących:
a) typ angielski, b) typ francuski

Źródło: [162].

Ogrzewanie obiektów o dużej kubaturze za pomocą taśm promieniujących ma w porównaniu z ogrzewaniem powietrznym aparatami grzewczo-wentylacyjnymi pewne zalety i wady. Do zalet należy zaliczyć:

- mniejsze zużycie mocy cieplnej o ok. (15 ÷ 25)% na pokrycie tych samych strat ciepła,
- bardziej równomierny rozkład temperatury,
- lepszy komfort cieplny pomieszczenia,
- nierozdmuchiwanie pyłów, par i gazów,
- cicha praca instalacji,
- oszczędność energii elektrycznej potrzebnej do pracy silników elektrycznych aparatów grzewczo-wentylacyjnych,
- mniejsze koszty eksploatacyjne.

Natomiast do wad można zaliczyć:

- duże koszty inwestycyjne,
- duże zużycie stali,
- duża masa własna urządzenia.

Taśmy promieniujące można zasilać nośnikiem o wysokich parametrach, jeżeli wysokość obiektu przekracza 6 m. Zalety ogrzewania za pomocą taśm promieniujących znacznie przewyższają wady, co jest powodem coraz częstszego stosowania tych urządzeń.

C.3. Elektryczne ogrzewanie podnóżkowe i podławkowe

W niektórych obiektach sakralnych montuje się elektryczne ogrzewanie podnóżkowe lub podławkowe. Grzejniki zasilane energią elektryczną montuje się pod siedziskami ławek lub kłęcznikami. Grzejnik jest skonstruowany tak, że główny strumień ciepła kierowany jest w dół na powierzchnię podłogi. Strumień ciepła odbijając się od podłogi powoduje wzrost temperatury w miejscu, gdzie jest to najbardziej pożądane, a więc na poziomie ławki.

System ogrzewania podławkowego jest systemem energooszczędnym, ponieważ ogrzewana jest tylko część budynku (pomieszczenia) w obszarze przebywania ludzi. Ponadto takie ogrzewanie (w przeciwieństwie do tradycyjnego ogrzewania kubaturowego) chroni rzeźby i drewniane konstrukcje przed nadmiernym przesuszeniem.

Grzejniki montowane pod siedziskiem lub kłęcznikiem są praktycznie niewidoczne. Do wad tego systemu grzewczego należy zaliczyć ograniczone możliwości zastosowania. Może być on montowany wyłącznie tam, gdzie są ławki, więc ogrzewanie dotyczy tylko osób siedzących. Ponadto nie wszystkie ławki są odpowiednie do montażu elementów grzejnych. Problem stanowią również składane krzesła. Ponadto, grzejniki ławkowe powodują podnoszenie pyłu. Przy czym efekt ten jest krótkotrwały i ustępuje szybko po wyłączeniu ogrzewania.

Widok ogólny elektrycznego grzejnika podławkowego przedstawiono na rys. C.6.



Rys. C.6. Widok ogólny elektrycznego grzejnika podławkowego

Źródło: [166].

C.4. Ogrzewanie podłogowe elektryczne i wodne

Systemy ogrzewania podłogowego w zależności od rodzaju zastosowanego nośnika energii dzieli się na: ogrzewanie zasilane ciepłą wodą, energią elektryczną oraz niewystępujące w budownictwie sakralnym ogrzewanie zasilane ciepłym powietrzem. Ogrzewanie podłogowe wodne może być wykonane w systemie mokrym lub w suchym. W systemie ogrzewania ciepłą wodą, do wykonania instalacji mogą być wykorzystane rury z miedzi oraz z tworzyw sztucznych, tj: polibutylenu-PB, polipropylenu (typ PPS), sieciowanego polietylenu VPE, PE-X, PEX-ALU-PEX.

Elektryczne ogrzewanie podłogowe można wykonywać ze specjalnych kabli grzejnych, z mat oraz płyt grzewczych. Przewody te w niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych są optycznie zbliżone do przewodów instalacyjnych, jednak w sposób zasadniczy różnią się od nich właściwościami. O ile przewody instalacyjne mają za zadanie przenoszenie energii elektrycznej z możliwie jak najmniejszymi stratami, o tyle przewody grzejne zamieniają ją na ciepło Joule'a. W związku z powyższym żyły przewodów grzejnych wykonane są z materiałów o dużej rezystywności. Główne wymagania stawiane przewodom grzejnym to:

- duża obciążalność liniowa definiowana jako stosunek mocy wydzielonej w przewodzie do jego długości,
- możliwie wysoka temperatura pracy,
- mała upływność elektryczna, zwłaszcza w maksymalnych temperaturach pracy,
- napięcie pracy nie niższe od napięcia sieci n.n.,
- odporność na wilgotność i oddziaływanie betonu,
- możliwie mała średnica zewnętrzna,

- elastyczność,
- duża trwałość w warunkach roboczych.



Rys. C.7. Przykład wykonanej instalacji ogrzewania podłogowego wodnego przygotowanej do wylania posadzki betonowej

Źródło: [167].

Ogólnie do zalet ogrzewania podłogowego można zaliczyć:

- równomierną temperaturę występującą w pomieszczeniu oraz korzystny gradient temperatury,
- zdolność samoregulacji,
- estetykę, ponieważ ogrzewanie jest „niewidoczne”,
- możliwość zastosowania w pomieszczeniach o charakterze zażytkowym, w których nigdy nie były stosowane grzejniki,
- czystość bez kurzu i brudu mogącego występować na grzejnikach,
- niewystępowanie wirowania kurzu w pomieszczeniu,
- niskie temperatury zasilania i powrotu dające możliwość współpracy z pompą ciepła bądź kolektorami słonecznymi,
- możliwość chłodzenia pomieszczenia w lecie przez pompowanie zimnej wody w rurach systemu,
- trwałość, liczona na co najmniej 50 lat.

Wady ogrzewania podłogowego to:

- decyzja o zastosowaniu tego rodzaju systemu grzewczego musi być podjęta na etapie projektu budowlanego bądź modernizacyjnego,
- duża bezwładność i związana z tym trudność regulacji,
- wyższe koszty inwestycyjne, o około (20 ÷ 40)% od ogrzewania z grzejnikami,
- brak możliwości późniejszych zmian geometrii powierzchni grzejnych oraz jej wykończenia (rodzaju wykładziny),

- stosowanie raczej w budynkach dobrze izolowanych cieplnie,
- średnie wartości jednostkowego strumienia ciepła wynoszą $(80 \div 120)$ W/m²,
- możliwość uszkodzenia rur, np. poprzez wiercenie w podłodze otworów.

C. 5. Ogrzewanie elektryczne z wykorzystaniem bloków grzejnych

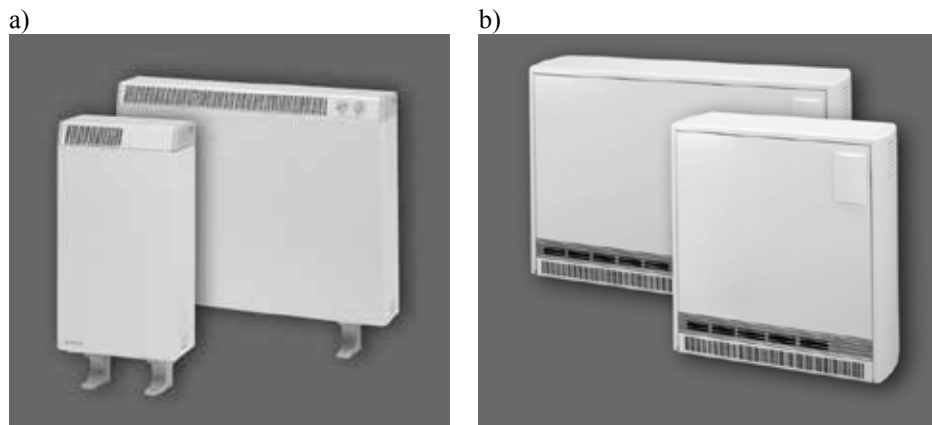
Poza wymienionymi powyżej sposobami można znaleźć rozwiązania, w których do ogrzewania obiektów sakralnych wykorzystuje się bloki grzejne zasilane energią elektryczną. Najbardziej rozpowszechnionymi urządzeniami służącymi do elektrycznego akumulacyjnego ogrzewania pomieszczeń są bloki grzewcze wolno stojące. Ze względu na swoją uniwersalność urządzenia te stosowane są zarówno do ogrzewania pomieszczeń mieszkalnych, jak i pomieszczeń użyteczności publicznej. Ogrzewacze wolno stojące dysponują mocami znamionowymi mieszczącymi się w przedziale $(1,25 \div 9)$ kW i są budowane jako urządzenia jedno- lub trójfazowe. Mają one zróżnicowane wymiary zewnętrzne, kształty, kolorystykę i fakturę obudowy.

Ogrzewacze akumulacyjne różnią się między sobą nie tylko zewnętrznymi, ale także sposobem pracy i konstrukcją. Pod względem sposobu pracy ogrzewacze można podzielić na trzy typy:

- ogrzewacze powierzchniowe, nazywane często statycznymi,
- ogrzewacze powierzchniowo-kanalowe,
- ogrzewacze z dynamicznym rozładowaniem nazywane również wentylatorowymi [168].

Najprostszym rozwiązaniem konstrukcyjnym ogrzewacza akumulacyjnego wolno stojącego i jednocześnie najstarszym typem jest ogrzewacz powierzchniowy, którego widok ogólny przedstawiono na rys. C.8a. Podstawową część konstrukcyjną ogrzewacza stanowi blok akumulacyjny wykonany z materiałów ceramicznych, w których zamontowane są elementy grzejne nagrzewające go w czasie zasilania (ładowania).

Blok akumulacyjny obudowany jest ze wszystkich stron warstwą izolacji cieplnej. Izolacja cieplna pozwala ograniczyć temperaturę obudowy do wartości bezpiecznej oraz regulować oddawanie ciepła do otoczenia. Zgromadzone w bloku akumulacyjnym ciepło przepływa przez izolację i obudowę do pomieszczenia. Odbywa się to przez swobodną konwekcję i promieniowanie, co uniemożliwia regulację ilości oddawanego ciepła. Jest ona ściśle uzależniona od temperatury powierzchni obudowy, a ta z kolei od temperatury bloku akumulacyjnego. Taki sposób przekazywania ciepła do pomieszczenia powoduje znaczne wahania ilości oddawanego ciepła w ciągu doby. Ogrzewacze powierzchniowe osiągają największą wydajność cieplną w krótkim czasie po zakończeniu ładowania, a minimalną pod koniec cyklu dobowego. Duże zmiany wydajności cieplnej powodują znaczne wahania temperatury w ogrzewanych pomieszczeniach.



Rys. C.8. Widok ogólny ogrzewaczy akumulacyjnych, a) ze statycznym rozładowaniem, b) z dynamicznym rozładowaniem

Źródło: [169].

Ponieważ ogrzewacze akumulacyjne powierzchniowe wykorzystują naturalny, niesterowany przepływ ciepła od bloku akumulacyjnego do pomieszczenia, nie mogą przetrzymywać zmagazynowanego ciepła przez dłuższy czas. Naturalne dość znaczne rozładowanie ogrzewacza występuje już w okresie jego ładowania.

Ogrzewacze powierzchniowe nie zapewniają wysokiego i stabilnego komfortu cieplnego w ciągu całej doby. Mimo wielu wad cieszą się jednak ciągle dość dużą popularnością, głównie ze względu na znacznie niższą cenę w stosunku do pozostałych typów ogrzewaczy. Wynika to z bardzo prostej konstrukcji oraz ograniczonej do minimum automatyki sprowadzającej się do instalowania regulatora ładowania i ogranicznika temperatury bloku akumulacyjnego. W najprostszych rozwiązaniach konstrukcyjnych zamiast regulatora ładowania stosowany jest ręczny przełącznik mocy oraz ogranicznik temperatury bloku akumulacyjnego, co prowadzi do dalszego obniżenia ceny.

Drugi rodzaj to ogrzewacze akumulacyjne powietrzno-kanalowe. Ten typ ogrzewaczy akumulacyjnych jest nieco bardziej rozbudowany konstrukcyjnie w porównaniu z ogrzewaczami powierzchniowymi. Podobnie jak w ogrzewaczu poprzedniej konstrukcji, również w tym, w metalowej obudowie znajduje się odizolowany cieplnie od niej ceramiczny blok akumulacyjny z zamontowanymi elementami grzejnymi.

Zasadnicza różnica konstrukcyjna polega na zastosowaniu prostego pionowego kanału powietrznego przechodzącego przez blok akumulacyjny. Wlot kanału znajduje się u dołu ogrzewacza, natomiast wylot u góry, co umożliwia naturalny, swobodny ruch powietrza. W ogrzewaczach tego typu nie stosuje się wymuszonego przepływu powietrza przez kanał. Oddawanie ciepła z bloku

akumulacyjnego do ogrzewanego pomieszczenia odbywa się zatem w dwojaki sposób. Pierwszy przez izolację cieplną i obudowę identycznie jak w ogrzewaczach powierzchniowych, i drugi, za pośrednictwem ciepłego powietrza wypływającego z kanału. Takie rozwiązanie konstrukcyjne umożliwia w pewnym ograniczonym zakresie sterowanie wydajnością ogrzewacza poprzez zmianę ilości powietrza płynącego kanałem. W tym celu ogrzewacze wyposażone są w sterowane przysłony otworu wlotowego lub wylotowego kanału. Przysłaniając przelot kanału ogranicza się ilość ciepłego powietrza wypływającego do pomieszczenia, a to z kolei powoduje obniżenie ogólnej ilości oddawanego ciepła.

Niekorzystną cechą ogrzewaczy powierzchniowo-kanałowych są wysokie temperatury powietrza na wylocie z kanału, szczególnie w krótkim czasie po zakończeniu ładowania. Z tego powodu na wylocie kanału umieszczane są różnego rodzaju dyfuzory zasysające i mieszające powietrze zimne z wylotowym, tak aby utrzymać temperaturę na dopuszczalnym bezpiecznym poziomie.

Ogrzewacze powierzchniowo-kanałowe mają wymiary nieco mniejsze od powierzchniowych. Zewnętrznie wyróżnia je wylot ciepłego powietrza umieszczony w górnej części obudowy. Pod względem automatyzacji, nie uwzględniając sterowania przysłoną kanału, są one na tym samym poziomie co ogrzewacze powierzchniowe.

Najbardziej rozbudowaną konstrukcję mają ogrzewacze z dynamicznym rozładowaniem, którego widok ogólny przedstawiono na rys. C.8b. Podobnie jak ogrzewacz kanałowy ma on kanał powietrzny, jednak tak skonstruowany, że niemożliwy jest w nim samoistny swobodny przepływ powietrza. Jego przepływ przez kanał wymusza zamontowany w ogrzewaczu wentylator elektryczny. Sterując załączaniem i wyłączaniem wentylatora lub jego wydajnością można zmieniać w znacznym zakresie ilość ciepła oddawaną przez ogrzewacz.

Inaczej skonstruowano również izolację cieplną bloku akumulacyjnego. Ogrzewacz z dynamicznym rozładowaniem wyposażony został w izolację cieplną znacznie lepszą niż ogrzewacze poprzednich typów, co powoduje, że ciepło do pomieszczenia oddawane jest głównie przez wydmuchiwane z kanału powietrze. Dobra izolacja umożliwia przetrzymywanie zgromadzonego w ogrzewaczu ciepła przy wyłączonym wentylatorze nawet do kilkunastu godzin. Proces tzw. samorozładowywania się ogrzewacza jest bardzo powolny. Wentylator ogrzewacza ma zwykle regulowaną wydajność. Podczas normalnej pracy wykorzystuje się niższą wydajność. Gdy zachodzi konieczność szybkiego nagrzania pomieszczenia, stosowana jest maksymalna wydajność wentylatora. Przełączenie takie pozwala na bardzo szybkie (dynamiczne) rozładowanie ogrzewacza i ta charakterystyczna cecha znalazła odbicie w nazwie urządzenia.

Ze względu na możliwość dość precyzyjnego sterowania pracą wentylatora za pomocą regulatora temperatury uzyskuje się bardzo równomierną temperaturę w pomieszczeniu w ciągu doby. Możliwość długiego przetrzymywania ciepła

oraz dynamiczne rozładowanie pozwalają na stosowanie ogrzewaczy w pomieszczeniach użytkowanych w godzinach popołudniowych (np. w salach widowiskowych, salach zebrań itp.), jak również w pomieszczeniach użytkowanych okresowo, np. świątyniach.

Podobnie jak w ogrzewaczach powierzchniowo-kanalowych, również w ogrzewaczach z dynamicznym rozładowaniem występuje niebezpieczeństwo wydmuchu do pomieszczenia powietrza o wysokiej temperaturze. Niebezpieczeństwo to jest tym większe, że przy każdorazowym uruchamianiu wentylatora następuje w pierwszej chwili wydmuchiwanie powietrza, które przez dłuższy czas pozostawało w kanale i zostało nagrzane do temperatury praktycznie równej temperaturze bloku akumulacyjnego (temperatura ta pod koniec okresu ładowania może przekraczać 600°C). Temperatura powietrza wylotowego zależy poza tym od wydajności wentylatora. Przy małej wydajności, czyli małych prędkościach przepływu jest wyższa.

Aby zapobiec temu zjawisku, ogrzewacze posiadają automatycznie sterowane urządzenie do mieszania powietrza zimnego z powietrzem wydmuchiwany z kanału. W wyniku tego mieszania temperatura na wylocie z ogrzewacza jest niezależna od stopnia naładowania ogrzewacza oraz prędkości powietrza i nie przekracza wartości dopuszczalnych.

Pod względem instalacyjnym wadę stanowi wymóg doprowadzenia do każdego ogrzewacza dwóch obwodów zasilania. Jeden z nich o dużej mocy, tzw. obwód energii pozaszczytowej, zasila elementy grzejne. Drugi o bardzo małej mocy ok. 20 W, tzw. obwód energii całodobowej, zasila wentylator poprzez regulator temperatury pomieszczenia.

C.6. Centralne ogrzewanie wodne lub parowe niskoprężne z grzejnikami miejscowymi

Często wykorzystywanym sposobem ogrzewania obiektów sakralnych jest centralne ogrzewanie wodne lub parowe niskoprężne z grzejnikami rozmieszczonymi w ich wnętrzu. W tego typu ogrzewaniu, nośnikiem ciepła jest gorąca woda o maksymalnej temperaturze 120°C. Woda podgrzana w kotle jest rozprowadzana rurami do grzejników, a po ochłodzeniu powraca do kotła w obiegu zamkniętym, gdzie ponownie zostaje podgrzana do zadanej temperatury i wprowadzona do obiegu.

W zależności od siły napędowej obiegu wody rozróżnia się: ogrzewanie grawitacyjne i pompowe, natomiast w zależności od sposobu rozprowadzenia wody na ogrzewanie wodne jednorurowe i dwururowe. Inny podział systemów grzewczych z centralnym kotłem wynika z zastosowania różnych nośników energii. Kotły centralnego ogrzewania mogą być zasilane paliwami stałymi, olejem opałowym, gazem czy też energią elektryczną. Kolejny podział wynika ze sposobu rozprowadzania rur zasilających grzejniki. Rozróżnia się ogrzewa-

nie wodne z rozdziałem górnym i dolnym. W zależności od sposobu połączenia układu rur z atmosferą rozróżnia się ogrzewanie systemu otwartego i zamkniętego. Obecnie stosuje się wyłącznie zamknięte, pompowe ogrzewanie wodne.

Centralne ogrzewanie wodne posiada następujące zalety:

- prostota obsługi (wysoki stopień automatyzacji),
- duże bezpieczeństwo eksploatacji,
- niska temperatura powierzchni grzejników, co zapewnia duży komfort cieplny,
- łatwość ewentualnej regulacji przez zmianę temperatury wody,
- dobra zdecentralizowana regulacja, np. za pomocą zaworów termostatycznych,
- niewielka korozja i długi okres eksploatacji.

a)



b)



c)



d)



Rys. C.9. Przykłady grzejników zamontowanych w obiektach sakralnych. a) grzejnik rurowy z dodatkowym ożebrowaniem zainstalowany w Warszawie na Powązkach w kościele przycementarnym św. Karola Boromeusza, b) stalowy grzejnik dekoracyjny, c), d) stalowy grzejnik płytowy

Źródło: [169].

Do wad tego rodzaju systemów grzewczych można zaliczyć:

- większą bezwładność cieplną w stosunku np. do systemów ogrzewania powietrznego i na skutek tego dłuższy czas rozgrzewania,
- wysokie koszty inwestycyjne,
- niebezpieczeństwo zamarzania.

W instalacjach centralnego ogrzewania ciepło przekazywane jest do ogrzewanego pomieszczenia za pośrednictwem grzejników, których przykłady przedstawiono na rys. C.9. Grzejniki są to najczęściej przeponowe wymienniki ciepła o rozbudowanej powierzchni od strony pomieszczenia. Ich zadaniem w instalacjach centralnego ogrzewania jest przekazywanie mocy cieplnej, dostarczonej przez nośnik ciepła z kotła do ogrzewanego pomieszczenia. Grzejniki, które oddają większą część ciepła w wyniku konwekcji są określane jako konwekcyjne. Zalicza się do nich:

- grzejniki ogniowe żeliwne,
- grzejniki z rur stalowych gładkich i ożebrowanych,
- grzejniki z rur żeliwnych ożebrowanych,
- grzejniki stalowe płytowe,
- grzejniki członowe aluminiowe,
- grzejniki konwektorowe.

Do grzejników promieniujących, tj. oddających zdecydowaną część mocy cieplnej w wyniku promieniowania, należą grzejniki płaszczyznowe.

Innym często stosowanym kryterium podziału grzejników jest materiał, z którego je wykonano. Rozróżnia się grzejniki:

- żeliwne,
- stalowe,
- z metali nieżelaznych, wśród których zdecydowanie dominuje aluminium i miedź.

Grzejniki są największym i najbardziej widocznym oprócz kotła elementem instalacji co. Ich prawidłowe umieszczenie ma duży wpływ na temperaturę powietrza w pomieszczeniu.

W ogrzewaniu parowym niskoprężnym nośnikiem ciepła jest para wodna. Parę wytwarzaną w kotłach doprowadza się przewodami do grzejników, w których para skrapla się, oddając ciepło i w postaci skroplin powraca do kotła, po czym obieg czynnika grzejnego zaczyna się od początku. Ogrzewanie parowe w domach mieszkalnych i budynkach biurowych jest dzisiaj praktycznie nie spotykane. Częściej tego rodzaju ogrzewanie wykonuje się tymczasowo lub okresowo w takich obiektach jak hale targowe czy sale wystawowe. Bardzo rzadko wykonuje się tego rodzaju ogrzewania w obiektach sakralnych.