ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

HENRYK KRAUSE

P. 3343/93

PODSTAWY TEMPERATUROWEJ DIAGNOSTYKI IZOLACYJNOŚCI CIEPLNEJ PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

# BUDOWNICTWO

Z. 78 Gliwice 1993

POLITECHNIKA ŚLĄSKA ZESZYTY NAUKOWE Nr 1215

P. 3343/92

HENRYK KRAUSE

# PODSTAWY TEMPERATUROWEJ DIAGNOSTYKI IZOLACYJNOŚCI CIEPLNEJ PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

#### OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Piotr Klemm Prof. dr inż. Stanisław Majerski

#### KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab.inż. Jan Bandrowski REDAKTOR DZIAŁU – Dr inż. Zdzisław Trojan SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Elżbieta Leśko

#### REDAKCJA

Mgr Aleksandra Kłobuszowska

#### **REDAKCJA TECHNICZNA**

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Śląskiej

## PL ISSN 0434 - 0779

Nakład 200+83 Ark.wyd. 8 Ark.druk.9.5 Papier offset III x 80g Oddano do druku 2.11.1993 r. Druk ukończono w listopadzie1993 r. Cena 28.000,-

R. Ullau

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w SC "AMGraf", Gliwice, ul. Jasna 8

Spis treści

		str.
WPI	ROWADZENIE	15
1.	PODSTAWY TEORETYCZNE DIAGNOSTYKI CIEPLNEJ	
	ZEWNĘTRZNYCH PRZEGRÓD BUDOWLANYCH	18
	1.1. Teoretyczne podstawy przewodzenia ciepła	
	przez przegrody	18
	1.1.1. Model matematyczny przewodzenia ciepła	18
	1.1.2. Podstawy diagnostyki termoizola-	
	cyjności przegrody	20
	1.2. Charakterystyki termoizolacyjności	26
	1.2.1. Uwagi ogólne	26
	1.2.2. Rodzaje charakterystyk	26
	1.3. Przegląd metod pomiarowych	27
	1.3.1. Rodzaje badań	27
	1.3.2. Zagadnienia techniczne pomiarów	28
	1.3.3. Opis wybranych metod	30
	1.4. Procedury pomiarowe	33
	1.4.1. Formuły zapisów	33
	1.4.2. Sposób wyznaczenia współczynnika k	38
	1.4.3. Ogólna klasyfikacja procedur pomiaro-	
	wych	42

2.	PRZEJMOWANIE CIEPŁA NA WEWNĘTRZNEJ POWIERZCHNI	
	PRZEGRODY	43
	2.1. Podstawowe zasady przejmowania ciepła	43
	2.1.1. Całkowita wymiana ciepła	43
	2.1.2. Konwekcyjna wymiana ciepła	44
	2.1.3. Radiacyjna wymiana ciepła	47
	2.2. Wielkości pomiarowe w badaniach	49
	2.2.1. Zasady pomiaru	49
	2.2.2. Badania eksperymentalne	50
	2.3. Złożoność zagadnienia przejmowania ciepła	52
	2.4. Ocena zagadnienia	53

3.	ZAŁOŻENIA I PODSTAWY TEORETYCZNE METODY TEMPERA-	
	TUROWEJ	55
	3.1. Teoria podobieństwa zagadnień metrologicznych	55
	3.1.1. Modelowanie zjawiska fizycznego	55
	3.1.2. Sytuacja eksploatacyjna przegrody	59
	3.1.3. Modelowanie operacyjne	60
	3.2. Istniejące charakterystyki bezwymiarowych	
	temperatur	63
	3.2.1. Liczba kryterialna Biota	63
	3.2.2. Indeks temperaturowy	66
	3.3. Wyznaczenie charakterystyk pomiarowych	67
	3.3.1. Wprowadzenie	67
	3.3.2. Formuły zapisów	69
	3.3.3. Interpretacja temperarturowa	70
	3.3.4. Wybór charakterystyki pomiarowej	72
	3.3.5. Charakterystyka pomiarowa	73
4.	WYNIKI BADAŃ WŁASNYCH	76
	4.1. Przedmiot badań	76
	4.2. Założenia badań własnych	77
	4.2.1. System pomiarowo-informatyczny	77
	4.2.2. Oprogramowanie zestawu pomiarowego	
	oraz przetwarzania danych	79
	4.2.3. Pomiar wielkości fizycznych	79
	4.3. Badania laboratoryjne	80
	4.3.1. Komora badawcza	80
	4.3.2. Przedmiot badań	81
	4.3.3. Wyniki badań	81
	4.4. Badania poligonowe	81
	4.4.1. Uwagi ogólne	81
5.0	4.4.2. Przykładowy obiekt badań	84
	4.5. Wyniki badań poligonowych	85
	4.5.1. Przebieg zmienności temperatur	
	i gęstości strumienia cieplnego w czasie	85
	4.5.2. Pola termiczne powierzchni przegród	88
	4.5.3. Temperatura powietrza wewnętrznego	94
	4.5.4. Przejmowanie ciepła	95

5.	ANAL	IZA WYNIKÓW BADAŃ	97
	5.1.	Charakterystyki pomiarowe	97
		5.1.1. Zmienność charaktertystyk pomiarowych	97
		5.1.2. Anomalie i defekty termiczne	99
		5.1.3. Definiowanie charakterystyk	101
		5.1.4. Zależności pomiędzy charakterystykami	102
		5.1.5. Wielkości graniczne charakterystyk	104
	5.2.	Niepewność pomiarowa charakterystyk	105
		5.2.1. Reprezentatywność odwzorowania	105
		5.2.2. Niepewność wielkości pomiarowych	106
		5.2.3. Szacunkowa ocena charakterystyk po-	
		miarowych	107
		5.2.4. Rozwiązanie zagadnienia	110
		5.2.5. Wskaźnik niepewności pomiarowej	112
		5.2.6. Ocena niepewności pomiarowej	113
	5.3.	Charakterystyka pomiarowa TP	114
		5.3.1. Formuły stosowania charakterystyki	114
		5.3.2. Wielkości dopuszczalne TP	115
	5.4.	Klasyfikacja termoizolacyjności przegród	117
	5.5.	Ocena wyników badań	120

6.	APLIE	KACJA TI	ERMICZNEJ DIAGNOSTYKI CIEPLNEJ	. 124
	6.1.	Analiza	ator bezwymiarowej temperatury TP	. 124
		6.1.1.	Założenia i przeznaczenie	. 124
		6.1.2.	Ogólny opis konstrukcji	. 124
		6.1.3.	Szacowanie błędów	. 126
		6.1.4.	Algorytm programu wyznaczenia TP	. 127
		6.1.5.	Obsługa analizatora	. 127
	6.2.	Zasady	prowadzenia diagnostyki - TDC	. 129
		6.2.1.	Badania diagnostyczne TDC - 1	. 129
		6.2.2.	Badania diagnostyczne TDC - 2	. 130
		6.2.3.	Ocena i interpretacja wyników	. 132
	6.3.	Obszary	y stosowania metod diagnostycznych	. 133

7.	PODSUMOWANIE	134
	LITERATURA	136
	WYKAZ WAZNIEJSZYCH OZNACZEŃ	145
	STRESZCZENIA	148

### CONTENTS

	str.
INTRODUCTION	15
1. THEORETICAL BASIS OF THERMAL DIAGNOSTIC OF	
EXTERNAL BUILDING PARTITIONS	18
1.1. Theoretical background of heat conductivity	
by walls	18
1.1.1. Mathematical model of heat conductivity	18
1.1.2. Foundation of heat-insulation diagnos-	
tic of walls	20
1.2. Characteristics of thermal insulating power	26
1.2.1. General remarks	26
1.2.2. Kinds of characteristics	26
1.3. Review of testing methods	27
1.3.1. Kind of tests	27
1.3.2. Technical problems of tests	28
1.3.3. Description of chosen methods	30
1.4. Testing procedures	33
1.4.1. Formula of notation	33
1.4.2. Determination of k coefficient	38
1.4.3. General classification of testing pro-	
cedures	42
2. CONDUCTANCE ON WALL INTERNAL SURFACE	43
2.1. General principles of surface conductance	43
2.1.1. Total heat exchange	43
2.1.2. Convectional heat exchange	44
2.1.3. Radiant heat exchange	47
2.2. Measured parameters	49
2.2.1. Principles of measurements	49
2.2.2. Experiments	50
2.3. Complexity of surface conductance	52
2.4. Problem estimation	53

3.	ASS	SUMPTIONS AND THEORETICAL BACKGROUND OF	
	THER	MOMETRIC METHOD	55
	3.1.	Similarity theory of metrological problems	55
		3.1.1. Modeling of physical phenomena	55
		3.1.2. Operational partition situation	59
		3.1.3. Operational modeling	60
	3.2.	Existing dimensionless temperature characte-	
		ristics	63
		3.2.1. Biot's criterial number	63
		3.2.2. Temperature index	66
	3.3.	Determination of measurment characteristics	67
		3.3.1. Introduction	67
		3.3.2. Notation formula	69
		3.3.3. Thermometric interpretation	70
		3.3.4. Choice of measurement characteristics	72
		3.3.5. Measurements characteristics	73
4.	RESU	LTS OF THE AUTHOR'S OWN RESEARCH	76
	4.1.	The subject of research	76
	4.2.	Assumptions	77
		4.2.1. Measurement system	77
		4.2.2. Programming and data procesing	79
		4.2.3. Measurements of physical magnitudes	79
	4.3.	Laboratory tests	80
		4.3.1. Test chamber	80
		4.3.2. Subject of research	81
		4.3.3. Test results	81
	4.4.	Field tests	81
		4.4.1. General remarks	81
		4.4.2. Example of test object	84
	4.5.	Results of field tests	85
		4.5.1. Course of temperature and density of	
		heat flux changes	85
		4.5.2. Thermal field of wall surface	88
		4.5.3. Temperature of indoor air	94
		4.5.4. Surface conductance	95

5.	ANALY	SIS OF	TESTS RESULTS	97
	5.1.	Measure	ement characteristics	97
		5.1.1.	Variability of measurement characte-	
			ristics	97
		5.1.2.	Thermal anomalies and defects	99
		5.1.3.	Characteristics definition	101
		5.1.4.	Interdependence of characteristics	102
		5.1.5.	Limiting magnitudes of characteristics	104
	5.2.	Uncerta	ainty of characteristics	105
		5.2.1.	Representativity of transformation	105
		5.2.2.	Uncertainty of measured magnitudes	106
		5.2.3.	Estimation of measurement characte-	
			ristics	107
		5.2.4.	Solution of problem	110
		5.2.5.	Index of uncertainty	112
		5.2.6.	Estimation of uncertainty	113
	5.3.	TP meas	surement characteristics	114
		5.3.1.	Formula of characteristics application	114
		5.3.2.	Permissible magnitudes TP	115
	5.4.	Thermal	l-insulating classification of walls	117
	5.5.	Estimat	tion of tests results	120
6.	APPL	CATION	OF THERMOMETRIC DIAGNOSTIC	124
	6.1.	Dimens	ionless temperature TP analyser	124
		6.1.1.	Assumptions and use	124
		6.1.2.	General description of construction	124
		6.1.3.	Errors estimation	126
		6.1.4.	Algorithm of TP program	127
		6.1.5.	Analyser operation	127
	6.2.	Princip	ples of diagnostics - TDC	129
		6.2.1.	Diagnostics of TDC-1	129
		6.2.2.	Diagnostics of TDC-2	130
		6.2.3.	Estimation and interpretation of	
			results	132
	6.3.	Fields	of use of diagnostic methods	133

7.	SUMMARY	134
	REFERENCES	136
	LIST OF SYMBOLS	145
	SYNOPSIS	148

# INHALTSVERZEICHNIS

str.

1.	THEORETISCHE GRUNDLAGEN THERMISCHER DIAGNOSTI-	
	ZIERUNG VON AUSSENWÄNDE	18
	1.1. Theoretische Grundlagen des Wärmeflusses	
	durch Wände	18
	1.1.1. Mathematisches Modell des Wärmeflusses	18
	1.1.2. Diagnostizierungsgrundlagen der	
	Thermoisolierung von Wänden	20
	1.2. Charaketristiken der Thermoisolierung	26
	1.2.1. Allgemeine Bemerkungen	26
	1.2.2. Arten von Charakteristiken	26
	1.3. Übersicht von Messverfahren	27
	1.3.1. Arten von Untersuchungen	27
	1.3.2. Technische Aspekte von Messverfahren	28
	1.3.3. Beschreibung ausgewählter Verfahren	30
	1.4. Messprozeduren	33
	1.4.1. Beschreibungsformeln	33
	1.4.2. Berechnung des k-Wertes	38
	1.4.3. Allgemeine Klassifizierung von Mess-	
	verfahren	42
2.	WDRMEERNAHME AN INNEREN WANDFLÄCHEN	43
	2.1. Grundregeln der Wärmeübernahme	43
	2.1.1. Vollständiger Wärmeaustausch	43
	2.1.2. Konvektiver Wärmeaustausch	44
	2.1.3. Wärmeaustausch durch Radation	47
	2.2. Messgrössen bei Untersuchungen	49
	2.2.1. Messregeln	49
	2.2.2. Experimentale Untersuchungen	50
з.	THEORETISCHE GRUNDSÄTZE UND GRUNDLAGEN DER	
	THEMPERETUR METHODE	55
	3.1. Ähnlichkeitstheorie metrologischer Fragen	55
	3.1.1. Modellerung physikalischer Ereignisse	55
	3.1.2. Nutzungsbedingte Lage von Wänden	59
	3.1.3. Operative Modellierung	60

	3.2.	Besteh	ende	Charakt	eristike	n e	inheitsl	oser	
		Tempera	turen		• • • • • • • • •		• • • • • • • • •		63
		3.2.1.	Kriter	iumswer	t von Bi	od .			63
		3.2.2.	Beschr	eibungs	formeln				69
		3.2.3.	Interp	rätieru	ng von T	empe	raturen		70
		3.2.4.	Wahl d	ler Mess	charakte:	rist	ik		72
		3.2.5.	Messch	arakter	istik				73
4.	ERGE	BNISSE E	IGENER	UNTERS	UCHUNGEN	• • •			76
	4.1.	Gegenst	and de	r Unter	suchunge	n			76
	4.2.	Grundsä	tze ei	gener U	ntersuch	unge	n		77
		4.2.1.	Mess u	ind Info	rmations	syst	em		77
		4.2.2.	Progra	ammierun	ng der Me	essa	nlage und	der	
			Datenv	erar be	itung				79
		4.2.3.	Messun	g physi	kalische	r Gr	össen		79
	4.3.	Laborun	tersuc	hungen			• • • • • • • • •		80
		4.3.1.	Unters	uchungs	kammer .				80
		4.3.2.	Gegens	tand de	r Unters	uchu	ngen		81
		4.3.3.	Unters	uchungs	ergebnis	se .			81
	4.4.	Praktis	che Un	tersuch	ungen				81
		4.4.1.	Allgem	eine Be	merkunge	n			81
		4.4.2.	Unters	uchunge	n am Bei:	spie	lobjekt		84
	4.5.	Untersu	chungs	ergebni	sse	• • • •			85
		4.5.1.	Verla	uf von	Wechsel	temp	peraturen	und	
			der	Dichte	des	Wärm	estromes	im	
			Hinbli	ck auf	die Mess	zeit			85
		4.5.2.	Thermi	sche Fe	lder an 1	Wänd	len		88
		4.5.3.	Raumte	mperatu	r				94
		4.5.4.	Temper	aturemp	fang				95
5.	ANALY	SE VON	UNTERS	UCHUNGS	ERGEBNIS	SEN			97
	5.1.	Messcha	rakter	istiken					97
		5.1.1.	Wechse	lweise	Messchar	akte	ristiken		97
		5.1.2.	Anomal	ien und	thermis	che	Deffekte		99
		5.1.3.	Erfass	ung von	Charakt	eris	tiken		101
		5.1.4.	Abhän	gigkeite	en zwisc	hen	Charakt	eris-	
			tiken						102

		5.1.5.	Grenzwerte von Charakteristiken	104
	5.2.	Messuns	sicherheit von Charakteristiken	105
		5.2.1.	Repräsentativität	105
		5.2.2.	Unsicherheit von Messgrössen	106
		5.2.3.	Schätzungsweise Auswertung von Mess-	
			grössen	107
		5.2.4.	Problemlösung	110
		5.2.5.	Mess-Unsicherheitswert	112
		5.2.6.	Auswertung der Messunsicherheit	113
	5.3.	Messcha	arakteristik TP	114
		5.3.1.	Verwendungsformeln von Charakteristiken	114
		5.3.2.	Zulässige Grössen TP	115
	5.4.	Klass	ifizierung der Thermoisolierung von	
		Wänden		117
	5.5.	Auswert	ung der Untersuchungsergebnisse	120
5.	APPLI	<b>KATION</b>	THERMISCHER WÄRMEDIAGNOSTIK	124
	6.1.	Analisa	ator einheitsloser Temperatur TP	124
	12	6.1.1.	Annahmem und Anwendung	124
		6.1.2.	Allgemeine Konstruktinsbeschreibung	124
		6.1.3.	Fehlerschätzung	126
		6.1.4.	Algorithmus des Programms zur	
			Ermittling des TP-Wertes	127
		6.1.5.	Bedienung des Analysators	127
	6.2.	Diagnps	stizierungsverfahren - TDC	129
		6.2.1.	Diagnostizierungsuntersuchungen TDC - 1	129
		6.2.2.	Diagnostizierungsuntersuchungen TDC - 2	130
		6.2.3.	Auswertung und Interprätation von	
			Ergenissen	132
	6.3.	Einsat	zgebiete diagnostischer Methoden	133

7. ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG	134
LITERATUR	136
AUFSTELLUNG WICHTIGER BEZEICHNUNGEN	145
ZUSAMMENFASSUNG	148

Racjonalne użytkowanie energii w budynkach wpływa w sposób znaczący na bilans energetyczny kraju. W Polsce zużycie energii na cele grzewcze w budynkach pochłania rocznie na 1 m<sup>2</sup> powierzchni użytkowej około 2-krotnie więcej energii wytwarzanej (głównie z węgla), aniżeli w krajach EWG. Gospodarka komunalno-bytowa zużywa około 40% wytwarzanej w kraju energii cieplnej, zaś możliwości techniczne obniżenia obecnego poziomu zużycia szacowane są na 35 - 45%. Oszczędność ta motywowana jest nie tylko względami ekonomicznymi, ale również ograniczeniem negatywnej dla środowiska naturalnego emisji zanieczyszczeń oraz składowania odpadów energetycznych. Jednym z głównych kierunków działań racjonalizacji zużycia energii jest jej oszczędność w istniejących zasobach budowlanych oraz w nowo projektowanych obiektach. W budynkach nowo realizowanych ograniczenie zużycia energii jest znacznie łatwiejsze w porównaniu do obiektów realizowanych w latach ubiegłych. Niewielki jednak przyrost ogrzewanej kubatury mieszkań sprawia, że główne źródło ograniczenia zużycia energii leży w budynkach eksploatowanych. Zwiększenie oszczędności energii cieplnej w obiektach istniejących wymaga prowadzenia powszechnej modernizacji cieplnej - termorenowacji. Postuluje się (m.in. Płoński [95]), aby potrzeby energetyczne nowego budownictwa pokrywać energią zaoszczędzoną w budynkach istniejących. Termorenowacja musi obejmować zmiane charakterystyki energetycznej budynków poprzez zwiększenie izolacyjności cieplnej obudowy obiektu oraz usprawnienie instalacji grzewczej i wentylacyjnej, a także wprowadzenie pomiaru ilości zużywanej energii cieplnej. Potrzebne są więc skuteczne technologie ocieplania, które oprócz ograniczenia strat ciepła, zwiększą trwałość ścian budynków. Wymaga to m. in. wprowadzenia prostych i szybkich metod diagnostyki obiektów budowlanych pozwalających ocenić stan izolacyjności termicznej zewnętrznych przegród budowlanych z dokładnością wystarczającą na potrzeby technicznego określania wielkości docieplania.

15

Badania diagnostyczne w użytkowanym obiekcie prowadzi się w warunkach nieustalonego przepływu ciepła. Różna geometria badanej przegrody w pomieszczeniach o zróżnicowanych kubaturach, usytuowanie i rodzaj źródła ogrzewania, sposób wentylacji powodują, że na powierzchni przegrody występują nieznane strefy zaburzeń. Podczas tych badań występuje częsty brak znajomości struktury badanej przegrody, informacji na temat losowych zmian termoizolacyjności, czy też samego sposobu użytkowania pomieszczeń.

Ze względu na zróżnicowane warunki tych badań, niepewność pomiarowa wyników badań diagnostycznych jest znacznie większa w porównaniu z badaniami laboratoryjnymi.

W pracy przeanalizowano i oceniono stosowane metody diagnostyki cieplnej przegród, w tym również metodę "indeksu temperaturowego", która nie znalazła dotychczas szerszego zastosowania. Stosowane metody badań termoizolacyjności przegród wykorzystują zwykle pomiar gęstości strumienia cieplnego. Wadą tych metod jest brak znormalizowanych wzorców pomiarowych umożliwiających skalowanie mierników gęstości strumienia cieplnego, a także długi (kilkudniowy) okres prowadzenia badań.

Badania izolacyjności termicznej przegrody wiążą się z okresem realizacji budynku, z uwagi na który można wyodrębnić:

obiekty nowo realizowane – w których znana jest
 technologia i sposób realizacji, znane są również obowiązujące
 w czasie realizacji wymagania,

 obiekty istniejące - o nieznanej często konstrukcji, czy też jakości ich aktualnego stanu technicznego.

Badania, w zależności od ich przeznaczenia, są prowadzone jako:

- badania poznawcze

- badania kontrolne.

Praca zawiera elementy poznawcze z teoretycznym uzasadnieniem przyjętej metody badań oraz sprawdzenie jej przydatności do celów diagnostycznych. Eksperymentalnie wyznaczono charakterystyki izolacyjności termicznej przegród przeprowadzając badania laboratoryjne w komorze badawczej i terenowe w eksploatowanym obiekcie.

Przedstawiono nową metodę diagnostyki temperaturowej, nie wymagającej pomiaru gęstości strumienia cieplnego. postępowania opiera na Zaproponowana metodyka sie charakterystyce określonej przez bezwymiarową temperaturę TP. Charakterystyka ta wyrażona jest poprzez iloraz różnic odpowiednich temperatur powierzchni przegrody oraz ośrodka wewnętrznego. Podejście takie nie tylko minimalizuje wpływ zmieniającego się środowiska zewnętrznego na wyniki pomiarów, ale pozwala na pominięcie współczynnika przejmowania ciepła α, jako najbardziej niepewnej wielkości pomiarowej w stosowanych dotychczas metodach.

Opracowanie metody stało się możliwe dzięki zastosowaniu prototypowego systemu pomiarowo-informatycznego, który pozwolił na wielopunktową rejestrację wielkości pomiarowych w czasie przy nieustalonych warunkach przepływu ciepła. W celu wdrożenia metody opracowano analizator do wyznaczenia wartości wprowadzonej charakterystyki.

W celu przedstawienia rozwiązywanego problemu pracę podzielono na etapy.

W pierwszym rozdziale omówiono podstawy teoretyczne diagnostyki cieplnej, przedstawiono stan wiedzy oraz dokonano przeglądu stosowanych metod i procedur pomiarowych dotyczących diagnostyki termoizolacyjności przegród.

W rozdziale drugim przedstawiono teoretyczne podstawy przejmowania ciepła oraz zasady wyznaczenia ich wielkości, które uzasadniają przyjęty sposób postępowania.

W rozdziale trzecim podano założenia i podstawy teoretyczne proponowanej temperaturowej metody diagnostycznej określenia charakterystyki cieplnej przegród zewnętrznych.

W rozdziale czwartym i piątym zawarto wyniki badań eksperymentalnych wraz z analizą uzasadniającą przydatność nowej metody.

W rozdziale szóstym przedstawiono aplikacyjny aspekt temperaturowej diagnostyki cieplnej wraz z zaproponowanym oraz wdrożonym analizatorem do badań termoizolacyjności przegród budowlanych. W rozdziale siódmym przedstawiono podsumowanie pracy. 1. PODSTAWY TEORETYCZNE DIAGNOSTYKI CIEPLNEJ ZEWNĘTRZNYCH PRZEGRÓD BUDOWLANYCH

#### 1.1. Teoretyczne podstawy przewodzenia ciepła przez przegrody

#### 1.1.1. Model matematyczny przewodzenia ciepła

Wymiana ciepła przez zewnętrzne przegrody z uwzględnieniem ich powierzchni obejmuje zasadniczo:

 od strony zewnętrznej: konwekcję, promieniowanie wysokotemperaturowe od słońca, promieniowanie długofalowe do nieboskłonu, promieniowanie od gruntu i otaczających budynków [20;27;29],

 od strony wewnętrznej: konwekcję, promieniowanie niskotemperaturowe od powierzchni ścian wewnętrznych i urządzeń grzewczych [33;74;108].

Istnieje również wpływ innych czynników, które oddziałują na powierzchnię przegrody (opady atmosferyczne, przemiany fazowe związane z wykropleniem itp.) jednak wpływ ich na wymianę ciepła w rozpatrywanym zagadnieniu jest nieznaczny, w związku z tym został pominięty.

Z uwagi na geometrię powierzchni (naroża), mostki termiczne oraz zmienność przestrzenną strumienia promieniowania od urządzeń grzewczych, przewodzenie ciepła w przegrodach jest w ogólności trójwymiarowe. Z dala od naroży, mostków, urządzeń grzewczych może być ono jednak rozpatrywane jako jednowymiarowe, a wpływ dwu- i trójwymiarowego pola temperatury w wyodrębnionych punktach osobliwych rozpatruje się odrębnie.

W otoczeniu przegród temperatura, promieniowanie na powierzchnie oraz intensywność konwekcji są zmienne w czasie użytkowania [51;52;103], stąd w rzeczywistych, nieustalonych warunkach przewodzenie ciepła przez jednostkę przegrody budowlanej o dowolnej strukturze (rys. 1) opisane jest równaniem Fouriera.



Rys.1. Schemat wymiany ciepła przez zewnetrzną przegrodę Fig.1. Scheme of heat exchange by external partitions

$$c(x)\rho(x) \xrightarrow{\partial T(x,\tau)} = \lambda(x) \xrightarrow{\partial^2 T(x,\tau)}, \qquad (1.1)$$

z warunkami brzegowymi:

- na zewnętrznej powierzchni

**x=**0

$$-\lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{x}} = \alpha_{ek} [\mathbf{T}_{e}(\tau) - \mathbf{T}(0,\tau)] + \mathbf{I}_{c}(\tau) \mathbf{A}_{c} - \mathbf{I}_{1}(\tau), \qquad (1.2)$$

- na wewnętrznej powierzchni

x=d

$$-\lambda(\mathbf{x})\frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{x},\tau)}{\partial \mathbf{x}} = \alpha_{ik} [\mathbf{T}(\mathbf{d},\tau) - \mathbf{T}_{ir}(\tau)] + \alpha_{ir} [\mathbf{T}(\mathbf{d},\tau) - \mathbf{T}_{ir}(\tau)], \quad (1.3)$$

oraz warunkiem początkowym:

 $\tau = 0$ 

$$T(x,0)=T(x)$$
. (1.4)

We wzorach powyższych oznaczono:

- α współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na powierzchni zewnętrznej,
- α współczynnik przejmowania ciepła przez konwekcję na powierzchni wewnętrznej,
- α współczynnik przejmowania ciepła przez promieniowanie na powierzchni wewnętrznej,
- T<sub>ir</sub> średnią temperaturę promieniowania pomieszczenia na rozpatrywaną przegrodę,
- A współczynnik absorbcji promieniowania słonecznego przez zewnętrzną powierzchnię przegrody,
- I natężenie promieniowania słonecznego padającego na zewnętrzną powierzchnię przegrody,
- I natężenie promieniowania długofalowego z zewnętrznej powierzchni.

Przedstawione równania są ścisłym zapisem bilansu z uwzględnieniem strumieni ciepła. Podobne zagadnienia bilansu cieplnego są opisane również w innych dyscyplinach technicznych, m.in. w odlewnictwie [87].

#### 1.1.2. Podstawy diagnostyki termoizolacyjności przegrody

W diagnostyce cieplnej ze względów metrologicznych, m.in. ze względu na złożoność pomiaru składowych promieniowania stosuje się uproszczone zapisy formuł fizycznych. Wprowadzono funkcję  $\theta(x)$  zdefiniowaną równaniem zgodnie z [52]:

$$\theta(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) / \mathbf{R}_{\lambda}, \qquad (1.5)$$

przy czym  $\Theta(0)=0$ ,  $\Theta(d)=1$ 

$$\frac{d\theta(x)}{dx} = \frac{1}{R_{\lambda}}.$$

Mnożąc równanie (1.1) przez  $\theta(x)$  i całkując po x od 0 do d otrzymamy:

$$\int_{0}^{d} c(x)\rho(x)\theta(x) \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} dx = \int_{0}^{d} \lambda(x)\theta(x) \frac{\partial^{2}T(x,\tau)}{\partial x^{2}} dx.$$
(1.6)

Zakładając dla 0  $\leq x \leq d$ ,  $\lambda(x) = const.$  oraz całkując przez części prawą stronę równania (1.6) otrzymano:

$$\begin{split} \lambda(\mathbf{x}) \theta(\mathbf{x}) & \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{x}, \tau)}{\partial \mathbf{x}} \Big|_{0}^{d} - \int_{0}^{d} \lambda(\mathbf{x}) \frac{d\theta(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{x}, \tau)}{\partial \mathbf{x}} d\mathbf{x} = \\ \lambda(\mathbf{d}) & \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{d}, \tau)}{\partial \mathbf{x}} - \frac{1}{R_{\lambda}} \left[ \mathbf{T}(\mathbf{d}, \tau) - \mathbf{T}(\mathbf{0}, \tau) \right] = \\ & - q(\mathbf{d}, \tau) - \frac{1}{R_{\lambda}} \left[ \mathbf{T}(\mathbf{d}, \tau) - \mathbf{T}(\mathbf{0}, \tau) \right]. \end{split}$$

Całkując po czasie równanie (1.6) od 0 do  $\tau$  , otrzymano:

$$\int_{0}^{d} c(x) \rho(x) \theta(x) \left[ T(x, \tau_{0}) - T(x, 0) \right] dx =$$

$$= -Q(d) - \tau_0 \left[ \overline{T}(d,\tau) - \overline{T}(0,\tau) \right] / R_{\lambda}$$
(1.7)

gdzie:

T - uśredniona temperatura powierzchni przegrody.

Z równania (1.7) otrzymano wzór na identyfikację oporu przewodzenia ciepła przegrody:

$$R_{\lambda} = \frac{\tau_{0} [T(d,\tau) - T(0,\tau)]}{-Q(d) - \int_{0}^{d} c(x) \rho(x) \theta(x) [T(x,\tau_{0}) - T(x,0)] dx}.$$
 (1.8)

Wielkość Q(d) oznacza ilość ciepła, która przepłynęła przez 1 m<sup>2</sup> powierzchni wewnętrznej w czasie τ<sub>0</sub>. Całka

$$\int_{0}^{0} c(x) \rho(x) \theta(x) [T(x, \tau_0) - T(x, 0)] dx$$
 (1.9)

wyraża ilość ciepła zakumulowanego w przegrodzie w chwili  $\tau_0$  w stosunku do stanu początkowego pomnożonego przez funkcję wagi  $\theta(x)$ . Z powyższego wynika, że większy wpływ ma akumulacja ciepła w warstwach położonych bliżej wewnętrznej powierzchni przegrody. Całka (1.9) przyjmuje określone wartości dla długiego czasu pomiaru  $\tau_0$ . Wartość ta staje się mała w stosunku do ilości ciepła Q(d). Przy odpowiednio dużych wartościach  $\tau_0$ można pominąć wartość całki. Opór cieplny warstw przegrody wyznacza się więc ze wzoru:

$$R_{\lambda} = \frac{\tau_{0}[T(d,\tau) - T(0,\tau)]}{-0(d)}.$$
 (1.10)

Powyższy wzór stanowi podstawę diagnostyki oporu przewodzenia ciepła przegrody budowlanej. Ilość ciepła Q(d) wyznacza się z pomiarów gęstości strumienia cieplnego q, zaś średnie wartości temperatur powierzchni z pomiarów ich wartości chwilowych w określonym przedziale czasu t.

We wzorach (1.8) i (1.10) występują tylko temperatury powierzchni przegrody niezależnie od warunków brzegowych wymiany ciepła na obu powierzchniach. Dla powtarzalnego charakteru zmian czasowych warunków wymiany ciepła przebiegi temperatury przegrody  $T(x, \tau_0)$  i T(x, 0) będą sobie równe. Przy pomiarach w budynkach celowe jest prowadzenie ich przez skończoną liczbę dób (zaczynając i kończąc pomiary o tej samej godzinie), przez co zmniejsza się wpływ dobowych wahań temperatury i promieniowania słonecznego.

Powtórzono poprzednie rozumowanie stawiając sobie za cel identyfikację badaniami nie oporu przewodzenia ciepła  $R_{\lambda}$ , lecz współczynnika przenikania ciepła

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{i}} + R_{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{i}}}, \qquad (1.11)$$

gdzie:

- α<sub>1</sub> obliczeniowa wartość współczynnika przejmowania ciepła
  na wewnętrznej powierzchni przegrody,
  - α obliczeniowa wartość współczynnika przejmowania ciepła
    na zewnętrznej powierzchni przegrody.

Wprowadzono funkcję θ(x) zdefiniowaną równaniem

$$\Theta(\mathbf{x}) = \mathbf{k} \left[ \frac{1}{\alpha} + \mathbf{R}(\mathbf{x}) \right], \qquad (1.12)$$

przy czym

$$\theta(0) = \frac{k}{\alpha}$$
,  $\theta(d) = 1 - \frac{k}{\alpha}$ ,  $\lambda(x) \frac{d\theta(x)}{dx} = k$ .

Mnożąc równanie (1.1) przez  $\theta(x)$  i całkując po x od 0 do d otrzymamy formułę jak poprzednio:

$$\int_{0}^{d} c(x)\rho(x)\theta(x) \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial \tau} dx = \int_{0}^{d} \lambda(x)\theta(x) \frac{\partial^{2}T(x,\tau)}{\partial x^{2}} dx. \quad (1.13)$$

Przyjmując podobnie jak dla wzoru (1.6)  $0 \le x \le d$ ,  $\lambda(x) = constoraz całkując przez części prawą stronę równania (1.13) otrzymano:$ 

$$\lambda(x)\theta(x) \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} \Big|_{0}^{d} - \int_{0}^{d} \lambda(x) \frac{\partial \theta(x)}{\partial x} \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x} dx =$$

$$= \lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{d},\tau)}{\partial \mathbf{x}} \left(1 - \frac{\mathbf{k}}{\alpha_{1}}\right) - \lambda(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathbf{T}(\mathbf{0},\tau)}{\partial \mathbf{x}} \frac{\mathbf{k}}{\alpha_{e}} - \mathbf{k} \left[\mathbf{T}(\mathbf{d},\tau) - \mathbf{T}(\mathbf{0},\tau)\right].$$

Po uwzględnieniu warunków brzegowych (wzór 1.2, 1.3) otrzymamy:

$$-q(d,\tau) - \frac{k}{\alpha_{i}} \left[ \alpha_{ik} T_{i}(\tau) + \alpha_{ir} T_{ir}(\tau) \right] + \frac{k}{\alpha_{i}} (\alpha_{ik} + \alpha_{ir}) T(d,\tau) +$$

$$+ \frac{k}{\alpha_{e}} \alpha_{ek} \left\{ \left[ T_{e}(\tau) + \frac{I_{c}(\tau)A_{c}}{\alpha_{ek}} - \frac{I_{1}(\tau)}{\alpha_{ek}} \right] - T(0,\tau) \right\} - k \left[ T(d,\tau) - \frac{1}{\alpha_{ek}} \right] - T(0,\tau) \right\}$$

$$- T(0,\tau) = - q(d,\tau) - k [T_{op}(\tau) - T(d,\tau)] + \frac{k}{\alpha} \alpha_{ek} \left[ T_{es}(\tau) - T(d,\tau) \right] + \frac{k}{\alpha} \left[ T_{es}(\tau) - T(d,\tau)$$

$$-T(0,\tau) - k \left[T(d,\tau) - T(0,\tau)\right] = -q(d,\tau) - k \left[T_{op}(\tau) - T(t)\right] = -q(t,\tau) - t \left[T_{op}(\tau) - T(t,\tau)\right] = -q(t,\tau) - t \left[T_{op}(\tau) - T(t,\tau)\right]$$

$$-T_{es}(\tau) \bigg], \qquad (1.14)$$

przy założeniu:  $\alpha_{e} = \alpha_{ek}, \alpha_{i} = \alpha_{ik} + \alpha_{ir}$  We wzorze (1.14) wprowadzono oznaczenia:

$$T_{op}(\tau) = \frac{\alpha_{1k}T_{1}(\tau) + \alpha_{1k}T_{1k}(\tau)}{\alpha_{1k}} - \text{temperatura operatywna},$$

 $T_{es}(\tau) = T_{e}(\tau) + \frac{I_{e}(\tau)A_{e}}{\alpha_{e}} - \frac{I_{1}(\tau)}{\alpha_{e}} - \text{ sloneczna zredukowana} \text{ temperatura powietrza.}$ 

Prowadząc postępowanie analogiczne do przyjętego wzoru (1.7) otrzymano:

$$k = \frac{-Q(d) - \int_{0}^{1} c(x)\rho(x)\Theta(x) [T(x,\tau_{0}) - T(x,0)] dx}{\tau_{0} [T_{0,p}(\tau) - T_{es}(\tau)]}, \quad (1.15)$$

gdzie:

T i T oznaczają odpowiednio średnie temperatury.

Wzór (1.15) tylko pozornie umożliwia identyfikację metrologiczną współczynnika przenikania ciepła k przegrody zewnętrznej. Wielkości T<sub>op</sub> i T<sub>es</sub> nie są bezpośrednio mierzalne i zwykle nie dysponujemy pomiarami wartości składowych pozwalającymi na ich obliczenie. Uproszczenia, polegające na utożsamieniu temperatur T<sub>o</sub> z bezpośrednim pomiarem t<sub>i</sub> oraz T z t, prowadzą do błędnych wyników. Szczególnie silnie oddziałuje w pomiarach bezpośrednie nasłonecznienie powierzchni zewnętrznej przegrody. Z tego względu zaleca się przeważnie identyfikację pomiarową oporu cieplnego R<sub>o</sub> wg wzoru (1.10) i określenie współczynnika k na podstawie wzoru (1.11).

#### 1.2. Charakterystyki termoizolacyjności

#### 1.2.1. Uwagi ogólne

Izolacyjność cieplna przegrody zewnętrznej określona poprzez charakterystykę termoizolacyjności przegrody - CTP wyrażona jest z reguły przy użyciu współczynnika przenikania ciepła k lub oporu cieplnego R. Wielkości te można obliczyć znając budowę przegrody. W istniejących budynkach nie zawsze zna się konstrukcję przegród, stąd wynika konieczność przeprowadzenia badan na obiekcie pozwalających stwierdzić ich izolacyjność. Badania te wykonuje się z reguły przy nieustalonych warunkach przepływu ciepła. Analizując powyższe zagadnienie można stwierdzić, że wyznaczone za pomocą takich pomiarów charaktervstvki termoizolacyjności przegród nie zawsze odpowiadają wielkościom obliczeniowym [43;71]. Stad też wielkości te nazywa się również wielkościami chwilowymi lub pozornymi [111]. Wartości pomiarowe współczynnika k lub oporu R, zgodnie z zasadami metrologii, są wielkościami pośrednimi [81]. Obecnie znane są różne sposoby postępowania przy określeniu CTP, które prowadzą w konsekwencji do stosowania odmiennych metodyk badań, powodujących uzyskiwanie nie zawsze oczekiwanych wyników [128]. Brak odpowiednich norm CZY jednoznacznych wytycznych w zakresie prowadzenia pomiarów ma swoje odbicie w przyjmowanych sposobach postępowania przy wyznaczaniu współczynnika przenikania k czy też oporu R w badaniach izolacyjności termicznej przegród.

#### 1.2.2. Rodzaje charakterystyk

Przy projektowaniu przegród zewnętrznych oraz obliczeniach zużycia ciepła na cele grzewcze, izolacyjność termiczną określa się na podstawie cech fizycznych materiałów i grubości poszczególnych warstw przegrody. Metoda obliczeniowa nie uwzględnia zmienności w czasie temperatury ośrodków powietrznych i ich wpływu na przegrodę, co powinno być uwzględniane przy pomiarowym wyznaczeniu charakterystyki termoizolacyjności przegrody. Różnice pomiędzy wartościami liczbowymi, wyznaczonymi w obliczeniach i pomiarach termoizolacyjności przegród, należy tłumaczyć odmiennym sposobem uwzględniania stanów (parametrów) wyjściowych.

termoizolacyjna przegrody w Charakterystyka normach [99] i zagranicznych [13;16;40] wyrażona krajowych jest poprzez wielkość określoną jako opór cieplny R lub współczynnik przenikania ciepła k. Charakterystykę tą można również wyrazić liczbami podobieństwa [2;58;123].

Na podstawie analizy wielkości fizycznych CTP można dokonać następującej ich klasyfikacji [70]:

I W zależności od sposobu wyznaczenia

- 1. Charakterystyki obliczeniowe
- 2. Charakterystyki pomiarowe (metrologiczne)
- Charakterystyki pomiarowo-obliczeniowe
  II Ze względu na warunki przepływu ciepła
- 1. Charakterystyki ustalonego przepływu
- 2. Charakterystyki nieustalonego przepływu

#### 1.3. Przegląd metod pomiarowych

#### 1.3.1. Rodzaje badań

Zgodnie z zasadami metrologii [23][94] obiektem pomiaru jest wybrana cecha przedmiotu stanowiąca fragment istniejącej rzeczywistości.

Warunkiem odwzorowania stanów wybranej cechy jest jednoznaczność przyporządkowania wartości. Poszukiwaną cechą jest izolacyjność termiczna przegrody wyrażana przez CTP.

Pomiarowe wyznaczenie izolacyjności termicznej przegrody sprowadza się więc do wyróżnienia określonych stanów poszukiwanej cechy. Trudno określić liczbę tych stanów, wynika ona ze specyfiki danej cechy [94]. Badania w zakresie wyznaczenia stanu izolacyjności termicznej przegrody mogą być prowadzone w zależności od ich przeznaczenia jako [116]:

- badania poznawcze są wykonywane w celu uzyskania informacji poznawczych (naukowych) w zakresie jakościowego i ilościowego opisu zjawisk badanego obiektu,
- badania kontrolne polegają na sprawdzeniu jakości nowo wykonanego lub eksploatowanego obiektu przez porównanie go do odpowiednich wymagań.

Obok podstawowych grup badań w nawiązaniu do przedstawionej pracy wyodrębniono:

 badania diagnostyczne - są to badania nieniszczące - NDT, które mogą dotyczyć zarówno badań poznawczych, jak i kontrolnych. Określają one cechy przegrody na podstawie badań zewnętrznych.

#### 1.3.2. Zagadnienia techniczne pomiarów

Przy pomiarze ciągłym w czasie badań  $\tau$ , wartość współczynnika przenikania oznaczona przez  $k(\tau)$  może być zapisana wzorem [65]:

$$k(\tau) = \frac{\int q(\tau) d\tau}{\int (t_{1}(\tau) - t_{2}(\tau)) d\tau} . \qquad (1.16)$$

Zapis ten jednak ze względów metrologicznych nie jest stosowany przy pomiarach izolacyjności termicznej przegród. Stosuje się wzór na opór cieplny R<sub>λ</sub>, wyrażony m.in. konduktancją cieplną [5]:

$$\Lambda = \frac{\int_{0}^{\tau} q \, d\tau}{\int_{0}^{\tau} \Delta \vartheta_{1} \, d\tau}$$

gdzie:

Δϑ<sub>ie</sub> - oznacza różnicę temperatury pomiędzy wewnętrzną i zewnętrzną powierzchnią przegrody.

(1.17)

Nieniszczące sposoby określenia izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych dotyczą nie tylko oceny jakościowej, ale także ilościowej.

W zakresie normowych badań ilościowej oceny termoizolacyjności przegród należy zwrócić uwagę na normę DIN [17]. Norma ta jest zgodna z normą ISO 8990 [41].

W celu określenia CTP przedstawiono cztery metody pomiaru gęstości strumienia cieplnego [17]:

- metoda regulowanej skrzynki grzejnej (Heizkasten),
- metoda regulowanej skrzynki grzejnej z osłoną (osłona boczna elementu badanego),
- metoda wykalibrowanej skrzynki grzejnej,
  - metoda ciepłomierza (Warmestrommesser).

Pierwsze dwie metody wymagają powierzchni badawczej minimum 1.0 x 1.0 m, metoda trzecia zaś 1.5 x 1.5 m. W metodzie czwartej miernik gęstości strumienia cieplnego powinien być umieszczony od strony wewnętrznej i jego powierzchnia powinna wynosić minimum 0.5 x 0.5 m, natomiast minimalna powierzchnia badanej przegrody musi wynosić 1.5 x 1.5 m.

Wielkości pomiarowe CTP wyznacza się jako:

- opór cieplny

$$R_{\lambda} = \frac{\Delta \vartheta_0}{q} , \qquad (1.18)$$

gdzie:

- Δϑ<sub>0</sub> średnia różnica temperatur obu powierzchni badanej przegrody [K],
- q średnia gęstość strumienia cieplnego [W/m<sup>2</sup>],

- współczynnik przenikania ciepła:

sposób A

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1}} + \frac{1}{\Lambda} + \frac{1}{\alpha_{2}}}, \qquad (1.19)$$

gdzie:

α - współczynniki przejmowania należy przyjąć wg
 DIN 4108 cz 4 [16],

sposób B

$$k = \frac{q}{\Delta \vartheta_1} , \qquad (1.20)$$

gdzie:

Δϑ<sub>L</sub> - średnia różnica temperatur obu ośrodków powietrznych [K].

#### 1.3.3. Opis wybranych metod

Metody pomiarowe CTP realizuje się rutynowo głównie poprzez pomiar oporu cieplnego  $R_{\lambda}$  zgodnie ze wzorem:

$$R_{\lambda} = \frac{\vartheta_i - \vartheta_e}{q}.$$
 (1.21)

Przegląd stosowanych pomiarowych metod na obiekcie wyznaczenia współczynnika k oraz oporu cieplnego R przedstawia Anderson [1]. Wykazał on, że w poszczególnych procedurach pomiarowych istnieje wiele różnic metodologicznych, które wymagają jeszcze rozwiązania. Spośród sposobów wyznaczenia gęstości strumienia cieplnego znana jest metoda skrzynki grzejnej "hot box" [17;129] oraz stosowana częściej w badaniach poligonowych, metoda ścianki pomocniczej, zwanej potocznie ciepłomierzem [17;80;90]. Wyznaczenie gęstości strumienia cieplnego prowadzi się zestawem urządzeń pomiaroworejestrujących, które można zakwalifikować do urządzeń profesjonalnych [3;107].

Analizę błędów pomiarowych czujników gęstości strumienia ciepła montowanych na powierzchniach przegród w różnych warunkach przedstawił Trethowen [130] oraz Kaiser [44]. W pracach krajowych również poruszano powyższy problem [24]. Mimo zalecanych metod wzorcowania czujników pomiarowych istnieją rozbieżne oceny dokładności pomiarów gęstości strumienia cieplnego [17;24;136]. Należy jednak stwierdzić, że brak jest uznawanych legalizowanych wzorców (etalonów) oraz znormalizowanych metod skalowania (kalibrowania) urządzeń pomiarowych do wyznaczania tych wielkości.

Badanie gęstości strumienia cieplnego q w użytkowanym budynku prowadzi się z reguły za pomocą ścianki pomocniczej (ciepłomierza). Metoda ta polega na umieszczeniu na powierzchni badanej przegrody czujnika-miernika o znanym oporze cieplnym. Gęstość strumienia cieplnego wyrażona jest jako funkcja mierzonej różnicy temperatur określona siłą termoelektryczną E.

Uwzględniając stałą miernika c (będącego funkcją jego oporu cieplnego, ilości termopar oraz ich rodzaju) wyznacza się gęstość strumienia cieplnego ze wzoru:

$$q = c E.$$

(1.22)

Znane są ciepłomierze różnych firm oparte na powyższej konstrukcji. Szeroki przegląd tych mierników podał Wojdyga [80;135].

Na uwagę zasługują mierniki typu "pas Schmidta", płytki pomiarowe produkcji TNO w Delf (Holandia), mierniki firmy Ahlborn (RFN).

W Polsce znane są ciepłomierze produkowane przez SOJO [47] oraz konstrukcje przedstawione przez ITB - CEBET [103]. Oprócz powyższej konstrukcji ścianki pomocniczej znane są rozwiązania działające na zasadzie pojemnościowej (dielektrycznej) związanej z wykorzystaniem sprzężenia elektrycznego. Na uwagę zasługuje konstrukcja ścianki HWA Venzmera i Kleina [131;132].

Znane są również metody bezpośredniego określenia oporu cieplnego  $R_{\lambda}$  za pomocą ścianki pomocniczej – ciepłomierza, która obok stosu termopar posiada wbudowany dodatkowy przetwornik pomiaru temperatury z możliwością podłączenia czujnika od strony przeciwnej niż ciepłomierz. Ciepłomierzem tym bezpośrednio wyznacza się badany opór cieplny. Przykładem może być ciepłcmierz THERM – 9730 – 111 firmy Ahlborn [48].

Bezpośredniego pomiaru oporu cieplnego dokonuje się również za pomocą tzw. aktywnej ścianki pomocniczej konstrukcji Rogaß, Dreyer [18;112;113]. Ścianka ta, jako wzorcowa, ma znany opór cieplny  $R_v$  i wyposażona jest w grzałkę elektryczną. W czasie pomiaru wymusza się ustalony przebieg temperatur w badanym przekroju (Ø 60 cm) przegrody. Mierząc charakterystyczne temperatury profilu badanej przegrody i wzorca określa się pomiarową wartość oporu cieplnego  $R_v$ . Badany opór cieplny przegrody wyznacza się z wzoru:

$$R_{\lambda} = R_{v} \frac{\Delta T_{o}}{\Delta T_{v}} , \qquad (1.23)$$

gdzie:

R, - jest znanym oporem cieplnym ścianki pomocniczej,
 ΔΤ, - różnica temperatur mierzonego obiektu,
 ΔΤ, - różnica temperatur na ściance pomocniczej.

Przenośne urządzenie pomiarowe, będące pośrednią konstrukcją pomiędzy skrzynką grzejną a aktywną ścianką pomocniczą, przedstawiają Harich, Enders [36]. Urządzenie to, składające się z płyty grzejnej i powierzchni chłodzącej o średnicy 90 cm, wytwarza stacjonarny przepływ strumienia cieplnego przez badaną przegrodę. Opór cieplny przegrody R, wyznacza się z zależności:

$$R_{\lambda} = F \frac{\Delta T}{\Phi} , \qquad (1.24)$$

gdzie:

 Φ - zadany strumień cieplny przy różnicy temperatur powierzchni ΔT dla powierzchni F.

Urządzenie pomiarowe do wyznaczenia współczynnika k umożliwiające pomiar w okresie całorocznym przedstawiają Duc i Jankowski [21]. Składa się ono ze skrzynki grzejnej umożliwiającej wytworzenie zadanego gradientu temperatur po obu stronach przegrody. Pomiar gęstości strumienia cieplnego prowadzi się za pomocą miernika strat ciepła MSC-2 umieszczonego w środowisku skrzynki na wewnętrznej powierzchni przegrody. Proponowana metoda oceny termoizolacyjności ścian może być stosowana bezpośrednio przed oddaniem obiektu do eksploatacji.

#### 1.4. Procedury pomiarowe

1.4.1. Formuly zapisów

Przy wyznaczaniu pomiarowej wielkości współczynnika k lub oporu cieplnego  $R_{\lambda}$  stosowane są zróżnicowane formuły zapisów fizycznych, mających również wpływ na metodologię prowadzenia badań. Według własnej klasyfikacji wyodrębniono:

#### I. Zapis standardowy

Podstawą wyznaczenia współczynnika k jest przekształcone równanie Pecleta

$$k = \frac{q}{t_1 - t_2} \cdot (1.25)$$

Jest to najprostsza formuła, która bezpośrednio pozwala na wyznaczenie współczynnika k. Z reguły stosowana w badaniach przy ustalonym przepływie ciepła w warunkach laboratoryjnych [17], rzadko w pomiarach przy nieustalonym przepływie ciepła, chociaż również zalecana [26]. Na powyższej zależności oparto formułę roboczą:

$$x = \frac{q_1}{t_1 - t_e} .$$
 (1.26)

#### II. Zapis "eksperta"

Współczynnik przenikania ciepła k wyznacza się na podstawie przekształconego wzoru 1.16, w którym gęstość strumienia cieplnego wyrażono wzorem Newtona. Zależność tą przedstawiono między innymi wzorem [96]:

$$k = \frac{t_{i} - \vartheta_{i}}{t_{i} - t_{i}} \alpha_{i} , \qquad (1.27)$$

- opór cieplny wyrażony jest wzorem [49]:

$$R_{\lambda} = R_{i} \frac{\vartheta_{i} - \vartheta_{e}}{t_{i} - \vartheta_{i}} . \qquad (1.28)$$

W zakresie stosowania wzorów 1.27 i 1.28 zalecane są różne sposoby przyjmowania współczynnika  $\alpha_1$  lub oporu  $R_1 = 1/\alpha_1$ :

Współczynnik α jako stała wielkość normowa.

Jest to rozpowszechniony zapis stosowany przy wykonywaniu ekspertyz i opinii [12]. Przyjmując normową wartość  $\alpha$  na podstawie normy DIN 4108 [16], firma Ultrakust Geratebau proponuje programowane urządzenie (Taschenrechner) do wyznaczania współczynnika k [25].

2. Współczynnik  $\alpha_i$  jako obliczeniowa wielkość. Wartość  $\alpha_i$  można obliczyć na podstawie teoretycznych wzorów zawartych między innymi w pracach [30][54].

 Współczynnik α wyznaczony z pomiaru gęstości strumienia cieplnego q..

Wielkość współczynnika a wyznacza się ze wzoru:

$$\alpha_{i} = \frac{q_{i}}{t_{i} - \vartheta_{i}} . \qquad (1.29)$$

Według powyższej metody zaleca się wykonywanie badań:

a) w charakterystycznych miejscach przegrody [93],

b) w miejscu wzorcowym przegrody [117].

III. Zapis normowy

Podstawą opisu pomiarowego współczynnika k jest wzór normowy:

$$k = \frac{1}{R_{1} + R_{\lambda} + R_{e}} .$$
 (1.30)

Wzór ten można wyrazić w postaci:

$$k = \begin{bmatrix} \vartheta_{i} & -\vartheta_{e} \\ - \vartheta_{i} & + (R_{i} + R_{e}) \end{bmatrix}^{-1}$$
(1.31)

W zakresie wykorzystywania tego zapisu stosuje się dwie możliwości:

Współczynnik pomiarowy normowy k [48;82].
 Na podstawie pomiaru wyznacza się:
$$\Lambda = \frac{1}{R_{\lambda}} = \frac{q_1}{\vartheta_1 - \vartheta_e} , \qquad (1.32)$$

zaś na podstawie norm przyjmuje się wartości oporów przejmowania ciepła [16;99]:

$$R_1 + R = 0.17$$
 (1.33)

2. Współczynnik pomiarowy eksperymentalny k [48]. Opór właściwy przegrody wyznacza się według wzoru 1.32, zaś opory przejmowania określa się z pomiarów według wzorów:

$$\frac{1}{R_{1}} = \frac{q_{1}}{t_{1} - \vartheta_{1}} , \qquad (1.34)$$

$$\frac{1}{R_{e}} = \frac{q_{e}}{q_{e} - t_{e}}$$
 (1.35)

## IV. Czas pomiaru

Wpływ zmian temperatur środowisk w czasie  $\tau$  na badaną przegrodę wchodzi w zakres teorii nieustalonego przepływu ciepła wiążącego się z rozwiązywaniem równania różniczkowego Fouriera z odpowiednimi warunkami brzegowymi [38;134].

Teoretyczną analizę zmienności temperatury zewnętrznej t w czasie  $\tau$  na wielkość współczynnika k przeprowadza Hauri [37]. Wprowadza pojęcie dynamicznego współczynnika k uzależniając CTP od zmian temperatur i gęstości strumienia cieplnego w czasie. Wyniki analizy, mimo że oparte są na przyjęciu harmonicznej zmiany temperatury t , uzasadniają uwzględnienie wpływu czasu pomiaru  $\tau$  na charakter współczynnika k. W celu uzyskania dokładniejszych informacji na temat zmienności CTP, wynikających ze stochastycznego charakteru temperatury t, Krause, Zaba, Gliński [68] opracowali program komputerowy TIPP przeznaczony do symulacji przepływu ciepła w rzeczywistych warunkach eksploatacji przegrody w czasie. Na podstawie analiz stwierdzono, że zarówno współczynnik k, jak i opór cieplny R nie są wartościami stałymi ani powtarzającymi się cyklicznie w czasie pomiaru t.

W badaniach przy określaniu pomiarowych charakterystyk uwzględniających parametr czasu τ wprowadza się między innymi pojęcie przesunięć fazowych [7], czasowych [50] bądź stałych czasowych [111]. Dosyć precyzyjnie pojęcia te, nazwane opóźnieniem czasowym elementów, tłumaczy norma ASHRAE-101-1981 [2]. Opóźnienia czasowe badanych elementów wiążą się z ich bezwładnością cieplną. Powoduje to, że temperatura danej przegrody lub pewnej masy jest funkcją jej poprzednich warunków przepływu ciepła. Zagadnienie to jest szczególnie ważne przy nasłonecznieniu. Podane w tej normie wartości opóźnienia czasowego (w godzinach) wyrażają minimalny czas, jaki musi upłynąć po nasłonecznieniu, aby można było prowadzić badania na obiekcie. W zależności od rodzaju przegrody (masy), wielkości te wynoszą od 2 do 7 godzin. Dokładne wyznaczenie opóźnienia czasowego elementów budynku poddanego zmiennym warunkom klimatycznym wymaga wielu danych, w tym dotyczących właściwości konstrukcyjno-materiałowych przegrody.

Zagadnienie sposobów wyznaczenia charakterystyki metrologicznej ma duże znaczenie praktyczne, gdyż od rodzaju charakterystyki zależy metodyka pomiaru [94]. W pracy założono cel określenia takiej charakterystyki metrologicznej przydatnej w diagnostyce izolacyjności termicznej przegród, która jako wielkość pomiarowa nie może być czasochłonna, musi być łatwo sprawdzalna, zaś stopień niepewności jej wyznaczenia nie może być większy od dotychczas stosowanych. W związku z tym w przyjętej charakterystyce wyznaczenie współczynnika przejmowania ciepła uznano za wielkość pośrednią.

Czas pomiaru Δτ jest to wielkość, która nie występuje bezpośrednio we wzorach poszczególnych procedur postępowania

37

stosowanych przy wyznaczaniu pomiarowej wielkości współczynnika k lub oporu  $R_{\lambda}$ . Wielkość ta jest różnie przyjmowana w badaniach ścian zewnętrznych, wg [64;82;103] wynosi od 1 ÷ 7 dni. Istnieje również pogląd, że występuje tylko kilka dni w roku charakteryzujących się przebiegiem temperatur, kiedy można wyznaczyć pomiarową wielkość współczynnika k [43]. Oryginalny sposób przyjmowania czasu pomiaru przy wyznaczeniu współczynnika k prezentuje firma Ahlborn [48]. Podaje możliwości uśrednienia współczynnika k po 2n sekundowym pomiarze gęstości strumienia q, następnie po 2 minutach oraz, jako wielkości uśrednionej, po 2 i więcej godzinach dla maksymalnej ilości 60 pomiarów w odstępach (0 ... 2n [h]). Daje to możliwość prowadzenia pomiarów max do 5 dni.

#### 1.4.2. Sposób wyznaczania współczynnika k

Nie wchodząc w zagadnienia metrologii samych pomiarów przeanalizowano sposoby wyznaczania wielkości pomiarowej k [65]. Wielkość współczynnika k wyznaczona w okresie pomiarowym  $\Delta \tau = \tau_{k} - \tau_{p}$  w zależności od przyjętych założeń może być określana dwoma sposobami.

Pomiarowa wartość współczynnika k wyznaczona poprzez pomiary dyskretne w czasie  $\Delta \tau$  może być traktowana jako:

Wielkość uwzględniająca stateczność cieplną przegrody.

$$k = k_{sr} = \frac{Q_{\Delta\tau}}{(\bar{t}_1 - \bar{t}_2)\Delta\tau} , \qquad (1.36)$$

gdzie:

- $Q_{\Delta \tau}$  ilość ciepła na jednostkę powierzchni przenikającego w okresie pomiarowym  $\Delta \tau$ ,
- $t_1 t_2 rożnica średnich temperatur w okresie pomiarowym <math>\Delta \tau$ .

Ilość magazynowanego ciepła w przegrodzie w okresie pomiarowym Δτ wyniesie:

$$\Delta Q = Q_{1\Delta T} - Q_{e\Delta T}$$
 (1.37)

a przy wyznaczonych wielkościach dla n pomiarów:

$$Q_{i\Delta\tau} = \frac{\Delta\tau}{n} \sum_{j=1}^{n} q_{ij} , \qquad (1.38)$$

$$Q_{e\Delta\tau} = \frac{\Delta\tau}{n} \sum_{j=1}^{n} q_{ej} . \qquad (1.39)$$

Okres pomiaru Δτ powinien być tak dobrany, aby ilość magazynowanego ciepła w przegrodzie można było pominąć. Warunek ten będzie spełniony, gdy:

$$Q_{1\Delta\tau} \cong Q_{e\Delta\tau} \cong Q_{\Delta\tau} \qquad (1.40)$$

 Wielkość uwzględniająca średnią chwilowych wartości współczynnika k.

Wartość chwilowa współczynnika k w chwili j wynosi:

$$k_{j} = \frac{q_{ij}}{t_{ij} - t_{ij}} .$$
 (1.41)

Srednia wartość chwilowa współczynnika k w okresie  $\Delta \tau$  przy n pomiarach wyniesie:

$$k = k_{sr} = \frac{\sum_{j=1}^{n} k_{j}}{n}$$
 (1.42)

Okres pomiarowy  $\Delta \tau$  odpowiadający  $k_{\dot{S}r}$  należy określić przy spełnieniu poniższego warunku:

$$\frac{k_n - k_{n-1}}{k_n} \leq x_{m1n} , \qquad (1.43)$$

gdzie:

 k<sub>n</sub>, k<sub>n-1</sub> - wielkości pomiarowe, wyznaczone jako średnie wartości dla n-1 oraz n pomiarów w okresie Δτ,
 x - minimalna względna różnica wartości k.

Na podstawie analizy symulacyjnej [64;65] wielkości pomiarowych określonych wzorami 1.36 i 1.42 można stwierdzić, że drugi sposób wykazuje wystarczającą dokładność w stosunku do sposobu pierwszego. Pozwala to na uproszczenie metrologiczne w pomiarze gęstości strumienia cieplnego i przyjęcie warunku  $q=q_1$ .

Jest to zgodne z zalecaną metodą pomiaru gęstości strumienia cieplnego q [17;109].

Metodyka badań określenia wielkości pomiarowej współczynnika k powinna dawać możliwość porównywania jego wartości z wymogami normowymi. Jako podstawę wyznaczenia wartości k należy przyjąć zapis normowy:

$$k = \frac{1}{R_{1} + R_{\lambda} + R_{e}} . \qquad (1.44)$$

Opór cieplny R<sub>λ</sub> należy określić poprzez pomiar, wyznaczając jego wartość chwilową:

$$R_{\lambda j} = \frac{\vartheta_{i j} - \vartheta_{e j}}{q_{i j}} . \qquad (1.45)$$

40

Średnia wartości chwilowych przy n pomiarach w okresie pomiarowym Δτ wyraża się wzorem:

$$R_{\lambda} = R_{\lambda s r} = \frac{\sum_{j=1}^{n} R_{\lambda j}}{n} . \qquad (1.46)$$

Na podstawie badań własnych oraz Pogorzelskiego [105] zaleca się, aby początek i zakończenie pomiarów przeprowadzić o tej samej godzinie w przesunięciu dobowym. Odstęp między poszczególnymi pomiarami, według wytycznych firmy Ahlborn, powinien wynosić 2 godziny [48]. Zgodnie z wytycznymi, bez względu na charakter przebiegu zmian temperatury zewnętrznej i promieniowania otoczenia w odniesieniu do ścian warstwowych, orientacyjne wartości czasu pomiaru można przyjąć [66;105]:

ściany "lekkie" - 1 doba,

- ściany "średnio ciężkie" - 3 doby,

- ściany "ciężkie" - 5 dób.

Okres pomiarowy  $\Delta \tau$ , odpowiadający  $\mathbf{R}_{\pm r}$ , należy określić przy spełnieniu warunku (wzór 1.37), tzn., że wartości  $R_{\lambda}$  obliczone narastająco z poszczególnych pomiarów nieznacznie się od siebie różnią:

$$\frac{R_{\lambda n} - R_{\lambda(n-1)}}{R_{\lambda n}} \leq x_{m1n} . \qquad (1.47)$$

x - minimalna względna różnica wartości R,

Uwzględniając normę DIN 52611 cz. 1 z 1991 oraz analizę przeprowadzoną przez Pogorzelskiego można stwierdzić, że  $R_{\lambda}$  w stosunku do wartości oporu rzeczywistego nie powinien się różnić więcej niż 5 ÷ 8% [17;105].

Wartości oporów przejmowania ciepła R<sub>i</sub>, R<sub>e</sub> należy przyjąć zgodnie z normą [99].

Ze względu na znaczną niekontrolowaną zmienność oporów przejmowania R i R przy pomiarach w warunkach nieustalonych

przepływów, nie należy przy rutynowej ocenie izolacyjności termicznej przegród wyznaczać ich pomiarowych wartości.

## 1.4.3. Ogólna klasyfikacja procedur pomiarowych

Istnieje wiele procedur postępowania przy pomiarowym określeniu oporu cieplnego przegrody  $R_{\lambda}$  czy też współczynnika przenikania ciepła k w warunkach nieustalonego przepływu ciepła w obiekcie budowlanym. Metody te zróżnicowane są nie tylko ze względu na stosowane urządzenia pomiarowe, ale również ze względu na przyjmowaną metodologię. Ze względu na przyjęty mechanizm przepływu ciepła przez badaną przegrodę, procedury te można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

1. Pomiar przy zmiennej gęstości strumienia cieplnego. W tym przypadku wielkości strumienia cieplnego q i różnica temperatur  $\Delta T$  lub  $\Delta \vartheta$  określona jest w funkcji czasu pomiaru  $\Delta \tau$ .

2. Pomiar przy wymuszonym ustalonym przepływie ciepła w czasie. W pomiarach tych przyjmujemy gęstość strumienia cieplnego  $q_i$  oraz różnicę temperatur  $\Delta T$  jako wartości stałe w czasie  $\tau$ .

3. Metody wynikające z analizy bilansu cieplnego nieustalonego przepływu ciepła w badanym obiekcie. W badaniach tych uwzględnia się obok strat ciepła przez przegrody inne straty w funkcji czasu pomiaru Δτ. 2. PRZEJMOWANIE CIEPKA NA WEWNETRZNEJ POWIERZCHNI PRZEGRODY

### 2.1. Podstawowe zasady przejmowania ciepła

#### 2.1.1. Całkowita wymiana ciepła

Zjawisko intensywności wymiany ciepła pomiędzy środowiskiem a powierzchnią przegrody można scharakteryzować poprzez współczynnik przejmowania α. Zjawisko to opisane jest wzorem Newtona.

$$q = \alpha \left( t_{n,i} - \vartheta_{s,i} \right).$$
 (2.1)

Wartość współczynnika przejmowania ciepła może być zmienna na całej rozpatrywanej powierzchni [124;134]. Należy więc rozróżniać lokalną wartość tego współczynnika a<sub>lok</sub> oraz jego wartość średnią a.

Lokalna wartość gęstości strumienia na wyznaczonej powierzchni mierzonej prostopadle w kierunku przepływu ciepła wyniesie:

$$q = \frac{dQ}{dF},$$
 (2.2)

stąd lokalna wartość współczynnika przejmowania:

$$\alpha_{1 \circ k} = \frac{dQ}{dF} \frac{1}{t_{p_1} - \vartheta_{s_1}}.$$
 (2.3)

Średni współczynnik przejmowania ciepła:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{F} \int_{F} \alpha_{1 \circ k} dF. \qquad (2.4)$$

W okresie grzewczym, dla którego określamy izolacyjność termiczną przegrody, wymiana ciepła pomiędzy powietrzem pomieszczenia  $t_i$  a chłodną wewnętrzną powierzchnią  $\vartheta_i$  odbywa się przy spełnieniu warunku  $t_i > \vartheta_i$ .

Przejmowanie ciepła odbywa się drogą konwekcji i promieniowania oraz niekiedy poprzez wymianę masy (przy kondensacji pary wodnej), którą jako zjawisko występujące przy "przemarzaniu ściany", pominięto.

W praktyce obliczeniowej stosuje się łączny współczynnik przejmowania ciepła α. Wyprowadza się go z warunku:

 $\alpha_{ik}(t_i - \vartheta_i) + \alpha_{ir}(\vartheta_r - \vartheta_i) = \alpha_i(t_i - \vartheta_i), \qquad (2.5)$ 

gdzie:

 ϑ<sub>r</sub> - średnia temperatura powierzchni, z którymi zachodzi wymiana ciepła przez promieniowanie.

Równość  $\alpha_i = \alpha_{ik} + \alpha_{ir}$  zachodzi jedynie przy  $t_i = \psi_r$ . Zależność ta przyjmowana jest w fizyce cieplnej oraz ogrzewnictwie jako wystarczające przybliżenie, mimo że w stosunku do jej zapisu istnieją zastrzeżenia [101].

#### 2.1.2. Konwekcyjna wymiana ciepła

Zasadniczą rolę podczas konwekcji odgrywają zjawiska zachodzące w warstwie przyściennej, w której ustalają się profile prędkości i temperatury.

Przepływ ciepła następuje pomiędzy warstwami tylko przez przewodzenie, natomiast równolegle do powierzchni następuje unoszenie ciepła przez poszczególne warstwy płynu. Model warstwy przyściennej wyprowadził Prandtl [53;134]. Całość tego procesu jest nazwana wnikaniem lub przejmowaniem ciepła.

W analizie teoretycznej wyodrębnia się układ nieograniczony ścianki pionowej płaskiej w przestrzeni nieograniczonej.Przy ruchu laminarnym płynu w warstwie przyściennej konwekcyjna wymiana ciepła z przegrodą wyrażona jest w układzie dwuwymiarowym równaniami: Fouriera - Kirchoffa

$$w_{x} \frac{\partial t}{\partial x} + w_{y} \frac{\partial t}{\partial y} = a \frac{\partial^{2} t}{\partial y^{2}},$$
 (2.6)

Naviera - Stokesa

$$w_{x} \frac{\partial w_{x}}{\partial x} + w_{y} \frac{\partial w_{x}}{\partial y} = g \beta (t - t_{o}) + \nu \frac{\partial^{2} w_{x}}{\partial y^{2}}, \qquad (2.7)$$

ciągłości strugi

$$\frac{\partial w_{x}}{\partial x} + \frac{\partial w_{y}}{\partial y} = 0.$$
 (2.8)

W powyższych wzorach oznaczono:

w - prędkość,

a - współczynnik wyrównania temperatury,

g - przyspieszenie ziemskie,

β - współczynnik rozszerzalności objętościowej płynu,

v - kinetyczny współczynnik lepkości.

Dla założonych warunków brzegowych:

$$y = 0$$
,

 $w_{x} = w_{y} = 0$ ,  $t = t_{y}$  stała temperatura ścianki.

 $y = \infty$ ,

w = 0, t = t stała temperatura powietrza.

Wprowadza się funkcję prądu  $\psi$  , spełniającą warunki:

$$w_{x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad w_{y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x},$$
 (2.9)

oraz zredukowaną temperaturę

.

$$\theta = \frac{t-t}{t-t} = \frac{t-t}{\Delta t}$$

Po wprowadzeniu zmiennej  $\eta = C y x^{-1/4}$ 

gdzie 
$$C = 4 \sqrt{\frac{q \beta \Delta t}{4 v^2}},$$

oraz po przyjęciu, że funkcja prądu wyraża się wzorem:

$$\psi = 4 \ \nu \ C \ x^{3/4} \ f(\eta) , \qquad (2.11)$$

$$\theta = \theta(\eta), \qquad (2.12)$$

gdzie f( $\eta$ ) – jest pewną funkcją. Po zróżniczkowaniu  $\psi$ , można układ równań (2.6 – 2.8) sprowadzić do postaci:

$$f'' + 3 f f' - 2 f'^{2} + \theta = 0, \qquad (2.13)$$
  
$$\theta'' + 3 Pr f \theta' = 0, \qquad (2.14)$$

gdzie:

$$f' = \frac{df}{d\eta}, \quad \theta' = \frac{d\theta}{d\eta}, \quad f' = \frac{d^2 f}{d\eta^2}.$$

przy warunkach brzegowych dla funkcji η

$$\eta = 0, \quad \theta = 1, \quad f = f = 0,$$
$$\eta = \infty, \quad \theta = 0, \quad f = 0.$$

Układy równań 2.13 oraz 2.14 mają znane rozwiązania otrzymane numerycznie [53;124]. Na ich podstawie można określić z równania wymiany ciepła współczynnik  $\alpha_{\mu}$ 

(2.10)

$$\alpha_{k} = -\frac{\lambda}{\Delta t} \left(\frac{\partial t}{\partial n}\right)_{W}.$$
 (2.15)

Wartość lokalna współczynnika przejmowania dla wewnętrznej pionowej powierzchni wynosi:

$$\alpha_{1 k x} = -\lambda C x^{-1/4} \theta'(0), \qquad (2.16)$$

lub w postaci kryterialnej:

$$Nu_{x} = \frac{\alpha_{x}}{\lambda} = 0.508 \text{ Pr}^{1/2} (0.952 + \text{Pr})^{-1/4} (\text{Gr}_{x})^{1/4}, \quad (2.17)$$

gdzie:

x - bieżąca odległość liczona od dołu ściany.

#### 2.1.3. Radiacyjna wymiana ciepła

Wymiana ciepła w pomieszczeniu przez promieniowanie odbywa się w zamkniętej przestrzeni w ograniczonym zakresie temperatur istniejących w użytkowanym pomieszczeniu. Nie jest ona zależna od odległości pomiędzy przegrodami oraz od ośrodka, którym zwykle jest powietrze.

Kształt i położenie przegród oraz ich właściwości jako powierzchni promieniujących są teoretycznie ściśle określone. Promieniowanie cieplne w pomieszczeniach ograniczonych ścianami traktować można jako promieniowanie ciała szarego [118]. Powierzchnie przegród budowlanych wykazują odmienność od ciała doskonale czarnego. Gęstošć strumienia cieplnego wymienianego przez promieniowanie pomiędzy dwoma szarymi powierzchniami wynosi:

$$q_{1-2} = \epsilon_{1-2} C_{o} \left[ \left( \frac{T_{1}}{100} \right)^{4} - \left( \frac{T_{2}}{100} \right)^{4} \right],$$
 (2.18)

47

gdzie:

- ε<sub>1-2</sub> średni stosunek wymiany energii promienistej powierzchni przegród (emisyjność wzajemna),
- C stała Stefana-Boltzmana (C =  $10^8 \sigma$ ).

W poszczególnych miejscach strumień energii E zależy od lokalnego stosunku konfiguracji przegród – ich wzajemnego usytuowania, co niezależnie od lokalnych zmian temperatury  $\vartheta_i$ wpływa na zmienność  $\alpha_i$ . W ogólnym przypadku lokalny stosunek konfiguracji wynosi:

$$\varphi_{d1-2} = \frac{d^2 E_{1-2}}{dE_1} = \int_{F_2}^{COS \ \beta_1 COS \ \beta_2} dF_2.$$
(2.19)

Dla całej powierzchni średni stosunek konfiguracji wynosi:

$$\varphi_{1-2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi r^2} dF_2 dF_1. \qquad (2.20)$$

Równania przepływu ciepła przez promieniowanie są, ze względu na temperaturę, nieliniowe. Przyjmuje się w praktyce uproszczony zapis:

$$q_{1-2} = \alpha_{1r} (t_1 - t_2) = \alpha_{1r} (T_1 - T_2).$$
 (2.21)

Porównując wzory 2.18 i 2.21 można otrzymać radiacyjny współczynnik przejmowania ciepła:

$$\alpha_{1r} = \frac{\varepsilon_{1-2}C_{\alpha}}{T_{1} - T_{2}} \left[ \left( \frac{T_{1}}{100} \right)^{4} - \left( \frac{T_{2}}{100} \right)^{4} \right] = \varepsilon_{1-2}\sigma_{c} \left( T_{1} + T_{2} \right) \left( T_{1}^{2} + T_{2}^{2} \right).$$
(2.22)

Dla Τ + Τ można α wyrazić w uproszczonej formie:

$$\alpha_{ir} = \varepsilon_{1-2} 4 \sigma_{c} T^{3}. \qquad (2.23)$$

Przybliżenie liniowe zastosowane we wzorze 2.21, upraszczające zapis, nie zmniejsza trudności określenia jego wielkości, gdyż współczynnik α, jest silnie nieliniowy.

# 2.2. Wielkości pomiarowe w badaniach

# 2.2.1. Zasady pomiaru

Przy określeniu termicznych parametrów komfortu cieplnego w pomieszczeniu, Mayer [83] przedstawia sposób wyznaczenia konwekcyjnego  $\alpha_{1k}$  oraz radiacyjnego  $\alpha_{1r}$ . Za pomocą specjalnie skonstruowanego do tego celu zestawu pomiarowego RST - Meter -Fühlers wyznacza się odpowiednie wartości liczbowe. Ze wzoru Newtona określa się oddzielnie radiacyjny oraz konwekcyjny współczynnik przejmowania ciepła. Wielkościami pomiarowymi są: -  $q_{k+}$  - sumaryczny strumień cieplny, RST wynikowa - ekwiwalentna temperatura wewnętrznej powierzchni przegrody, q - konwekcyjny strumień cieplny, t - temperatura środowiska wewnętrznego. Pozostałe wielkości, w tym radiacyjny strumień cieplny q , są wyznaczone obliczeniowo.

$$q_{r} = q_{k+r} - q_{k}$$
 (2.24)

Temperaturę otoczenia przestrzeni zamkniętej, uwzględniającą temperaturę wynikową RST oraz promieniowanie q<sub>r</sub>, wyraża się wzorem:

$$t = \sqrt{\frac{(RST + 273.2)^4}{100}} - \frac{qr}{C} \cdot 100 - 273.2, \qquad (2.25)$$

gdzie: C = 4,9  $W/m^2 K^4$  – współczynnik promieniowania miernika RST.

Wynikowe współczynniki przejmowania ciepła wyznacza się ze wzoru:

radiacyjny	$\alpha_{ir} = q_r (RST - t),$	(2.26)

konwekcyjny 
$$\alpha_{ik} = q_k (RST - t_i).$$
 (2.27)

Jak wynika z 2.2.1, nie stosuje się bezpośredniego pomiaru radiacyjnej gęstości strumienia cieplnego q<sub>r</sub>. Temperatury związanej z radiacją nie mierzy się bezpośrednio, a wyznacza się na podstawie temperatury powierzchni przegrody oraz wyznaczonej pośrednio gęstości strumienia cieplnego q.

#### 2.2.2. Badania eksperymentalne

Przebieg procesu wymiany ciepła z ogrzewanego pomieszczenia jest zróżnicowany, w zależności od rodzaju zamkniętej przestrzeni środowiska, kubatury oraz ilości i wielkości przegród zewnętrznych. Proces ter, jako niejednorodny, jest zakłócany ograniczoną obecnością powierzchni o zróżnicowanych temperaturach i zmiennych prędkościach napływu powietrza.

Od smukłości warstwy powietrza zależy mechanizm konwekcyjnego przepływu ciepła. Przy dostatecznie grubej warstwie powietrza przy pionowych ścianach ograniczających występują ruchy wznoszące i opadające cząstek płynu. Na podstawie Peteli zjawiska te przedstawiono poglądowo na rysunku [92]. Dla pełnej przegrody pionowej w dostatecznej odległości od źródła ciepła, cząstki ciepłego powietrza przy zetknięciu z chłodną powierzchnią ściany ochładzają się i jako cięższe opadają w dół. Przy ścianie, dla której t > 🔹 , chłodne powietrze ogrzewa się i unosi się do góry. W przegrodzie, w obrębie której znajduje się źródło ciepła lub nieszczelności, poprzez które występuje infiltracja powietrza (lub występują te przypadki razem) mechanizm ruchu cząstek powietrza jest inny, aż do odwrotnego w stosunku do typowej pełnej przegrody.

## sciana gorąca



sciana zimna

Rys. 2.1. Konwekcja swobodna w układzie zamkniętym Fig. 2.1. Free convection in closed system

Nie można w sposób jednoznaczny dostosować i uogólnić rozważań teoretycznych, które mogłyby być bezpośrednio wykorzystane w praktyce (2.16, 2.22). W związku z powyższym istnieje konieczność prowadzenia badań eksperymentalnych dotyczących ustalenia prawidłowości przejmowania ciepła na powierzchni przegrody. W tym zakresie od 1963 roku w MISI prowadzono badania eksperymentalne [7]. W pomieszczeniu badawczym izolowanym termicznie źródłem ciepła był ekranowany grzejnik umieszczony w podłodze. Analizie poddano proces konwekcji na chłodnych powierzchniach przegród w pomieszczeniu. W realizowanym eksperymencie badania nie pozwoliły jednak otrzymać dokładnego obrazu wymiany ciepła warstwy przyściennej płynu z powierzchnią przegrody. Badania te wskazały jednak kierunek dalszego prowadzenia prac w tym zakresie. Dalsze badania prowadzone przez Rada, cytowane przez Bogosławskiego, wykonywane były w pomieszczeniu na nagrzanych powierzchniach pionowych [7]. Efektem tych badań było wykazanie zmienności wartości konwekcyjnego współczynnika a na pionowej powierzchni przegrody, w zależności od jej wysokości. Wyniki powyższych badań zgodne są z wynikami przedstawionymi przez autorów m.in. [75;78;134].

### 2.3. Złożoność zagadnienia przejmowania ciepła

Wpływ współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$  na wymianę ciepła przez przegrodę różnie jest interpretowany.

Przy wyznaczeniu obliczeniowej wartości współczynnika przenikania ciepła k przyjmuje się, zgodnie z klasycznymi poglądami Rietschella [110] i Cammerera [10], że wpływ współczynników przejmowania α na jego ostateczną wartość jest niewielki. Klasyczne ujęcie tego zagadnienia, zgodnie z prawem Newtona (wzór 2.1), traktuje współczynnik przejmowania ciepła jako stałą wielkość rachunkową wystarczająco dokładną i wygodną dla praktycznych obliczeń współczynnika przenikania ciepła k [110]. W specjalistycznej literaturze dotyczącej wymiany ciepła [38;55;133] znacznie większą wagę, aniżeli dotychczas w fizyce cieplnej [15;96;125], przywiązuje się do znaczenia tego współczynnika.

Istotny wpływ wielkości współczynnika przejmowania ciepła  $\alpha$ występuje przy określeniu współczynnika przenikania ciepła kjako wielkości pomiarowej. Współczynniki przejmowania  $\alpha_i$  i  $\alpha_i$ określone są poprzez składową konwekcyjną  $\alpha_k$  i radiacyjną  $\alpha_i$ , które to zależą od wielu czynników trudnych do jednoznacznego praktycznego określenia [38;92;124]. Według badań szwedzkich [93], wpływ zakłóceń konwekcyjnych i promieniowania powoduje znaczne zwiększenie współczynnika przejmowania  $\alpha_i$ , nawet 2 + 3 razy w stosunku do warunków normalnych.

Znany jest szereg wzorów do obliczania szczególnie wielkości  $\alpha_{1k}$  [7;54;75] oraz wielkości  $\alpha_{1r}$  [8;118;119]. Różnie ocenia się udział  $\alpha_{1k}$  i  $\alpha_{1r}$  w kształtowaniu sumarycznej wielkości  $\alpha_{1}$ . Z reguły przypisuje się dominującą rolę składnika  $\alpha_{1r}$  [123], zaś w praktycznym stosowaniu zaleca się przyjmować  $\alpha_{1k}/\alpha_{1r} = 2/3$  [125].

Na podstawie literatury związanej z fizyką cieplną można stwierdzić, że składowa konwekcyjna  $\alpha$  zależy od temperatury powierzchni przegrody  $\vartheta_1$ , różnicy temperatur ( $t_1 - \vartheta_1$ ) oraz prędkości powietrza w warstwie przyściennej [14;55;75]. Składowa radiacyjna zależy od temperatury powierzchni przegrody  $\upsilon_1$ , stanu jej powierzchni i rodzaju środowiska [31;118]. Stwierdza się znaczną rozpiętość w zakresie przyjmowania pomiarowych wartości  $\alpha_1$ , odbiegających od zalecanych wartości wielkości normowych. Praktycznie można przyjąć wg Linka, że całkowite wartości pomiarowe  $\alpha_1$  wahają się w granicach 2 ÷ 6  $W/(m^2 K)$  [77], chociaż przy powietrznym ogrzewaniu pomieszczeń wartości te mogą dochodzić do 12  $W/(m^2 K)$  [22].

Przy wyznaczeniu pomiarowej wartości współczynnika k, przedział zmienności współczynnika przejmowania ciepła od strony zewnętrznej  $\alpha$  jest znacznie większy aniżeli od wewnętrznej  $\alpha$ .

Zagadnienie to jest szczegółowo rozpatrywane w literaturze związanej z termografią w podczerwieni [19;93] oraz w specjalistycznych pracach na temat absorpcyjności i emisyjności zewnętrznych powierzchni przegrody [34;121].

Nie analizując szczegółowo powyższego zagadnienia, można przyjąć, że  $\alpha$  zmienia się nie tylko w zależności od różnic temperatur ( $\vartheta$  - t), ale i od prędkości wiatru oraz kierunku jego parcia. Dla przegród pionowych, na podstawie Klebera, opór należy przyjmować 0.04 oraz 0.00 (m<sup>2</sup>K)/W [49], natomiast wg Lierscha wynosi od 13 ÷ 25 W/(m K) [75], wg Bobrana od 20 ÷ 100 W/(m<sup>2</sup>K) [6], wg Beckera 50 W/(m<sup>2</sup>K) [4].

## 2.4. Ocena zagadnienia

Z analizy zagadnienia przejmowania ciepła przy nieustalonym przepływie wynika, że współczynnik przejmowania  $\alpha$  wyrażony poprzez jego składowe  $\alpha$  i  $\alpha$  jest wielkością niejednoznacznie określoną. Wywód teoretyczny (pkt. 2.1.) wskazuje, że współczynniki konwekcyjny, jak i radiacyjny są wielkościami, których lokalne wartości mogą się różnić od wartości średnich. Ponadto w stanach nieustalonych zachodzi zmienność temperatur w czasie, co również wpływa na zmienność współczynnika przejmowania ciepła [59].

Wnioski z badań eksperymentalnych (pkt. 2.2.) wykazują, że zmienność ta spowodowana jest również kształtem pomieszczeń, zakłóceniami spowodowanymi infiltracją powietrza i dodatkowymi źródłami ciepła. Brak możliwości bezpośredniego pomiaru współczynnika α, wynikający z trudności metrologicznych szczególnie w zakresie pomiaru składowych radiacyjnych, uzupełnia powyższe wnioski.

Przeprowadzona analiza literaturowa potwierdza złożoność zagadnienia przejmowania ciepła.

Uzasadnia to przyjęcie takiego podejścia do zagadnień diagnostyki izolacyjności termicznej przegród budowlanych, które nie wymaga bezpośredniego pomiaru współczynnika α.

W konsekwencji w pracy wykorzystano metodę temperaturową do określenia CTP.

3. ZAKOŻENIA I PODSTAWY TEORETYCZNE METODY TEMPERATUROWEJ

### 3.1. Teoria podobieństwa zagadnień metrologicznych

# 3.1.1. Modelowanie zjawiska fizycznego

Modelowanie zjawiska fizycznego, jako zagadnienia związanego z określeniem termoizolacyjności przegrody, jest odwzorowaniem wyidealizowanego wzorca przenikania ciepła przez przegrodę w układzie zależności matematycznych.

Aby zjawiska ujęte w modelu były podobne do zjawisk we wzorcu, który można identyfikować z badaną przegrodą, należy zachować następujące warunki [9;94]:

- podobieństwo geometryczne modelu do wzorca,
- wielkości fizyczne charakteryzujące modelowane zjawisko powinny się zmieniać według tych samych praw, co we wzorcu,
- wielkości fizyczne wchodzące do analizy modelu i wzorca powinny być proporcjonalne,
- należy tak dobierać stałe podobieństwa, aby ich kryteria dla modelu i wzorca były podobne.

Czynnikiem będącym źródłem deformacji modelu przy przyjęciu quasi-stacjonarnego charakteru temperatury wewnętrznej t jest losowy przebieg temperatury zewnętrznej t. Zmiany te można opisać funkcją ciągłą, to jest wybranym rozkładem empirycznym lub poprzez pomiary funkcją dyskretną o zmianach skokowych.

Temperaturowe oddziaływanie środowisk na przegrodę, wyrażone poprzez różnicę temperatur  $(t_i - t)$ , powoduje odpowiedź przegrody zależną od jej właściwości. Odpowiedź przegrody wyrażona może być poprzez gęstość strumieni ciepła  $q_i$  i o oraz temperatur , & lub jak w przyjętym modelu wyjściowym m<sup>w</sup> (rys 3.1.), poprzez odpowiednie różnice temperatur, z których jedna lub obie przypisane są powierzchni badanej przegrody.

Stan termiczny przegrody w przyjętym modelu wyrażony jest poprzez różnicę odpowiednich temperatur ΔT lub Δϑ. Realizacja pełnego podobieństwa modelu do wzorca jest możliwa w przypadku ustalonego przepływu ciepła lub przepływu nieustalonego, gdy czas badań będzie nieskończenie długi, czyli  $\tau \rightarrow \infty$  [28].

Wzorując się na modelowaniu złożonych zjawisk procesów termodynamicznych oraz przenikania ciepła w chemii fizycznej [79;102] można przyjąć, iż mimo że modelowanie takie jest przybliżone, to pozwala na wyciągnięcie praktycznych wniosków. Schemat analizowanego modelu wyjściowego dla jednowymiarowego ustalonego przepływu ciepła przedstawiono na rys. 3.1 [57].



Rys. 3.1. Model wyjściowy podobieństwa ustalonych pól fizycznych - m"

Fig. 3.1. Initial model of similarity of steady-state physical fields - m<sup>W</sup>

Z modelu wynika, że poszczególne różnice temperatur są proporcjonalne do odpowiednich oporów cieplnych. Ilość przepływającego ciepła na jednostkę powierzchni poprzez poszczególne warstwy przegrody wynosi:

56

$$Q_{12} = Q_{23} = Q_{34} = Q_{45} = Q_{15} = Q$$
, (3.1)

$$\frac{\Delta\vartheta_{12}}{R_{12}} = \frac{\Delta\vartheta_{23}}{R_{23}} = \frac{\Delta\vartheta_{34}}{R_{34}} = \frac{\Delta\vartheta_{45}}{R_{45}} = \frac{\Delta\vartheta_{15}}{R_{15}} .$$
(3.2)

Ogólnie można tą zależność wyrazić zapisem:

$$\frac{\Delta \vartheta}{\Delta T} = \frac{R}{R}$$
 (3.3)

Analizując powyższe zagadnienie przy nieustalonym przepływie ciepła zakłada się stabilizację przepływu w chwili pomiaru [9]. Jest to pojęcie, które odpowiada lokalnej równowadze termodynamicznej. Przegroda w badanym przekroju osiąga określony profil (rozkład) temperatur zależny od różnic występujących temperatur  $\Delta T = (t_i - t_j)$  oraz całkowitego oporu cieplnego przegrody R.

W celu osiągnięcia podobieństwa w zakresie przepływu ciepła w warunkach rzeczywistych, należy zmierzyć temperatury w charakterystycznych punktach przyjmując, że punkty te leżą na prostej CB trójkąta ABC (rys. 3.1.), którego podstawą jest bok trójkąta AB = const.

Przyjęty sposób traktowania przepływów nosi nazwę automodelowania i jest stosowany przy modelowaniu zjawisk zachodzących z udziałem przepływu płynów [9].

Przy wyznaczeniu liczb podobieństwa jako bazę odniesienia można przyjąć oddziaływanie stanów termicznych na przegrodę w formie różnic temperatur  $(t_i - t_i)$  lub  $(\vartheta_i - \vartheta_i)$ . Porównując odpowiednie trójkąty modelu wyjściowego m<sup>w</sup> (rys. 3.1.) – oznaczając stany odpowiedzi przegrody symbolem  $\Delta \vartheta$  – uzyskujemy dwa rodzaje liczb podobieństwa wyrażone w formie bezwymiarowych temperatur:

57

$$\theta_{k} = \frac{\Delta \vartheta}{t_{i} - t_{e}}$$

oraz

$$\theta_{\Lambda} = \frac{\Delta \vartheta}{\vartheta_1 - \vartheta_2} . \tag{3.5}$$

Poprzez podobieństwo odpowiednich ilorazów różnic temperatur do ilorazu różnic oporów cieplnych uzyskane wielkości można uznać za CTP. Wielkość  $\theta_k$  można porównać ze współczynnikiem przenikania ciepła k lub z całkowitym oporem cieplnym R, gdyż czynnik oddziaływania stanów środowiska na przegrodę odnosi się do różnicy temperatur (t - t). Wielkość  $\theta_{\Lambda}$  można porównać ze współczynnikiem przewodzenia ciepła przez przegrodę  $\Lambda$  lub jego odwrotnością – oporem cieplnym  $R_{\lambda}$ , gdyż oddziaływanie środowiska odnosi się do różnicy temperatur ( $\vartheta$  -  $\vartheta$ ).

Przy zmianie temperatury t w czasie  $\tau$  występują deformacje modelu wyjściowego  $m^{\#}$  (rys. 3.1). Przyjmując jego zróżnicowane postacie w zależności od kierunku i prędkości tych zmian, deformacje te przedstawiono graficznie na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Deformacje modelu wyjściowego podobieństwa m<sup>\*</sup> Fig. 3.2. Deformation of initial similarity model m<sup>\*</sup>

(3.4)

# 3.1.2. Sytuacja eksploatacyjna przegrody

Zakładając, że ogólne zasady dotyczące niezawodności konstrukcji, zgodnie z normą ISO 2394 [39], dotyczą również zagadnień związanych z termoizolacyjnością przegród, można przyjęty model wyjściowy podobieństwa m (rys. 3.1.) przeanalizować pod kątem "użytkowania przegrody".

Oddziaływania powstające w wyniku planowanego sposobu użytkowania konstrukcji wywołane warunkami stanów środowiska mogą być określone mianem sytuacji projektowych odpowiadających zwykłym warunkom użytkowania konstrukcji. Powinny one być wykorzystywane między innymi jako parametry przy definiowaniu sytuacji projektowych [39].

Transponując powyższe stwierdzenia przy badaniach termoizolacyjności przegród wprowadzono pojęcie sytuacji eksploatacyjnej przegrody, oznaczonej symbolem SEP. Pojęcie to jest stosowane przy badaniach niezawodności urządzeń [107]. Sytuacje eksploatacyjne przegrody mogą się różnić warunkami i czasem trwania.

Model matematyczny opisujący SEP określony jest przy przyjęciu następujących założeń [107]:

 w dowolnej chwili użytkowania obiektu budowlanego przegroda nie może się znajdować w więcej niż jednej sytuacji eksploatacyjnej,

- jeżeli dana sytuacja eksploatacyjna wystąpi, to czas jej trwania nie jest zerowy.

Analizując model wyjściowy podobieństwa m<sup>\*</sup> (rys. 3.1.) przyjęto, że sytuację eksploatacyjną przegrody – SEP, wyrażoną poprzez odpowiednią liczbę stanów, odwzorowuje wysokość trójkąta AC jako suma składowych różnic temperatur w zapisie:

$$(t - \vartheta) + (\vartheta - \upsilon) + (\vartheta - t) = (t - t)$$
. (3.6)

Znaki "+" umiejscowione są w miejscu "odpowiedzi przegrody", zaś różnica temperatur  $(t_i - t_j)$  charakteryzuje warunki stanu środowiska. Składowym sytuacji eksploatacyjnej (różnicom temperatur) odpowiadają składowe oporów cieplnych, których wielkości w modelu m<sup>w</sup> przyjęto jako:

$$R_{1} + R_{2} + R_{2} = R$$
 (3.7)

Sytuacja eksploatacyjna przegrody SEP, w której zawarta jest odpowiedź przegrody, obok zapisu pełnego (wzór 3.6) wyrażona jest również poprzez zapisy:

$$(t_{1} - \vartheta_{1}) + (\vartheta_{1} - \vartheta_{2}) = (t_{1} - \vartheta_{2}) , \qquad (3.8)$$

$$(\vartheta - \upsilon) + (\vartheta - t) = (\vartheta - t) . \tag{3.9}$$

Tak więc SEP można wyrazić różnicą trzech kolejnych temperatur spośród czterech stanów t, t, t.

#### 3.1.3. Modelowanie operacyjne

Dla stochastycznego charakteru zewnętrznej temperatury t przy przyjęciu t = const oraz  $R_1 + R_2 + R_3 = R = const występuje$ zdeformowanie modelu wyjściowego (rys. 3.2). Uzyskane wielkości pomiarowe w zakresie gęstości strumienia cieplnego będą różne  $q \neq q \neq q \neq q$ . Sytuacja eksploatacyjna przegrody SEP w ujęciu pomierzonych różnic temperatur A& odpowiada sumie ilorazów gęstości strumienia ciepła i odpowiednich składowych oporu cieplnego, zmieniając się w czasie τ. W zakresie zmienności tych wielkości związanych z przebiegiem temperatury t i jej wpływem na profil temperatury przegrody (przesunięcie punktu A w modelu - m - rys. 3.2) wyodrębniono umownie trzy strefy sytuacji eksploatacyjnej przegrody SEP:

strefa I - zmian małych:

 $t_{i} - \vartheta_{i} = \frac{q_{i}}{\alpha_{i}} = q_{i}R_{i}$ , (3.10)

strefa II - zmian średnich:

$$\vartheta_1 - \vartheta_e = q_\lambda \frac{d}{\lambda} - = q_\lambda R_\lambda$$
, (3.11)

strefa III - zaburzeń:

$$\vartheta_e - t_e = \frac{q_e}{\alpha} = q_e R_e$$
 (3.12)

Umownie przyjęto, że:

$$q_{\lambda} = \frac{q_{1}m + q_{n}}{m + n}$$
, (3.13)

gdzie:

m,n - wielkości zmienne w czasie τ.

Zabiegiem, którym można nie tylko ułatwić, ale również i zwiększyć dokładność modelowania, jest modelowanie częściowe [9]. Prowadzi ono do praktycznego uproszczenia wyznaczanej charakterystyki [116].

Przyjęto więc modelowanie operacyjne –  $m^{\circ}$ , – jako model systemu pomiarowego [94] – polegające na uproszczeniu modelu wyjściowego  $m^{\forall}$ , które zmniejsza stopień niepewności przy nieustalonym przepływie ciepła. Jako model operacyjny przyjęto model  $m^{\circ}$  (rys.3.3), w którym pominięto strefę zaburzeń ( $\vartheta$  –  $t_{\circ}$ ). Modelowanie to mieści się w modelowaniu fizycznym pozwalającym na wyznaczenie bezwymiarowych temperatur. Zachowany jest bowiem warunek różnic trzech kolejnych temperatur.



Rys. 3.3. Model operacyjny -  $m^{\circ}$ Fig. 3.3. Operational model -  $m^{\circ}$ 

Z podobieństwa trójkątów modelu operacyjnego m<sup>®</sup> (rys.3.3.) wynikają zależności wskazujące na zależność różnic temperatur od odpowiednich oporów cieplnych zgodnych ze wzorem (3.2):

$$\frac{\Delta\vartheta_{12}}{R_{12}} = \frac{\Delta\vartheta_{23}}{R_{23}} = \frac{\Delta\vartheta_{12} + \Delta\vartheta_{23}}{R_{12} + R_{23}^2}, \qquad (3.14)$$

Porównując powyższe zależności uzyskujemy trzy warianty zapisów bezwymiarowej temperatury:

$$\frac{R_i}{R_\lambda} = \frac{t_i - \vartheta_i}{\vartheta_i - \vartheta_e} , \qquad (3.15)$$

$$\frac{R_{i} + R_{\lambda}}{R_{\lambda}} = \frac{t_{i} - \vartheta_{e}}{\vartheta_{i} - \vartheta_{e}} , \qquad (3.16)$$

$$\frac{R_i}{R_i + R_{\lambda}} = \frac{t_i - \vartheta_i}{t_i - \vartheta_e} . \qquad (3.17)$$

W powyższych zapisach iloraz różnic pomierzonych temperatur wyraża iloraz odpowiednich oporów cieplnych. Z punktu widzenia metrologii poszukiwana cecha wyrażona jest odpowiednimi stanami.

#### 3.2. Istniejące charakterystyki bezwymiarowych temperatur

## 3.2.1. Liczba kryterialna Biota

Liczba kryterialna Biota Bi charakteryzuje wymianę ciepła w ciele stałym poprzez podobieństwo przejmowania ciepła. Dla przegrody jednorodnej przedstawiana jest w formie wzoru [134]:

$$Bi = \frac{\alpha \, l_{\circ}}{\lambda} \, , \qquad (3.18)$$

gdzie:

1 - wymiar charakterystyczny,

α - współczynnik przejmowania ciepła.

Wzór w powyższym zapisie znany jest w literaturze przy analizie matematycznej nieustalonego przewodzenia dla ogrzewanego lub chłodzonego elementu ciała stałego [28;38;84].

W rozwiązywaniu matematycznym powyższego zagadnienia tzw. metodą parametrów skupionych [4], zastosowanie tego wzoru (3.18) ograniczone jest do warunku Bi<<1, tj. gdy zmiany temperatury w obrębie elementu ciała jednorodnego są znacznie mniejsze, aniżeli między elementem a otoczeniem.

Wymiar charakterystyczny –  $l_{o}$  wyznaczony jest z warunku geometrycznego elementu  $l_{o} = V/F$  – (objętość przez powierzchnię elementu). Współczynnik  $\lambda$  określony jest jak dla danego znanego

materiału, zaś współczynnik przejmowania ciepła α przyjmuje się jako wielkość matematyczną bez fizycznego uzasadnienia.

W uogólnionej analizie zagadnień związanych z przewodzeniem ciepła przez płytę, liczba Bi traktowana jest jako iloraz oporu przewodzenia ciepła do oporu przejmowania [38;45]:

$$Bi = \frac{R_{\lambda}}{R_{\alpha}} .$$
 (3.19)



Rys. 3.4. Zmienność liczby Bi w zależności od termoizolacyjności przegrody

Fig. 3.4. Variability of Bi number in dependence on wall thermal isolation

Liczba Bi przedstawia bezwymiarową formę zapisu przewodzenia ciepła, przy uwzględnieniu warunku brzegowego trzeciego rodzaju [53]. Z powyższego wynika, że przy bardzo dobrej izolacyjności termicznej płyty (przegrody), tj. kiedy  $R \equiv R_{\lambda}$ , liczba Bi+  $\infty$ , natomiast przy bardzo małej termoizolacyjności przegrody  $R \equiv R_{\alpha}$ , liczba Bi+ 0.

Powyższą zależność uwzględniającą przebieg temperatury w warunkach ustalonych można przedstawić graficznie (rys. 3.4).

Wyrażając warunek Fouriera, który określa ciągłość strumienia ciepła dla warunków brzegowych trzeciego rodzaju wyrażonego wzorem Newtona, otrzymujemy równanie:

$$-\lambda \operatorname{grad} t = \alpha \left( t_{p_i} - \vartheta_{q_i} \right) . \qquad (3.20)$$

Po pomnożeniu obu stron równania przez wymiar charakterystyczny <sup>1</sup> oraz jego odpowiednim przekształceniu otrzymujemy zależność wyrażoną liczbą Biota [57]:

$$1 \text{ grad } t = Bi(t - v) . \tag{3.21}$$

Można więc przyjąć, że liczba Bi, wiążąca równanie Fouriera oraz Newtona w jeden zapis fizyczny, może znależć zastosowanie w określeniu CTP.

Przyjmując, że wymiar charakterystyczny *l* związany jest z grubością przegrody, zaś współczynnikowi przejmowania ciepła α odpowiada współczynnik przejmowania od wewnątrz α – gdyż interesuje nas, ile ciepła przejmuje przegroda od strony pomieszczenia – liczba Bi przyjmuje postać:

$$Bi = \frac{R_{\lambda}}{R_{i}} . \qquad (3.22)$$

W pracach z zakresu termodynamiki [28] oraz w pracy ITB [104] przy analizie zagadnień związanych z metodyką pomiarów oporu cieplnego przyjmuje się liczbę Bi w dwóch zapisach:

$$Bi_{1} = \frac{\alpha_{1} l_{o}}{\lambda} , \qquad (3.23)$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha_e l_o}{\lambda} , \qquad (3.24)$$

gdzie:

 $\alpha_i$ i  $\alpha$  współczynniki przejmowania ciepła od wewnętrznej i zewnętrznej strony przegrody (płyty przewodzącej ciepło).

W celu wyznaczenia przebiegu temperatur przy nieustalonym przepływie ciepła w ścianach zewnętrznych za pomocą programu BASIC, Liersch [74] uwzględnia przy zmianie warunków brzegowych również dwie liczby Bi.

Na podstawie przedstawionego modelu podobieństwa m<sup>\*</sup> (rys. 3.1.) oraz modelu operacyjnego m<sup>°</sup> (rys. 3.3.), wykorzystując równocześnie (wzór 3.22), liczbę Bi można wyrazić jako iloraz różnic temperatur:

$$Bi_{s} = \frac{\vartheta_{1} - \vartheta_{e}}{t_{1} - \vartheta_{1}} . \qquad (3.25)$$

Wielkość liczby Bi wyrażoną powyższym ilorazem różnic temperatur nazwano skorygowaną liczbą Biota, oznaczając ją symbolem Bi

W rozwiązaniu analitycznym zagadnień aktywnej niestacjonarnej metody pomiarowej przy sterowaniu warunkami brzegowymi, przedstawienie pól temperaturowych oraz gęstości strumienia cieplnego za pomocą wielkości bezwymiarowych jest bardzo praktyczne [106]. Uzależnia się wtedy właściwości termoizolacyjne przegród od charakterystyki wyrażonej liczbą Bi. Stwierdzono, że przy dużych liczbach Bi rozdzielczość pomiarowa nie będzie spełniona (rys. 3.5) Uwzględniając czasowy przebieg temperatur można stwierdzić, że przy małych liczbach Bi rozkłady temperatury w przegrodzie stają się wcześniej stacjonarne.

#### 3.2.2. Indeks temperaturowy

Norma ANSI/ASHRAE 101-1981 [2] podaje wzór na określenie bezwymiarowej temperatury zwanej indeksem temperaturowym, oznaczonym symbolem TI - "Temperature Index". Wzór ten znalazł zastosowanie przy analizie izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych w badaniach termowizyjnych [86]. Ujednolicenia w zakresie tej niekonwencjonalnej charakterystyki dokonano w USA dopiero na początku lat pięćdziesiątych, przyjmując jej ostateczny zapis [123]:

$$\Gamma I = \frac{\vartheta - t_e}{t_1 - t_e} . \tag{3.26}$$

Indeks temperaturowy TI określający CTP można zdefiniować umownie jako bezwymiarową temperaturę powierzchni przegrody  $\vartheta_1$ wyrażoną w procentach, gdy różnica temperatur powietrza ( $t_1 - t_2$ ) wynosi 100°, przy  $t_2 = 0°$ .

Przyjmując dla przegród zewnętrznych, że wartość  $R_{e} = 1/\alpha_{e}$ jest bardzo mała w stosunku do sumy  $R_{1} + R_{\lambda}$ , skorygowaną liczbę Bi można wyrazić poprzez TI zależnością [58]:

$$Bi_{s} \cong \frac{TI}{1 - TI} . \qquad (3.27)$$

3.3. Wyznaczenie charakterystyk pomiarowych

# 3.3.1. Wprowadzenie

Punktem wyjściowym zdefiniowania CTP niezależnie od formuły jej zapisu powinna być relacja równoważności pomiędzy przedmiotem poszukiwań, czyli obiektem pomiaru, którym jest termoizolacyjność przegrody, a wynikami uzyskanymi z relacji pomiędzy pomierzonymi stanami.

Każda CTP zdefiniowana przy ustalonym przepływie ciepła niezależnie od sposobu jej wyrażania, sformułowana jest w kategoriach relacji i odwzorowań deterministycznych.

W celu zdefiniowania pomiarowej CTP wyznaczanej w warunkach eksploatacyjnych obiektu, należy nie tylko opierać się na stosowanej definicji ustalonego przepływu ciepła, ale również na wpływie wynikającym z nieustalonego oddziaływania środowiska.

W wyniku powyższego dla różnych SEP należy porównać otrzymaną wielkość CTP z wielkością oczekiwaną. W przypadku subiektywnej oceny zgodności tych dwóch wielkości badacz uważa zazwyczaj, że CTP została poprawnie wyznaczona. Taki sposób postępowania jest możliwy do przyjęcia, kiedy wartość oczekiwana CTP została określona również inną metodą (np. metodą odkrywkową czy też występujących przejawów właściwości [61]).

Z punktu widzenia zasad metrologicznych pomiarową CTP można więc określać jako reprezentatywną wielkość oczekiwaną – zbliżoną do wartości miarodajnej.

Wszystkie obserwacje eksperymentalne obciążone są niepewnościami pomiarowymi, stąd też ważnym problemem w metrologii jest zagadnienie sensowności stwierdzeń dotyczących kategorii właściwości miar.

Miara w wymienionym przypadku oznacza wielkość przyjętą za jednostkę porównawczą. Definiowanie miary, przy ustalonym przepływie ciepła, jest jednoznacznie zrealizowane w stosunku do przyjmowanych wzorców – dotyczy to między innymi definicji współczynnika przewodności cieplnej materiałów λ czy też współczynnika przenikania ciepła k.

Przez analogie do innych dziedzin techniki można stwierdzić, że przy pomiarowym określeniu CTP w nieustalonych przepływach, miara pozostawiona jest dobrej intuicji pomiarowca [81]. W badaniach diagnostycznych nie tylko dokładność przyrządów, lecz dokładność zdefiniowania miary wielkości mierzonej wyznacza realną dokładność wyniku mierzenia.

Logiczne jest również stwierdzenie, że przyjęta definicja powinna zapewnić odtwarzalność miary w określonych wymogami granicach.

Spośród wielkości pomiarowych definiujących miarę, występują: wielkości pierwotne – temperatury t, d, jako jednoznaczne w zdefiniowaniu oraz proste w wyznaczeniu, wielkości pośrednie – gęstość strumienia cieplnego q czy jeszcze bardziej złożone niż współczynnik przejmowania ciepła α. Są to wielkości pomiarowe, które zależą również w części od skorelowanych wzajemnie metrologicznie czynników, których jednoznaczny wpływ nie jest uwzględniany.

Odpowiednie wartości miar mogą być jednoznacznie porównywalne, gdy podstawowy układ warunków oddziaływania środowiska w czasie, jako układ odniesienia, będzie taki sam dla każdego z badanych obiektów. Jest to warunek, który w badaniach przy nieustalonych stanach jest praktycznie nieosiągalny.

Sformułowanie warunków porównywalności miar i ich wartości występujących przy określeniu CTP, w nieustalonych przepływach nie jest dotychczas jednoznacznie sprecyzowane i wymaga dalszych badań eksperymentalnych [128].

# 3.3.2. Formuły zapisów

Analizując uzyskane z modelu operacyjnego m<sup>°</sup> (rys. 3.3) bezwymiarowe temperatury (wzory 3.15, 3.16, 3.17) określono związek ze skorygowaną liczbą Bi.

Uporządkowane formuły zapisów jak poniżej [127;128]:

$$\Theta_{1} = Bi_{s} = \frac{\vartheta_{1} - \vartheta_{e}}{t_{1} - \vartheta_{1}} , \qquad (3.28)$$

$$\Theta_2 = TP = \frac{Bi}{1+Bi} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{t_1 - \vartheta_2},$$
(3.29)

$$\theta_{3} = Bi_{s}^{*} = Bi_{s}^{*} + 1 = \frac{t_{1} - \vartheta_{e}}{t_{1} - \vartheta_{1}}$$
 (3.30)

W celu zobrazowania wzajemnych powiązań powyższych charakterystyk na rys. 3.5 przedstawiono graficzną zależność TP od Bi oraz Bi.

Spośród rozpatrywanych charakterystyk (wzory 3.28 ÷ 3.30) należy wytypować najbardziej praktyczną CTP do celów TDC na użytkowanym obiekcie. W celu uzasadnienia tego wyboru przeprowadzono analizę istotnych czynników wpływających na wybór takiej charakterystyki.



Rys. 3.5. Zależność graficzna charakterystyk TP = f(Bi ) oraz TP = f(Bi )

Fig. 3.5. Diagram of characteristics TP = f(Bi ) and TP = f(Bi )

# 3.3.3. Interpretacja temperaturowa

Praktyczną miarą stanu izolacyjności termicznej zewnętrznych przegród jest temperatura jej wewnętrznej powierzchni  $\vartheta_1$ , która w okresie grzewczym kształtuje różnicę temperatur  $\Delta \vartheta_1 = (t_1 - \vartheta_1)$  charakteryzującą termiczne elementy mikroklimatu pomieszczeń [32;120].

W opisie SEP różnica  $\Delta \vartheta$  określa strefę małych zmian wyrażoną iloczynem gęstości strumienia oraz oporu przejmowania ciepła  $R_i$ . Każda z wyznaczonych bezwymiarowych temperatur (wzory 3.28 - 3.30) zależna jest bezpośrednio od wartości  $\Delta \vartheta$  lub jej składowej (t, -  $\vartheta$ ) + ( $\vartheta_i$  -  $\vartheta_i$ ).

Wyszczególnione warianty bezwymiarowych temperatur opierają się na wyznaczonych wartościach trzech temperatur t,  $\vartheta$ ,  $\vartheta$ . Wpływ ich jest jednak różny w kształtowaniu charakterystyk jako wielkości określającej termoizolacyjność przegrody. Przy założeniu, że temperatura  $t_i = \text{const}$ , zaś zmienność wielkości  $\vartheta_i$ oraz  $\vartheta$  wywołana jest stochastycznym charakterem temperatury zewnętrznej t, występuje zmiana SEP w czasie, którą przedstawia rys. 3.6.



Rys. 3.6. Wpływ temperatury t na zmiany SEP Fig. 3.6. Influence of temperature t on changes of SEP

W odniesieniu do stanu rzeczywistego na obiekcie (rys.3.6) widoczne jest odstępstwo przedmiotu pomiaru od przyjętego modelu wyjściowego m<sup>4</sup>. Odstępstwo to zwiększa się w kierunku środowiska zewnętrznego. Spośród trzech rozpatrywanych
temperatur modelu operacyjnego m° (rys 3.3) wartość  $\vartheta$  obarczona jest największym wpływem zmiennej temperatury t.

Analizując warianty zapisów bezwymiarowych temperatur można stwierdzić, że nie wszystkie charakterystyki pomiarowe są w jednakowym stopniu zależne od temperatury . Należy więc wybrać tę formułę zapisu, w której wpływ & jako wielkości pomiarowej będzie najmniejszy.

### 3.3.4. Wybór charakterystyki pomiarowej

Analizowane CTP są funkcjami pomierzonych temperatur  $t_{i}$ ,  $\vartheta$ ,  $\vartheta$ . Z wielkości tych największą zmiennością charakteryzuje się temperatura  $\vartheta$ . Wynika to z faktu, że na zewnętrzną powierzchnię przegrody obok zmiennej zewnętrznej temperatury powietrza oddziałuje wiele termicznych obciążeń zewnętrznych w postaci zmiennych czynników w czasie, jak: promieniowanie, wiatr, wilgotność powietrza, opady atmosferyczne.

Istotne jest więc dobranie spośród formuł bezwymiarowych temperatur (wzór 3.28 - 3.30) zapisu matematycznego, możliwie najmniej wrażliwego na zmienność & .

Wrażliwość odwzorowania CTP scharakteryzowano wielkością s określającą zmianę wartości  $\theta$  w funkcji  $\vartheta$ :

$$s = \frac{\theta(\vartheta_e) - \theta(\vartheta_e - \Delta \vartheta_e)}{\theta(\vartheta_e)} 100\%$$
 (3.31)

Badając za pomocą powyższego wzoru formuły (wzór 3.28 – 3.30) stwierdzono najmniejszą wrażliwość formuły TP (wzór 3.29) przy wartości  $s \equiv 3$ %, podczas gdy formuły (wzór 3.28 i 3.30) wykazywały wrażliwość na poziomie  $s \cong 30$ %. Należy więc wytypować formułę zapisu TP, w której wpływ w jako wielkości pomiarowej na wartość charakterystyki będzie najmniejszy.

#### 3.3.5. Charakterystyka pomiarowa

Jako pomiarową CTP przyjęto charakterystykę oznaczoną symbolem TP i wyrażoną wzorem:

$$TP = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_e}{t_1 - \vartheta_e} , \qquad (3.32)$$

Charakterystykę TP nazwano umownie bezwymiarową temperaturą pomiarową lub też potocznie wskaźnikiem pomiarowym.

Tak więc zapis wskaźnika TP wyraża cechę obiektu pomiaru, którą jest izolacyjność termiczna przegrody, poprzez pomierzone stany tej cechy wyrażonej temperaturami.

Wykorzystując zależności (wzory 3.10, 3.11), charakterystykę wskaźnika TP (wzór 3.32) można wyrazić poprzez opory cieplne oraz gęstości strumienia cieplnego:

$$TP = \frac{q_{\lambda}R_{\lambda}}{q_{1}R_{1} + q_{\lambda}R_{\lambda}} . \qquad (3.33)$$

Zakładając że  $q_i \cong q_{\lambda}$  – warunek ten przyjęto, gdyż pomija strefę zaburzeń (wzór 3.12) – wzór przyjmuje uproszczony zapis:

$$TP = \frac{R_{\lambda}}{R_{1} + R_{\lambda}} . \qquad (3.34)$$

Dla nieustalonego przepływu ciepła w określonym czasie τ, dla danej SEP charakterystykę TP można wyrazić wzorem:

$$TP(\tau) = \frac{\vartheta_1(\tau) - \vartheta_2(\tau)}{\tau_1(\tau) - \vartheta_2(\tau)} . \qquad (3.35)$$

Analizując warunki graniczne charakterystyki TP można przyjąć:

- przy nieskończenie dużej termoizolacyjności przegrody, gdy opór właściwy  $R_{\lambda} \rightarrow \infty$ , temperatura  $\vartheta_1 = t_1$ , stąd wpływ  $R_1$  na R będzie bardzo mały, czyli  $R_1 \equiv 0$ ,

- przy zerowej termoizolacyjności przegrody, gdy  $R_{\lambda} \Rightarrow 0$ , temperatury powierzchni przegrody będą do siebie zbliżone,  $\vartheta_1 \cong \vartheta_1$ .



Rys. 3.7. Zależność zmienności wskaźnika TP od różnic temperatur

Fig. 3.7. Dependence of TP index variability on temperature difference

Z wykresu (rys. 3.7) wynika, że dla dowolnej chwili pomiaru:

$$TP_{j} = tg\beta_{j} = \frac{\vartheta_{ij} - \vartheta_{ej}}{t_{ij} - \vartheta_{ej}}, \qquad (3.36)$$

gdzie:

 $\beta_1 - kat$  nachylenia wskaźnika TP, 0°< $\beta_1 \le 45^\circ$ .

Teoretycznie można przyjąć, że gdy:  $R_{\lambda} \Rightarrow \infty$  wtedy  $\beta_{\perp} = 45^{\circ}$  i TP = 1.0. Charakterystyka metrologiczna TP została przyjęta w niniejszej pracy jako podstawa teoretyczna temperaturowej metody diagnostycznej (TDC) oceny izolacyjności termicznej przegród budowlanych w badaniach poligonowych [62].

#### 4. WYNIKI BADAN WKASNYCH

#### 4.1. Przedmiot badań

Prowadzone od 1980 roku w Instytucie Technologii i Organizacji Budownictwa Politechniki Śląskiej badania stanu ochrony cieplnej budynków mieszkalnych, w tym m.in. eksperymentalnego wyznaczenia CTP, obejmowały [60;63;67;71]:

badanła laboratoryjne prowadżone w komorze badawczej
Laboratorium Fizyki Budowli, polegające na określeniu
izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych i złączy,

- badania terenowe termoizolacyjności przegród pionowych prowadzone w licznych eksploatowanych obiektach budowlanych.

Badania te pozwożły na uzyskanie odpowiedniego przygotowania praktycznego w zakresie prowadzenia badań diagnostycznych z uwzględnieniem aspektów metrologicznych.

Na użytek niniejszej pracy przeprowadzono badania w budynku wolno stojącym zrealizowanym metodą tradycyjną.

Podstawą do porównania i określenia CTP jest pomiar wielkości fizycznych – stanów – dla różnych SEP zmiennych w czasie  $\tau$ .

Analiza przydatności bezwymiarowej temperatury TP jako CTP powinna opierać się nie tylko na teoretycznym uzasadnieniu przyjętego modelu, ale również na badaniach prowadzonych w warunkach eksperymentalnych laboratoryjnych i poligonowych.

Przyjęto w pracy:

- wyznaczenie wpływu temperaturowego oddziaływania stanów środowiska  $t_{i}$ ,  $t_{i}$  na termiczną odpowiedź przegrody (zależną od CTP) wyrażoną poprzez stany:  $v_{i}$ ,  $v_{j}$ ,  $q_{i}$ ,  $q_{i}$ ,

 porównanie przyjętej charakterystyki TP ze stosowanymi charakterystykami (oporem R, i współczynnikiem k).

Badania laboratoryjne, ze względu na wielkość obiektu badawczego, nie obejmują zazwyczaj całej powierzchni przegrody oraz pełnych możliwości symulacyjnych stanów środowiska. Wartość poznawcza tych badań jest zatem ograniczona w stosunku do możliwości badań poligonowych, gdzie dostępna może być cała powierzchnia przegrody wraz z jej konstrukcyjnymi elementami przy zróżnicowanych SEP.

Prowadzenie badań eksperymentalnych stało się możliwe dzięki zastosowaniu prototypowego systemu pomiarowo-informatycznego opracowanego przez zespół pod kierunkiem autora pracy.

#### 4.2. Założenia badań własnych

#### 4.2.1. System pomiarowo-informatyczny

Stosowane dotychczas sposoby rejestracji wielkości fizycznych, które opisują CTP, były metodami pracochłonnymi, nie dającymi możliwości prostej współpracy programowanych urządzeń sterująco-rejestrujących i czujników.

Rozwój automatycznej techniki pomiarowej opartej na cyfrowym sterowaniu układów pomiarowych stworzył możliwość opracowania systemu pozwalającego na pomiar i rejestrację dyskretnych informacji w czasie [86].

W poszukiwanym systemie pomiarowym urządzenia sterujące, rejestrujące oraz pomiarowe winny być połączone równolegle do magistrali cyfrowej, której zadaniem jest przesyłanie rozkazów i instrukcji organizujących pracę systemu, jak również informacji o stanie urządzeń składowych i wynikach pomiarów.

W ramach prac badawczych Instytutu TiOB Politechniki Sląskiej wykonanych pod kierunkiem autora opracowania [69;70] zgodnie z normą PN-83/T-06536 [98] skompletowano urządzenia magistrali pomiarowej w standardzie IEC 625 [89].

został przystosowany prowadzenia System do pomiarów wielkości fizycznych przy badaniach CTP. Schemat blokowy systemu pomiarowo-informatycznego przedstawiono na rys. 4.1. Kontrolerem i sterownikiem zastosowanego systemu jest mikrokomputer Schneider CPC - 6128. Wprowadzone do pamięci mikrokomputera wyniki pomiarowe zostają wstępnie opracowane, a następnie zapisane jako standardowe zbiory na dyskietki 5.25 cala, w formacie akceptowanym przez komputer IBM PC.

Zarejestrowane na dyskietkach zbiory wyników pomiarowych stanowią podstawę do analizy przeprowadzonej w ramach niniejszej pracy oraz materiał archiwalny.

Na powyższe rozwiązanie magistrali pomiarowej zwrócono uwagę w opracowaniu ITB dotyczącym koncepcji zestawu aparatury do badań efektu energetycznego w budynkach doświadczalnych [104].



Rys. 4.1. Schemat blokowy systemu pomiarowo-informatycznego Fig. 4.1. Block-scheme of data processing system

# 4.2.2. Oprogramowanie zestawu pomiarowego oraz przetwarzania danych

Pakiet oprogramowania sterującego pracą zestawu pomiarowo-informatycznego oraz oprogramowanie komputerowe przetwarzania danych pomiarowych opracowano w Zespole Fizyki Budowli pod kierunkiem autora pracy [69;70]. Oprogramowania te obejmują:

 Program INSTAL służący do cechowania układu pomiarowego w czasie jego instalowania.

 Program POMIAR obsługujący zestaw pomiarowy w czasie jego eksploatacji - steruje wykonywanym pomiarem i rejestracją wyników na dyskietce.

3. Graficzne przedstawienie przebiegu wielkości pomiarowych.

4. Obliczanie średnich wartości wg zróżnicowanych procedur.

5. Obliczanie CTP jako wielkości chwilowych i średnich.

4.2.3. Pomiar wielkości fizycznych

## Pomiar temperatury

Sposób pomiaru temperatur za pomocą magistrali pomiarowej przedstawiono w pracy ITiOB [69].

Do pomiaru temperatur zastosowano czujniki termooporowe Pt 100 klasy 0.5, produkcji MERA - KFAP, których parametry metrologiczne określone są w normie [100]. Cechowanie czujników wykonano na magistrali pomiarowej zgodnie z programem INSTAL [69].

Zastosowany mostek pomiarowy typu FMN - TGL 10395 PL gwarantuje poprawną współpracę z czujnikiem Pt 100 w zakresie pomiaru temperatur od -30°C do +60°C.

Pomiar gęstości strumienia cieplnego

Sposób pomiaru gęstości strumienia cieplnego za pomocą magistrali pomiarowej przedstawiono w pracy ITiOB [69]. Jako czujniki gęstości strumienia cieplnego zastosowano przetworniki typu MGS – 3A produkcji firmy SOJO – Wrocław. Zakres temperaturowy ich pracy wynosi od -18°C do +80°C. Czujniki te generują na zaciskach wyjściowych siłę elektromotoryczną E, proporcjonalną do wartości gęstości strumienia cieplnego q. Stałe czujników C=E/q są określone przez wytwórcę. Czujniki zostały dodatkowo przetestowane na ściance próbnej w laboratorium Zespołu Fizyki Budowli Instytutu TiOB.

Pomiar prędkości przepływu powietrza

Badania kontrolne pomiaru prędkości przepływu powietrza prowadzono za pomocą anemometru HCA-1 produkcji ZDEMP Politechniki Śląskiej.

Pomiar wilgotności względnej

Badania kontrolne pomiaru wilgotności względnej powietrza prowadzono za pomocą psychrometru Assmanna TB - 19.

### 4.3. Badania laboratoryjne

#### 4.3.1. Komora badawcza

Badania laboratoryjne dla kilku rodzajów ścian prowadzone były na istniejącym w Laboratorium Fizyki Budowli stanowisku badawczym.

Badania wielkości pomiarowych przegrody przeprowadzono w klimatycznej komorze badawczej Instytutu TiOB. W skład komory wchodzą dwa pomieszczenia:

 - "ciepłe" o kubaturze 63 m<sup>3</sup>, symulujące wewnętrzne warunki mikroklimatu pomieszczenia mieszkalnego,

 "zimne" o kubaturze 60 m<sup>3</sup>, symulujące w dużym przybliżeniu ustabilizowane warunki w zakresie temperatur oraz wilgotności środowiska zewnętrznego.

Pomiędzy pomieszczeniami istnieje otwór o wymiarach 3.60 x 2.80 m przeznaczony do wymurowania ściany próbnej lub zamontowania elementu (maksymalna długość 3.00 m) lub jego fragmentów. W komorze badawczej, ze względu na dużą stateczność cieplną obudowy, można prowadzić badania przy przyjęciu quasi-stacjonarnego przepływu ciepła, zaś przy otwartej bramie pomieszczenia "zimnego" w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Pomiary i rejestracja wielkości fizycznych prowadzone są aktualnie za pomocą systemu pomiarowo-informatycznego Instytutu TiOB.

## 4.3.2. Przedmiot badań

Przedmiotem cytowanych w pracy badań były prefabrykaty trójwarstwowe typu ZWO wykonane w technologii W-70 przez Fabrykę Domów w Katowicach Panewnikach. Na elementach badanych wyodrębniono pola pomiarowe zlokalizowane poza zasięgiem zaburzeń brzegowych.

#### 4.3.3. Wyniki badan

Przykładowe wyniki pomiarów t oraz q wybranych punktów pomiarowych z serii pomiarowej rejestrowanej co 1 godz. w 14dobowym cyklu badawczym, realizowanym przy równoczesnym nagrzewaniu pomieszczenia "ciepłego" komory, przedstawiono w postaci tabelarycznej oraz graficznej na rys. 4.2 oraz 4.3.

# 4.4. Badania poligonowe

## 4.4.1. Uwagi ogólne

Prowadzenie badań poligonowych w zakresie określenia CTP w eksploatowanym obiekcie jest złożone ze względu na:

- konieczność wyłączenia pomieszczenia z eksploatacji,

 uciążliwości związane z montażem czujników pomiarowych na całej powierzchni istniejącej przegrody i przestrzeni pomieszczenia,

usytuowanie czujników na zewnętrznej powierzchni przegrody
w charakteystycznych, ściśle określonych miejscach, szczególnie

Wykres zmiany temperatury w czasie Czujnik 22,pomiar 14-dniowy



PUNKT POMIAROWY Nr 22 ZESTAWIENIE TEMPERATUR 14 DNIOWEGO POMIARU

lgodz	1	2	2	4	5	6	7	8	9	19	11	12	13	14	Isredniai
: 13 :	17.62	23.94	25.50	28.69	29.89	30.17	31.14	38.97	38.58	38.29	31.41	32.08	31.92	32.50	: 28.91
1 14	18.35	23.88	26.57	28.59	29.22	38.23	31.21	31.84	38.74	38.64	31.51	31.95	31.65	33.74	29.2
1 15 1	18.59	23.94	26.67	28.69	29.16	38.23	31.84	31.91	39.81	39.60	31.55	31_98	31.78	23.91	1 29.61
1 16	19.13	24.14	25.78	28.52	29.22	30.39	31.84	31.11	38.74	30, 94	31.65	32.15	31.51	32.74	: 29.14
1 17 1	19.37	24.41	27.04	28.92	29.33	39.23	31.14	30.74	38.77	31.14	31.51	31.92	31.53	38.77	: 29.21 :
1 18 1	19.67	23.84	27.31	28.69	29.36	39, 13	31.88	38.74	38.57	31.24	31.71	32.15	31.48	33.57	: 29.20 :
: 19 :	23, 94	24.01	27.21	28.99	29.43	38.29	31.01	30.74	38.71	31.21	31.45	32.12	31.51	38.71	: 29.24 :
: 20 1	29.17	24.21	27.27	28.82	29.43	33.34	38.97	38.81	38.77	31.41	31.78	37.85	31.51	38.77	1 29.31
; 21 ;	29,48	24.38	27.31	29.19	29.56	38.34	31.11	38.77	38.71	21.31	31.65	32.29	31.55	38.71	29.38
- 22	28.71	24.45	27.48	29.15	29.56	38.37	31.13	38.77	39,81	31.48	31.78	32.19	31.51	30.31	1 29.45 1
: 73 :	21.08	24.55	27.48	29.82	29.53	38.38	31.84	39.71	38.84	31.34	31.61	32.12	31.34	39.84	: 29.41 ;
: 0 :	21.12	24.55	27.37	29.36	29.53	30.27	31.04	38.74	38.77	31.45	31.71	32.15	31.51	38.77	1 29,45 1
1 1 1	21.49	24.75	27.71	29.26	29.70	30.40	31.01	30.71	38.77	31.34	31.65	2.05	31.38	38.77	: 29.50 ;
: 2:	21.59	24.72	27.82	29.25	29.76	38.47	31.14	38.81	38.84	31.41	31.71	32.19	31.24	3 <b>0.</b> S4	: 29.56 :
1 11	22.36	74.99	27.68	29.53	29.88	38.44	31.84	38.74	38.71	31.21	31.78	32.85	31.29	30.71	: 29.57 :
1 4 1	21.96	25.15	28.81	29.43	29.86	38.44	38.97	38.71	39.74	31.24	31.78	32.98	31.08	38.74	1 29.58
: 5 :	27.76	25.19	28.15	29.39	29.98	38.47	31.94	38.84	38.74	31.34	31.98	32.22	31-31	38.74	: 29.58 :
1 4 1	22 36	25.25	28,01	29.59	29.73	38.50	31.01	30.64	39.87	31.21	31.32	31.95	31.21	38.87	: 29.63 :
1 7 1	22.63	25.42	28.25	29.66	29.83	38.58	30.91	38.67	36.50	31.29	31.92	32_98	31.21	38.50	; 29.65 ;
: 8 :	27.83	25.49	28.95	28.79	29.83	38.57	38.84	38.68	39.57	31.21	31.92	31.82	32.91	38.57	: 29.58 :
1 9 1	27 98	25.73	28.22	28.72	29.98	38.68	38.87	38.67	30.68	31.11	31.85	32.98	31.01	39.68	: 29.53 :
1 10 1	22.98	25.79	28,48	28,92	29.93	38.58	30.87	38.57	39.64	31.31	31.98	31.92	31.94	30.64	: 29.59 :
1 11 1	23.14	25.73	28.38	28.65	29.93	38.60	38.94	38.54	38.34	31.28	31.88	32.82	30.77	39.34	29.61
1 12 1	23.34	25.73	28.38	28.59	38.10	30.57	31.84	38.47	38.17	31.24	31.92	31.95	31.84	38.17	: 29.62 :
isred.	21.07	24.76	27.59	29.82	29.61	30.38	31.83	38.75	38.68	31.17	31.73	32.07	31.34	30.58	

Max temp. w ciągu 14 dni trwania pomiarów wyniosła 32.286 Min temp. w ciągu 14 dni trwania pomiarów wyniosła 17.617 Punkt 22 znajduje się po stronie wewnetrznej w powietrzu

Rys. 4.2. Przykładowy wydruk zmienności wewnętrznej temperatury t pomieszczenia ciepłego Fig. 4.2. Example of data on internal temperature variability t, of thermal room



PUNKT POMIAROWY NE C ZESTAWIENIE STRUMIENI CIEPLNYCH 14 DNIOWEGO POMIARU

igodz i	1	2	3	4	5	à	7	3	9	13	1:	12	15	14	frednis
; 13 :	25.98	16.24	14.21	13.60	13.83	13.40	12.59	14.21	11.37	11.37	13.40	14.52	14.52	11.57	: 14.36
: 14 :	25.58	12.99	15.43	12.99	14.21	13.49	13.40	13.40	13.48	12.99	15.24	13.82	15.92	13.40	1 14.73
1 15 1	23.55	14.21	1	12.99	13.88	13.40	13.29	14.21	13.63	13.40	14.21	15.02	17.35	13.83	: 14.79
: 16 =	22.55	14.21	12.99	13.42	13.80	13.98	14.21	14.52	12.59	17.95	16.24	12.13	12.99	12.59	: 14.59
: :7 :	21.52	15.43	14.21	12.18	14.62	13.48	12.99	13.42	12.99	17.05	15.02	11.57	15.83	12.99	1 14.58
; 13 1	23.14	12.59	13.48	14.62	:5.23	12.99	12.18	13.43	12.40	17.26	15.43	15.02	14.52	12.40	; 14.25
1.17.1	23.71	15.82	15.43	13.40	17.90	17.80	12.59	13.59	12.59	16.55	14.52	13.40	17.46	12.59	1 14.78
: 20 :	21.11	15.02	15.02	13.40	. 15. 43	13.48	14.21	13.83	12.19	16.24	15.43	12.13	15.43	12.12	: 14.65
: 21 :	17.46	15.93	12.59	14.62	14.62	12.99	12.59	12.99	13.80	15.65	14.21	15.43	16.55	13.80	1 14.57
1221	19.58	14.21	14.21	11.77	13.20	14.21	12.59	13.22	12.59	15.43	16.55	12.13	14.21	12.57	: 14.89
1.77.1	12.68	12.99	14.52	12.99	14.21	14.21	12.18	12.18	12.59	15.92	13.40	13.40	15.83	12.57	: 13.92
: 0 :	18.27	13.49	13.80	15.43	13.90	12.99	12.18	12.99	13.68	14.21	15.83	12.99	13.32	13.83	: 14.89
1 1 1	15.83	14.52	12.99	12.59	13.30	14.21	13.40	12.59	12.10	14.52	12.99	13.20	17.05	12.13	: 13.78
: 2 :	15.65	13.80	15.43	14.52	13.40	15.82	12.99	14.21	12.59	14.21	15.02	15.83	13.82	12.59	: 14.38
: 3 :	17.35	16.24	12.99	13.30	13.88	12.59	12.99	13.52	15.43	15.43	12.59	14.71	17.26	15.43	: 14.59
: 4 :	15.43	15.43	12.59	12.99	15.83	15.92	12.48	13.40	12.59	14.52	14.52	15.43	14.21	12.59	: 14.15
: 5 :	15.65	14.62	16.24	14.21	12.99	13.80	13.43	13.99	14.21	15.83	15.83	13.89	17.46	14.21	: 14.79
51	14.52	13.20	14.21	15.83	15.43	14.21	14.62	14.21	12.99	14.62	14.52	15.82	13.60	12.99	1 14.35
: 7 :	15.02	14.21	13.48	14.21	14.62	12.59	13.48	13.40	12.99	13.90	15.02	12.18	14.21	12.79	1 13.72
: 8 :	15.43	14.21	13.40	9.74	15.33	13.50	12.13	12.18	11.77	17.85	12.57	14.21	14.21	11.77	1 13.31
91	14.21	12.99	12.99	11.77	12.59	13.28	15.02	13.48	12.99	13.40	13.90	15.24	12.99	12.99	: 13.51
10 1	15.92	13.40	13.28	11.77	15.02	14.21	13.40	12.99	12.59	15.92	15.43	15.43	16.45	12.59	1 14.07
11 1	16.24	15.02	13.40	10.96	14.21	12.99	13.38	12.59	11.77	15.83	12.18	15.83	14.62	11.77	13.66
12 1	14.21	15.92	13.40	10.95	14.21	12.99	13.20	12.19	11.37	13.80	14.52	13.49	13.30	11.37	1 13.22
≟red:	18.54	14.44	13.94	13.13	14.23	13.63	13.25	13.40	12.86	15.89	14.58	:4.84	15.17	12.56	:

Max strumleń clepiny w clagu 14 dni trwania pomlarów wyniosť 25.984 Min strumleń clepiny w clagu 14 dni trwania pomlarów wyniosť 9.744 Punkt 3 inajduje się od strony wewnętrenej

- Rys. 4.3. Przykładowy wykres zmienności gęstości strumienia cieplnego  $q_1$  na powierzchni przegrody pomieszczenia ciepłego
- Fig. 4.3. Example of diagram of heat stream q, variability on the surface of thermal room partition

przy pomiarach na wyższych kondygnacjach,

 nadzór nad eksploatację magistrali pomiarowoinformatycznej,

niemożliwość przewidywania zewnętrznych warunków klimatycznych, szczególnie temperatury t w czasie prowadzenia badań.

Tak więc wybór obiektów badań poligonowych oraz wpływ na zakres oddziaływania czynników zewnętrznych jest ograniczony.

#### 4.4.2. Przykładowy obiekt badań

Dom jednorodzinny wolno stojący zlokalizowany w Mikołowie w dzielnicy domków jednorodzinnych. Budynek o kubaturze = 620 m<sup>3</sup> został oddany do użytku w 1979 roku. Posiada CO wodne (grzejniki żeliwne, piec gazowy typu Juban). Badania prowadzono w okresie styczeń, luty, w pokoju mieszkalnym o powierzchni 16.6 m<sup>2</sup> na poziomie I kondygnacji, przy uszczelnionej stolarce okiennej. Badano ścianę zewnętrzną północną, o wymiarach 3.2m x 2.5m, bez otworów okiennych, o grubości 44 cm, o obliczeniowej wartości oporu cieplnego  $R_{\lambda} = 1.06 \text{ m}^2 \text{K/W}$  oraz współczynnika przenikania ciepła  $k = 0.81 \text{ W/m}^2 \text{K}$ . Strukturę badanej ściany przedstawiono na rys. 4.4.

	tynk cen-wap. (cyklinowany)	2 cm
	cegla pelna	12 cm
	pustka powietrzna zamknieta	4 cm
	bloczki PGS'07'	24. cm
	tynk wap-cem.	2 cm

Rys. 4.4. Przekrój badanej ściany zewnętrznej Fig. 4.4. Cross section of investigated external wall Schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na badanej przegrodzie przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Usytuowanie punktów pomiarowych w osiach przecięcia wraz z polem pomiarowym A

Fig. 4.5. Arrangement of measurement points on axes intersection with measurement field A

#### 4.5. Wyniki badań poligonowych

4.5.1. Przebieg zmienności temperatur i gęstości strumienia cieplnego w czasie

Przykładowe wyniki wielkości pomiarowych dla punktu 3C przedstawiono dla dwóch serii pomiarów.





Rys. 4.6.a. Przebieg zmienności temperatur t oraz t Fig. 4.6.a. Variability of temperatures t and t



Rys. 4.6.b. Przebieg zmienności temperatur  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$ Fig. 4.6.b. Variability of temperatures  $\vartheta_1$  and  $\vartheta_2$ 



Rys. 4.6.c. Przebieg zmienności gęstości strumienia cieplnego q, oraz q

Fig. 4.6.c. Variability of heat streams density  $q_1$  and  $q_2$ 

B. Seria pomiarowa II dla typowego przebiegu temperatury t.



Rys. 4.7.a. Przebieg zmienności temperatur  $t_1$  oraz  $t_2$ Fig. 4.7.a. Variability of temperatures  $t_1$  and  $t_2$ 



Rys. 4.7.b. Przebieg zmienności temperatury 🗞 oraz 🔮 Fig. 4.7.b. Variability of temperatures 🗞 and 🔮





Fig. 4.7.c. Variability of heat streams density  $q_{\perp}$  and  $q_{\perp}$ 

# 4.5.2. Pola termiczne powierzchni przegród

Termoizolacyjność przegrody przyjmowana jest w praktyce jako stała z uwagi na to, że współczynniki przewodności cieplnej  $\lambda$ materiałów przegrody ulegają niewielkim zmianom, których wielkości w okresie badań  $\Delta \tau$  nie można stwierdzić – gdyż są praktycznie niemierzalne.

Ma to swoje odzwierciedlenie przy obliczeniowym określaniu izolacyjności termicznej.

Jak wynika jednak z badań eksperymentalnych, wykonana poprawnie przegroda o zaprojektowanej stałej w całej płaszczyżnie termoizolacji  $R_{\lambda}$  = const, w warunkach eksploatacyjnych nie wykazuje na powierzchni stałych termicznych pól, które odpowiadałyby istniejącej termoizolacji. Na powierzchniach przegrody – co jest szczególnie widoczne przy badaniach od wewnątrz – występują zróżnicowane w poszczególnych partiach pola temperatury i gęstości strumienia cieplnego zmieniające się również w czasie τ. Wyniki badań przedstawiono wykorzystując pakiet programów przetwarzania danych pomiarowych pkt 4.2.2.

Pola temperatur

Pola temperatur wewnętrznej powierzchni przegrody można zapisać:

$$\vartheta_{1} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \tau) = f(\mathbf{d}\mathbf{F}, \tau) \quad . \tag{4.1}$$

Występujące zmienności pól temperatur są funkcją miejsca i czasu. Rysunki 4.8 oraz 4.9 przedstawiają izotermy  $\vartheta_{ixy}$  dla dwóch wybranych SEP I ( $t_{e} = -9.1^{\circ}$ C,  $t_{i} = 20.1^{\circ}$ C) i SEP II ( $t_{e} =$ -3.8 C,  $t_{e} = 17.0$  C), bazujących na punktach pomiarowych z badań poligonowych pkt 4.4. Rysunki 4.10, 4.11 przedstawiają przestrzenny obraz izoterm SEP I i SEP II.



Rys. 4.8. Izotermy 🖲 dla SEP I Fig. 4.8. Isotherms 🕘 ixy for SEP I

89



Rys. 4.9. Izotermy  $\vartheta_{i \times y}$  dla SEP II Fig. 4.9. Isotherms  $\vartheta_{i \times y}$  for SEP II



Rys. 4.10. Rozkład przestrzenny temperatur  $\vartheta_{i \times y}$  dla SEP I Fig. 4.10. Space distribution of temperatures  $\vartheta_{i \times y}$  for SEP I



Rys. 4.11. Rozkład przestrzenny temperatur dla SEP II Fig. 4.11. Space distribution of temperatures for SEP II

Dla porównania na rys. 4.12. przedstawiono obraz izoterm  $\vartheta_{1\times y}$  opracowanych na podstawie badań szwedzkich [93] dla przegrody o wymiarach 2.0 x 2.0 m z otworem okiennym, przy ustalonym przepływie ciepła dla SEP ( $t_e = -20^{\circ}$ C,  $t_1 = 21 \div 23^{\circ}$ C). Wykres opracowano dla warunków normalnych. Dodatkowo w badaniach wprowadzono źródła zakłóceń, których wpływ przedstawiono w pkt. 2.3.

Pola gęstości strumienia cieplnego

Pole gęstości strumienia cieplnego wewnętrznej powierzchni przegrody g

Pole to jest funkcją miejsca i czasu

$$q_{1,v_{1}} = f(x,y,\tau) = f(dF,\tau)$$
 (4.2)

91



Rys. 4.12. Izotermy dla badań [93] Fig. 4.12. Isotherms for investigation [93]



- Rys. 4.13. Rozkład przestrzenny temperatur 👌 opracowany na podstawie badań szwedzkich [100]
- Fig. 4.13. Space distribution of temperatures  $\vartheta_{i \times y}$ , based on Swedish investigation [100]

Rysunki 4.14 i 4.15 przedstawiają izostrumienie  $q_{1\times 1}$  dla SEP I.



Rys. 4.14. Izostrumienie dla SEP I Fig. 4.14. Isostreams for SEP I



Rys. 4.15. Rozkład przestrzenny izostrumieni dla SEP I Fig. 4.15. Space distribution of isostreams for SEP I

Porównawczo obraz izostrumieni q<sub>1xy</sub> wykreślony na podstawie badań [93] przedstawiono na rys.4.16.

Ilość przepływającego ciepła Q w czasie dr na podstawie wyznaczonych lokalnych pól dF można przedstawić za pomocą wzoru:

$$Q = \int \int q_1(\tau) dF d\tau$$

gdzie:

gęstość chwilowa strumienia cieplnego mierzona prostopadle do pola dF w czasie  $\tau$ .



Rys. 4.16. Izostrumienie dla badań [93] Fig. 4.16. Isostreams for investigation [93]

### 4.5.3. Temperatura powietrza wewnętrznego

Z polem termicznym powierzchni przegrody wiąże się pole temperatury oraz gęstości strumienia cieplnego. Wzrost lub spadek różnicy temperatury pomiędzy powierzchnią przegrody a otoczeniem zachodzi w kierunku normalnym do powierzchni izotermicznej.

Wykonywane w tym samym czasie pomiary temperatur powietrza wewnętrznego t czujnikiem pomiarowym Pt 100 wskazują na jej zmienność w zależności od miejsca pomiaru.

Wartość temperatury  $t_{1,j}$  w określonym punkcie przestrzeni pomieszczenia, przyporządkowanej temperaturze  $\vartheta_{1,j}$ , nie jest

(4.3)

stała. Badania wykazały, że oprócz widocznej zmiany temperatury powietrza t, w warstwie przyściennej zmienia się ona również, chociaż w sposób mniej zauważalny, w pozostałych miejscach pomieszczenia.

W zamkniętym pomieszczeniu badawczym, w którym maksymalna prędkość przepływu powietrza wynosiła około 0.15 m/s, maksymalna temperatura t występowała w odległości około 50 cm od powierzchni przegrody w środkowej jej części oraz w odległości większej niż 80 ÷ 100 cm od pionowych naroży.

Daje się zauważyć, że różnice wartości t zależą również od źródła ciepła, kształtu pomieszczenia, umiejscowienia otworów okiennych i drzwiowych oraz szybkości zmian różnic temperatur  $(t, -t_{,})$  w czasie  $\tau$ .

Określenie zróżnicowanych  $t_{ij}$  w prowadzonych badaniach przy wielopunktowej analizie pól termicznych przegrody  $\vartheta_{ixy}$ ,  $q_{ixy}$ jest bardzo trudne do zrealizowania ze względów metrologicznych.

Na podstawie badań własnych dla celów diagnostycznych przyjęto jako wewnętrzną temperaturę, temperaturę odniesienia t, tj. mierzoną w odległości ok. 1.0 m od powierzchni badanej przegrody w jej geometrycznym środku.

#### 4.5.4. Przejmowanie ciepła

W celu wyznaczenia oporu  $R_{\lambda}$  lub współczynnika k istnieje potrzeba oszacowania oporu  $R_{\lambda}$ .

Lokalną wartość chwilową oporu przejmowania można wyznaczyć ze wzoru:

$$R_{i}(\tau) = \frac{dF}{dQ_{F}} \left[ t_{i}(\tau) - \vartheta_{i}(\tau) \right] . \qquad (4.4)$$

Sredni opór przejmowania ciepła  $R_1$  przy *n* liczbie pomiarów w czasie  $\Delta \tau$  liczony narastająco wyznaczono ze wzoru:

Przykładowe zestawienie wartości wielkości pomiarowych R uzyskanych w badaniach poligonowych rejestrowanych co 4 godziny w okresie 1 doby w środku otwartej przegrody (pole pomiarowe A - rys. 4.5) przedstawiono w tablicy 4.1.

 $= \frac{\sum_{j=1}^{n} R_{j}(\tau)}{\pi}$ 

R

Tablica 4.1

Wyszczególnie	Jedno	Nr pomlaru							
and the second second				2	3	4	5	6	
Temperatury	ϑ <sub>1</sub>	° c	17.7	18.0	17.0	16.6	17.2	1.5	
pomlarowe	v.		0.3	0.5	1.7	-0.6	0.6	38	
Różnica temperatur	t <sub>i</sub> - v <sub>i</sub>	К	1.3	1.5	1.3	0.9	1.8	17	
Gęstość strumienia cieplnego	q	<u>W</u> m <sup>2</sup>	8.1	7.8	7.8	6.6	8.8	91	
Opór przejmowania ciepła	R <sub>i</sub>	$\frac{m^2 K}{W}$	0.160	0.192	0.167	0.136	0.205	0187	

Przykładowe zestawienie wartości pomiarowych R

Jak wynika z badań, w wybranym okresie pomiarowym można stwierdzić znaczną zmienność oporu  $R_{_1}$ , co zgodne jest z rozważaniami podanymi w rozdziale 2.

#### 5. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

#### 5.1. Charakterystyki pomiarowe

## 5.1.1. Zmienność charakterystyk pomiarowych

Na podstawie badań eksperymentalnych stwierdzono, że istnieje znaczna różnica pomiędzy CTP ustalonego oraz nieustalonego przenikania ciepła.

Pomiarowa CTP wyznaczona przy nieustalonym przepływie ciepła, poprzez pomierzone stany zmienne w czasie  $\tau$  jest miarą przepływającego ciepła przez przegrodę ukształtowaną przez SEP.

Na podstawie danych pomiarowych przedstawionych w pkt. 4 określono zmienność charakterystyk  $R_{\chi}$ , k i TP oraz ich uogólnioną definicję.

Zmienność pomiarowych CTP w czasie  $\tau$  dla serii pomiarowych I i II wyrażonych poprzez opór cieplny  $R_{\lambda}$ , współczynnik przenikania ciepła k oraz bezwymiarową temperaturę pomiarową TP przedstawiono na rys. 5.1. oraz 5.2.



Rys. 5.1.a. Wielkość chwilowa  $R_{\lambda}$  dla I serii pomiarowej Fig. 5.1.a. Instantaneous value of  $R_{\lambda}$  for test run I

97



Rys. 5.1.b. Wielkość chwilowa k dla I serii pomiarów Fig. 5.1.b. Instantaneous value of k for test run I



Rys. 5.1.c. Wielkość chwilowa TP dla I serii pomiarów Fig. 5.1.c. Instantaneous value of TP for test run I



Rys. 5.2.a. Wielkość chwilowa  $R_{\lambda}$  dla II serii pomiarów Fig. 5.2.a. Instantaneous value of  $R_{\lambda}$  for test run II



Rys. 5.2.b. Wielkość chwilowa k dla II serii pomiarów Fig. 5.2.b. Instantaneous value of k for test run II

Charakterystyki te zostały wyznaczone na podstawie wielkości pomiarowych stanów przedstawionych na rys. 4.6. oraz 4.7.



Rys. 5.2.c. Wielkość chwilowa TP dla II serii pomiarów Fig. 5.2.c. Instantaneous value of TP for test run II

5.1.2. Anomalie i defekty termiczne

Dla przegród jednorodnych o stałym oporze cieplnym  $R_{\lambda}$  pomiarowe wartości temperatur v , v różnią się w

poszczególnych partiach przegrody. Temperatury te są wynikiem termicznego obciążenia przegrody – w korelacji z jej właściwościami fizycznymi.

Lokalne różnice w ilości napływającego i odpływającego ciepła Q w czasie  $\tau$  na powierzchnię przegrody powodują kształtowanie się zróżnicowanych pól temperatur  $\vartheta_{i\times y}$  oraz gęstości strumienia cieplnego  $q_{i\times y}$ . Na powierzchniach przegrody pola te są zróżnicowane i to nie tylko w przypadku zmiennej termoizolacyjności czy też występowania typowych mostków cieplnych, ale również dla ścian o stałym oporze  $R_{\lambda}$ . Wymaga to bardzo szczegółowej analizy obrazu termicznego powierzchni przegrody.

Zróżnicowanie pól temperatur  $\vartheta_{i \times y}$  spowodowane jest niewątpliwie zmianą całkowitego oporu cieplnego przegrody R, co ma swoje odzwierciedlenie w SEP. Zmiany spowodowane powierzchniowym oporem przejmowania ciepła, czyli zróżnicowaną wartością R<sub>i</sub> (lub R<sub>e</sub>), powinny być interpretowane jako anomalia termiczne przegrody.

Przy lokalnej zmianie oporu cieplnego przegrody R<sub>A</sub> spowodowanego znacznym obniżeniem termoizolacyjności jej struktury materiałowej występują pola, które można określić jako **defekty termoizolacyjności przegrody.** 

W zapisie wzoru na całkowity opór cieplny przegrody

$$R = (R_i + R_e) + R_\lambda$$
(5.1)

można wyodrębnić składowe wpływające na obraz pola termicznego powierzchni przegrody jako:

 anomalie termiczne – zmiany całkowitego oporu cieplnego przegrody R spowodowane zmianą powierzchniowych oporów przejmowania ciepła R i R,

defekty termoizolacyjne – zmiany całkowitego oporu przegrody <sup>F</sup>
R spowodowane zmianą oporu cieplnego warstwy materiałowej R<sub>1</sub>.

Rozróżnienie anomalii termicznej od defektu termoizolacji ma istotne znaczenie przy interpretacji charakterystyk pomiarowych. W praktyce anomalia termiczne są często utożsamiane z mostkami cieplnymi występującymi szczególnie w narożnych partiach przegrody (pionowych i poziomych), czy też np. kalenicy stropodachu [91].

#### 5.1.3. Definiowanie charakterystyk

Wartości charakterystyk pomiarowych ulegają zmianom w czasie  $\tau$ . Na podstawie teoretycznych rozważań [28] oraz badań własnych można przyjąć, że przy  $\tau \rightarrow \infty$  średnia wartość charakterystyki będzie zbliżona do wartości wyznaczonej przy ustalonym przepływie ciepła.

Zmiany wartości CTP w czasie zależą od wielu czynników, min.:

- gradientu zmian temperatur środowiska w czasie,

struktury przegrody wyrażonej oporem cieplnym R, oraz masą przegrody,

- parametrów geometrycznych badanej przegrody i pomieszczenia,

- ruchu powietrza,

- sposobu użytkowania pomieszczenia,

- rodzaju ogrzewania,

rodzajów przyrządów pomiarowych oraz sposobów prowadzenia i rejestrowania badań.

Poszczególne czynniki w różny sposób wpływają na kształtowanie się CTP w czasie. W pomiarach termoizolacyjności niektóre wielkości są między sobą skorelowane. Stąd też trudność jednoznacznego wyznaczenia poszukiwanej cechy dla danej SEP i porównywania jej z definicją ustalonego przepływu.

Można przyjąć, że SEP wpływa na kształtowanie się pomiarowej CTP niezależnie od jej formy zapisu, czy będzie to opór cieplny  $R_{\lambda}$ , czy współczynnik przenikania k, lub też charakterystyki wyrażonej w formie bezwymiarowych temperatur TI, TP.

Uogólnioną definicję CTP przy nieustalonym przepływie ciepła sformułowano:

Pomiarowa CTP określa cechę obiektu pomiaru, która jako izolacyjność termiczna przegrody jest wyrażona poprzez pomierzone w czasie τ jej stany dla danej SEP.

Wielkość CTP powinna być wyznaczona jako wartość uśredniana narastająco z określonej liczby pomiarów dla danego okresu czasu Δτ przy założeniu prawdopodobieństwa nieprzekroczenia jej przyjętego odchylenia.

## 5.1.4. Zależności pomiędzy charakterystykami

Wyznaczenie CTP należy zaliczyć do rozwiązywania zadań inwersyjnych polegających na określeniu właściwości materiałowych ze znanych temperatur i warunków brzegowych [134].

Porównując znane CTP wyznaczone poprzez pomiary temperatur i gęstości strumienia cieplnego  $R_{\lambda}$ , k z charakterystykami wyznaczonymi poprzez pomiary samych temperatur, a opisanymi bezwymiarowymi temperaturami TI, TP można znaleźć związek pomiędzy tymi dwoma rodzajami charakterystyk. Opór cieplny  $R_{\lambda}$ lub współczynnik przenikania ciepła k można wyrazić iloczynem odpowiedniego zapisu bezwymiarowej temperatury oraz współczynnika lub oporu przejmowania ciepła.

Przyjmując umownie, że bezwymiarową temperaturę nazwiemy wyróżnikiem termoizolacyjności – TB, zaś współczynnik lub opór przejmowania ciepła nazwiemy umownie wskaźnikiem przejmowania ciepła – z\_, wtedy CTP można wyrazić jednym zapisem:

$$CTP = TB z$$
(5.2)

Wielkość ta może być rozpatrywana jako chwilowa w określonym przedziale czasu Δτ.

Wyodrębniając wyróżniki termoizolacyjności TB odpowiednio dla R, oraz k można zapisać:

wyróżnik oporu cieplnego:

$$TB_{R} = f\left(\frac{\vartheta_{1} - \vartheta_{e}}{U_{1} - \vartheta_{1}}\right) , \qquad (5.3)$$

- wyróżnik współczynnika przenikania ciepła:

$$TB_{k} = f\left[\frac{(t_{1} - \vartheta_{1})}{(t_{1} - \vartheta_{1}) + (\vartheta_{1} - \vartheta_{1}) + (\vartheta_{e} - t_{e})}\right]$$
(5.4)

Z analizy powyższych zapisów w nawiązaniu do SEP wynika, że TB<sub>R</sub> jest ilorazem dwóch składowych gradientów temperatur: przewo- dzenia ( $\vartheta_i - \vartheta$ ) oraz przejmowania ( $t - \vartheta_i$ ), zaś TB<sub>k</sub> jest ilorazem kombinacji trzech składowych - przewodzenia ( $\vartheta_i - \vartheta$ ) oraz przejmowania od wewnątrz i zewnątrz ( $t - \vartheta_i$ ), ( $\vartheta - t_i$ ) Wskażnik przejmowania ciepła z jest funkcją gęstości

Wskaźnik przejmowania ciepła z jest funkcją gęstości strumienia cieplnego  $q_i$  oraz składowej przejmowania ciepła (t -  $\vartheta$ ) występującej już w wyróżniku termoizolacyjności.

W analizie wzoru 5.2 można stwierdzić, że wskaźniki z przy wyznaczaniu  $R_i$  lub k są skorelowane metrologicznie poprzez składową przejmowania ( $t_i - \vartheta_i$ ) z wyróżnikiem termoizolacjności TB.

Z porównania stanów składowych SEP pod względem metrologicznym w formule zapisu  $R_{\lambda}$  lub k występuje nakładanie się informacji. Wpływa to zakłócająco na odwzorowywanie szukanej cechy obiektu pomiaru [94]. Porównując stosowane przy pomiarach CTP  $R_{\lambda}$  oraz k z bezwymiarowymi TI i TP można stwierdzić, że opór cieplny  $R_{\lambda}$  oraz współczynnik k występują w interkorelacji.

Bezwymiarowe temperatury Bi, TI i TP występują w postaci autokorelacji simpleksów jednoimiennych pierwotnych wielkości fizycznych.

Z powyższej analizy wynika, że charakterystyki pomiarowe określone według formuł występujących w interkorelacji będą mniej dokładne od charaktrystyk występujących w autokorelacji.

103

## 5.1.5. Wielkości graniczne charakterystyk

Wyznaczona CTP określająca stan izolacyjności termicznej przegród pozwala w diagnostyce cieplnej w sposób umowny podzielić obszar zmienności na klasy oraz określić ich wielkości dopuszczalne [56;58].

W zależności od formy zapisu charakterystyki jej miara powinna być porównywalna z określoną wielkością graniczną, w tym dopuszczalną wartością znanej CTP.

W miejsce określonej pomiarowej wielkości oporu cieplnego  $R_{\lambda}$  lub współczynnika przenikania ciepła k, które uznaje się w praktyce jako obowiązujące na podstawie norm, można w sposób mniej skomplikowany metrologicznie wyznaczyć ich wyróżnik termoizolacyjności, to jest TB<sub>p</sub> lub TB<sub>p</sub>.

Wyróżnik taki porównuje się ilorazem granicznej wielkości normowej oporu  $R_{\lambda}$  lub współczynnika k i odpowiedniego wskaźnika przejmowania ciepła z

Powyższą relację przedstawiono za pomocą wzoru (5.2) dla wybranej granicznej wartości R lub k w formie zapisu: - dla wyróżnika oporu cieplnego R<sub>λ</sub>:

$$B_{R} \geq \frac{R_{\lambda gr}}{z_{g\lambda}} ,$$

- dla wyróżnika współczynnika k:

$$IB_{k} \leq \frac{k_{gr}}{z_{gk}} .$$
 (5.6)

Zapisy te zmniejszają stopień niepewności pomiarowej (pkt. 5.3) wyróżnika termoizolacyjności w porównaniu z oporem  $R_{\lambda}$  lub współczynnikiem k. Zwiększają natomiast stopień niepewności ilorazu granicznej (dopuszczalnej) wartości wielkości  $R_{\lambda}$  lub k i dopuszczalnego wskażnika przejmowania z . Iloraz ten staje się umownym etalonem, który nie musi być jednak w czasie pomiarów na obiekcie wyznaczany.

(5.5)

Jest to zabieg korzystny z punktu widzenia metrologii określenia cechy izolacyjności termicznej przegrody, gdyż w sposób widoczny zmniejsza stopień niepewności procesu pomiarowego. Staje się to ważnym elementem badań kontrolnych, które występują w czasie badań diagnostycznych.

#### 5.2. Niepewność pomiarowa charakterystyk

#### 5.2.1. Reprezentatywność odwzorowania

Określenie pomiarowych CTP należy rozpatrywać z punktu widzenia ich przydatności przy badaniach, które mogą mieć charakter pomiarów poznawczych i kontrolnych [115].

Cechą wspólną pomiarów, niezalenie od ich charakteru, jest reprezentatywność odwzorowania poszukiwanej cechy – którą jest termoizolacyjność przegrody – oraz wymagana do jej odwzorowania dokładność badań.

Istnieje wiele źródeł zmienności i zakłóceń wpływających na charakter i dokładność wyznaczanych charakterystyk.

Zagadnienia te możemy rozpatrywać przy uwzględnieniu sformułowań niepewności:

"Terminem niepewności oznaczamy te wszystkie różnice pomiędzy wynikiem pomiaru i nieznaną wartością rzeczywistą, które możemy tylko szacować" [35;128]. Różnice te mogą mieć charakter przypadkowy, systematyczny lub tendencyjny.

Mając zbiór wyników uzyskanych z pomiarów estymujemy więc wartość niepewności pomiarowej, tak aby tą drogą uzyskać jak najwięcej informacji o wyznaczonej wartości rzeczywistej, której określenie przy nieustalonych stanach nie jest w pełni możliwe.

Podstawowy układ warunków pomiarowych nie jest "układem zupełnym", istnieją bowiem w tym również czynniki nieokreślone, które poprzez dominację zmiennej losowej wpływają na charakter uzyskanych wyników.

Przy wyznaczaniu CTP należy również zwrócić uwagę na niepewność przyrządu pomiarowego. Niepewność ta oznacza graniczny błąd przyrządu pomiarowego albo rozrzut wyników pomiaru wyznaczony poprzez błędy pomiarowe [126].

Niepewność pomiarowa przyrządu – określona poprzez błąd graniczny – wyznaczana jest przez porównanie jego wskazań ze wskazaniem przyrządu uznawanego za dokładniejszy (etalon). Błąd pomiaru takim przyrządem zależy dodatkowo od miejsca pracy przyrządu oraz wartości wielkości i stanu czyników wpływających.

Przyrząd może wykazywać histerezę, może podlegać starzeniu i wpływom szumów wewnętrznych itp. Może to powodować niepowtarzalność wskazań i równocześnie nadaje błędowi pomiarowemu charakter losowy.

Z punktu widzenia metrologii wyznaczenia stanów określających CTP wprowadzono pojęcie stopnia niepewności pomiarowej. Jest to pojęcie abstrakcyjne, istotne dla poszukiwanej cechy obiektu pomiaru.

Chcąc zachować właściwe obszary niepewności, wzdłuż całej drogi w systemie poprawnej relacji porządkowej miary należy spełnić warunek, aby każdy kolejny stopień charakteryzował się mniejszą niepewnością pomiarową [127].

Stopień niepewności charakteryzuje stosunek odchylenia występującego błędu do wielkości nominalnej, której w sposób ilościowy nie można jednoznacznie określić. Im większy stopień niepewności, tym możliwość wystąpienia większego błędu i mniejsza możliwość odwzorowania cechy obiektu badań. W zależności od źródła błędu poszczególne niepewności podlegają sumowaniu – wzrasta więc stopień niepewności.

W skali procentowej relację porządkową stopnia niepewności przyjęto od 100 + 0% .

#### 5.2.2. Niepewność wielkości pomiarowych

Temperatura jako wielkość fizyczna pierwotna ma swój ściśle określony wzorzec. Niski stopień niepewności pomiarowej używanego przyrządu można uzasadnić możliwością oddzielnego skalowania poszczególnego przyrządu czy całego zestawu pomiarowo-rejestrującego i łatwością porównania go z wyskalowanym etalonem.

Gęstość strumienia cieplnego jest wielkością wtórną [56]. Pomiarowe wyznaczenie tej wielkości może odbiegać od założonego definicją wzorca. Brak jest uznanego wzorca służącego do porównywania danego przyrządu przy badaniach gęstości strumienia cieplnego.

Dane na temat przyrządu oraz urządzenia pomiarowego (klasy dokładności, jego charakterystyka) bazują na danych technicznych producenta. Przeciętny badacz nie ma możliwości sprawdzenia poprawności danych. Brak jest również uznanych powszechnie metod skalowania przyrządu pomiarowego i możliwości porównania go z etalonem gęstości strumienia cieplnego.

## 5.2.3. Szacunkowa ocena charakterystyk pomiarowych

Analiza uogólnionego wzoru 5.2, wyrażającego CTP, wskazuje, że stopień niepewności pomiarowej utożsamiany ze względnym błędem pomiaru charakterystyki jest sumą niepewności pomiarowej występujących przy wyznaczeniu wyróżnika termoizolacyjności TB oraz wskaźnika przejmowania ciepła  $z_q$ .

Powyższą zależność możemy wyrazić wzorem

$$\left|\frac{\Delta \text{CTP}}{\text{CTP}}\right| = \left|\frac{\Delta \text{TB}}{\text{TB}}\right| + \left|\frac{\Delta z_{\text{q}}}{z}\right| \quad . \tag{5.7}$$

Z pracy wynika (pkt. 3.3), że bezwymiarowa temperatura TP jest również wyróżnikiem termoizolacyjności TB, charakteryzującym CTP.

$$\frac{\Delta \text{CTP}}{\text{CTP}} = \frac{\Delta \text{TB}}{\text{TB}} . \tag{5.8}$$

Reasumując, można stwierdzić, że stopień niepewności pomiarowej CTP, wyrażonej wyróżnikiem termoizolacyjności TB,
zgodnie z zapisem jest niższy od stopnia niepewności stosowanych charakterystyk (wzór 5.2).

Ocenę charakterystyk pomiarowych pod względem ich jakości metrologicznej przydatności przeprowadzono poprzez wielokryterialną analizę matematyczną, której podstawowym celem jest modelowanie sytuacji decyzyjnych razem z typową dla nich niepewnością, niestałością i nieokreślonością danych ocen preferencji [115].

Celem takiego postępowania jest udzielenie odpowiedzi na pytanie, którą CTP należy stosować ?

Rozwiązywanie problemu decyzyjnego, ze względu na arbitralnie przyjęty aparat matematyczny, przypadkowy często układ informatyczny, może być tylko pozornie ścisłe. Opierając się na ocenie niepewności pomiarowej przeprowadzono poniższą analizę.

Istnieje potrzeba oceny CTP uwzględniających zagadnienie niepewności pomiarowej. W tym celu zastosowano elementy wielowymiarowej analizy porównawczej dla przyjętych poniżej formuł zapisów fizycznych CTP [73;97;115]:

$$CTP_{i} = k_{i} = \frac{q_{i}}{t_{i} - t_{e}} , \qquad (5.9)$$

$$CTP_2 = k_e = \frac{q_e}{t_1 - t_e}$$
, (5.10)

$$CTP_{3} = R_{\lambda i} = \frac{\vartheta_{i} - \vartheta_{e}}{q_{i}} , \qquad (5.11)$$

$$CTP_{4} = R_{\lambda e} = \frac{\vartheta_{1} - \vartheta_{e}}{q_{e}} , \qquad (5.12)$$

$$CTP_{s} = TI = \frac{\vartheta_{i} - t_{e}}{t_{i} - t_{e}}, \qquad (5.13)$$

$$CTP_{6} = TP = \frac{\vartheta_{1} - \vartheta_{e}}{t_{1} - \vartheta_{e}} . \qquad (5.14)$$

Metody tego typu mają tę właściwość,że są prowadzone na podstawie modeli niewielu zmiennych. Stąd też stosowana jest równocześnie analiza czynnikowa służąca do redukowania liczby zmiennych.

Uszeregowanie wielkości pomiarowych według stopnia niepewności pomiarowej jest umownym, a zarazem subiektywnym uporządkowaniem liniowym, nie uwzględniającym jednostek ani odległości pomiędzy położeniami wielkości pomiarowych jako punktów opisujących CTP [126].

Kolejność porządkującą wyznaczone eksperymentalnie stany jako wielkości pomiarowe określone poprzez punkty w zbiorze, uwzględniające stopień niepewności pomiarowej przedstawiono w tablicy 5.1.

Tablica 5.1

Umowne uporządkowanie wielkości pomiarowych ze względu na niepewność pomiarową wg oceny autora

Nr porządkowy	1	2	3	4	5	6
Wlelkość pomiarowa	ϑ <sub>i</sub>	v.	t	t <sub>e</sub>	q	qe
Rodzaj wielkości pomiarowych	pierwotne			pochodne		

Miara wielkości pomiarowej jest obarczona pewnym błędem. Poprzez zwiększenie ilości mierników oraz liczby pomiarów i odpowiedni rachunek błędu dąży się do jego zredukowania. Równocześnie wartości pomiarowe jednych wielkości uznawane są przez badacza za bardziej pewne  $v_1$ ,  $t_1$ , inne zaś za mniej pewne  $t_2$ ,  $q_2$ . Ten zróżnicowany poziom zaufania do uzyskiwanych wielkości wyrażony poprzez niepewność pomiarową uzasadniony jest różnymi czynnikami mającymi wpływ na reprezentatywność odwzorowania mierzonej cechy. W analizie tych zagadnień istnieje zawsze obok znanych teorii błędów bardziej lub mniej subiektywna ocena badacza.

Dokonywanie analiz w grupie prac eksperymentalnych związanych z metrologią badań CTP umożliwi bardziej obiektywne opisanie problemu pomiarów w fizyce cieplnej.

# 5.2.4. Rozwiązanie zagadnienia

wyznaczenia wprowadzonego wskaźnika poziomu stanu Celem 5.17) wielkości niepewności pomiarowej C(X) (wzór dla wyszczególnionych w tablicy 5.1 dokonuje się porównania poziomu niepewności dla każdych dwóch wielkości pomiarowych - metodą analizy par [97]. Odpowiada to klasyfikacji dwustanowej, rozgraniczającej klasy stanu "lepszy i gorszy" [11]. Wyniki analizy koduje się w postaci macierzy porównań MP[n,n].

W celu porównania wielkości pomiarowych, przy określaniu CTP (tab. 5.1), wyznaczono następującą macierz porównań poziomów stanów niepewności

(5.15)3. n v, t, t, q, q 0 1 t, х 0 1 1 0 0 0 1 1 1 ϑ<sub>i</sub> 1 1 0 1 1 1 1 x 1 1 1 1 0 1 v 1 х 1 1 1 0 0 1 1 1 e t, =>MP = 0 0 0 х 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 1 0 0 х 0 0 0 1 q, 0 0 0 0 0 x 0 0 0 0 0 0 q\_ 5 S (X) 2 0 1 3 4

gdzie

 $S_j(x)$  – suma elementów w każdej kolumnie, której wartość jest przyporządkowana odpowiedniej wielkości pomiarowej.  $S_j(x)$  osiąga wartość maksymalną dla x, którego pomiar ma największy stopień niepewności.

Określona macierz kwadratowa o wartościach elementów 0 i 1 jest asymetryczna. Sprawdzenie własności asymetrii jest równocześnie sprawdzeniem czy analiza par była konsekwentnie przeprowadzona.

Wskaźnik poziomu stanu niepewności pomiarowej wielkości x wyraża się wzorem:

$$C(x) = \frac{S_{j}(x)}{S_{j^{max}}}$$
 (5.16)

Dla analizowanych wielkości pomiarowych wskaźniki te przyjmują następujące wartości:

$S(t_{1}) = 2$	=>	$C(t_i) =$	$\frac{2}{5} = 0.4$ ,	
$S(\vartheta_1) = 0$	=>	$C(\vartheta_1) =$	$\frac{0}{5} = 0.0$ ,	
$S(\vartheta) = 1$	=>	C(ϑ_) =	$\frac{1}{5} = 0.2$ ,	(5.17)
$S(t_{e}) = 3$	=>	C(t <sub>e</sub> ) =	$\frac{3}{5} = 0.6$ ,	(3.17)
$S(q_1) = 4$	=>	C(q <sub>1</sub> ) =	$\frac{4}{5} = 0.8$ ,	
S(q) = 5	=>	C(q_) =	$\frac{5}{5} = 1$ .	

Wartość 0 wskażnika C(x) przedziału <0, 1> odpowiada wielkości pomiarowej mającej najmniejszy stopień niepewności pomiarowej, zaś C(x) = 1.0 największemu.

### 5.2.5. Wskażnik niepewności pomiarowej

Każda formuła zapisu CTP (wzory 5.9 - 5.17) zależy od trzech parametrów. W celu określenia ich syntetycznych wskażników stopnia niepewności pomiarowych wykorzystano metodę sieci pajęczej [114].

Przyjęto płaski układ trzech współrzędnych tworzących ze sobą kąt 120°. W równych odległościach od punktu 0 (najmniejszy stopień niepewności) wyznaczono punkt 1 (największy stopień niepewności).

Na rys. 5.3. przedstawiono przykładową sieć pajęczą do wyznaczenia syntetycznego wskaźnika niepewności  $W_n$  dla  $k_i$  wg wzoru 5.9.

Punkty C( $q_i$ ), C( $t_i$ ), C( $t_i$ ) wyznaczają wierzchołki trójkąta, którego pole powierzchni  $F_{\Delta}(k_i)$  jest charakterystyczne dla danej CTP.

Tak określona miara  $F_{\Delta}(y)$  dla danej CTP oznaczonej jako parametr y przyjmuje tym większą wartość, im większą wartość mają wskaźniki C(x) wyznaczające wierzchołki trójkąta  $\Delta(y)$ . Im wyższa wartość  $F_{\Delta}(y)$ , tym większa niepewność wyznaczenia parametru y. Jako syntetyczny wskaźnik stopnia niepewności  $W_n(y)$  parametru y przyjęto stosunek pola  $F_{\Delta}(y)$  do pola "trójkąta bazowego"  $F_{\Delta}(B)$  wyznaczonego poprzez punkty o współrzędnych 1, 1, 1 wyrażony w procentach:

$$W_n(Y) = \frac{F_{\Delta}(Y)}{F_{\Delta}(B)} 100$$
 (5.18)

Pole bazowe F<sub>A</sub>(B) wynosi 129.6 dla skali <0, 1>.

Dla badanych parametrów y syntetyczny wskaźnik niepewności wynosi:

$$F_{\Delta}(k_{1}) = 46.0 \implies W_{n}(k_{1}) = 35.5\%,$$
  
$$F_{\Delta}(k_{e}) = 52.5 \implies W_{n}(k_{e}) = 40.5\%, \qquad (5.19)$$

$$\begin{split} F_{\Delta}(R_{\lambda_1}) &= 7.4 &=> & W_n(R_{\lambda_1}) = 5.7\% , \\ F_{\Delta}(R_{\lambda_e}) &= 10.8 &=> & W_n(R_{\lambda_e}) = 8.3\% , \\ F_{\Delta}(TI) &= 10.0 &=> & W_n(TI) = 7.7\% , \\ F_{\Delta}(TP) &= 3.7 &=> & W_n(TP) = 2.8\% . \end{split}$$



Rys. 5.3. Sieć pajęcza wskaźników niepewności  $W_n(k_1)$ Fig. 5.3. Spider's network of uncertainty indices  $W_n(k_1)$ 

5.2.6. Ocena niepewności pomiarowej

Na podstawie przeprowadzonej oceny stopnia niepewności wielkości pomiarowych (tab. 5.1) w skali relacji porządkowej wyrażonej poprzez wskaźnik W można uszeregować analizowane CTP od największego do najniższego wskaźnika niepewności.



113

Końcowy etap oceny stopnia niepewności pomiarowej, polegający na wytypowaniu "najlepszej" pomiarowej CTP spośród przyjętych formuł (wzory 5.9 ÷ 5.14), nie oddaje w sposób ilościowy wzajemnych korelacji między rozpatrywanymi charakterystykami, gdyż uszeregowanie wielkości pomiarowych nie uwzględnia ilościowo poszczególnych niepewności. Uzyskane wyniki można traktować jako znaczne uproszczenie badanej rzeczywistości przy zachowaniu podstawowych prawidłowości założonych w przyjętym zbiorze zmiennych (tab. 5.2).

Należy przyjąć, że najmniejszą reprezentatywność odwzorowania cechy termoizolacyjności przegrody wykazują formuły CTP wg wzoru 5.9 i 5.10.

Wyznaczając pomiarową wielkość oporu cieplnego R należy stosować formułę wzoru 5.11, która pozwala na wyznaczenie współczynnika k, przy przyjęciu normowych wartości R i R.

Uzasadnienie stosowania bezwymiarowych temperatur wskazuje na trafność w przyjęciu TP, w porównaniu nie tylko ze stosowanymi dotychczas charakterystykami, ale również ze stosowanym indeksem temperaturowym TI.

#### 5.3. Charakterystyka pomiarowa TP

5.3.1. Formuły stosowania charakterystyki

Na podstawie analizy założeń (pkt. 3.3) przyjęto jako pomiarową charakterystykę określającą CTP wskaźnik pomiarowy TP.

Stosowanie TP w diagnostyce cieplnej wymaga znajomości odpowiednich formuł.

Przy pomiarach w czasie poszczególny pomiar traktowany jest jako wielkość chwilowa wg wzoru:

$$TP_{j} = \frac{\vartheta_{1j} - \vartheta_{0j}}{t_{1j} - \vartheta_{0j}} .$$
 (5.20)

Średnia wartości chwilowych przy pomiarach w okresie Δτ wyraża się wzorem:

$$TP = TP_{sr} = \frac{\sum_{j=1}^{n} TP_{j}}{n}$$
 (5.21)

Okres pomiarowy Δτ odpowiadający miarodajnej wartości TP<sub>śr</sub> należy wyznaczyć przy spełnieniu warunku (wzór 5.23), tzn., że wartości TP obliczone narastająco z poszczególnych pomiarów nieznacznie się od siebie różnią:

$$\frac{TP_{n} - TP_{n-1}}{TP_{n}} \leq x_{min}, \qquad (5.22)$$

gdzie:

TP<sub>n</sub>, TP<sub>n-1</sub> – wielkości pomiarowe wyznaczone jako średnie wartości dla *n*-1 oraz *n* pomiarów w okresie  $\Delta \tau$ , x<sub>min</sub> – minimalna względna różnica wartości TP.

Przy badaniach wykonywanych w dłuższym czasie Δτ zaleca się rozpoczynanie i kończenie pomiarów o tej samej porze, w odstępie pełnych dób.

### 5.3.2. Wielkości dopuszczalne TP

Wskaźnik pomiarowy TP może być traktowany jako wyróżnik temperaturowy, który określa się podczas pomiarów. Istnieje zależność pomiędzy  $R_{\lambda}$  a TP wyrażająca się wzorem:

$$R_{\lambda} = \frac{TP}{1 - TP} R_{i}$$

gdzie (wzór 3.34):

$$TP = \frac{R_{\lambda}}{R_{i} + R_{\lambda}}$$

W powyższym zapisie prawa strona równania staje się etalonem TP.

Określony w ten sposób etalon zawiera obok założonej wielkości oporu cieplnego  $R_{\lambda}$  opór przejmowania ciepła  $R_i$ . Do określenia jego wartości liczbowych wymagana jest znajomość tych oporów.

Opór cieplny  $R_{\lambda}$  może być przyjmowany jako wielkość dopuszczalna lub graniczna na podstawie normy lub innych wymagań.

Wartość pomiarowa R jest zróżnicowana na powierzchni przegrody, co ma swoje potwierdzenie w polach termicznych (rys. 4.8, 4.9, 4.12).

Na podstawie badań własnych oraz danych literaturowych w tab. 5.2 przedstawiono średnie wartości oporu przejmowania  $R_{\rm i}$  .

Przy określeniu dopuszczalnej wielkości "etalonu TP" odpowiadającego granicznej, np. normowej, wielkości współczynnika  $K_d$ , wielkość  $R_{\lambda d}$  wyznacza się ze wzoru:

$$R_{\lambda d} = \frac{1}{k_{d}} - (R_{1} + R_{e}) . \qquad (5.24)$$

(5.23)

Lp.	Rodzaj powierzchni ściany zewnętrznej	Ri m <sup>2</sup> K∕₩
1	Šciana plaska otwarta	0.17
2	Ściana płaska za zasłoną	0.22
3	Ściana płaska za meblami	0.29
4	Ściana płaska za meblościanką bez przewiewu	0.50
5	Naroże	0.22

Pomiarowe zalecane wartości oporów R<sub>i</sub> w zależności od powierzchni ściany

Zapis etalonu TP przyjmuje postać:

etalon TP = 
$$\frac{R_{\lambda d}}{R_{1} + R_{\lambda d}}$$
. (5.25)

Ze względu na sposób przyjmowania R<sub>1</sub> etalon TP może być określony jako:

- pomiarowo-normowy; przy przyjęciu R, na podstawie normy [99],
- pomiarowo-eksperymentalny; przy przyjęciu R, wg tabl. 5.2.

### 5.4. Klasyfikacja termoizolacyjności przegród

Odwzorowanie SEP pozwala na identyfikację cech określających izolacyjność termiczną. Wyznaczone bezwymiarowe temperatury TP mogą podlegać regułom klasyfikacji w jednoimienny zbiór [23;116]. Zbiór ten można rozdzielić na podzbiory będące klasami określającymi odwzorowanie równoważnych jej cech. Jak wykazują liczne doświadczenia, określenie skal empirycznych zostało wprowadzone w celu zaspokojenia potrzeb praktycznych [94].

W TDC wprowadzono klasyfikację ścian ze względu na izolacyjność termiczną.

W określeniu klas pomiarowej charakterystyki TP uwzględniono:

 klasyfikację termoizolacyjności ścian za pomocą indeksu temperaturowego TI [56],

klasyfikację termoizolacyjności ścian wyrażonej poprzez
 współczynnik przenikania ciepła k,

 klasyfikację termoizolacyjności przegród związanej z czasowym okresem realizacji budynków [62].

W celu określenia zależności pomiędzy oporem cieplnym  $R_{\lambda}$  i współczynnikiem przenikania ciepła k a wprowadzoną bezwymiarową temperaturą pomiarową przedstawiono wzajemne związki:

- zależność pomiędzy Bi a TP:

$$Bi_{s} = \frac{TP}{1 - TP}$$

- zależność pomiędzy TP a R,:

$$TP = \frac{Bi_s}{1 + Bi} = \frac{R_\lambda}{R_1 + R_2}$$

- zależność pomiędzy  $R_{\lambda}$  a TP:

$$R_{\lambda} = Bi_{s} R_{i} = \frac{TP}{1 - TP} R$$

- zależność pomiędzy R; a TP:

118

(5.26)

(5.27)

(5.28)

$$R_i = R_\lambda \left(\frac{1}{TP} - 1\right)$$
, (5.29)

zależność pomiędzy współczynnikiem k a wskażnikiem TP:
 zapis dokładny:

$$k = \left[\frac{TP}{1-TP} R_{i} + (R_{i} + R_{e})\right]^{-1} = \left[\frac{TP}{1-TP} R_{i} + 0.17\right]^{-1}, \quad (5.30)$$

- zapis uproszczony dla R = 0:

$$k = -\frac{1}{R_{1}} (1 - TP)$$
 (5.31)

Termiczne elementy mikroklimatu, wyrażone różnicą temperatur  $\Delta \vartheta = t - \vartheta$  wiążą się z temperaturą punktu rosy, maksymalną wielkością współczynnika k, parametrami komfortu cieplnego pomieszczeń oraz czynnikami zdrowotnymi i oszczędnością energii [78;120].

W powyższych zależnościach graniczne wartości składowej przejmowania  $\Delta \vartheta_1$  SEP wynoszą 2 ÷ 10 K. W celu określenia obszaru zmienności współczynnika k dla poszczególnych klas, przyjęto dwie charakterystyczne wielkości oporu przejmowania ciepła: wartość normową  $R = 0.12 \text{ m}^2 \text{K/W}$  [99] oraz eksperymentalną  $R_1 = 0.17 \text{ m}^2 \text{K/W}$  [77]. Wielkości R przyjęto jako wartości graniczne równe 0.05 [99] oraz 0.01 m $^2 \text{K/W}$  [6]. Wielkość współczynnika k odniesiono do różnicy temperatury  $\Delta t =$ 40 K. Powyższe założenia pozwalają na oszacowanie wielkości współczynnika k w zależności od składowej SEP wyznaczonej poprzez  $\Delta \vartheta_1$ .

W klasyfikacji izolacyjności termicznej przegród określonej indeksem temperaturowym TI przyjęto: bardzo dobrą izolacyjność dla TI ≥ 0.95, natomiast złą przy jej braku TI < 0.75 [2;56]. Na podstawie przyjętych założeń przedstawiono klasy izolacyjności termicznej przegród dla wybranych CTP stanowiących istotny element znakowania energetycznego budynku. Wielkości te można oszacować dla wyznaczonej wartości bezwymiarowej temperatury TP.

Tablica 5.3

Umowna klasyfikacja charakterystyk termoizolacyjności termicznej przegród

Klasa termo- izola- cyjno- ści	Skorygo- wana li- czba Bio- ta <b>Bi</b> s	Charakte- rystyka TP	Współczyn- nik <b>k</b>	
	-	-	$\frac{W}{m^2 K}$	
К-А К-В К-С К-D К-Е	>19 9 - 19 6 - 9 4 - 6 <4	≥0.95 0.95-0.90 0.90-0.84 0.84-0.72 <0.72	0.3-0.5 0.5-0.8 0.8-1.2 1.2-1.5 1.5-2.0	

#### 5.5. Ocena wyników badań

Dla wybranych danych uzyskanych podczas badań poligonowych dla dwóch serii pomiarów wyznaczono wielkości chwilowe charakterystyk pomiarowych przedstawionych na rys. 5.1 oraz 5.2.

Ze względu na dłuższy nieprzerwany okres badań analizie wyników poddano II serię pomiarową. Na rys. 5.4 przedstawiono przebieg zmienności wskażnika TP. Przebieg ten został wyznaczony na podstawie wartości chwilowych TP (rys. 5.2.c) jako średnie narastające wielkości liczbowych dla *n* pomiarów (wzór 5.21) w czasie pomiaru  $\tau$ .

W celu porównania charakterystyk, na rys. 5.5 przedstawiono przebieg zmienności współczynnika przenikania ciepła k (rys. 5.2.b) jako narastające średnie wielkości dla n pomiarów w czasie  $\tau$ .



- Rys. 5.4. Przebieg zmienności wskaźnika TP wyznaczonego jako średnie narastające w czasie τ
- Fig. 5.4. Variability of TP index determined as growing average in time  $\tau$



- Rys. 5.5. Przebieg zmienności współczynnika k wyznaczonego jako średnie narastające w czasie τ
- Fig. 5.5. Variability of k coefficient determined as growing in time  $\tau$

Założono że, wielkości x<sub>min</sub> poszczególnych charakterystyk są składowymi **współczynnika zbieżności CTP** wyrażonego zapisem:



Rys. 5.6. Przebieg zmienności współczynników zbieżności X w czasie τ dla wskaźnika TP oraz współczynnika k

Fig. 5.6. Variability of convergence coefficient X in time for TP index and coefficient k

Zapis powyższego wzoru dotyczy charakterystyk pomiarowych niezależnie od formuły ich zapisu.

Wykres zmienności współczynników zbieżności X w funkcji czasu t charakteryzuje niepewność pomiarową dla bezwymiarowej temperatury TP oraz współczynnika k. Niepewność tę przedstawiają zmniejszające się odchylenia współczynnika zbieżności od wielkości granicznej.

Jak wynika z aproksymacji odchyleń współczynników zbieżności (rys.5.5), charakterystyka TP wykazuje niższą niepewność pomiarową w porównaniu z charakterystyką k.

Z analizy wyników badań dla II serii pomiarowej wynika, że odpowiednie charakterystyki pomiarowe wynoszą:

TP = 0.89,

 $k = 0.80 [W/m^2 K].$ 

Badaną przegrodę zewnętrzną można zakwalifikować, zgodnie z tabelą 5.3, do klasy termoizolacyjności K-C.

Na podstawie analizy można stwierdzić, że wymagany okres pomiaru Δτ w celu uzyskania miarodajnej CTP przy badaniach II serii pomiarowej mieści się w granicach:

- dla współczynnika przenikania ciepła k - 48 ÷ 60 godz.,

- dla wskaźnika pomiarowego TP - 12 ÷ 20 godz.

Wymagany okres pomiaru  $\Delta \tau$  dla oporu  $R_{\lambda}$  mieści się w granicach nieco mniejszych niż dla współczynnika k.

Zachowując warunek rozpoczynania i kończenia pomiarów o tej samej porze w odstępie pełnych dób, okres pomiarowy Δτ należy przyjąć [66;105]:

- dla k oraz  $R_{\lambda}$  - 3 doby,

- dla TP - 1 doba.

Porównując niezbędny czas pomiaru w celu uzyskania miarodajnej charakterystyki pomiarowej TP z czasem pomiaru charakterystyk uwzględniających współczynnik przejmowania ciepła  $\alpha$  należy stwierdzić, że okres pomiaru  $\Delta \tau$  przy wyznaczaniu zaproponowanej charakterystyki TP jest znacznie krótszy.

Uproszczona metrologia badań, mniejszy stopień niepewności, krótszy czas pomiaru wskazuje na większą przydatność charakterystyki pomiarowej **TP** w stosunku do istniejących, wyznaczonych przy współudziale współczynnika przejmowania ciepła. 6. APLIKACJA TERMICZNEJ DIAGNOSTYKI CIEPLNEJ

6.1. Analizator bezwymiarowej temperatury TP

### 6.1.1. Założenia i przeznaczenie

Brak krajowych rozwiązań przyrządów do szybkiej oceny charakterystryk termoizolacyjnych przegród budowlanych spowodował opracowanie przez zespół pod kierownictwem autora analizatora bezwymiarowej temperatury TP [70]. Służy on do oceny termoizolacyjności istniejących przegród budowlanych, kontroli przegród w nowo wznoszonych obiektach oraz jest użyteczny w diagnostyce związanej z docieplaniem istniejących budynków [46;48].

Jest to urządzenie przenośne o małych gabarytach i masie, nie sprawiające kłopotu podczas eksploatacji. Pod względem metrologicznym dokładność pomiaru nie jest gorsza, niż uzyskiwana za pomocą tradycyjnych metod i systemów pomiarowych. Jego podstawowym zadaniem jest wyznaczenie wartości miarodajnej charakterystyki pomiarowej dla badanej przegrody tj. wskaźnika TP.

### 6.1.2. Ogólny opis konstrukcji

Prototyp analizatora został wykonany w Instytucie TiOB w ramach prac realizowanych w CPBR [70;72]. Jego podstawowymi blokami funkcjonalnymi są:

- 1) zasilacz,
- 2) sterownik mikroprocesorowy,
- 3) część pomiarowa.

Zadaniem zasilacza jest dostarczenie napięć niezbędnych do prawidłowego funkcjonowania sterownika mikroprocesorowego i części pomiarowej. Podstawowe dane techniczne zasilacza:

- napięcie wejściowe: 220 V, 50 Hz ±10%,
- napięcie wyjściowe: +5 V ±0,25 V, 1,5 A, -5 V ±0,25 V, 1,5 A.

Zasilacz jest odporny na zwarcie wyjść do masy.

Sterownik mikroprocesorowy pełni funkcję jednostki obliczeniowej i sterującej przebiegiem pomiarów. W rozwiązaniu modelowym wykorzystano sprawdzony układ sterownika CA-80 taktowany przebiegiem zegarowym o częstotliwości 4 MHz stabilizowanej kwarcem. System wyposażony jest w pamięć EPROM o pojemności 8 Kb oraz w pamięć RAM o pojemności 2 Kb. Sterownik zasilany jest napięciem +5 V.

Układ pomiarowy służy do zamiany przebiegu analogowego (temperatura) na postać cyfrową. W prototypie wykorzystano przetwornik analogowo-cyfrowy o konstrukcji monolitycznej typu ICL 7109. Wymaga on zasilania napięciami +5 V i -5 V DC. Zamiana sygnału analogowego na cyfrowy oparta jest na metodzie integracyjnej z podwójnym całkowaniem i autozerowaniem. Rozdzielczość przetwornika wynosi 12 bitów, czas przetwarzania 10 ms. Przetwornik ten charakteryzuje się dużą stabilnością pracy w szerokim zakresie temperatur. Dokładność względna przetwarzania jest na poziomie ±1 LSB. Skonstruowano 3-kanałowy układ do pomiaru temperatury dający dokładność pomiaru rzędu 0,1<sup>0</sup>C.

Rolę czujników temperatury mogą pełnić diody półprzewodnikowe lub tranzystory ze zwartym złączem baza-kolektor. Tego typu czujniki nadają się do pomiaru temperatury w zakresie -30°C do +120°C, a więc wystarczającym w zastosowaniach w budownictwie. Odczytane wartości temperatury w trzech charakterystycznych punktach są lokowane w pamięci RAM.

W pamięci EPROM ulokowane są dwa główne programy. Pierwszy jest oprogramowaniem systemu mikroprocesorowego, zapewnia on komunikację z klawiaturą, wyświetlaczem itp. Drugi natomiast jest właściwym oprogramowaniem pomiarowym. Steruje on przebiegiem procesu pomiarowego (odmierzanie czasu, sekwencyjny wybór punktów pomiarowych), jak również wykonuje niezbędne operacje matematyczne. Oblicza wartość chwilową TP oraz wariancję.

Wyznaczana wartość średnia TP jest wyświetlana na wyświetlaczu przez cały czas trwania pomiarów (po każdym odczycie temperatur wartość ta jest uaktualniana).

125



Rys. 6.1. Schemat blokowy analizatora Fig. 6.1. Block-scheme of analyser

Schemat blokowy analizatora przedstawiono na rys. 6.1.

#### 6.1.3. Szacowanie błędów

Dokładność pomiarów temperatur zależy od dokładności czujników, w prototypowym analizatorze wykorzystano czujniki Pt-100, mierzące temperaturę z dokładnością do  $0.1^{\circ}$ C. Wpływ dokładności poszczególnych wartości składowych na ostateczną wartość TP można oszacować wykorzystując rachunek różniczkowy. TP jest funkcją trzech zmiennych  $t_i$ ,  $v_i$  i  $v_e$ , a więc przyrost wartości funkcji TP można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta TP = \frac{\partial f}{\partial t_1} \Delta t_1 + \frac{\partial f}{\partial \vartheta} \Delta \vartheta_1 + \frac{\partial f}{\partial \vartheta} \Delta \vartheta . \qquad (6.1)$$

Po obliczeniu odpowiednich pochodnych cząstkowych otrzymujemy:

$$\Delta TP = \frac{1}{t_{1} - \vartheta_{e}} \left( \frac{\vartheta_{e} - \vartheta_{1}}{t_{1} - t_{e}} \Delta t_{1} + \Delta \vartheta_{1} + \frac{\vartheta_{1} - t_{1}}{t_{1} - \vartheta_{e}} \Delta \vartheta_{1} \right).$$
(6.2)

W celu oszacowania maksymalnego zakresu skali analizatora TP założono, że pomiary przeprowadzane będą przy minimalnej różnicy temperatur  $t - t \ge 10$  K i maksymalnej 40 K. Przyjęto więc, że badaniom podlegać będą przegrody, dla których k jest większe od 0.2 i mniejsze od 2.0 W/m<sup>2</sup>K. W zależności od przyjętych założeń dokładność wyznaczenia TP wynosi od 0.05 przy  $\Delta T = 10$  K do 0.01 przy  $\Delta T \ge 40$  K.

### 6.1.4. Algorytm programu wyznaczenia TP

Algorytm programu wyznaczenia charakterystyki pomiarowej TP oraz sprawdzenia wariancji jej wyznaczenia przedstawiono na schemacie blokowym - rys. 6.2.

#### 6.1.5. Obsługa analizatora

Czujniki oznaczone symbolem & oraz & mocujemy odpowiednio do wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni badanej przegrody za pomocą pasty silikonowej lub innego środka o podobnych właściwościach. Czujnik oznaczony symbolem t należy umieścić w powietrzu wewnątrz pomieszczenia w odległości 1 m od badanej przegrody w połowie jego wysokości.



Rys. 6.2. Algorytm programu wyznaczenia TP Fig. 6.2. Alghoritm of TP determination

Uruchomienie analizatora, jego przygotowanie do pracy, praca oraz wyniki pomiarów zawiera instrukcja opracowana pod kierunkiem autora [70].

### 6.2. Zasady prowadzenia diagnostyki - TDC

Izolacyjność termiczna ścian zewnetrznych jest składową stanu technicznego badanego budynku. Pomiary te wykonuje się w obiekcie w czasie jego eksploatacji, stąd muszą mieć charakter badań diagnostycznych - terenowych.

Przy badaniach TDC w budynkach, które będą modernizowane, należy określić:

- zasady prowadzenia badań,

- program badań,

- sposób obróbki i interpretacji danych pomiarowych,

- koszty badań.

TDC ujmuje badania przegród w sposób alternatywny, gdyż jak wskazuje praktyka, nie zawsze muszą być stosowane metody czasochłonne. Poniżej przedstawiono zasady badań.

## 6.2.1. Badania diagnostyczne TDC - 1

Badania te są podstawowym i wyjściowym elementem badań budynków, w których określa się stan techniczny przegród [61].

W TDC-1 przedstawiono sposoby oceny stopnia przemarzania ścian zewnętrznych na podstawie występujących zmian na ich wewnętrznych powierzchniach w badanych pomieszczeniach. Poglądowy zakres występujących zmian przedstawiono na rys. 6.3 oraz w tabl. 6.1.

Na podstawie oceny jednorodności ścian oblicza się dla jej poszczególnych fragmentów konstrukcyjnych wartości współczynnika k poprzez:

– wyznaczenie temperatury t<sub>i</sub> oraz wilgotności względnej  $\varphi_i$ wewnątrz badanych pomieszczeń,

 wykonanie inwentaryzacji konstrukcyjnej ścian, zaznaczając zmiany fizyczne na jej wewnętrznej powierzchni,

 analizę zakresu występujących zmian fizycznych na powierzchniach wewnętrznych ścian (rys.6.3), klasyfikując je na podstawie tablicy 6.1 do określonej grupy przegród zewnętrznych.



Rys. 6.3. Zakres zmian na ścianach zewnętrznych a) grupa B, b) grupa C, c) grupa D, d) grupa W W - (może obejmować grupy od A do D)

Fig. 6.3. Range of changes on external walls a) group B, b) group C, c) group D, d) group W W - (can include all groups)

6.2.2. Badania diagnostyczne TDC-2

W przypadku niemożliwości zaakceptowania badań ścian na podstawie TDC-1 z braku danych ilościowych należy kontynuować badania według TDC-2 [62].

Najbardziej praktyczną metodą jakościowego określenia niejednorodności termolzolacyjnej ścian jest metoda podczerwieni, wykonywana za pomocą badań kamerą termowizyjną [42;122]. Z uwagi na ryzyko błędnej interpretacji badań termograficznych wymagana jest znajomość konstrukcji i zmian fizycznych ściany zewnętrznej określonej na podstawie TDC-1. Klasyfikacja przegród zewnętrznych ze względu na wartość współczynnika przenikania ciepła k

Grupa przegród zewnętrz- nych	Współczynnik k m <sup>2</sup> wilgotność względna $\varphi$ %		Zmiany na wewnętrznej powierzchni przegrody
	45-65	70-90	
A	< 0.75	<0.55	Brak zmian
В	0.75-1.2	0.55-1.0	W okresie długotrwałych silnych mrozów ślady rosze- nia w narożach i nadprożach
с	1.2-1.7	1.0-1.4	Ślady zabrudzeń szczególnie wyrażne w okolicach naroży i nadproży
D	1.7	1.4	Mocne zabrudzenia, pojawie- nie się pleśni
W	<0.75 >1.70	<0.55 >1.40	Widoczne przemakanie, naj- częściej po opadach

W TDC-2 zastosowano prostą jakościową metodę diagnostyki. Określenie wskaźnika TP odbywa się poprzez pomiar temperatur ośrodka powietrznego t, oraz temperatur powierzchni przegrody ϑ, ϑ przy (t, -t) ≥ 10 K.

Wartości wskaźnika TP jako charakterystyki pomiarowe wyznaczone mogą być za pomocą analizatora (pkt. 6.1) lub innymi urządzeniami pomiarowymi. Uzyskane wielkości TP można porównać z wielkościami granicznymi określonymi wg wzoru (5.23) lub tablicy 5.3.

Oszacowanie współczynnika przenikania ciepła k

Wartość uśredniona z pomiarów w czasie  $\Delta \tau$  współczynnika k dla poszczególnych punktów pomiarowych wyznacza się ze wzoru 5.30:

$$k = \left(\frac{TP}{1-TP} R_{1} + 0.17\right)^{-1}, \qquad (6.3)$$

lub uproszczonej zależności wzór 5.31:

$$k = \frac{(1 - TP)}{R} , \qquad (6.4)$$

gdzie:

wielkości TP wyznacza się według wzoru 5.21, zaś wartości R przyjmuje się z tablicy 5.2.

6.2.3. Ocena i interpretacja wyników

Wyniki TDC powinny identyfikować stan ochrony cieplnej ścian zewnętrznych z dokładnością wynikającą z potrzeb badań kontrolnych.

Dla wyznaczonych za pomocą badań termowizyjnych pól o zbliżonej izolacyjności termicznej lub w przypadku ich braku w punktach siatki pomiarowej wyznacza się charakterystykę pomiarową TP.

Dla wyznaczonych wartości TP, w zależności od rodzaju powierzchni wewnętrznej, przyjmuje się określoną wartość współczynnika przejmowania ciepła R<sub>i</sub> i oblicza współczynniki przenikania ciepła k.

W zależności od ilościowego udziału wartości współczynnika k z uwzględnieniem konstrukcji i wielkości badanej przegrody oraz zmienności od  $k_{\min}$  do  $k_{\max}$  zgodnie z wielkościami w tablicy 6.1, przyjmuje się miarodajną wartość współczynnika k będącą podstawą do dalszej analizy w zakresie ochrony cieplnej.

## 6.3. Obszary stosowania metod diagnostycznych

Elementem kończącym analizę zagadnień związanych z opracowaniem zasad TDC jest próba całościowego przedstawienia problematyki pomiarowego określenia CTP.

Na rys. 6.4 przedstawiono zależności pomiędzy poszukiwaną cechą obiektu wyrażoną poprzez CTP a wybranymi stanami jako wielkościami pomiarowymi.



Rys. 6.4. Schemat blokowy obszarów stosowania metod diagnosycznych

Fig. 6.4. Block-scheme of range of diagnostic method applicability

## 7. PODSUMOWANIE

Przedstawiona praca jest próba podsumowania wieloletnich dociekań oraz badań praktycznych autora w zakresie opracowania podstaw temperaturowej diagnostyki cieplnej TDC. -W pomiaru cieplnej obiektem jest diagnostyce izolacyjność termiczna przegrody budowlanej, która jako poszukiwana cecha wvrażona jest poprzez charakterystykę pomiarowa, badań stanowiącą odzwierciedlenie jej właściwości.

Zrealizowana praca obejmuje analize podstaw klasycznej teorii przejmowania ciepła oraz przedstawia złożoność wyznaczania wielkości pomiarowych współczynnika przejmowania ciepła, uzasadniając tym samym zasadność opracowania nowej metody badań. Ponadto praca zawiera nie tylko podstawy fizykalne opracowanej metody diagnostycznej, ale przedstawia również zasady metrologii użytecznej w prowadzonych eksperymentach. Zakres pracy dotyczy głównie badań poznawczych dla nieustalonych przepływów ciepła na podstawie wnioskowania metrologicznego, nie zaś ilościowej analizy statystycznej. Takie ustawienie zagadnienia pozwoliło na opracowanie podstaw teoretycznych procedury postepowania przy diagnostyce izolacyjności cieplnej przegród budowlanych.

W celu uzasadnienia powyższej procedury zastosowano prototypowy system pomiarowo-informatyczny oraz opracowano konstrukcję analizatora do temperaturowej diagnostyki cieplnej. Urządzenie to jest prototypowym miernikiem pozwalającym na proste uzyskanie wyników niezbędnych do oceny termoizolacyjności istniejących przegród budowlanych.

Określono związek pomiędzy stanami środowisk i przegrody wyrażonej różnicami odpowiednich temperatur w czasie, który poprzez wprowadzone pojęcie "sytuacja eksploatacyjna przegrody" opisuje składowe przenikania ciepła. Rozgraniczono anomalia termiczne od defektów termoizolacyjnych, co jest istotne przy interpretacji charakterystyk pomiarowych podczas diagnostyki cieplnej przegród.

134

W analizie wyników badań przedstawiono zależności pomiędzy charakterystykami wyznaczonymi poprzez pomiar gęstości strumienia cieplnego oraz pomiar samych temperatur. Oszacowano minimalny czas pomiaru niezbędny do miarodajnego określenia charakterystyk pomiarowych.

W przedstawionych podstawach temperaturowej diagnostyki cieplnej jako pomiarową charakterystykę izolacyjności wprowadzono bezwymiarową temperaturę - TP. Charakterystyka ta jest skorygowaną przez autora formą kryterialnej liczby Biota uwzględniającą przewodzenie i przejmowanie ciepła przez przegrodę. Określona jest poprzez pomiar samych temperatur z pominięciem gęstości strumienia cieplnego. Charakterystyka ta odznacza się zminimalizowanym wpływem środowiska zewnętrznego na wyniki pomiarów. Ocena charakterystyk pomiarowych wykazuje, że w stosunku do stosowanych, wprowadzona charakterystyka wykazuje się niższym stopniem niepewności pomiarowej.

Przedstawiono sposób określenia wzorca "etalonu TP" zależnego od normowej lub innej granicznej wielkości współczynnika k lub oporu cieplnego R<sub>2</sub>.

Zaproponowana nowa metodyka badań diagnostycznych pozwala więc na prowadzenie szybkiej i prostej diagnostyki cieplnej jako wyjściowego stadium prognozowania w zakresie termorenowacji budynków. Umożliwia ona ocenę izolacyjności termicznej zewnętrznych przegród budowlanych z dokładnością wystarczającą do określenia wielkości docieplenia. LITERATURA

1. Anderson B.R.: Methods in use for testing thermal performance in situ, BRE Scottish Laboratory 47/28/1, Glasgow 1983. ANSI/ASHRAE 101-1981: Application of Infrared 2. Sensing Devices to the Assesment of Building Heat Loss Characteristics. 3. ASTM C 1046-85: Standard Practice for In - Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components. 4. Becker M.: Heat Transfer, Plenum Press, New York and London 1986. 5. Berber J.: Bauphysik, Verlag Handwerk und Technik, Hamburg 1986. 6. Bobran H.W., Bobran J.: Handbuch der Bauphysik, Fachverlag, Braunschweig 1990. Bogosławski W.N.: Procesy cieplne i wilgotnościowe 7. budynkach, Arkady, Warszawa 1985. 8. Brennet C.O., Myers J.E.: Przenoszenie pędu ciepła i masy, WNT, Warszawa 1967. 9. Bretsznajder S.: Zagadnienia projektowania procesów przemysłu chemicznego, PWT, Warszawa 1958, t.1. 10. Cammerer I.S.: Izolacje ciepłochronne w przemyśle, Arkady, Warszawa 1967. 11. Cempel Cz.: Diagnostyka wibroakustyczna maszyn, PWN, Warszawa 1989. 12. COBRPB CEBET: Badania termoizolacyjności ścian zewnętrznych domków jednorodzinnych typu "Sigma" w Mikołowie k. Katowic, Warszawa 1982. 13. CSN-0540 Tepelne technicke vlasnosti stavebnich konstrukci a budov. VUNM, Praha 1977. 14. Diem P.: Die thermische Behaglichkeit als Kriterium für die Bemessung der Wärmedämmung einer Ausenwand, DAB 6/1978. 15. Diem P.: Bauphysik im Zusammenhang. Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1987. 16. DIN-4108: Wärmeschutz im Hochbau.

17. DIN 52611: Bestimmung des Wärmedurchlasswiederstandes von Wänden und Decken.

 Dreyer J., RogaßH.: Messungvon Wärmedurchgangswiderständen mit absoluten Meßverfahren, Messen, Steuern, Regeln, 4/1986.
 Drozdow W., Suchariew W.: Termografia w stroitielstwie.

Strojizdat, Moskwa 1987.

20. Dubal L.: Äquivalente Temperatur, Bauphysik, 2/1985.

21. Duc E., Jankowski S.: Wyznaczanie gwarantowanej wartości współczynnika przenikania ciepła ścian warstwowych wielkopłytowych, Inżynieria i Budownictwo, 1/1990.

22. Erhorn H.,Szerman M.,Gertis K.: Wie beeinflußt die Heizflähenanordnug im Raum die thermische Behaglichkeit und den Wärmeverlust, Bauphysik, 5/1986.

23. Finkelstein L.: Teoria i filozofia pomiaru. Podręcznik metrologii cz. I, WKŁ, Warszawa 1988.

24. Firkowicz K., Pogorzelski J.A.: Propozycje kierunków rozwoju technik pomiarowych  $\lambda$  i k. Konferencja nauk. techn. Fizyka budowli w teorii i praktyce, Politechnika Łódź, Łódź 1987.

25. Fischer H.: Messvefahren und neue Messgeräte in den Klimatechnik. Manuskript Ultrakust - Gerätebau GmbH Ruhmannsfelden 1979.

26. Fiszer A.: Badania izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych budynków przy zastosowaniu mierników gęstości strumienia cieplnego. Biuletyn Informacyjny UKR, Łódź 4-5/1985.
27. Franke F.: Stadtklima. Karl Krämer Verlag, Stuttgart 1977.
28. Gdula S.: Przewodzenie ciepła, PWN, Warszawa 1989.

29. Goldstein R. J.: Quantitative termography. Estimate of building envelope heat loss. A. Wiley, Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., New York, Chichester 1989.
30. Gołebowicz M.: Metody badań cieplno-fizycznych materiałów budowlanych. ITB, Seminarium, Fizyka Budowli, Warszawa 1963.

31. Gosöle K., Schüle W.: Schall, Wärme, Feuchtigkeit. Bauverlag, Wisbaden, Berlin 1980.

32. Grandjean E.: Ergonomia mieszkania. Arkady, Warszawa 1978.
33. Grzeszczyk, W. Nowak H., Cena K.: Skorygowana temperatura powietrza jako wskaźnik termiczny środowiska budynków. Archiwum Inżynierii Lądowej, t. XXXI, z. 1-2, 1985. 34. Grzeszczyk W. Nowak H. Marszałek K.: Wpływ absorbcyjnych i emisyjnych własności powierzchni przegród budowlanych na wartość współczynnika przejmowania ciepła przez promieniowanie. Prace naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 7/1982.

35. Gundlach W., Ciepłucha J., Kozanecka D.: Podstawy metrologii, cz. I. Politechnika Łódzka, Łódż 1989.

36. Harich H., Enders W.: Messeinrichtung zur Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes an fertigen Objekten. Bauphysik, 3/1985.

Hauri H.: Berechnung des dynamischen k-Wertes. Bauphysik,
 2/1979.

38. Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki. WNT, Warszawa 1968.

39. ISO 2394. Ogólne zasady dotyczące niezawodności konstrukcji
tłumaczenie, Warszawa 1987.

40. ISO 6946/1. Thermal insulation - Calculate methods. Part 1. Steady state thermal properties of building components and building elements.

41. ISO/DIS 8990. Thermal insulation - Determination of steady
- state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box.

42. ISO 6781. Thermal insulation - Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes - Infrared method.
43. Janka F.: Thermografie in der praktischen Anwendung im Bauwesen. Expert Verlag, Sindelfingen 1986.

44. Kaiser E.: Örtliche Wärmestrommessung mit Hilfswand -Wärmestromaufnehmen in Materialen unbekanten Wärmeleitfähigkeit. Messen, Steuern, Regeln, 2/1983.

45. Kakac S., Yener Y.: Heat Conduction Hemisphere Publishing
Corporation. New York, Washington, Philadelphia, London 1985.
46. Karty katalogowe (Datenblatt) ULTRAKUST - Gerätebau - Ruhmannsfelden.

47. Karta katalogowa SOJO, Czujniki natężenia strumienia ciepła MGS-3.

48. Karty katalogowe urządzeń pomiarowych, (Datenblatt) Ahlborn Mess und Reglungstechnik Holzkirchen. 49. Kleber K.: Praktische Bauphysik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1988.

50. Korsgaard V., Madsen T.L.: Własności izolacyjne kilku typowych ścian zewnętrznych wystawionych na działania atmosferyczne. Duńska Wyższa Szkoła Techniczna, Laboratorium Izolacji Cieplnej, Raport, Kopenhaga 1964 (tłumaczenie maszynopis).

51. Kossecka E.: Bilans cieplny prostych systemów heliogrzewczych i przegród budowlanych w długich przedziałach czasu. Archiwum Inżynierii Lądowej, Warszawa 1991.

52. Kossecka E.: Bilans cieplny elementów obudowy w długich okresach czasu. Referat na Sekcji Fizyki Budowli 1989-02-16.

53. Kostowski E.: Przepływ ciepła. Politechnika Śląska, Gliwice 1986.

54. Kozierski J.: Zagadnienia fizykalne w budownictwie i instalacjach. PWN, Warszawa 1971.

55. Kraus W.: Messungen des Temperatur und Geschwindigkeitsfeldes bei frei Konvektion. Verlag G. Braun, Karlsruhe 1955.

56. Krause H.: Wskaźnik temperatury bezwymiarowej w diagnostyce izolacji cieplnej zewnętrznych przegród budowlanych. XXXIII Konferencja Naukowa, Krynica 1987.

57. Krause H.: Klasyfikacja izolacyjności termicznej przegród przy pomocy liczb podobieństwa. Zeszyty Naukowe WSI nr 88, Budownictwo 19, Zielona Góra 1989.

58. Krause H.: Lösung von bauphysikalischen Aufgaben mit Hilfe von Ähnlichkeitszahlen. A. B. Archiv des Badewesens, 2/1990.

59. Krause H.: Przejmowanie ciepła na wewnętrznej powierzchni przegrody. IV Konferencja nt. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź 1993.

60 Krause H.: Kierunki modyfikacji budownictwa wielkopłytowego w województwie katowickim. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Z. 62, Gliwice 1985.

61. Krause H.: Ocena współczynnika k w istniejących budynkach. Przegląd budowlany, 10/1986.

139

62. Krause H.: Temperaturowa diagnostyka cieplna modernizowanych budynków mieszkalnych. XXXIV Konferencja Naukowo Techniczna, Krynica 1988.

63. Krause H., Blazy J., Krzycki J.: Badania rzeczywistej izolacyjności termicznej trójwarstwowych przegród ściennych. XX Konferencja Problemowa, Kołobrzeg 1984.

64. Krause H., Gliński H.: Sposób interpretacji i wyznaczenia pomiarowej wielkości współczynnika k. Przegląd Budowlany, 8-9/1991.

65. Krause H., Gliński H.: Zmienność charakterystyk termoizolacyjności przegród w czasie badań. II Konferencja Naukowo Techniczna. Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź 1989.

66. Krause H., Gliński H.: Wpływ czasu pomiaru na wartość współczynnika przenikania ciepła k. XXXIII Konferencja Naukowa, Krynica 1989.

67. Krause H., Krzycki J., Pichocki E.: Problemy ochrony cieplnej budynków mieszkalnych systemu szczecińskiego SG. XXVII Konferencja Naukowa KILiW PAN i KN PZiTB, Warszawa, Krynica 1981.

68. Krause H.,Zaba A, Gliński H.: Zmienność współczynnika przenikania "k" w warunkach rzeczywistego przepływu ciepła – symulacja komputerowa. XXXIV Konferencja Naukowa, Krynica 1988, t. 4.

69. Krause H. i inni: Termoizolacyjność przegród budowlanych. Badania eksperymentalne. Praca NB-400/RAu-2/RB-4/88 ITiOB, Gliwice 1989.

70. Krause H. i inni: Charakterystyki termoizolacyjne pionowych przegród zewnętrznych w aspekcie badań cieplnych. Etap I, II, III CPBR 02.21. Gliwice 1988-1990.

71. Krause H. i inni: Prace naukowo-badawcze Instytutu TiOB NB-40/RB-4/80, NB-156/RB-4/80, NB-421/RB-4/83, NB-10/RB-4/83 i inne.

72. Krause H. i zespół: Zgłoszenie patentowe P-288134 z dnia 1990.12.17 pt."Przyrząd pomiarowy do kontroli jakości termoizolacji zewnętrznych przegród budowlanych". 73. Krodkiewska-Skoczylas E.: Metody syntetycznej oceny jakości produktów. Biblioteka Jakości, Wydawnictwa Normalizacyjne, Warszawa 1982.

74. Lieneweg F.: Handbuch der technischen Temperaturmessung. Verlag Vieweg Sohn, Braunschweig 1976.

75. Liersch K.W.: Belüfftete Dach und Wandkonstruktionen. Band 1, Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1981.

76. Liersch K. W.: Basic-Programme für den baulichen Warme und Feuchtschutz, Werner Verlag, Düsseldorf 1991.

77. Link A.: Wpływ intensywnie działających wewnętrznych czynników cieplno-wilgotnościowych na użyteczność i trwałość budynków. Dysertacja doktorska, Burglengenfeld, Gliwice 1985.
78. Lohmeyer G.: Praktische Bauphysik. B. G. Teubner, Stuttgart 1985.

79. Luyben W. L.: Modelowanie symulacji procesów przemysłu chemicznego. WNT, Warszawa 1976.

80. Mańkowski S., Wojdyga K.: Pomiary strat ciepła przez przegrody budowlane. Rozdział 9 podręcznika: Bogosławski W.N.: Procesy cieplne i wilgotnościowe w budynkach. Arkady, Warszawa 1985.

Marcyniuk A.: Teoria pomiaru. Politechnika Śląska, skr.
 1168, Gliwice 1984.

82. Matczuk Z.: Badania izolacyjności cieplnej ścian budynków mieszkalnych, cz I - metody. Przegląd budowlany, 1/1989.

83. Mayer E.: Thermische Behaglichkeit in Räumen Neue Beurteilungs - und Massmöglichkeiten. Gesundheits Ingenier, 1/1989.
84. Mayiner S.: Thermodynamik. Springer Verlag, Berlin 1990.

85. Michalski L., Eckrersdorf K.: Pomiary temperatur. WNT, Warszawa 1986.

86. Mill P. A. D., McIntosh G. B.: The application of thermography for building and industrial energy management. Library of Congress Cataloging - in Publication Duty, A. Wiley Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc., New York, Chichester 1989.

87. Mochnacki B., Suchy J.: Modelowanie i symulacja krzepnięcia odlewów. PWN, Warszawa 1993.

88. Niederliński A.: Systemy i sterowanie. Wstęp do automatyki i cybernetyki technicznej. PWN, Warszawa 1983. 89. Nowakowski W., Boratyński A., Borowiecki J.: System interfejsu IEC - 625. WKiL, Warszawa 1984. 90. Oleskowicz, Popiel Cz., Bogusławski L.: Czujniki strumieni ciepła. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1986. 91. Ostapiuk J. Rzeszotarski A.: Zewnętrzne przegrody budowlane świetle badań termowizyjnych i obliczeniowych. w XXXIV Konferencja nauk. KILiW PAN i KNPZITB, Gliwice - Krynica 1988. t.6. 92. Petela R.: Przepływ ciepła. PWN, Warszawa 1983. 93. Petterson B., Axen B.: Thermography. Stockholm 1980. 94. Piotrowski J.: Teoria pomiarów. PWN, Warszawa 1986. 95. Płoński W.: Termorenowacja budynków modernizowanych. XXXIV Konferencja Naukowa KILiW PAN i KNPZITB, Gliwice - Krynica 1988, t.6. 96. Płoński W., Pogorzelski A.: Fizyka budowli. Arkady, Warszawa 1979. 97. Pluta W.: Wielowymiarowa analiza porównawcza w badaniach ekonomicznych. PWE, Warszawa 1977. 98. PN-83/T-06536. System interfejsu do programowanej aparatury pomiarowej.

99. PN-91/B-02020. Ochrona cieplna budynków.

100. PN-59/M-53852. Platynowe mierniki termoelektryczne.

101. Pogorzelski J. Urban Ł.: Ustroje budowlane, cz. I, PWSZ, Warszawa 1952.

102. Pogorzelski J.: Modele fizyczno-matematyczne wybranych zagadnień fizyki cieplnej budowli. Prace naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej nr 37, Wrocław 1988.

103. Pogorzelski J., Firkowicz K.: Nowe techniki pomiaru współczynnika przenikania ciepła k i przewodności cieplnej. Praca NB nr NF-84/ITB 1987/89.

104. Pogorzelski J. A. Firkowicz K. Kostrzewa J.: Przygotowanie badań w budynkach doświadczalnych. Praca naukowo -badawcza nr NF-86, ITB, Warszawa 1988.

142

105. Pogorzelski J., Firkowicz K., Kostrzewa J., Panek A.: Wpływ czasu pomiarów na identyfikowaną wartość oporu cieplnego przegród w budynku. XXXIV Konferencja Naukowa, Krynica 1990, t.4. 106. Poppei J., Rogaß H., Dreyer J.: Ausgewählte Messverfahren zur Schnellbestimmung der Wärmedämmung. Wissenschaftliche Zeitschrift der Ingenieur, Hochschule, Cottbus 1987. 107. Prażewska M.: Niezawodność urządzeń elektronicznych, WKŁ, Warszawa 1987. 108. Profos P.: Handbuch der Industriellen Messtechnik. Vulkan Verlag, Essen 1981. 109. Pyszniak J.: Metody badania izolacyjności cieplnej oraz Użytkowanie, wilgotności ścian budynków wielkopłytowych. Konserwacja, Remonty, 1-2/1987. 110. Rietschel H.: Podręcznik ogrzewania i wietrzenia. Arkady, Warszawa 1963. 111. Roberts C.O., Reinke K .: Thermal Measurements of Building Envelope Components In The Field. ASHRAE JOURNAL, 3/1982. 112. Rogaß H., Dreyer J., Donath A.: Wärmedämmesungen mit aufeprägten Temperaturfeldern. Bauphysik, 3/1989. 113. Rogaß H., Dreyer J.: Mikrorechnergestütztes Meßgerät zum Bestimmung des Wärmedurchlaß widerstandes von Gebäudewänden. Bauinformation, Wissenschaft und Technik, 3/1986. L., Mikoś J.: Ekonomika budownictwa. Rowiński 114. PWN. Warszawa 1987. Wielokryterialne wspomaganie decyzji. WNT, 115. Roy B.: Warszawa 1990. 116. Rozenberg W.J.: Wstęp do teorii błędów systemów pomiarowych. PWN, Warszawa 1982. 117. Rymarczyk Z., Bischoff S.: Zastosowanie termowizji do oceny izolacji cieplnej budynków. OBR Wyrobów Instalacyjno-Sanitarnych i Grzewczych w Radomiu (maszynopis). 118. Sala A.: Radiacyjna wymiana ciepła. WNT, Warszawa 1982. 119. Siegiel R., Howell J.R.: Thermal radiation heat transfer. Mc Graw Hill Book Company, New York 1972.
120. Śliwowski L.: Komfort cieplny w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej 16, Wrocław 1982.

121. Sliwowski L. i inni.: A Building and his Physical Environment. Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1992.

122. Sprecht H.: Einsatz der Thermographie im Bauwesen -Möglichkeiten und Grenzen. ETA, 1/1982.

123. Stainton W. D.: Quantitative Interpretation of Building Thermograms. IRIF, Toronto 1987.

124. Staniszewski B.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1980.

125. Stupperich F.R.: Wärmeschutz im Hochbau. Verlag CF. Müller, Karlsruhe 1979.

126. Sydenhan P. H.: Rozważania o stanie statycznym i stanie ustalonym. Podręcznik metrologii, cz. II, WKiŁ, Warszawa 1990. 127. Sydenham P. H.: Etalony i normy w miernictwie. Problemy podstawowe i praktyczne. Podręcznik metrologii, cz. I, WKiŁ, Warszawa 1988.

128. Szydłowski H.: Teoria pomiarów. PWN, Warszawa 1981.

129. Thermal insulation: materials and systems - A conference sponsored by ASTM committee C-16 on Thermal Insulation Dallas, TX, 2 ÷ 6 Dec. 1984 Powell/Matthews, Philadelphia 1987.

130. Trethowen H.: Measurement Errors with surface mounted Heat Flux meters. Building and Enviroment, Vol. 21, 1/1986.

131. Venzmer H., Klein A.: Hilfswand - Meßanordnung auf dielektrischen Basis zur Messung von Wärmeströmen in Bauwerksteilen. Bauzeitung, 3/1987.

132. Venzmer H., Klein A.: Wärmeflußmeßanordnung A-WFM-1 zur Bauwerksdiagnostik. Bauzeitung, 6/1987.

133. Wagner W.: Wärmeübertragung. Vogel Verlag, Würzburg 1989.134. Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. PWN, Warszawa 1979.

135. Wojdyga K.: Pomiary współczynnika przenikania ciepła k przegród budowlanych w warunkach nieustalonej wymiany ciepła.
Zeszyty Naukowe WSI nr 88, Budownictwo 19, Zielona Góra 1989.
136. Wojdyga K.: Metody pomiarów zmiennych strumieni ciepła w rzeczywistych przegrodach budowlanych. (praca doktorska), Politechnika Warszawska, Warszawa 1985.

### Wykaz waźniejszych oznaczeń

A. Podstawowe wielkości fizyczy	ne
a - współczynnik wyrówna	nia temperatury
A - absorbcyjność	A DESCRIPTION OF THE OWNER OWNER OF THE OWNER OWNER OF THE OWNER OF THE OWNER OF THE OWNER OWNE
c - ciepło właściwe	
F - powierzchnia	
I - natężenie promieniowa	ania
1, d - wymiar liniowy	
q - gęstość strumienia c. O (E) - ciepło (energia)	iepła
t. T - temperatura powietrz	a
α - współczynnik przejmo	wania ciepła
$\lambda$ - współczynnik przewod	zenia ciepła
o – gestość materiału	
Λτ - czas pomiaru (różnica	a czasu)
· temperatura powierzci	nni przegrody
$\Delta \vartheta$ . $\Delta T$ - różnica temperatur	
<ul> <li>Φ - strumień ciepła</li> </ul>	
-	
B. Stosowane indeksy	
<ul> <li>od zewnątrz</li> </ul>	
1 - od wewnątrz	
J,n,m - liczby kolejne	
<ul> <li>składowa konwekcyjna</li> <li>pł - płyn</li> </ul>	
r - składowa radiacvina	

s - wykroplenie

ść – ściana

- śr wartość średnia
- x,y współrzędne miejsca
- β kąt

-

- stopień
  - (kreska nad oznaczeniem) średnie wartości

## C. Stosowane charakterystyki termoizolacyjności przegród

Nazwa	Oznaczenie	Jednostka
Współczynnik przenikania ciepła	k	$\frac{W}{m^2 K}$
Konduktancja clepina przegrody	Λ	$\frac{W}{m^2 K}$
Opór ciepiny przegrody	R	$\frac{m^2 K}{W}$
Opór cieplny warstw materiału przegrody	R <sub>λ</sub>	$\frac{m^2 K}{W}$
Opór przejmowania ciepła	R <sub>1</sub> R <sub>e</sub>	$\frac{m^2 K}{W}$

D. Zastosowane charakterystyki liczb podobieństwa (bezwymiarowe temperatury)

Nazwa	Oznaczenie	Zapis
Liczba kryterialna Biota	Bi	$\frac{\alpha \ l_{\circ}}{\lambda}$
Skorygowana liczba Biota	Bis	$\frac{\vartheta_1 - \vartheta_e}{t_1 - \vartheta_1}$
Indeks temperaturowy	TI	$\frac{\vartheta_i - t_e}{t_i - t_e}$
Wskażnik pomiarowy	TP	$\frac{\vartheta_1 - \vartheta_e}{t_1 - \vartheta_e}$
Bezwymiarowa temperatura	θ	$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta T}$

146

E. Skróty podstawowych nazw

CTP - charakterystyka termolzolacyjnosci przegrody
NDT - non-destructive testing - metoda nieniszcząca
SEP - sytuacja eksploatacyjna przegrody
TDC - temperaturowa diagnostyka cieplna

### Podstawy temperaturowej diagnostyki izolacyjności cieplnej przegród budowlanych

#### Streszczenie

Jednym z głównych kierunków działań racjonalizacji zużycia energii jest jej oszczędność w istniejących zasobach budowlanych oraz w nowo projektowanych obiektach. Potrzebne są więc skuteczne technologie ocieplania, które oprócz ograniczenia strat ciepła zwiększą trwałość ścian budynków. Wymaga to m.in. wprowadzenia prostych i szybkich metod diagnostyki obiektów budowlanych, pozwalających ocenić stan izolacyjności termicznej zewnętrznych przegród budowlanych.

W pracy przeanalizowano i oceniono stosowane metody diagnostyki cieplnej przegród. Stosowane metody badań termoizolacyjności przegród wykorzystują zwykle pomiar gęstości strumienia cieplnego. Wada tych metod jest brak znormalizowanych wzorców pomiarowych, a także długi okres prowadzenia badań.

Przedstawiono nową metodę diagnostyki temperaturowej, nie wymagającą pomiaru gęstości strumienia cieplnego. Zaproponowana metodyka postępowania opiera się na charakterystyce określonej przez bezwymiarową temperaturę TP.

Opracowanie metody stało się możliwe dzięki zastosowaniu prototypowego systemu pomiarowo-informatycznego. W celu wdrożenia metody opracowano analizator do wyznaczenia wartości wprowadzonej charakterystyki.

Zaproponowana nowa metodyka badań diagnostycznych pozwala więc na prowadzenie szybkiej i prostej diagnostyki cieplnej jako wyjściowego stadium prognozowania w zakresie termorenowacji budynków. Umożliwia ona ocenę izolacyjności termicznej zewnętrznych przegród budowlanych z dokładnością wystarczającą do określenia wielkości docieplenia.

148

# Foundations of the temperature diagnostic test of the building envelope thermal insulation

### Summary

Saving energy in the existing building stock and newly designed objects is one of the main directions of the rationalisation of it's consumption. Thus there is a need for effective techniques of upgrading insulation which apart from reducting the heat loses. Contribute to the greater durability of the building external walls. This requires among others, the introduction of simple and fast methods of inspection of buildings which make the evaluation of the thermal insulation performance of the building envelope possible.

In this work the currently used methods of the thermal survey of building envelope, have been analyzed and evaluated. These methods usually utilize the heat flux density measurements. Their weakness is connected with the lack of the standardized sample and long duration of testing.

In the dissertation a new method of the temperature diagnostic test which does not require the measurements of the heat flux density is presented. The proposed technique is based on the characteristic determined by the non-dimensional temperature TP. The elaboration of the method was possible after application of the prototype of the data acquisition and analysis system. In order to implement the method, an analyser for determining the introduced characteristic value has been worked out.

The new technique developed by the another makes it possible to carry out simple and fast thermal diagnostic test of the building envelope as the forst step in the prognosis of it's thermo-renovation of buildings. It allows to determine with the adequate accuracy how much insulation should be added to upgrade it to the necessary level.

## Grundlagen Temperaturbedingter Diagnostizierung Isolirender Eigenschaften von Aussenwanden

### Zusammenfassung

Zu den wichtigsten, energiesparenden Maßnahmen zählen Vorhaben, deren Aufgabe sowohl die Energieeinsparung in den bestehenden Gebäuden als auch im Neubau ist.

Es werden somit für den Bedarf des Bauwesens effektive Systeme benötigt, die neben der Gewährung optimaler Wärmedämmung auch für die Erhöhung Lebensdauer der Außenwände sorgen.

Dies bedarf den Einsatz einfacher und schneller Diagnostizierungsverfahren, mittels derer bestehende wärmedämmende Eigenschaften von Außenwänden ermitteldt werden können.

In der vorstehenden wissenschaftlichen Arbeit wurden die, derzeit in der Bauphysik bekannten und angewandten Diagnostizierungsverfahren analysiert und ausgewertet. Daraus resultiert die Feststellung, daß den meisten, derzeit in der Praxis angewandten Untersuchungsmethoden wärmedämmender Eigenschaften von Ausenwänden, die Messung der Dichte von Wärmeströmen zugrundegelegt wird.

Nachteil dieser Verfahren ist sowohl der Mangel an normalisierten, einheitlichen Meßverfahren als auch die Dauer durchzuführender Untersuchungen.

In der vorstehenden wissenschaftlichen Arbeit wurde ein modernes Temperatur-Meßverfahren dargestellt, das auf die Messung der Wärmestromdichte verzichtet.

Das vorgeschlagene Verfahren basiert auf der Charakteristik meßeinheitslosen Temperatur TP.

Die Erarbeitung des Verfahrens war dank dem Einsatz des Prototyps eines Meß-Informationsverfahrens möglich.

Zum Zweck der Durchführung des o.g. Verfahrens wird ein Analysator eingesetzt, der der Ermittlung eingeführter Einheit dient. Das neue Diagnostizierungs-Meßverfahren ermöglicht den Einsatz eines schnellen und verhältnismäßig einfachen Diagnostizierungsverfahrens, das als ein weiteres, wichtiges Stadium in der Entwicklung moderner Prognostizierungsverfahren im Bereich der Wärmedämmtechnik zu betrachten ist.

Das genannte Verfahren ermöglicht mit ausreichender Genauigkeit die Beurteilung wärmedämmender Eigenschaften von Außenwänden.

