ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

MARIAN B. NANTKA

PROBLEMY IDENTYFIKACJI PRZEPŁYWÓW I WYMIANY POWIETRZA W BUDYNKACH WIELOSTREFOWYCH Z WENTYLACJĄ NATURALNĄ

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA

Z.36
GLIWICE
1993

POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE
Nr 1214

MARIAN B. NANTKA

PROBLEMY IDENTYFIKACJI PRZEPŁYWÓW I WYMIANY POWIETRZA W BUDYNKACH WIELOSTREFOWYCH Z WENTYLACJĄ NATURALNĄ

GLIWICE 1993

OPINIODAWCY

Prof. nadzw. dr. hab. inż. Teresa Jędrzejewska-Ścibak

Dr hab. inż. Edward Szczechowiak-Prof. Politechniki Poznańskiej

KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY — Prof. dr hab. inż. Jan Bandrowski

REDAKTOR DZIAŁU — Dr inż. Zbigniew Trzeciakiewicz

SEKRETARZ REDAKCJI — Mgr Elżbieta Leśko

REDAKCJA

Mgr Anna Błażkiewicz

REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą

Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0867-6038

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej

ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakł. 150+83 Ark. wyd. 8 Ark. druk. 7 Papier offset. kl. III 70x100,80g

Oddano do druku 9.09.1993 Podpis. do druku 9.09.1993 Druk ukończ. w październiku 1993

Cena 28.000,–

Druk, "ROLEK", Gliwice, ul.Kazimierza Wielkiego 4

SPIS TREŚCI

	Str.
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	9
1. WPROWADZENIE	11
2. PRZEGLĄD PROBLEMATYKI BADAŃ WYMIANY POWIETRZA W BUDYNKACH	16
2.1. Stan dotychczasowy w zakresie ocen wymiany powietrza	16
2.2. Oceny wymiany powietrza	17
2.3. Wpływ struktury wewnętrznej budynków na przepływy powietrza	20
2.4. Podstawowe problemy w dziedzinie ocen naturalnej wymiany powietrza	21
3. WYNIKI BADAŃ JAKO ŹRÓDŁO WIEDZY O WYMIANIE I WEWNĘTRZNYCH PRZEPŁYWACH POWIETRZA	24
3.1. Charakterystyki przepływów i wymiany powietrza	24
3.2. Wyniki pomiarów procesu wymiany powietrza	30
3.2.1. Wymiana powietrza w przestrzeni budynku	30
3.2.2. Przepływy powietrza w mieszkaniach	32
3.2.3. Przepływy powietrza przez kanały wentylacji naturalnej	35
3.2.4. Ocena warunków przepływu powietrza w klatce schodowej	37
3.3. Ocena przydatności pomiarów w badaniach przepływów powietrza w budynkach o złożonej strukturze wewnętrznej	39
4. ANALITYCZNE METODY IDENTYFIKACJI PRZEPŁYWÓW I WYMIANY POWIETRZA	41
4.1. Struktura modeli matematycznych	41
4.2. Charakterystyka wielostrefowych modeli matematycznych	43
4.3. Sformułowanie problemu badań przepływów i wymiany powietrza w budynkach wielostrefowych	51
5. PROPONOWANA METODA BADANIA WYMIANY POWIETRZA W WIELOSTREFOWYCH BUDYNKACH MIESZKALNYCH	54
5.1. Założenia wstępne	54
5.2. Strefowanie wewnętrznej przestrzeni budynków	56
5.2.1. Części mieszkalne budynków	56
5.2.2. Przestrzenie pionowe przechodzące przez całą wysokość budynków	57
5.3. Model systemu zastępczego	61
5.4. Model matematyczny przepływów powietrza i jego realizacja	64
5.4.1. Ogólna koncepcja obliczeń iteracyjnych	64
5.4.2. Zasady realizacji obliczeń w modelu wielostrefowym	66
5.4.3. Definiowanie danych wejściowych do realizacji modelu	70

5.5. Przeprowadzanie symulacji przepływów powietrza ... 73

5.5.1. Realizacja modelu matematycznego ... 73
5.5.2. Charakterystyka programu komputerowego ... 75

5.6. Skuteczność i efektywność proponowanej metody symulacyjnej w odniesieniu do wybranych parametrów i czynników napędowych procesu wymiany powietrza ... 78

5.6.1. Kanały wentylacji naturalnej ... 78
5.6.2. Zróżnicowanie temperatur powietrza wewnętrznego ... 82
5.6.3. Modelowanie oddziaływania wiatru ... 85
5.6.4. Elementy weryfikacji opracowanej metody ... 90

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE ... 93

LITERATURA ... 97

STRESZCZENIE ... 106

CONTENTS

Str.

LIST OF MAIN SYMBOLS 9

1. INTRODUCTION 11

2. REVIEW OF THE PROBLEMS OF AIR EXCHANGE IN BUILDINGS 16
2.1. State of the art of air exchange evaluation 16
2.2. Air exchange evaluation 17
2.3. Influence of building interior structure on air flows 20
2.4. Basic problems of natural air exchange 21

3. TEST RESULTS AS A SOURCE OF KNOWLEDGE OF AIR EXCHANGE AND INTERIOR AIR FLOWS 24
3.1. Characteristic of air flows and air exchange 24
3.2. Results of measurements of air exchange process 30

3.2.1. Air exchange in building space 30
3.2.2. Air flows in flats 32
3.2.3. Air flows in natural ventilation ducts 35
3.2.4. Evaluation of air flow conditions in staircase 37

3.3. Evaluation of usefulness of measurements for testing air flows in building of a complex interior structure 39

4. ANALITYCAL METHODS OF IDENTIFYING AIR FLOWS AND AIR EXCHANGE 41
4.1. Structure of mathematical models 41
4.2. Characteristcs of multizone mathematical method 43
4.3. Formulation of the problem of the testing of air flows and air exchange in multizone buildings 51

5. PROPOSED METHOD OF THE TESTING OF AIR EXCHANGE IN MULTIZONE DWELLING HOUSES 54
5.1. Preliminary assumptions 54
5.2. Zoning of building interior space 56

5.2.1. Habitable parts of buildings 56
5.2.2. The whole building high vertical spaces 57

5.3. Equivalent system model 61
5.4. Mathematical model of air flows and its solution 64

5.4.1. General conception of interative calculations 64
5.4.2. Principle of the execution of calculations in multizone model 66
5.4.3. Definition of input data for the implementation of the model 70

5.5. Simulation of air flows 73

5.5.1. Implementation of mathematical model 73

5.5.2. Computer programme characteristcs 75

5.6. Effectiveness of proposed simulation method in reference to chosen parameters and driving factors of air exchange process 78

5.6.1. Natural ventilation ducts 78
5.6.2. Differences in indoor air temperature 82
5.6.3. Modelling of wind effect 85
5.6.4. Elements of the verification of the developed method 90

6. SUMMARY AND FINAL CONCLUSIONS 93

REFERENCES 97

SUMMARY 106

СОДЕРЖАНИЕ

Стр

ОБОЗНАЧЕНИЯ 4

I. ВСТУПЛЕНИЕ 6

2. ПЕРЕСМОТР ПРОБЛЕМОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДУХООБМЕНА В ЗДАНИЯХ II

2.I. Существующие состояние в оценках воздухообмена II
2.2. Оценки воздухообмена I2
2.3. Влияние внутренной структуры зданий на течение воздуха I5
2.4. Основное проблемы исследования воздухообмена . . I6

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ О ВОЗДУХООБМЕНИЕ И ВНУТРЕННЫХ ТЕЧЕНИЯХ ВОЗДУХА . . . I9

3.I. Характеристика течений и обмен воздуха I9
3.2. Результаты измерений воздухообмена 25
3.2.I. Воздухообмен в пространстве здания 25
3.2.2. Течение воздуха через квартиры 27
3.2.3. Течение воздуха через каналы натуральной вентиляции 30
3.2.4. Оценки условий течения воздуха через лестничное клетки 32
3.3. Оценка пригодностьи измерений для анализирования течений воздуха в зданиях с сложоном внутренном строением 34

4. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕЧЕНИЙ И ОБМЕНА ВОЗДУХА 36

4.I. Структура математических моделей 36
4.2. Характеристика многозонных математических модели 38
4.3. Формулировка проблема исследований течения и обмена воздуха в многозонных зданиях 46

5. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА ВОЗДУХООБМЕНА В МНОГОЗОННЫХ ЖИЛЫХ ЗДАНИЯХ 49

5.I. Заложения предварительные 49
5.2. Зонирование внутренного пространства зданий . . 5I
5.2.I. Жилые части зданий 5I
5.2.2. Вертикальные шахты 52
5.3. Модель замещателного система 56
5.4. Математической модель и его реализация 59
5.4.I. Общая концепция расчётов 60
5.4.2. Основа реализаций расчётов в многозонных моделях 6I
5.4.3. Определение входной информации для реализаци модели 65

5.5. Выполнение расчётов течений воздуха 68
5.5.I. Реализация математического модельа 69
5.5.2. Характеристика расчётного программа 7I
5.6. Эффективность предлагаемой методы при избранных параметров и фактов решающих воздухообмен 73
5.6.I. Каналы естественной вентиляции 73
5.6.2. Дифференйирование внутренной температуры воздуха 78
5.6.3. Моделирование влияния ветра 8I
5.6.4. Элементы верификаци разрабатываеной методы . . . 86

6. РЕЗЮМЕ И ПОСЛЕДНИЕ ПРЕДЛОЖЕНИЯ 89

ЛИТЕРАТУРА 95

РЕЗЮМЕ I06

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I INDEKSÓW

a - współczynnik przenikania powietrza

A - powierzchnia

B - szerokość budynku (wymiar zewnętrzny)

c - współczynnik konwekcji ciśnienia dynamicznego wiatru

h, Δh - odległości pionowe i różnice wysokości (od poziomu dachu budynku)

H - wysokość budynku od poziomu gruntu (wymiar zewnętrzny)

K - kubatura przestrzeni wewnętrznej

l, Σl - długość lub suma długości szczelin w stolarce budowlanej

L - długość budynku (wymiar zewnętrzny)

m, Δm - strumień masy powietrza i jego przyrost

p, Δp - ciśnienie lub różnica ciśnień

$\dot{Q}$ - potrzeby cieplne

r - współczynnik korelacji

S - szczelność przegród i ich elementów ($S = a\Sigma i$)

t, Δt - temperatura lub różnica temperatur (wartości bezwzględne T, ΔT)

$\dot{V}$, V^* - strumień objętości powietrza

w - prędkość wiatru

Symbole greckie

α - wykładnik zależny od rodzaju ruchu powietrza <0,5; 1,0>

β - wykładnik określający zmianę pionowego gradientu prędkości wiatru

δ - współczynnik uzależniony od rodzaju i zabudowy terenu dla określenia zmiany pionowego gradientu prędkości wiatru

ε - dokładność procesu iteracyjnego

$\Delta\upsilon$ - przyrost objętości powietrza w rozważanej strefie

Θ - kierunek działania wiatru

σ - odchylenie standardowe

τ, $\Delta\tau$ - czas lub długość kroku czasowego

Indeksy

d - numer strefy docelowej w systemie zastępczym

dw - drzwi wejściowe do mieszkań

DW - drzwi wejściowe do budynku

i - numer kondygnacji budynku (poziomu w systemie); także numer rozpatrywanej strefy

j - numer stref sąsiednich do rozpatrywanej "i"

k - kolejny numer iteracji

KL - klatka schodowa

KW - kanały wentylacyjne

m - wartości pomiarowe, także średnie

n, N - ilość serii pomiarowych lub symulacji

o - wartości obliczeniowe

w - warunki wewnętrzne

wd - główny wylot powietrza z kanałów wentylacyjnych

x - numer połączenia strefy "i" ze strefą sąsiednią "j"

z - warunki zewnętrzne, także numer strefy źródłowej w systemie zastępczym

Znaczenia skrótów

C - wartości całkowite

IN - infiltracja powietrza z otoczenia zewnętrznego

OC - ochrona cieplna budynku

PC - przenikanie ciepła

PP - przenikanie powietrza

RW - rodzaj wentylacji

WP - wymiana powietrza

1. WPROWADZENIE

Powszechnie uznaną potrzebą w działalności gospodarczej jest oszczędność energii w procesach ogrzewania i wentylacji budynków. Jest ona realizowana przez wprowadzanie przegród o lepszych własnościach izolacyjnych oraz doskonalenie cieplnych i ruchowych właściwości układów ogrzewania i wentylacji.

Niniejsza praca dotyczy jednego z czynników kształtujących potrzeby cieplne budynków, jakim jest proces wymiany powietrza. Ilość energii cieplnej zużywanej w tym procesie zależy głównie od ilości powietrza wymienianego w budynkach. Ilości te są jednak wynikiem nie tylko działania zastosowanego układu wentylacji, ale również wpływu zjawisk zakłócających, których przykładem są procesy przenikania powietrza przez przegrody budowlane. Procesy te wraz z ich siłami napędowymi stanowią podstawowy czynnik uczestniczący w kształtowaniu wymiany powietrza zachodzącej w budynkach z kanałową wentylacją naturalną będących przedmiotem opracowania.

Ze względu na niedoskonałość rozwiązań wentylacji naturalnej oraz skomplikowany charakter wymiany powietrza zachodzącej w budynkach, jednoznaczne określenie ilości tego powietrza jest nadal trudne do ustalenia. Trudności te występują szczególnie wyraźnie w budynkach o dużej ilości przestrzeni wewnętrznych i są wynikiem m.in. ograniczonych możliwości badania wymiany powietrza z uwagi na właściwości poszczególnych elementów budynku oraz różnorodność i specyfikę dróg przepływu powietrza z zewnątrz do budynków i w ich wnętrzu.

Problem oceny wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych był przedmiotem szeregu prac o różnym stopniu kompleksowości w zakresie uwzględnianych parametrów i czynników oraz dekompozycji rzeczywistej struktury wewnętrznej.

Znamienne dla pierwszego okresu rozwoju metod badawczych są opracowania D. Brandesa [22] i H. Weiera [100]. Do realizacji głównie poznawczych celów badań wykorzystano w nich modele matematyczne sprowadzone do układów nieliniowych równań, bilansujących ilości powietrza przepływające przez wybrane przestrzenie. Autorzy powyższych prac, podkreślając trudności w matematycznej realizacji takich układów, dążą do zmniejszenia ilości równań przez nie zawsze wystarczająco umotywowane ograniczanie liczby przestrzeni. Pomimo braku precyzji zasad agregacji przestrzeni tendencje do upraszczania modeli matematycznych utrzymały się, a nawet pogłębiły. Efektem tego było pojawienie się

dużej ilości metod analitycznych, w których pomijano niektóre elementy budynku lub czynniki kształtujące badane procesy [2, 12, 23, 33, 77, 91], a także sprowadzające budynki do pojedynczej przestrzeni [11, 27, 41, 49, 73]. Jednak niezależnie od sposobu konstruowania modelu budynków podstawową trudnością była ocena realności uzyskiwanych wyników przez ich konfrontację z rezultatami pomiarów.

Już w tym okresie pierwsze prace autora dotyczą zarówno problematyki modelowania matematycznego, jak i prób identyfikacji przepływów i wymiany powietrza drogą pomiarów w budynkach istniejących [57-61, 104, 105]. Publikacje i prace te obejmują testowanie i wykorzystanie metod pomiarowych, oceny ich przydatności do identyfikacji procesów wymiany powietrza oraz weryfikacji modeli matematycznych. Kompleksowość przeprowadzanych prac znacznie wyprzedzała stan zaawansowania podobnych badań wykonywanych w omawianym okresie.

Następny etap rozwoju metod badawczych w zakresie omawianych zagadnień charakteryzuje się opracowywaniem i stopniowym opanowywaniem nowych technik pomiarowych [3, 11, 20, 28, 31, 32, 83, 97]. Wśród nich największe znaczenie dla identyfikacji fizycznej badanych procesów przypisuje się metodom znakowania powietrza gazami wskaźnikowymi. Najwszechstronniejsze analizy w tym zakresie przedstawili R.E. Edwards i C. Irvin [31] oraz M.D.A.E.S. Perera i R.R. Walker [80]. Podkreślając dokładność i możliwość ciągłej rejestracji mierzonych wielkości, zwracają również uwagę na trudności w przeprowadzaniu pomiarów w większej ilości pomieszczeń. Mają one miejsce głównie w budynkach o dużej ilości przestrzeni wewnętrznych, dla których pożądana jest znajomość wpływu wymiany powietrza nie tylko na potrzeby cieplne, ale także komfort cieplny lub migrację zanieczyszczeń. Podobny charakter mają prace autora [65-68, 108, 110]. Skupiają się one na wykonywaniu pomiarów w dużej ilości budynków mieszkalnych w tym również wielorodzinnych, za pomocą różnych metod pomiarowych. W pracach tych podkreślono przyczyny braku reprezentatywności pomiarów przepływu i wymiany powietrza w przypadku grupowania od kilku do kilkunastu pomieszczeń w pojedyncze przestrzenie. Stwierdzono również, że szczególnymi przypadkami utraty reprezentatywności oceny wymiany powietrza są okresy dominującego wpływu wiatru [75, 76] oraz marginalne traktowanie pionowych szybów w budynkach zwłaszcza wielokondygnacyjnych.

Z uwagi na wzajemne połączenie przestrzeni wewnętrznych celowe jest zatem opanowanie umiejętności dokonywania ocen w dowolnej z nich na tle zmian obserwowanych w całym

budynku. Duże perspektywiczne znaczenie dla tak rozumianych ocen mają metody komputerowej symulacji przepływów powietrza, pod warunkiem odpowiedniej kompozycji modelu matematycznego i jego powiązania z rzeczywistym obrazem badanych procesów.

Autor w niniejszym opracowaniu przedstawił wyniki badań nad doskonaleniem metod symulacyjnych w powyżej podanym zakresie. Głównym celem pracy jest stworzenie szerokich możliwości uszczegółowiania wielostrefowego modelu przepływów powietrza oraz dokonywanych z jego pomocą badań symulacyjnych. Realizacja tego celu oznacza przede wszystkim umożliwienie zbierania danych i przygotowania ich do przeprowadzenia analiz statystycznych przestrzennego rozkładu infiltracji i przepływów powietrza wynikających zarówno z podziału budynków na strefy, jak i ze zróżnicowania parametrów i sił napędowych procesu, a w tym również i złożonego oddziaływania wiatru. W ramach dotychczas przeprowadzonych analiz przepływów i wymiany powietrza nie podjęto tak szczegółowych ocen wpływu struktury modelu wielostrefowego na wiarygodność symulacji komputerowej. Tymczasem jest to jedna z głównych przyczyn trudności w uzyskaniu zadowalających wyników obliczeń z punktu widzenia ich przydatności do ocen wymiany powietrza.

Krótki przegląd i omówienie niektórych współczesnych poglądów na temat problemów i rozwoju metod badań wymiany powietrza przedstawiono w rozdziale 2 pracy. Uwagę zwrócono przede wszystkim na zagadnienia związane bezpośrednio z celem pracy, podkreślając trudności w ich rozwiązaniu. W rozdziale 3 pracy zaprezentowano niektóre wyniki pomiarów pomocne przy charakteryzowaniu wymiany powietrza oraz stanowiące zasadnicze źródło wiedzy do jej oceny. Dotyczy to w szczególności określania cech i właściwości przepływów powietrza wynikających z różnorodności ich dróg zarówno w poziomach, jak i pionach budynków, a przede wszystkim w kanałach wentylacji naturalnej i klatkach schodowych.

Rozdział 4 pracy zawiera analizę typowych rozwiązań wielostrefowych modeli matematycznych pod kątem ich przydatności do uzyskiwania podobnych informacji drogą symulacji komputerowej. W wyniku tej analizy sprecyzowane zostały podstawy udoskonalenia tych modeli.

Kluczowe znaczenie dla pracy ma jej rozdział 5. Uzyskane w wyniku wieloletnich badań autora dane pomiarowe i wyniki analiz wykorzystano do opracowania zasad podziału budynków na strefy stanowiące jednostkowe elementy utworzonego w ten sposób złożonego

systemu zastępującego budynek (rozdział 5.2 i 5.3). W stosunku do znanych w tym zakresie rozwiązań charakteryzuje się on gęstszą siecią podziałów odzwierciedlającą rozplanowanie pomieszczeń wewnętrznych oraz nie praktykowanym dotychczas, podziałem pionowych przestrzeni. Z uwagi na ilość wzajemnie połączonych stref oraz wymagania odnośnie do interpretacji fizycznej badanego procesu wykorzystano, nie stosowaną dotychczas w analizach przepływów powietrza, uniwersalną metodę bilansów elementarnych. Adaptacja jej polegała na wprowadzeniu prostej procedury iteracyjnej dostosowanej do wyjściowych równań bilansowych w postaci zwyczajnych równań różniczkowych i sprawdzaniu tych bilansów przy odpowiednio określanych wielkościach kroku czasowego dla różnicowej postaci tych równań (rozdział 5.4).

Efektem końcowym przeprowadzonych badań było opracowanie nowego programu komputerowego (rozdział 5.5). Obejmuje on cały algorytm postępowania, począwszy od konstruowania systemu zastępującego budynek, poprzez opisy jego elementów i ich połączeń, a skończywszy na sposobie dokonywania symulacji. Opracowany program jest elastyczny i podatny na modyfikacje opisów oraz umożliwia w ramach zastosowanych zależności wprowadzanie dowolnych zmian tych opisów. W rozdziale 5.6 przedstawiono ocenę możliwości stosowania metody, jej efektywność oraz pewne elementy weryfikacji. Przedstawione w tym rozdziale rezultaty badań byłyby trudne lub wręcz niemożliwe do osiągnięcia przy zastosowaniu dotychczasowych, znacznie uproszczonych metod symulacyjnych. Wskazano również sposób dokonywania badań symulacyjnych w warunkach wpływu wiatru (rozdział 5.6.3).

W trakcie przeprowadzania analiz pojawił się nie rozwiązany dotychczas problem charakteryzowania przestrzeni pionowych oraz wprowadzania do obliczeń wyników pomiarów. Problem ten został w znacznym stopniu wyjaśniony i ukierunkowany.

Niniejsze opracowanie jest zbieżne z obecnie wykonywanymi pracami dotyczącymi ocen przepływów i wymiany powietrza. Akcentuje ono jednak w znacznie większym stopniu dotychczas pomijany w nich wpływ struktury wewnętrznej budynków mieszkalnych na naturalną wymianę powietrza. Modele wielostrefowe opracowane przez H.E. Feustela i V.M. Kendona [33, 34], M.K. Herrlina [42] czy M.H. Shermana i D.T. Grinsruda [91, 92] nie pozwalają na uzyskiwanie przestrzennych przepływów powietrza w budynkach i zlokalizowanych w nich pomieszczeniach [68]. Proponowana w niniejszym opracowaniu metoda ma właśnie w tym zakresie duże możliwości. Pozwala ona na szybkie uzyskiwanie

wiarygodnych danych o kształtujących się na granicach poszczególnych stref warunków, niezależnie od lokalizacji tych pomieszczeń w budynku, powiązania ze strefami sąsiednimi i zmienności czynników decydujących o wymianie powietrza. Metoda jest również przydatna do analiz statystycznych procesu, pozwalających określać niepewności i niedokładności wynikające z uśrednień opisów oddziaływania wiatru. Możliwa jest zatem realizacja analiz systemów w różnym stopniu agregujących przestrzenie wewnętrzne oraz parametry i czynniki decydujące o badanym procesie. Oznacza to, że dokonywać można weryfikacji matematycznej i w efekcie badać zasadność agregacji bez konieczności wykorzystywania innych metod.

Przedstawiona koncepcja będąca uogólnieniem wieloletnich doświadczeń autora po raz pierwszy podejmuje próbę kompleksowego opisu problemu. Opracowanie nie obejmuje całości problematyki. Ważną jego zaletą jest zwrócenie uwagi na charakter poszczególnych oddziaływań i ich współzależność, co stanowi wypełnienie luki w zakresie systematyzowania i porządkowania omawianych zagadnień. Nie bez znaczenia jest również częściowe wyeliminowanie trudności w dokonywaniu ocen procesu z uwagi na wielostrefowość budynków, a także skonkretyzowanie kierunków dalszych badań.

2. PRZEGLĄD PROBLEMATYKI BADAŃ WYMIANY POWIETRZA W BUDYNKACH

2.1. Stan dotychczasowy w zakresie ocen wymiany powietrza

Oceny przepływów i wymiany powietrza, wobec ich podstawowego znaczenia dla zużycia energii i kształtowania się parametrów mikrośrodowiska mieszkalnego, prowadzone są przez szereg ośrodków naukowych w Wielkiej Brytanii [14, 18, 32, 80, 83, 98], Szwecji [1, 17, 41, 42, 45, 49, 51, 77, 81, 89, 93], USA [12, 13, 26, 32, 34, 91, 92] oraz w wielu innych krajach [21, 23, 24, 37, 55, 56, 85, 86, 96]. Obejmują one szeroki wachlarz zagadnień i odzwierciedlają indywidualne zainteresowania i cele przeprowadzających badania.

Do najbardziej znaczących zaliczyć należy opracowanie realizowane w ramach współpracy międzynarodowej koordynowanej przez IEA[1] oraz jej filię AI&VC[2] [2-11, 28]. Prace te cechuje kompleksowość począwszy od sformułowania stopnia złożoności badanej problematyki, a skończywszy na stosowanych metodach badawczych, włącznie ze stymulowaniem ich rozwoju i dalszego doskonalenia.

Zaobserwować można wyraźny podział opracowań na dwie grupy. Pierwsza z nich dotyczy wentylacji mechanicznej, przy działaniu której wpływ parametrów i czynników naturalnych jest sprowadzony do roli zakłóceń procesu. Prace te koncentrują się głównie na poszukiwaniu metod identyfikacji przepływów powietrza w pojedynczych przestrzeniach na potrzeby ocen jakości procesu wentylacyjnego [10, 15, 38, 39, 54, 90, 98]. Są one w sposób luźny związane z tematyką wchodzącą w zakres niniejszego opracowania, odwrotnie niż ma to miejsce w przypadku prac zaliczanych do drugiej grupy, a dotyczących wentylacji naturalnej.

Siłą napędową naturalnej wymiany powietrza są czynniki sprowadzane w budynkach z wentylacją mechaniczną do roli zakłóceń (np. wypór termiczny, napór wiatru). Wobec dużej losowości i trudności w przewidywaniu równoczesnego ich oddziaływania rzadko podejmowane są pomiary w budynkach istniejących. Z reguły dotyczą one wybranych ich przestrzeni lub parametrów i czynników, przy traktowaniu pozostałych jako mniej istotnych [16, 27, 37, 44, 47, 51, 73]. W przeważającej ilości prac akcentuje się głównie wpływ szczelności przegród zewnętrznych, a szczególnie stolarki budowlanej [7, 11, 46, 50, 69, 77,

---

1 IEA - International Energy Agency
2 AI&VC - Air Infiltration & Ventilation Centre

91]. Charakterystyczne dla tych analiz jest traktowanie budynków od zewnątrz jako pewnej całości. Podejście takie prowadzi do uzyskania prostych opisów procesu wymiany powietrza w postaci modeli jego infiltracji, mających duże znaczenie inżynierskie, lecz pomijających szereg elementów wewnętrznych, a głównie kanałów wentylacji naturalnej i przestrzeni komunikacyjnych [2, 9, 26, 48, 71, 80]. Ma to miejsce głównie w przypadku budynków jednorodzinnych, w których wpływ tych elementów na wymianę powietrza jest niewielki. Potwierdzili to m.in. T. Alereza [12], M.D. Lyberg [50, 51] oraz M.H. Sherman i wsp. [91, 92], podkreślając brak możliwości przenoszenia takich opisów i ocen na inne budynki lub poza sprawdzony pomiarowo zakres zmian właściwości przegród i warunków wymiany powietrza. Stosowanie prostych opisów wymiany powietrza dla budynków o złożonej strukturze wewnętrznej wydaje się nieuzasadnione. Zdaniem autora, prezentowanym zresztą we wcześniejszych opracowaniach [52, 57, 58, 61, 66, 68, 76], głównym tego powodem jest duża rozpiętość intensywności oddziaływań parametrów i czynników wewnętrznych w przestrzeni takich budynków w powiązaniu z otoczeniem zewnętrznym.

Jednym ze sposobów obejścia tych trudności jest stosowanie modeli matematycznych budynków [11, 23, 33, 41, 70, 72, 86, 95]. W modelach takich wprowadza się założenia wyjściowe dotyczące zarówno skupiania przestrzeni wewnętrznych, jak i oddziaływania sił napędowych, co sprawia, że uzyskiwane wyniki nie wychodzą poza zakres ocen ogólnych. Na potrzebę wyjścia poza taki zakres zwracali uwagę M.E. Feustel z wsp. [33, 34] oraz J. Railio i P. Saarnio [86], postulując m.in. konieczność innego niż dotychczas podejścia do modelowania przepływów powietrza w tzw. strukturach wielostrefowych. W opinii autora jednym z elementów takiego podejścia jest wprowadzenie zasad postępowania zmierzających do zachowania w możliwie największym stopniu kompleksowości i uniwersalności. Dotyczy to głównie możliwości dokonywania ocen wpływu wewnętrznych przepływów międzystrefowych na wymianę powietrza z otoczeniem zewnętrznym.

2.2. Oceny wymiany powietrza

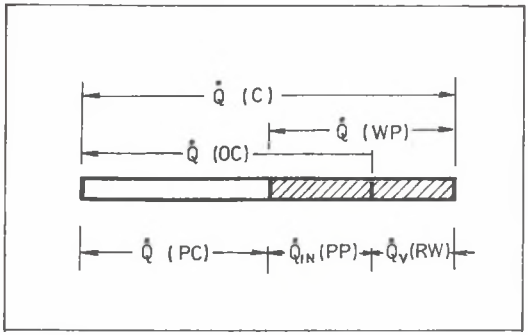
Wymiana powietrza jest jednym z procesów zachodzących w systemie, jaki stanowi budynek wraz z wyposażającymi go instalacjami ogrzewania i wentylacji.

Wśród wielu aspektów ocen wymiany powietrza jednym z często podkreślanych jest jej wpływ na zużycie energii [15, 22, 23, 24, 29, 37, 43, 64, 95]. Analizy możliwości ograniczenia zużycia energii wskazują głównie na kierunki mające największy udział decyzyjny.

Minimalizacja zużycia ciepła oznacza w tym przypadku głównie ograniczenie strat ciepła budynków. Jest to realizowane drogą zwiększania izolacyjności cieplnej i szczelności przegród budowlanych. Problem izolacyjności cieplnej przegród jest dobrze rozpoznany i sukcesywnie rozwiązywany. Natomiast rozwiązanie zagadnienia szczelności przegród wciąż napotyka na trudności. Wynikają one nie tylko z nie do końca rozpoznanego charakteru procesów przenikania powietrza (infiltracja, eksfiltracja) i ich oddziaływania na wewnętrzne przepływy powietrza. Kłopotliwe jest również pogodzenie dwóch przeciwstawnych koncepcji co do minimalizacji ilości powietrza wymaganego w pomieszczeniach i budynkach [13, 38, 61, 112, 114, 116, 118]. Nie wnikając w słuszność tych koncepcji, możliwe jest jednak dokonywanie analiz z uwagi na kształtowanie potrzeb cieplnych budynków. Przykładem takich analiz są badania wykonane m.in. na Uniwersytecie w Sztokholmie [1, 46, 47, 49, 77, 81, 89]. Objęto nimi typowe budynki jednorodzinne z wentylacją naturalną, dla których zastosowano różnego rodzaju procedury obliczeniowe do analiz całkowitych potrzeb cieplnych.

Podobny charakter, lecz znacznie większy zakres z uwzględnieniem również wyników pomiarów miały analizy wykonane przez autora opracowania. Dotyczyły one ponad 90 budynków mieszkalnych, w tym w większości - budynków wielorodzinnych. Na drodze pomiarów oraz przy wykorzystaniu opracowanych algorytmów obliczeniowych określono wartości wielkości reprezentatywnych dla poszczególnych składników bilansu potrzeb cieplnych [59-62, 64, 115, 118]. Najistotniejszym efektem tych prac było podanie pełniejszych niż dotychczas sposobów ocen zasadniczych strat ciepła z uwzględnieniem szerokiego zakresu wielkości je opisujących [100, 101]. Zasadę opracowanych metod przedstawiono schematycznie na rys. 2.1. Główną ich zaletą jest możliwość wydzielenia w ocenach niekontrolowanych procesów przenikania powietrza (IN-infiltracja) oraz dostosowanie do sposobu przeprowadzania analiz pakietu programów komputerowych opisujących te procesy.

Istotne znaczenie tak opracowanych metod polega na możliwości wyznaczania optymalnych wartości wielkości opisujących jeden z elementów składowych, przy ustaleniu drugiego z nich. W omawianym przypadku dotyczy to głównie współczynników przenikania powietrza przy założonej, minimalnej wymianie powietrza oraz izolacyjności cieplnej przegród. Dodatkową zaletą jest możliwość wyboru rodzaju wentylacji realizującej przyjętą wymianę powietrza. Możliwości te ilustrują prace [64, 65, 106, 107, 110], w których zamieszczono nomogramy pozwalające na szybkie dokonywanie ocen w powyższym zakresie.



Rys. 2.1. Podział zasadniczych strat ciepła budynków [62, 64]:C - wielkość całkowita; OC - ochrona cieplna; WP - wymiana powietrza; PC - przenikanie ciepła; PP - przenikanie powietrza (infiltracja); RW - rodzaj wentylacji

Fig. 2.1. The division of principal heat losses of buildings [62,64]: C - total value; OC - thermal protection; WP - total air change; PC - heat transmission; PP - air leakage; RW - type of ventilation

Warto podkreślić, że opracowane zasady postępowania, wielokrotnie postulowane w szeregu znaczących prac [11, 12, 28, 34, 85], systematyzują problematykę i wydzielają z niej zagadnienia będące obiektem zainteresowań specjalistów fizyki budowli lub aerodynamiki. Niemniej zastosowane w powyższych metodach opisy procesów naturalnej wymiany powietrza charakteryzują się daleko idącymi uproszczeniami. Sprowadzają one budynek do przestrzeni o jednolitych rozkładach oddziaływających parametrów i czynników. Takie traktowanie budynków jest w wielu przypadkach niewystarczające. Niemożliwe jest tutaj określenie, w jaki sposób odbywa się wymiana powietrza wewnątrz budynków, co utrudnia określenie potrzeb cieplnych zlokalizowanych w nich pomieszczeń, a także nie pozwala na wnioskowanie o komforcie cieplnym lub migracji zanieczyszczeń w obrębie budynków [9, 10, 39, 41, 89, 113, 114, 120]. Uzyskane wyniki mogą być jednak z powodzeniem wykorzystywane do ustalenia warunków wstępnych ocen bardziej precyzyjnych, w których budynki byłyby rozpatrywane od wewnątrz jako zbiory określonej ilości przestrzeni wewnętrznych.

2.3. Wpływ struktury wewnętrznej budynków na przepływy powietrza

Przepływy powietrza przez budynki wywołane są dużą ilością jednocześnie oddziaływających parametrów i czynników mających charakter wymuszeń i zakłóceń. W tej sytuacji pomijanie jakiegokolwiek z nich nie wydaje się uzasadnione. Dotyczy to również warunków wewnętrznych, stymulujących przepływy powietrza pomiędzy poszczególnymi przestrzeniami wewnętrznymi. Problem ten łączy się ze strukturą budynków, przy czym z uwagi na specyfikę procesów naturalnej wymiany powietrza niezbędne jest tutaj wyjście poza tradycyjny sposób jej definiowania.

Zagadnienie to pojawiło się w szerszej skali w pracach R.E. Edwardsa [31], M.E. Feustela [34], J. Railio i wsp. [85, 86] oraz niektórych opracowaniach autora [67, 73, 111, 117, 119]. Początkowo strukturę wiązano jedynie z istnieniem głównych ścian działowych w budynkach. Efektem tego było m.in. tworzenie modeli budynków, w których strefami były najpierw poszczególne kondygnacje, a później - mieszkania. Jednak stosunkowo szybko okazało się to niewystarczające. Wykazano, że wymiana powietrza ustalona jako średnia dla tych przestrzeni, nie zawsze jest reprezentatywna dla poszczególnych pomieszczeń. Zwracali na to uwagę m.in. D.L. Bohac i wsp. [20] i M.D. Lyberg [60] stwierdzając, że ilości powietrza wymienianego w pomieszczeniach z otoczeniem zewnętrznym, szczególnie przy dominacji naporu wiatru, mogą różnić się kilkakrotnie w stosunku do wartości średnich dla przestrzeni, w których skład one wchodzą.

Jednak istnieją ważniejsze przyczyny takiego stanu rzeczy. Do istotniejszych można zaliczyć wybór sposobu określania przepływów powietrza w przestrzeniach przechodzących przez całą wysokość budynków, takich jak klatki schodowe i kanały wentylacji naturalnej. Zakłócający wpływ klatek schodowych na wymianę powietrza w przyległych do nich częściach mieszkalnych badali m.in. M.E. Feustel [34] oraz A.S. Zohrabian i wsp. [103]. Kształtujące się wzdłuż ich wysokości warunki cieplne i przepływowe osłabiają lub potęgują intensywność przepływów powietrza w przyległych do nich pomieszczeniach. Jednak brak jest zadowalających sposobów uwzględniania charakterystycznej dla tych szybów zmienności parametrów powietrza, a także nie jest w pełni znany zakres ich wpływu na wymianę powietrza.

Podobne zastrzeżenia dotyczą kanałów wentylacji naturalnej. Przy stosowanych dotychczas zasadach agregacji przestrzeni wewnętrznych trudne jest uwzględnienie ich wpływu na pomieszczenia bezpośrednio przez nie wentylowane [48, 72, 73, 110, 111, 119]. Jest to

tym istotniejsze, że charakterystyczna jest tu nieproporcjonalność tych oddziaływań wzdłuż wysokości poszczególnych kanałów. Powodują one zmiany ilości powietrza wentylacyjnego w obrębie pojedynczego kanału, sięgające nawet do kilkudziesięciu procent.

Wszystko to sprawia, że potrzebne staje się zupełnie inne niż dotychczas traktowanie wewnętrznej przestrzeni budynków z kanałową wentylacją naturalną. Dokonywane tutaj podziały powinny obejmować nie tylko części mieszkalne, lecz również przestrzenie pionowe. W tym celu wskazane wydaje się przeprowadzenie pomiarów w budynku reprezentatywnym dla omawianej grupy obiektów oraz wykorzystanie uzyskanych danych do nowego opracowania zasad ich podziału. Zadaniem autora ma to podstawowe znaczenie dla modelowania badanego procesu i uwiarygodnienia wyników jego analiz.

2.4. Podstawowe problemy w dziedzinie ocen naturalnej wymiany powietrza

Dokonywanie ocen procesu wymiany powietrza wymaga dobrej znajomości badanych budynków. Niezależnie od stosowanej metody badawczej niezbędna jest znajomość charakterystyk tych ich cech, które determinują wartość i zmienność procesu. Oprócz informacji geometrycznych istotne są więc dane o charakterystykach przenikania powietrza przez przegrody oraz charakterystykach przepływowych dla kanałów wentylacji naturalnej i szybów pionowych.

Procesy przenikania powietrza przez przegrody lub ich elementy są dość dobrze poznane, a zebranie informacji o wartościach wielkości je opisujących nie stwarza istotnych trudności [5, 7, 11, 26, 41, 63, 104-110]. Dotyczy to również elementów przepuszczalnych dla powietrza w przegrodach wewnętrznych [63, 79, 110].

Uzyskanie danych charakteryzujących ruch powietrza w przestrzeniach pionowych wymaga przeprowadzenia pomiarów i uściślenia na podstawie otrzymanych wyników pomiarów indywidualnych ich cech i własności [3, 6, 11, 35, 46, 59, 66, 88, 106]. Pewne informacje w tym zakresie uzyskać można również na podstawie analizy połączeń oporów przepływu powietrza w obrębie zastępujących te przestrzenie sieci połączeń [41, 110], wymagających jednak nadal konfrontacji z danymi pomiarowymi.

Wśród czynników określających siły napędowe badanego procesu najlepiej poznany i stosunkowo prosty do określenia jest wypór termiczny. Jednak i w tym przypadku istnieją wątpliwości co do zakresu wpływu zmian temperatur powietrza w obrębie poszczególnych przestrzeni, a szczególnie przestrzeni pionowych.

Mechanizm oddziaływania wiatru na budynki nie jest w pełni poznany [75, 78, 82, 91, 101]. Powszechną praktyką jest zastępowanie rzeczywistych fluktuacji ciśnień statycznych na przegrodach zewnętrznych uśrednionymi wielkościami współczynników konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru. Pomijane są w ten sposób losowe wpływy zmian kierunków wiatru i ich deformacja wywoływana określoną zabudową terenu. Z uwagi na duże trudności pomiarowe wielkości tych współczynników określa się drogą badań modeli budynków [2, 5, 21, 73, 104-110] i są one z reguły uśredniane dla poszczególnych przegród zewnętrznych. Brak jest dotychczas ocen wpływu zmienności tych współczynników na powierzchniach poszczególnych przegród, co wydaje się jedną z przyczyn upraszczania wprowadzanych opisów.

Całościowe rozwiązanie powyższej problematyki wykracza poza cele niniejszego opracowania. Jednak ze względu na jego zakres za wskazane uznać można dokonanie analiz z uwzględnieniem dostępnych obecnie sposobów określania zmienności współczynników konwersji wiatru na powierzchniach przegród zewnętrznych, wywołanych zmianą kierunku wiatru i zabudową terenu [94, 101].

Procesy naturalnej wymiany powietrza są trudne do oceny na drodze pomiarowej. Praktycznie najdokładniejsze są metody znakowania gazami wskaźnikowymi, wykorzystujące zautomatyzowane stanowiska pomiarowe [3, 11, 32, 67, 80, 83, 108]. Główną ich zaletą jest możliwość ciągłej rejestracji badanych bezpośrednio zmian stężeń wskaźnika lub jego ilości w zależności od stosowanych odmian tej metody [11, 108]. Do jej wad zalicza się m.in. brak dopracowania metodyki pomiarów w zakresie dostarczania znacznika i poboru próbek powietrza do analizy, a także trudności w jednoznacznym określeniu, jaką drogą odbywa się mierzona wymiana powietrza. Zwracają na to uwagę D'Ottavio i wsp. [30], R.R. Walker [97] oraz autor [67, 68, 108, 110], proponując uzupełnienie badań rejestracją stanu czynników decydujących o procesie, a w tym również i warunków ciśnieniowych kształtujących się w badanych przestrzeniach.

Druga grupa metod pomiarowych zakłada zebranie informacji o procesie w sposób pośredni. Jest to duża ilość prostych metod identyfikacyjnych oraz klasyczne testy ciśnieniowe obejmujące poszczególne elementy, przegrody lub przestrzenie [3, 7, 11, 41, 61, 70, 82, 93, 108, 110]. Polegają one na sztucznym wytworzeniu w obrębie badanych elementów lub przestrzeni określonych różnic ciśnień i ustaleniu na ich podstawie charakterystyk przepływowych. Uzyskane w ten sposób dane mają duże znaczenie dla badań ekspertyzowych i często wchodzą w zakres diagnostyki budynków [6, 110]. Mogą one być i są

wykorzystywane również jako dane wejściowe do realizacji modeli matematycznych. W zakresie badań ciśnieniowych odnotować należy również pierwsze próby ich zastosowania do rzeczywistej symulacji przepływów powietrza [93, 110].

Do badania przepływów powietrza w budynkach złożonych z dużej ilości przestrzeni wewnętrznych szczególnie przydatne są metody obliczeniowe oparte na modelowaniu matematycznym. Istnieje jednak szereg przyczyn znacznie ograniczających ich wykorzystanie [74, 76, 110, 111, 114]. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć agregację przestrzeni wewnętrznych dokonywaną z reguły w oderwaniu od fizycznej interpretacji zjawisk decydujących o przepływach i wymianie powietrza. Brak umotywowanych koncepcji podziału budynków wynika głównie z braku dostatecznych informacji o wewnętrznych przepływach powietrza i ich wpływie na jego wymianę w poszczególnych pomieszczeniach. Opracowanie efektywnych metod symulacyjnych w tym zakresie można uznać za zadanie wymagające szybkiego rozwiązania. Zwiększenie szczegółowości modelu wielostrefowego, a tym samym i wiarygodności prognozowania przepływów powietrza jest niezbędne również z uwagi na silną dążność do integracji metod symulacyjnych w kierunku ich wykorzystania do ocen procesów kształtujących się w pomieszczeniach [4, 39, 43, 53, 54, 89, 112, 115, 120].

W niniejszym opracowaniu podjęto próbę opanowania trudności w identyfikacji przepływów i wymiany powietrza w wielostrefowych budynkach mieszkalnych z kanałową wentylacją naturalną. W tym celu wykorzystano wyniki wieloletnich badań autora w budynkach istniejących, uzupełniając je szczegółowymi pomiarami wewnętrznych przepływów powietrza. Następnie przeanalizowano modele posiadające status wielostrefowych z uwagi na możliwość uzyskiwania za ich pomocą szczegółowych informacji o przepływach i wymianie powietrza. Wobec małej przydatności istniejących modeli sprecyzowano wymagania, jakie należy spełnić, aby informacje takie móc uzyskiwać. Oznaczało to realizację nowego modelu, przy której szczególny nacisk położono na nie rozwiązane do chwili obecnej zagadnienia. Zaliczono do nich przede wszystkim sformułowanie zasad podziału budynków na jednostkowe elementy strukturalne oraz tworzenie systemów zastępujących budynki dla potrzeb symulacji omawianych procesów. Uwagę zwrócono na sposoby definiowania opisów poszczególnych elementów strukturalnych i ich połączeń. Niezbędne było również wykorzystanie innej niż dotychczas metody obliczeniowej oraz opracowanie sposobów realizacji badań symulacyjnych.

3. WYNIKI BADAŃ JAKO ŹRÓDŁO WIEDZY O WYMIANIE I WEWNĘTRZNYCH PRZEPŁYWACH POWIETRZA

Mimo dość szerokiej tematyki dotychczasowych prac stan wiedzy w zakresie wpływu wewnętrznych przepływów powietrza na jego wymianę jest nadal niewystarczający. Ponieważ zagadnienie to ma ścisły związek z podziałem budynków, niezbędna była kontynuacja pomiarów, mająca na celu scharakteryzowanie tych cech badanego procesu, które mogą mieć znaczenie dla miarodajności dokonywanych ocen. Pomiary przeprowadzono w budynku o dużej ilości pomieszczeń z kanałową wentylacją naturalną. Nie bez znaczenia było również przeznaczenie budynku (hotel), stwarzające duże możliwości pomiarowe [108-110]. Planując pomiary, wzięto pod uwagę brak praktycznych możliwości sterowania budynkiem lub czynnikami decydującymi o badanym procesie. Z tego też powodu, a także uwzględniając możliwości pomiarowe, badania skoncentrowano w okresach sprzyjających poprawnemu funkcjonowaniu kanałów wentylacyjnych.

Badaniami objęto większość pomieszczeń i elementów budynku wykorzystując techniki ciśnieniowe i znakowania gazem wskaźnikowym, uzupełniając je pomiarami czynników wymuszających i towarzyszących przepływom powietrza.

3.1. Charakterystyki przepływów i wymiany powietrza

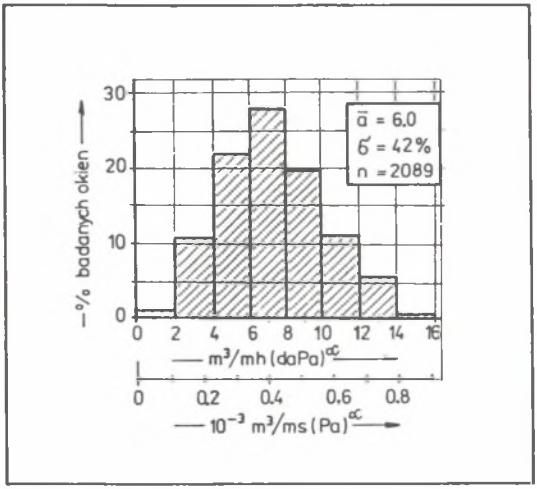
Jednym z zamierzeń niniejszego opracowania było zwrócenie uwagi na przydatność stosowanych sposobów charakteryzowania badanego procesu.

Niezależnie od tego, czy obiektem ocen są elementy przegród lub elementy budynku, podstawą ich jest związek pomiędzy właściwościami przegród lub przestrzeni a czynnikami wymuszającymi ruch powietrza. Stosowane mogą tu być dwa podstawowe sposoby pozyskiwania charakterystyk metodami pomiarowymi.

Pierwszy z nich polega na zastosowaniu technik ciśnieniowych, a ich obiektem może być element przegrody, pomieszczenie lub grupa pomieszczeń. Ich własności określane są za pomocą współczynników szczelności (S) lub współczynników przenikania powietrza (a), związanych z sobą przez powierzchnie elementów lub długości szczelin w badanym elemencie (Σ1). Uzupełnieniem zależności są różnice ciśnień (Δp), których wpływ na ilość powietrza (V) weryfikowany jest wykładnikami potęgowymi α uzależnionymi od charakteru ruchu powietrza:

$$\dot{V} = S(\Delta p)^{\alpha} = a\Sigma l\,(\Delta p)^{\alpha},\ m^3/s \qquad (3.1)$$

Praktycznym przykładem realizacji takich zależności są dane zebrane w tabelach 3.1 i 3.2 oraz na rys. 3.1 i 3.2 stanowiących ich opracowanie statystyczne [104, 110]. Wykorzystuje się tutaj założenia podobieństwa rozkładów charakterystycznych wielkości (a,S,α,WP,...) do rozkładów normalnych wprowadzone przez R.E. Edwardsa [31], D.W. Etheridge'a [32] i M.H. Shermana [92]. Ustalone z ich pomocą wartości średnie i odchylenia standardowe uważa się za podstawę ocen, przy czym warto zwrócić uwagę,że dotyczyć one mogą jedynie szczelności elementów przegród lub ich kompleksów.



Rys. 3.1. Ocena statystyczna wartości współczynników przenikania powietrza ($\bar{a}$) dla 2089 okien drewnianych pojedynczych (oszklenie podwójne) [61, 63, 108, 110]

Fig. 3.1. The statistical estimation of air flow coefficients ($\bar{a}$) for 2089 wooden windows (double glass) [61, 63, 108, 110]

Wykorzystywanie tak uzyskanych danych do charakteryzowania procesu wymiany powietrza może być przyczyną błędnego wnioskowania, szczególnie gdy badania mają dotyczyć wzajemnego oddziaływania na siebie poszczególnych przestrzeni wewnętrznych. Przyczyną tego jest pominięcie zmienności różnic ciśnień kształtujących się w tych przestrzeniach. Efektem takich ocen są niewiele różniące się wartości średniej wymiany

Tabela 3.1

Zestawienie danych pomiarowych do oceny przenikania powietrza przez typową stolarkę budowlaną [110]

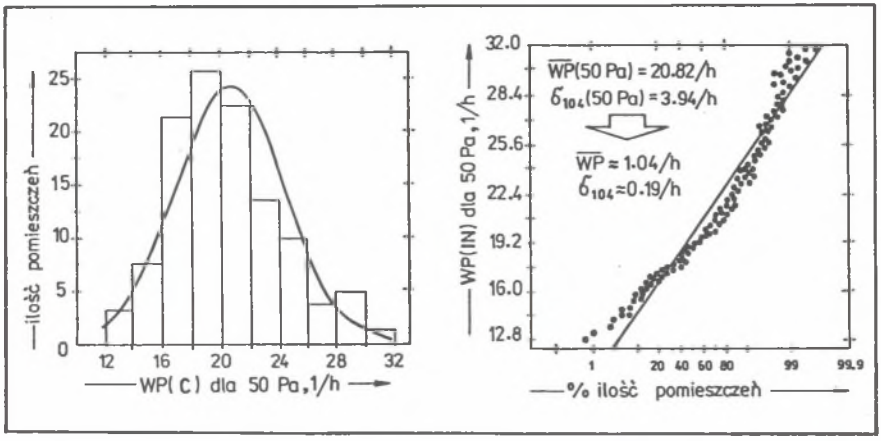
Wyszczególnienie	Współczynnik przenikania a, m^3/mh (da Pa)				Wykładnik potęgowy, α, -			
	średn.	maks.	min.	odchyl. standard.	średn.	maks.	min.	odchyl. standard.
(596) Okna drewniane zespolone								
nieuszczelnione	5,01	12,40	0,94	2,41	0,70	0,81	0,58	0,10
uszczelnione	1,26	2,96	0,57	0,61	0,67	0,74	0,63	0,03
(148) Okna drewniane skrzynkowe								
nieuszczelnione	5,41	8,60	1,26	1,44	0,69	0,72	0,55	0,04
uszczelnione	1,29	2,78	0,39	0,90	0,67	0,70	0,64	0,03
Okna z tworzyw sztucz. (Trocal), nieuszczelnione (z wkładkami)	0,18	0,35	0,03	0,15	0,66	0,72	0,61	0,03
(1012) Drzwi wejściowe do mieszkań (ocieplone)								
nieuszczelnione	12,2	16,8	6,81	5,92	0,58	0,69	0,50	0,03
uszczelnione	0,96	4,16	1,04	0,45	0,68	0,71	0,57	0,06
(41) Drzwi wejściowe do budynku (uszczelnione)								
drewniane	2,58	5,37	0,49	1,43	0,66	0,79	0,58	0,05
metalowe	1,92	2,24	0,70	0,84	0,67	-	-	0,05

Uwaga: w nawiasach podano ilość badanych elementów stolarki budowlanej

powietrza dla przestrzeni położonych w obrębie budynku (patrz tabela 3.2). Tymczasem ich lokalizacja, a ściślej oddziaływanie zmiennych warunków środowiskowych może powodować istotne zmiany rzeczywistej wymiany powietrza. Wobec powyższego za poprawne uznaje się charakterystyki podawane w postaci zależności:

$$\sum_j \dot{V}_{j,i} = \sum_j S_{j,i}(\Delta p_i)^{\alpha_{j,i}} \operatorname{sgn} \Delta p_i = 0, \ m^3/s \qquad (3.2)$$

odnoszące się do przestrzeni "i" oraz uwzględniające strumienie powietrza napływające z przestrzeni sąsiednich "j" oraz zmienność różnic ciśnień w obrębie budynków.



Rys. 3.2. Ocena statystyczna całkowitej wymiany powietrza -WP(C)- oraz rozkład normalny jej wartości związanej z infiltracją powietrza -WP(IN)- dla 104 przestrzeni wewnętrznych położonych w jednym z badanych budynków (wyniki testów ciśnieniowych przy $\Delta p_t \approx 50 Pa$) [108]

Fig. 3.2. The statistical estimation of total air change -WP(C)- and normal distribution of infiltration air change -(WP(IN)- for 104 inner spaces located in one of the tested building (results of pressurization tests at $\Delta p_t \approx 50\ Pa$) [108]

Z uwagi na trudności w zakresie ich pomiarów nawet i tak zdefiniowane charakterystyki przepływowe nie pozwalają na pełną ocenę badanego procesu.

W tym znaczeniu przydatniejsze są metody znakowania gazem wskaźnikowym, będące drugim sposobem pomiarowej oceny procesu wymiany powietrza [11, 30, 40]. Ilustracją mogą być tutaj dane zebrane na rys. 3.3 dla wszystkich mieszkań badanego budynku, w postaci

Tabela 3.2

Wyniki testów podciśnieniowych wykonywanych w mieszkaniach badanego budynku (kubatura mieszkania - 142,27 m^3, do obliczeń współczynnika S przyjęto $\alpha = 0,67$) [110].

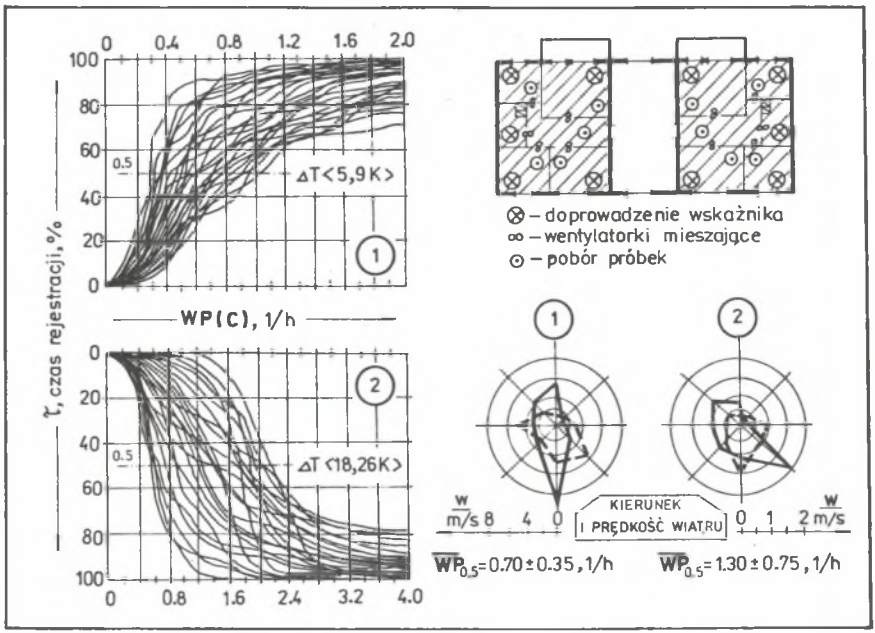
(1) Numer kondygnacji	Różnica ciśnień $-\Delta p_t$, Pa	Ilość powietrza $(-\Delta p_t)$, m^3/h	WP(C), 1/h		Średni współczynnik S m^3/s, 1Pa
			dla $-\Delta p_t$	według (2)	
1L	54	3220	22,6	1,13	0,00308
2L	50	2941	20,7	1,03	0,00296
3L	60	2894	20,3	1,01	0,00262
4L	50	2851	20,0	1,00	0,00287
5L	47	2990	21,0	1,05	0,00315
6L	58	3926	27,6	1,38	0,00397
7L	55	3796	26,7	1,34	0,00361
8L	52	3529	24,8	1,24	0,00347
9L	56	3194	22,4	1,12	0,00298
10L	53	3257	22,9	1,15	0,00318
11L	62	2602	18,3	0,92	0,00229
wartości średnie (WS)		3200	22,8	1,14	0,00310
odchylenie standardowe, δ, (OS)		390			
WS/OS, %		12			

(1) Numer kondygnacji	Różnica ciśnień $-\Delta p_t$, Pa	Ilość powietrza $(-\Delta p_t)$, m^3/h	WP(C), 1/h		Średni współczynnik S m^3/s, 1Pa
			dla $-\Delta p_t$	według (2)	
1P	59	2672	18,8	0,94	0,00242
2P	40	3300	23,2	1,16	0,00386
3P	53	2805	19,7	0,98	0,00271
4P	62	2960	20,8	1,04	0,00259
5P	54	3037	21,3	1,07	0,00292
6P	60	2701	18,9	0,95	0,00242
7P	56	3415	24,0	1,20	0,00320
8P	52	3493	24,5	1,22	0,00341
9P	58	2937	20,6	1,03	0,00268
10P	49	2519	17,7	0,88	0,00256
11P	55	2500	17,5	0,87	0,00234
wartości średnie (WS)		2948	21,0	1,05	0,00283
odchylenie standardowe, δ, (OS)		294			
WS/OS, %		10			

Uwaga: (1) Mieszkania położone po lewej i prawej stronie klatki schodowej (odpowiednio L i P)

(2) Zależność empiryczna WP = 0,05 [WP (50 Pa)] wg [41, 110]

rozkładów całkowitej wymiany powietrza [72, 110]. Charakterystyczne jest jej duże zróżnicowanie w stosunku do wartości średnich uzyskiwanych na podstawie testów ciśnieniowych (patrz rys. 3.2). Nadal jednak otrzymane charakterystyki nie w pełni opisują omawiany proces. Nie wiadomo bowiem, jaką część całkowitej wymiany powietrza stanowią jego ilości przepływające z otoczenia zewnętrznego, a jaką - z klatki schodowej, a także brak jest informacji odnośnie do ilości powietrza przepływającego kanałami wentylacyjnymi.



Rys. 3.3. Funkcje rozkładu prawdopodobieństwa występowania całkowitej wymiany powietrza -WP(C)- dla wszystkich mieszkań położonych w jednym z badanych budynków (wyniki pomiarów uzyskanych za pomocą metody znakowania gazem wskaźnikowym) [74, 111, 119]

Fig. 3.3. The cumulative frequency distribution of total air change -WP(C)- for all the flats located in one of the tested building (results of the tracer gas method) [74,111,119]

W praktyce wartości wymiany powietrza w rozpatrywanej przestrzeni "i" są każdorazowo sumą w postaci:

$$\underbrace{WP_i}_{\text{wartości całkowite}} = \sum_j \dot{V}_{ji}/K_i = \Big(\underbrace{\pm\sum_j \dot{V}_{ji}}_{\text{z/do otoczenia zewnętrznego}} \pm \underbrace{\sum_j \dot{V}_{ji}}_{\text{z/do przestrzeni sąsiednich}} \Big), \quad 1/h \qquad (3.3)$$

gdzie K_j jest efektywną kubaturą danej przestrzeni [4, 40, 67], zaś indeks "j" odnosi się do strumieni powietrza wymienianych z przestrzeniami sąsiednimi i otoczeniem zewnętrznym oraz przepływających kanałami wentylacyjnymi.

Pomiarowe uzupełnienie takich charakterystyk, aczkolwiek kłopotliwe, jest możliwe. Wymaga to wykorzystania jednej z odmian techniki znakowania gazami [3, 11, 30, 40, 110] lub metody stosowanej przez autora [67, 108], zakładającej znajomość warunków ciśnieniowych i stosunków szczelności przegród otaczających badaną przestrzeń. W praktyce jest to jedyna droga pomiarowego charakteryzowania omawianych procesów z uwagi na wewnętrzne przepływy powietrza. Do określenia ich wpływu celowe jest zatem wzajemne uzupełnianie danych uzyskiwanych za pomocą obu powyżej przedstawionych sposobów dokonywania pomiarów.

3.2. Wyniki pomiarów procesu wymiany powietrza

Powyższe wnioski wykorzystano do skoncentrowania dalszych pomiarów na określeniu wpływu wewnętrznych przepływów powietrza na jego wymianę w przestrzeniach budynku oraz oddziaływania na nie kanałów wentylacyjnych i klatki schodowej.

3.2.1. Wymiana powietrza w przestrzeni budynku

Dysponując dużą ilością danych pomiarowych odnośnie do szczelności stolarki budowlanej oraz ilości powietrza przepływającego kanałami wentylacyjnymi odpowiadających znanym parametrom czynników wymuszających przepływy powietrza, można uzyskać ogólną charakterystykę badanych procesów. Jej podstawą jest wydzielenie z budynku poszczególnych mieszkań i założenie, że powietrze jest w nich wymieniane drogą przenikania przez okna w ścianach zewnętrznych ($\dot{V}_o$), drzwi wejściowe z klatki schodowej ($\dot{V}_{dw}$) oraz kanały wentylacyjne ($\dot{V}_{KW}$). Pomiarami obejmuje się 2 z powyższych elementów (najczęściej drzwi i kanały), a następnie uzyskane wyniki zestawia się w postaci funkcji:

$$f_{dw,KW}\left(\dot{V}_{i,dw,KW}; x_1, x_2, \ldots x_n\right) = 0 \qquad (3.4)$$

gdzie "i" jest numerem kondygnacji, zaś x to n czynników decydujących o przepływach powietrza, takich jak wypór termiczny, prędkość i kierunek wiatru itp.

Uzyskane w ten sposób funkcje mogą być przybliżone za pomocą wielomianów:

$$\dot{V}_{i,dw,KW} \approx (b_o + b_1x_1 + b_2x_2 + b_nx_n)_{dw,KW} \qquad (3.5)$$

w których współczynniki $b_{o...n}$ są określane za pomocą aproksymacji średniokwadratowej funkcji (3.4) na zbiorze danych pomiarowych [110]. Efektem takiego opracowania danych dla badanego budynku są zależności wielomianowe:

$$\dot{V}_{i,dw} \approx 2{,}8 + 4{,}4\Delta T - 6{,}6\,w + 0{,}16\,(i^2 - 16{,}7i + 60)/(i - 7), \quad m^3/h$$

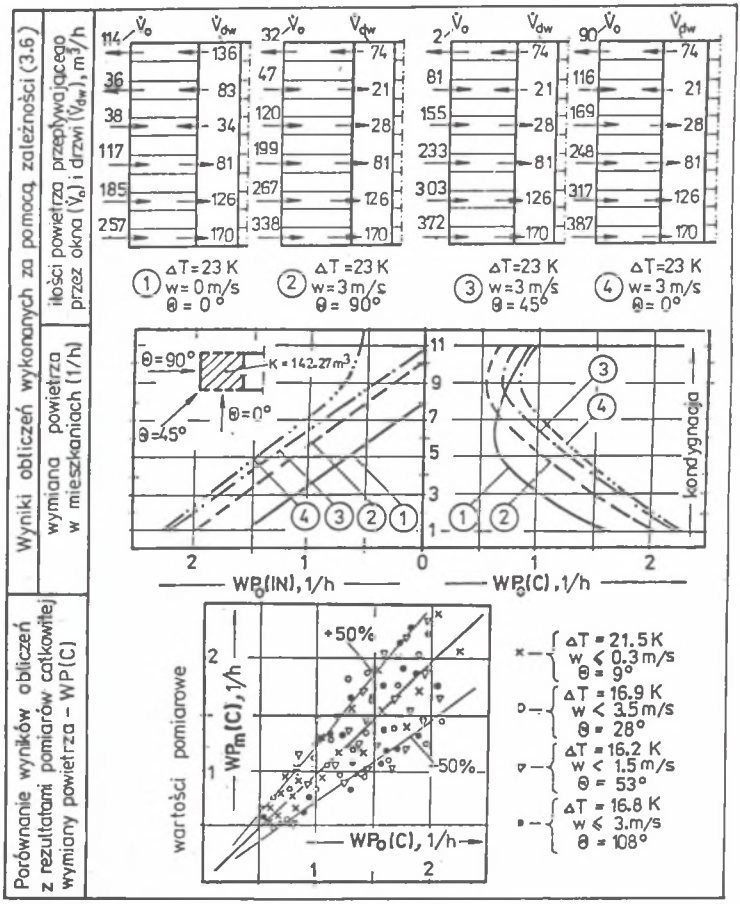
$$\dot{V}_{i,KW} \approx 16{,}6 + 1{,}9\Delta T - 6{,}8\,w + 48{,}7 \sin\Theta - 12{,}6\,i, \quad m^3/h \qquad (3.6)$$

gdzie: ΔT - różnica temperatur powietrza, K,
w - prędkość wiatru, m/s,
Θ - kąt naporu wiatru w stosunku do fasady okiennej, ^{o} (patrz rys. 3.4),
i - numer kolejny kondygnacji,

które pozwalają na oszacowanie ilości powietrza infiltrującej przez okna do poszczególnych mieszkań, a także całkowitej jego ilości w nich wymienianej.

Przykładowym wynikiem są dane zestawione na rys. 3.4 wraz z porównaniem całkowitej wymiany powietrza określonej za pomocą metody znakowania gazem wskaźnikowym dla paru wariantów zmian czynników wymuszających ruch powietrza [67]. Mimo że prawdopodobieństwo wystąpienia wymiany powietrza określonej za pomocą omawianego sposobu oceny procesu jest niewielkie, zachowany zostaje jego charakter ujawniający się przede wszystkim w występowaniu zmian ilości powietrza przepływającego kanałami i klatką schodową.

Prostej formie zależności charakteryzujących proces odpowiada jednak kłopotliwy sposób dochodzenia do nich. Trudności te powodują, że sposób ten jest rzadko stosowany, pomimo większej miarodajności tak opracowanych wyników, niż ma to miejsce w przypadku stosowania uproszczonych metod obliczeniowych.



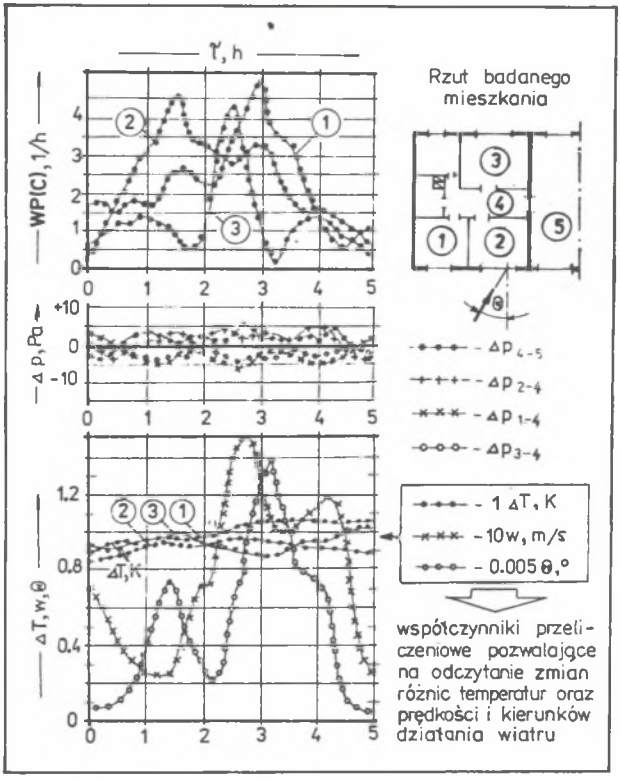
Rys. 3.4. Wyniki obliczeń całkowitej i związanej z infiltracją wymiany powietrza -WP(C), WP(IN)- uzyskane za pomocą prostej metody (opis w tekście) i ich porównanie z rezultatami pomiarów [108-110]

Fig. 3.4. Total and infiltration air change rate-results -WP(C), WP(IN)- calculated by the simple method (description in the text) and their comparison of the measurement results [108-110]

3.2.2. Przepływy powietrza w mieszkaniach

Określanie wymiany powietrza w odniesieniu jedynie do przestrzeni mieszkań położonych na poszczególnych piętrach nie stanowi wystarczającej informacji o kształtowaniu tego procesu w poszczególnych pomieszczeniach zlokalizowanych w mieszkaniach. Jednym z celów przeprowadzonych badań było m.in. stwierdzenie jej zróżnicowania w stosunku do średniej wymiany powietrza ustalanej dla całych mieszkań. Przykładowe wyniki pomiarów

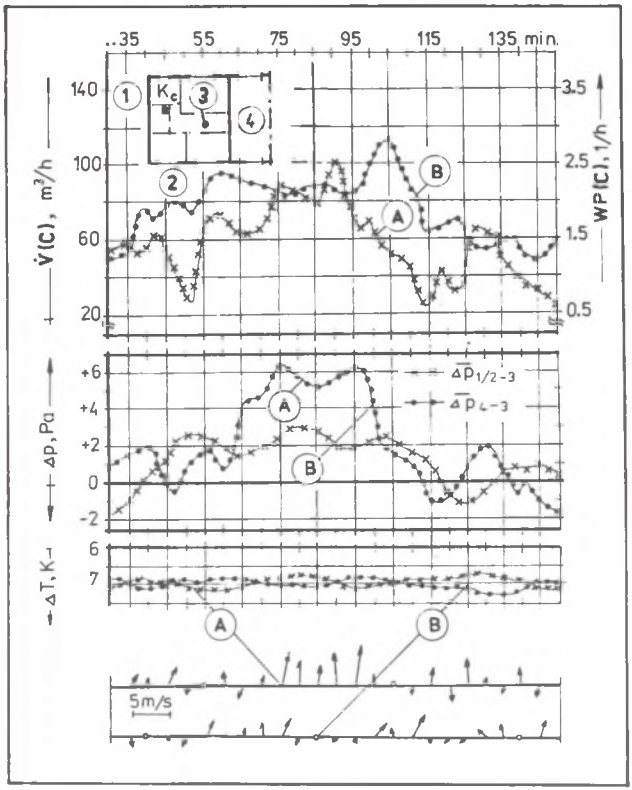
reprezentatywne dla badanego budynku przedstawiono na rys. 3.5 i 3.6. W pomiarach zastosowano metodę badań zmian stężenia gazu wskaźnikowego w wybranych pomieszczeniach mieszkań, uzupełnianą pomiarami warunków ciśnieniowych występujących w ich obrębie.



Rys. 3.5. Zmienność całkowitej wymiany powietrza -WP(C)- w czasie dla trzech pokoi mieszkalnych (1,2,3) położonych na 2 kondygnacji badanego budynku [110, 111]

Fig. 3.5. The changeability of total air change -WP(C)- as a fuction of time for three rooms in the flat located on 2nd floor level of the tested building [110, 111]

W warunkach jednoczesnego wpływu wyporu termicznego i naporu wiatru (rys. 3.5) za charakterystyczne uznać można znaczne zróżnicowanie wartości wymiany powietrza kształtującej się w badanych pomieszczeniach mieszkania. Dotyczy to zarówno całkowitej wymiany powietrza, jak i jej części związanej z infiltracją przez okna w ścianach zewnętrznych.



Rys. 3.6. Wpływ działania kanałów wentylacji naturalnej na całkowitą wymianę powietrza $-\dot{V}(C) \rightarrow WP(C)$*- w kuchni mieszkania położonego na 2 kondygnacji badanego budynku [110]: 1,2 - warunki zewnętrzne; 3 - przedpokój; 4 - klatka schodowa;* K_c *- kuchnia, A - wyeliminowanie działania kanałów (zamknięcie otworów); B - normalne działanie kanałów*

Fig. 3.6. The influence of natural ventilation ducts action on total airchange $-\dot{V}(C) \rightarrow WP(C)$*- for kitchen in the flat located on 2nd floor level of the tested building [110]: 1,2 - external conditions; 3 - hall; 4 - staircase;* K_c *- kitchen; A - elimination of ventilation ducts action (air orificies are closed); B - normal action of ventilation ducts*

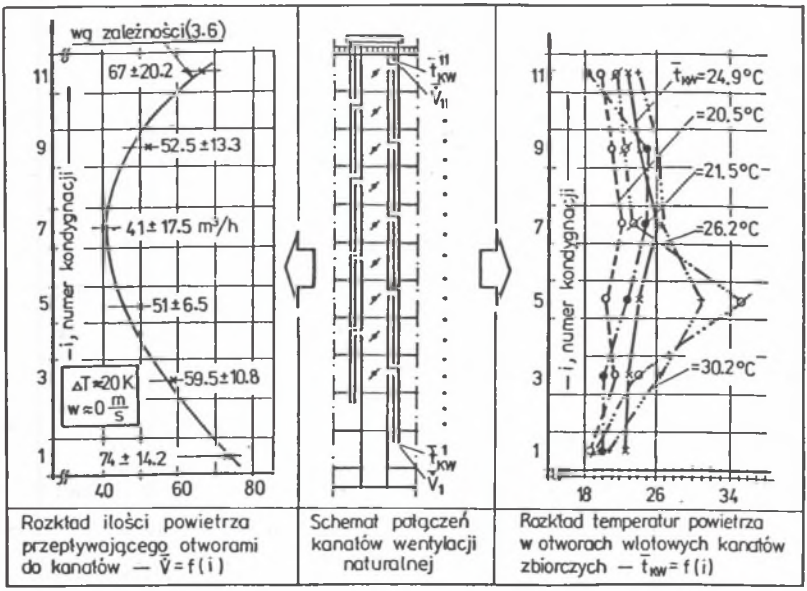
Zmienność ta utrzymuje się nawet przy zwiększaniu wpływu wyporu termicznego oraz wyeliminowaniu funkcjonowania kanałów wentylacji naturalnej (przez uszczelnianie otworów wywiewnych - kratek wentylacyjnych). Eliminacja ta powoduje zmniejszenie całkowitej

wymiany powietrza w odniesieniu do całego mieszkania średnio o 20% (rys. 3.6). Wpływ tych kanałów ujawnia się jednak głównie w pomieszczeniach, w których są one zamontowane (kuchnie, łazienki). W trakcie ich użytkowania wzrost wymiany powietrza sięga średnio kilkunastu procent wartości średnich dla całego mieszkania. Towarzyszy temu zróżnicowanie simpleksów temperaturowych i stężeń zanieczyszczeń w obrębie poszczególnych pomieszczeń [104, 106, 110].

Wszystkie powyższe zmiany charakteryzuje silna zależność położenia pomieszczeń zarówno wzdłuż wysokości budynku, jak i w obrębie mieszkania, co jest wynikiem nie tylko lokalnego zróżnicowania warunków środowiskowych, ale również zniekształcającym oddziaływaniem przestrzeni klatki schodowej.

3.2.3. Przepływy powietrza przez kanały wentylacji naturalnej

Niezależnie od rozwiązania kanałów wentylacyjnych podstawowym sposobem ich charakteryzowania są pomiary ilości powietrza przepływającego przez otwory wlotowe do tych kanałów. Przy przeprowadzaniu takich pomiarów wskazane jest jednak skoncentrowanie ich w okresach sprzyjających poprawnemu działaniu takich kanałów. Oznacza to, że powinny one dotyczyć okresów wyraźnej dominacji wyporu termicznego, przy czym zalecane jest wyeliminowanie zakłóceń związanych z eksploatacją budynków i pomieszczeń. Pierwszy z powyższych warunków sprowadzić można do zalecenia wykonania pomiarów w okresie zimowym. Drugi z nich można uznać za spełniony przy nieotwieraniu okien i drzwi w obrębie budynku. W przypadku eksploatowania pomieszczeń celowe jest również mierzenie temperatur powietrza w otworach wentylacyjnych oraz, w miarę możliwości, w obrębie kanałów. Charakterystycznym przykładem zrożnicowania przepływów powietrza są dane zestawione na rys. 3.7 dla układu zbiorczych kanałów wentylacji naturalnej, zastosowanych w badanym budynku. W lewej części tego rysunku przedstawiono zmienność ilości powietrza przepływającego otworami wlotowymi do kanałów zbiorczych (kratkami wentylacyjnymi) na poziomach poszczególnych pięter. Są one wynikiem pomiarów przeprowadzonych w budynku składającym się na opracowanie zależności (3.6)- rozdział 3.2.1. Tak uzyskane dane uzupełniono wartościami odchyleń standardowych ilości powietrza wywiewanego oraz wynikami pomiarów temperatur powietrza w otworach wlotowych do kanałów.



Rys. 3.7. Charakterystyczne cechy przepływów powietrza w układzie zbiorczych kanałów wentylacji naturalnej zastosowanej w badanym budynku [66, 107]: x = + 4°C/0,5 m/s; o = - 8°C/0,3 m/s; ● = - 15,5°C/0,5 m/s; ϕ = -7,8°C/0,5 m/s (po 30 min.pracy gazowych urządzeń); + = 0°C/0 m/s

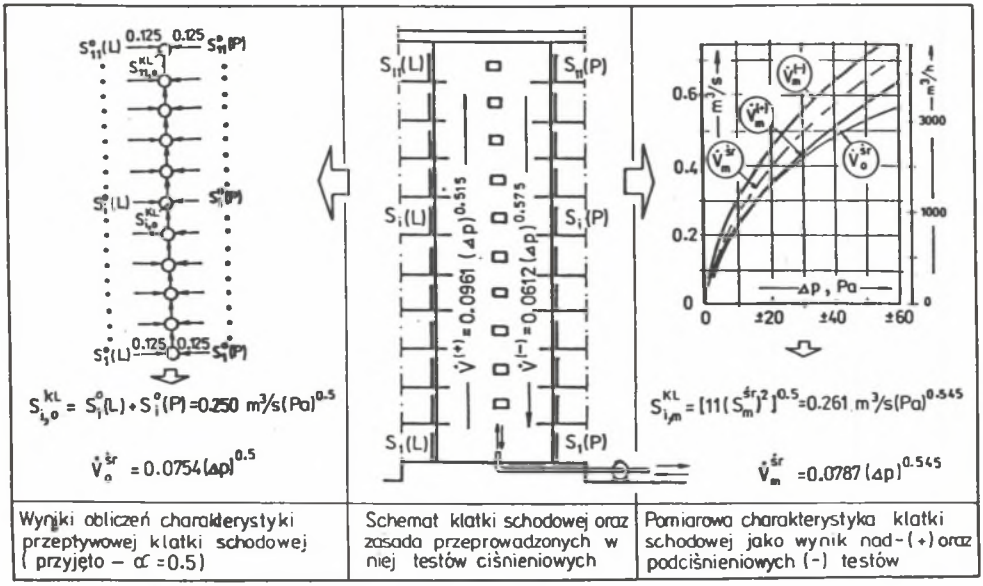
Fig. 3.7. The specific quality of air flows in collective ducts of natural ventilation used in the the tested buildnig [66, 107]: x = + 4°C/0,5 m/s; o = - 8°C/0,3 m/s; ● = - 15,5°C/0,5 m/s; ϕ = -7,8°C/0,5 m/s(after 30 min.of gas cooker and water heater functioning); + = 0°C/0 m/s

Dla zmian ilości powietrza przepływającego kanałami charakterystyczne jest wyraźne zmniejszenie ilości powietrza na poziomie 7 kondygnacji, przy jednoczesnej dużej niestabilności ruchów powietrza związanych z częstą zmianą niewielkich różnic ciśnień. Zależność zmian z wysokością nie ma charakteru liniowego, a rzeczywiste (chwilowe) ilości powietrza przepływającego kanałami są efektem nie tylko ich rozwiązania, ale przede wszystkim wynikiem kumulowania się oddziaływań związanych z układem szczelności przegród w obrębie pomieszczeń oraz panującymi tam warunkami ciśnieniowymi.

Na skutek eksploatacji pomieszczeń dochodzić może do różnicowania się temperatur powietrza (prawa część rys. 3.7). Ma ono charakter lokalny, tym niemniej odnotowany zakres zmian uzasadnia jego uwzględnianie w ocenach badanego procesu.

3.2.4. Ocena warunków przepływu powietrza w klatce schodowej

Pomiędzy przepływami powietrza w częściach mieszkalnych budynków a jego ruchami w obrębie klatki schodowej istnieje ścisły związek. Wyraża się on poprzez kumulowanie poziomych ruchów powietrza z każdego poziomu budynku (piętra) i ich przetwarzanie na przepływy pionowe. Z punktu widzenia budynku jako całości przestrzeń klatki schodowej stanowi więc szyb pionowy, charakteryzujący się mniej lub bardziej proporcjonalnym rozłożeniem szczelin w oknach i drzwiach wejściowych do mieszkań.



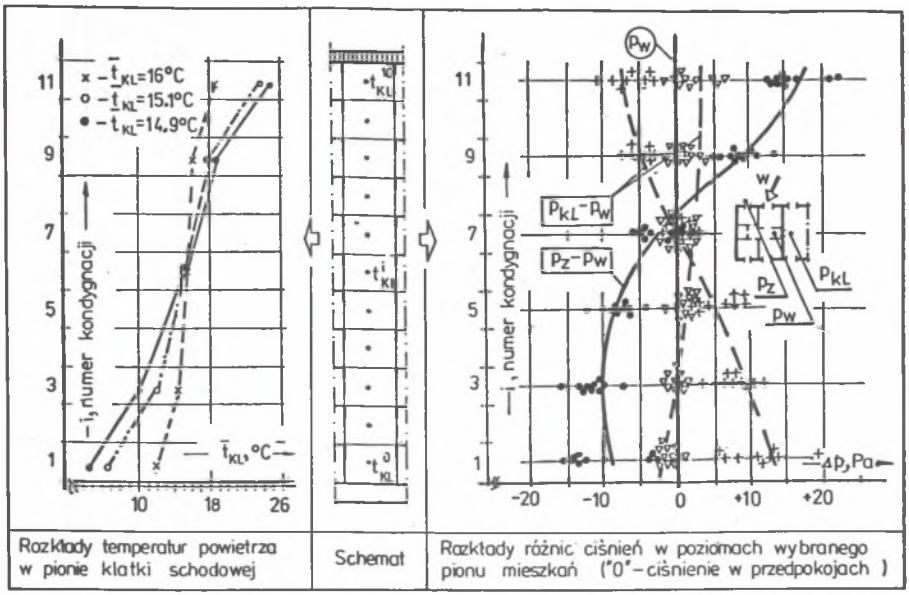
Rys. 3.8. Charakterystyka przepływów powietrza przez klatkę schodową badanego budynku (obliczeniowa - po lewej stronie rysunku oraz pomiarowa - jako wynik testów ciśnieniowych) [104, 110, 111]

Fig. 3.8. The characteristic of air flows through the staircase in tested buildings (computational - left side of figure and as results of pressurization tests) [104,110,111]

Charakterystykę przepływów powietrza w obrębie klatki schodowej uzyskać można za pomocą badań ciśnieniowych oraz pomiarów różnic ciśnień i rozkładu temperatur wzdłuż jej wysokości. Zgodnie z zasadą pomiaru charakterystyk przepływowych opracowaną przez J. Klote'go [45] badania takie powinny być wykonywane za pomocą testów nad- i podciśnieniowych, w wyniku których ustalane są średnie wartości wielkości składających się na charakterystyki przepływowe. Przykładowe wyniki takich testów ciśnieniowych prze-

prowadzone w klatce schodowej badanego budynku przedstawiono na rys. 3.8 wraz z układem szeregowo połączonych stref odpowiadających poziomom poszczególnych pięter budynku z zastępczymi charakterystykami szczelin w elementach przepuszczalnych dla powietrza występujących w mieszkaniach [107-111].

Wynikiem zarówno pomiarów ("m"), jak i obliczeń ("o") są charakterystyki przepływowe podobne do zależności (3.1). Wartości współczynników przepływu powietrza (S) i wykładników potęgowych są zbliżone, co pozwala uniknąć pomiarów kłopotliwych w budynkach mieszkalnych.



Rys. 3.9. Rozkłady różnic ciśnień i temperatur wzdłuż wysokości klatki schodowej badanego budynku (przykład) [104-110]

Fig. 3.9. Pressure and temperature distribution along the height of the staircase in the tested building (example) [104-110]

Innymi parametrami charakterystycznymi dla klatki schodowej są rozkłady różnic ciśnień wzdłuż jej wysokości oraz rozkłady temperatur powietrza. Na podstawie przedstawionych na rys. 3.9 danych w tym zakresie stwierdzić należy dużą zmienność różnic ciśnień, a przede wszystkim nieliniowość tych zmian oraz charakterystyczne przegięcie krzywych je opisujących. W warunkach dominującego wpływu wyporu termicznego oscyluje ono wokół poziomu odpowiadającego połowie wysokości budynku. W przypadku silnego oddziaływania wiatru

ma miejsce duża niestabilność układów ciśnień oraz brak prawidłowości [105]. Podobny charakter mają zmiany temperatur powietrza wskazujące, że tradycyjne traktowanie klatek schodowych jako szybów o jednakowej temperaturze średniej ($\bar{t}_{KL}$) może być przyczyną błędnej oceny wymiany powietrza w budynku.

3.3. Ocena przydatności pomiarów w badaniach przepływów powietrza w budynkach o złożonej strukturze wewnętrznej

Przydatność pomiarów do oceny przepływów powietrza w budynkach rozpatrywać należy w aspekcie celu realizowanych badań i dalszego wykorzystania ich wyników.

Dane otrzymywane za pomocą technik ciśnieniowych są pomocne przy realizacji różnego rodzaju metod obliczeniowych. Nie zawierają one z reguły informacji o rzeczywistej strukturze badanych budynków i mają w związku z tym zastosowanie ograniczone do wąskiego zakresu i zmian skupionych parametrów i czynników [2, 67, 68, 93, 110]. Informacje uzyskane za pomocą omawianych metod składają się przede wszystkim na oceny szczelności przegród, nie zaś procesu wymiany powietrza. Mimo to podkreślić należy, że informacje te są podstawą do ocen zużycia ciepła i jako takie są wymagane przez akty prawne w wielu krajach [6].

Na identyfikację fizyczną procesu pozwalają metody znakowania gazami wskaźnikowymi, za pomocą których uzyskać można średnie wartości wymiany powietrza oraz oceniać jej zmienność w czasie. Metody te uważać można za opanowane w stosunku do pojedynczych przestrzeni. W przypadku badań kompleksu przestrzeni należy je uzupełniać pomiarami ciśnieniowymi dotyczącymi elementów przepuszczalnych dla powietrza zlokalizowanych w powierzchniach ograniczających poszczególne przestrzenie. Na pełny obraz procesu składają się zatem informacje uzyskane na podstawie obu technik pomiarowych, przy czym stosowanie gazów wskaźnikowych uznać należy za technikę wzorcową, przydatną do określania wiarygodności ocen dokonywanych za pomocą innych metod pomiarowych i obliczeniowych [3, 4, 11, 67, 76].

Z uwagi na ujawnione powyżej zróżnicowanie cech i własności procesu wentylacyjnego celowe jest traktowanie budynku jako zbioru określonej ilości przestrzeni. Przestrzeniami tymi są nie tylko poszczególne pomieszczenia, ale również części wydzielone z szybów pionowych, czy nawet z kanałów wentylacyjnych. Nie wydaje się również słuszne przyjmowanie założenia "a priori", że wymiana powietrza ustalona dla kompleksu przestrzeni będzie w każdych warunkach reprezentatywna dla każdej z tych przestrzeni [72, 89, 90, 98, 99].

Niezależnie od użytej metody pomiarowej uzyskiwane wyniki dotyczą tylko elementów struktury budynków, jakimi są poszczególne przestrzenie, nie zaś ich zbioru tworzącego te budynki. Tymczasem specyfika wymiany powietrza, ujawniająca się dużą przypadkowością i losowością badanego procesu (szczególnie gdy ma on charakter naturalny), wymaga jednoczesnego dokonywania badań we wszystkich przestrzeniach budynków. Zadaniu temu sprostać mogą z powodzeniem metody obliczeniowe wykorzystujące modele matematyczne budynków i przepływów powietrza.

4. ANALITYCZNE METODY IDENTYFIKACJI PRZEPŁYWÓW I WYMIANY POWIETRZA

Omówienie metod obliczania przepływów powietrza zostało celowo poprzedzone zestawieniem wyników pomiarów charakterystycznych dla procesu i budynku z uwagi na jego strukturę wewnętrzną. Wszystkie metody obliczeniowe korzystają bowiem z różnych założeń upraszczających, dotyczących zarówno opisowej strony modeli, jak i ich matematycznej realizacji. Przedstawione w rozdziale 3 wyniki pomiarów mogą być wykorzystane do oceny poprawności przyjętych założeń, szczególnie odnośnie do części opisowej, a także do oceny poprawności wyników obliczeń.

Szczegółową dyskusję metod obliczeniowych przedstawiono w pracach [109, 110], opartych na zbiorczym zestawieniu stanu istniejącego wykonanym w ramach realizacji Aneksu 23 przez International Energy Agency [35, 36], przy współudziale autorów metod. Analizą tą objęto 50 modeli z 16 krajów, z których jedynie 15 zakłada istnienie przestrzeni wewnętrznych.

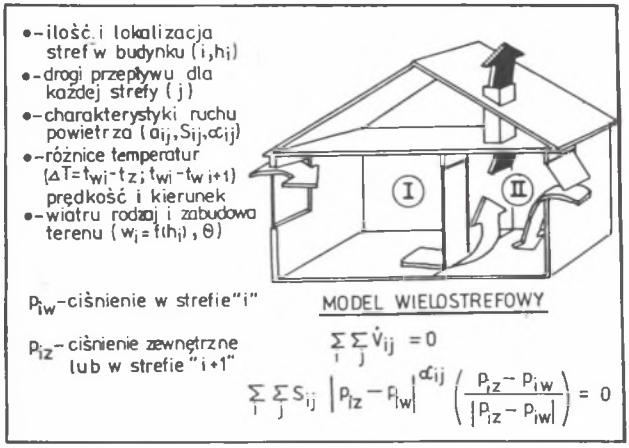
4.1. Struktura modeli matematycznych

Ogólne zasady konstruowania modeli budynków sprowadzają się do wydzielenia z nich pewnej ilości przestrzeni wewnętrznych, kontaktujących się ze sobą poprzez przepuszczalne dla powietrza elementy budowlane przegród. Podstawowym kryterium takich podziałów jest założenie wyrównania parametrów powietrza w tych przestrzeniach. Sugerując się głównie wynikami sztucznych prób przeprowadzanych za pomocą technik ciśnieniowych (patrz tabela 3.2), za wystarczające uważa się wyróżnienie poszczególnych mieszkań jako odrębnych stref. Podstawą obliczeń jest wykorzystanie zasady bilansowania strumieni powietrza napływających i odpływających z tych stref. Zgodnie z zasadą zachowania masy bilans taki ma postać:

$$\sum_i \sum_j \dot{m}_{ij} = 0, \ \text{kg/s} \tag{4.1}$$

gdzie "i" oznacza ilość stref (przestrzeni) w budynku, zaś "j" są drogami przepływu powietrza (napływu lub wypływu) przez strefę "i" z przestrzeni sąsiednich "j".

W większości modeli obliczeniowych powyższy bilans masowy sprowadzany jest do bilansu strumieni objętości powietrza, jak to przedstawiono schematycznie na rys. 4.1 na przykładzie budynku dwustrefowego. Postępowanie takie oznacza pominięcie wpływu zmian



Rys. 4.1. Zasada tworzenia i realizacja modeli wielostrefowych (schemat) [36, 104, 110]

Fig. 4.1. The principles of making and implementation of multizone models (scheme) [36, 104, 110]

gęstości powietrza. Badania wpływu jej zmian wykonywane przez D. Brandesa [22], H.E. Feustela [33, 34] oraz autora niniejszego opracowania [57, 58, 71, 110] wykazują, że błąd z tego tytułu nawet w przypadku maksymalnego zróżnicowania temperatur powietrza w szybach klatek schodowych (patrz rozdział 3) nie przekracza 1÷2%.

W przypadku budynku o dużej ilości stref wewnętrznych oraz pionowych szybów klatek schodowych modelami matematycznymi są układy równań bilansowych w postaci:

$$\sum_i \sum_j \left[S_{ij}^{o} \left(p_{ij,z} - p_{ij,w} \right)^{\alpha_{ij}} + S_{ij}^{dw} \left(p_{KL} - p_{ij,w} \right)^{\alpha_{ij}^{dw}} - \right.$$

$$\left. - S_{ij}^{KW} \left(p_{ij,w} - p_{wd} \right)^{\alpha_{ij}^{KW}} \right] = 0 \qquad (4.2a)$$

$$S_l^{DW}\left(p_{l,z}-p_{KL}\right)^{\alpha^{DW}}+\Sigma\left[S_{ij}^{O,KL}\left(p_{ij,z}-p_{KL}\right)^{\alpha^{O,KL}}-\right.$$

$$\left.S_{ij}^{dw}\left(p_{KL}-p_{ij,w}\right)^{\alpha_{ij}^{dw}}\right]=0 \qquad (4.2b)$$

gdzie:

S, α - szczelność przegród odpowiadająca oknom występującym w mieszkaniach (o) i klatce schodowej (o, KL), drzwiom wejściowym do budynku (DW) i do mieszkań (dw) oraz wielkości wykładników potęgowych,

p - ciśnienia panujące na zewnątrz budynku (z), wewnątrz poszczególnych stref (w), w najwyższym punkcie klatki schodowej (KL), na poziomie wylotu powietrza z kanałów wywiewnych (wd).

Wyjściowymi są tutaj dane odnośnie do własności elementów przepuszczalnych dla powietrza (S_{ij},α_{ij}) oraz zależności opisujące jego przepływ w wyniku kształtowania się określonego rozkładu ciśnień na przegrodach zewnętrznych budynków [4, 46, 59, 63, 109]. Wielkościami obliczanymi są ciśnienia kształtujące się w każdej ze stref pod wpływem różnic ciśnień związanych ze zmianą warunków środowiskowych, tzn. wyporu termicznego i naporu wiatru, a także mocy i rozwiązania układu kanałów wentylacyjnych ($p_{ij,w}$) [11, 29, 58, 71, 95, 111].

Ponieważ zależność strumieni objętości powietrza od różnic ciśnień jest nieliniowa, poszukiwany rozkład ciśnień w strefach budynku może być uzyskany jedynie drogą komputeryzacji obliczeń przy zastosowaniu odpowiedniej techniki numerycznej.

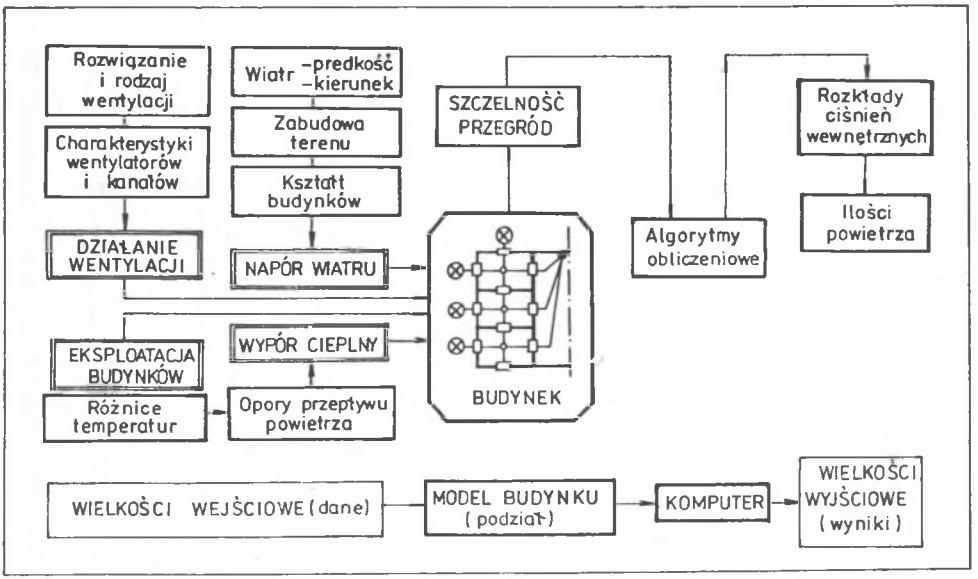
4.2. Charakterystyka wielostrefowych modeli matematycznych

W niniejszym opracowaniu scharakteryzowano reprezentatywne modele matematyczne dla większości obecnie stosowanych ich rozwiązań. Wybrano 7 z kilkudziesięciu modeli wielostrefowych, typowych dla ich rozwoju obserwowanego w ostatnim dziesięcioleciu, a jednocześnie najwszechstronniejszych z uwagi na ich części opisowe i dostępność.

Do porównania wybrano zatem programy (modele) opracowane przez G. Waltona [99], W. de Gidsa [37], Takao Tsuchina [36], M. K. Herrlina [42], C. Melo [55], M.B. Nantkę [71]

oraz grupę uczonych z 9 krajów uczestniczących w bezpośredniej realizacji części Aneksu Nr 23 (International Energy Agency) [36].

Analizę skoncentrowano na opisowych częściach programów, metodach realizacji obliczeń, a także sposobach sterowania i komunikacji pomiędzy użytkownikiem a modelem. Podstawy struktury modeli są identyczne i odpowiadają schematowi przedstawionemu na rys. 4.2. Cechuje ją modułowość przy jednoczesnej współzależności modułów opisowych i obliczeniowych. Rzadko stosowane są osobne programy wejściowe przetwarzające i magazynujące dane wejściowe. Dotyczy to zarówno czynników decydujących o ciśnieniach kształtujących się na powłoce zewnętrznej budynków, jak i parametrach charakteryzujących przepływy powietrza, uzależnionych od szczelności przegród. Są one zresztą wprowadzane w drugim z modułów stanowiącym model budynku. Oba uzależnione od siebie moduły stanowią założenia modelu realizowanego za pomocą wybranej metody numerycznej.



Rys. 4.2. Struktura modeli matematycznych (schemat)

Fig. 4.2. The structure of mathematical models (scheme)

Modułem końcowym jest zbiór wartości wielkości wyjściowych, którymi są bezpośrednio wartości ciśnień lub różnic ciśnień i odpowiadające im ilości powietrza określone na podstawie przyjętych charakterystyk przepływowych. Podstawowe cechy porównywanych modeli/programów zestawiono w tabeli 4.1. wraz z ogólną ich oceną.

Tabela 4.1

Charakterystyka wybranych modeli /programów dla budynków wielostrefowych

Nazwa modelu/programu Język oprogramowania	AIRENT C	GAINE F IV	SHMVMR F 77	MOVECOMP F 77	FLOW 2 F 77	INFIL Basic	COMIS F 77
Rodzaj komputera System operacyjny	PC MS-DOS	WS/IBM WSM	IBM MS-DOS	M-PC MS-DOS	VAX/IBM VMS	PC DOS	VAX/PC MS-DOS
Opisy: wyporu cieplnego	+	+	+	+	+	+	+
Opisy: naporu wiatru	+	+	+	+	+	+	+
Opisy: szczelin	+	+	+	+	+	+	+
Opisy: dużych otworów	+	-	-	+	-	-	+
Strefy: zewnętrzne	+	+	+	+	+	+	+
Strefy: wewnętrzne	-	-	-	-	-	-	-
Kanały [1] B	-	+	+	-	-	-	-
wentylacyjne P	+	-	+	+	-	+	+
Metoda iteracyjna [2]	N-Steff	MNB	N	N/R	MN/R	R.F+N/R	N-Steff
Wprowadzanie zmian w trakcie obliczeń	-	-	-	-	-	-	-
Śledzenie obliczeń na ekranie	-	-	-	-	-	-	-
Drukowanie wyników	+	+	+	+	+	+	+
Przetwarzanie wyników	-	-	-	-	-	-	-
Cele: potrzeby cieplne	+	+	+	+	+	+	+
Cele: migracja zanieczyszczeń	-	-	-	-	-	-	-
Pozycje w wykazie literatury	99	36	36	42	55	71	36

[2] - R.F. "regula falsi"; N -metoda Newtona; N/R - metoda Newtona-Raphsona; MN/R - zmodyfikowana metoda N/R; N - Steff - metoda Newtona z procedury Steffensena; MNB - metoda Browna

[1] - "B" - obliczane bezpośrednio w ramach programu centralnego; "P" - wprowadzane jako dane wejściowe na podstawie obliczeń poza programem centralnym

- Dla modułów wielkości wejściowych modeli charakterystyczne jest duże podobieństwo wprowadzanych danych opisowych lub podprogramów obliczeniowych. Dotyczy to sposobu uwzględniania wyporu termicznego i naporu wiatru, a także zależności stosowanych do opisu przepływu powietrza przez szczeliny oraz otwory w dużych powierzchniach. Podstawą ich jest znany i sprawdzony formalizm matematyczny opisu procesów i oddziaływań, a nieliczne różnice wynikają głównie z podziału budynku na strefy oraz założeń wprowadzanych do realizacji układów bilansowych równań nieliniowych. Podobna sytuacja ma miejsce w zakresie innych modeli nie objętych porównaniem przedstawionym w tabeli 4.1, a w tym również programów krajowych [15, 25, 29, 44, 86, 95].

- Moduł opisu budynku rzadko realizowany jest w sposób jawny. Z reguły podział budynku na strefy wynika jedynie ze struktury równań bilansowych zawartych w przyjętej procedurze obliczeniowej. Jedynie program COMIS pozwala na szczegółową specyfikację wydzielanych stref wraz z zestawieniem znajdujących się w nich elementów przepuszczalnych dla powietrza. Jednak nawet i w tym przypadku brak jest możliwości zrealizowania innej opcji podziału budynku. We wszystkich modelach wyróżnione są jedynie strefy posiadające bezpośredni kontakt z otoczeniem zewnętrznym (strefy zewnętrzne) [68, 109, 111, 117, 119]. Dotyczy to zarówno części mieszkalnych, jak i komunikacyjnych, co oznacza, że pomijany zostaje wpływ przestrzeni wewnętrznych komunikujących się z otoczeniem zewnętrznym w sposób pośredni na wymianę powietrza w strefach zewnętrznych. Na podstawie wieloletnich badań omawianej problematyki stwierdzić można, że jednym z ważniejszych elementów struktury budynku są kanały wentylacyjne i różnego rodzaju szyby pionowe. Charakterystyczne dla zdecydowanej większości programów są pośrednie opisy kanałów wentylacyjnych stanowiących pojedyncze strefy niezależnie od ich konstrukcji. Polega to na określeniu wartości wielkości opisujących charakterystyki przepływowe kanałów poza programem głównym i wprowadzeniu ich w postaci danych wejściowych. Sposób taki zastosował J. Karolak [44] w opracowanym przez siebie pierwszym modelu obliczeniowym w kraju. Podobnie postąpił autor w pierwszych programach symulacyjnych [71]. Jednak już w roku 1982/83 opisy kanałów wprowadzone zostały bezpośrednio do nowych edycji tych programów [57, 58]. Do znaczących modeli wielostrefowych w kraju zaliczyć należy program opracowany przez E. Szczechowiaka [95]. Realizuje on również bezpośredni sposób uwzględniania kanałów wentylacyjnych w ramach centralnego programu obliczeniowego, a ponadto zwraca uwagę na problemy zbieżności obliczeń iteracyjnych.

Z porównywanych w tabeli 4.1 programów jedynie dwa realizują powyższy postulat. Jednak nawet i w tych przypadkach brak jest informacji na temat zmiany charakterystyk przepływowych kanałów w wyniku zmian przepływów powietrza w obrębie poszczególnych stref.

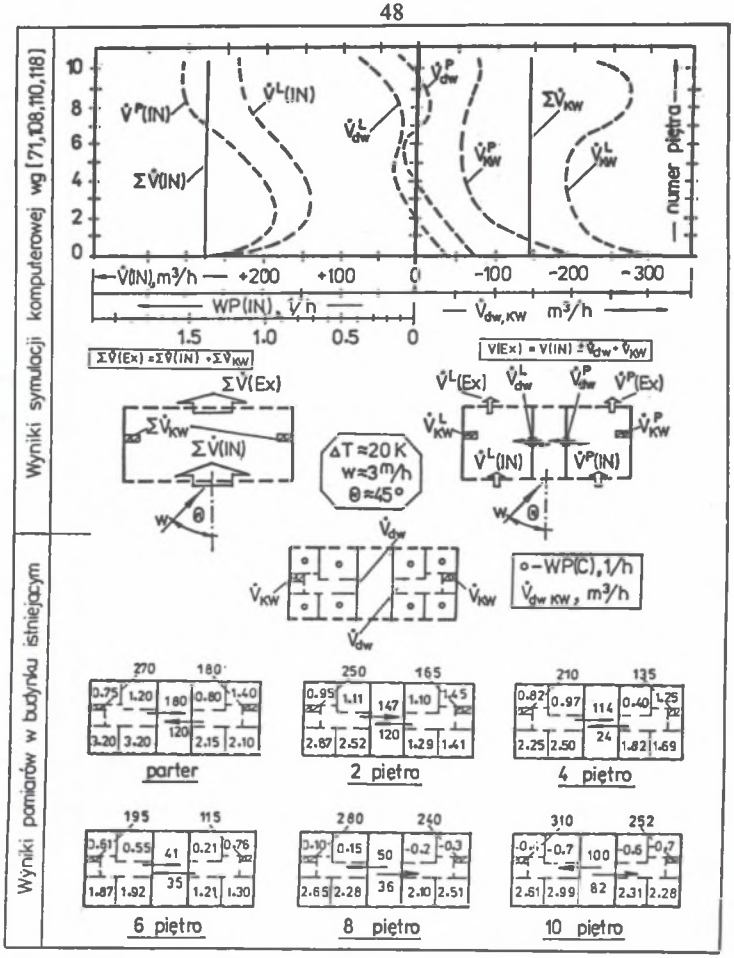
Żaden z programów zagranicznych lub krajowych nie uwzględnia charakterystycznej zmienności parametrów powietrza w pionowych szybach, a szczególnie klatkach schodowych.

- Za niezadowalający uznać należy stan w zakresie komunikacji użytkownika z programami, a przede wszystkim śledzenia obliczeń, wprowadzania zmian w trakcie ich trwania oraz formy opracowania wyników wraz z ich magazynowaniem. Forma i zależne od potrzeb zorganizowanie modułów wielkości wyjściowych nie stanowią jednak trudności. Z reguły wymagają jedynie dodatkowego oprogramowania i zależą głównie od możliwości zastosowanych jednostek komputerowych oraz przewidywanego sposobu dalszego wykorzystania wyników.

Niezależnie od rozwiązania modelu uzyskiwane wyniki obliczeń mają formę końcową podobną do danych zaprezentowanych w górnej części rys. 4.3. Dane te uzyskano za pomocą programów opracowanych przez autora [58, 66] opartych na punktowym modelu budynku (Schemat po lewej stronie rys. 4.3) oraz sprowadzeniu budynku do systemu będącego zbiorem stref (punktów) odpowiadających poszczególnym mieszkaniom (schemat po prawej stronie rys. 4.3). Obliczenia wykonano dla 10-piętrowego budynku będącego przedmiotem szczegółowych pomiarów, których wyniki przedstawiono w rozdziale 3 niniejszego opracowania. Jednym z efektów tych pomiarów były wartości wymiany powietrza w poszczególnych pomieszczeniach uzyskane za pomocą metody znakowania gazem wskaźnikowym. Wyniki tych pomiarów przedstawiono dla wybranych poziomów badanego budynku w dolnej części rys. 4.3. wraz ze schematem podziału budynku. Mimo niedotrzymania warunku jednoczesności tych pomiarów uzyskane wyniki jako jedyne dostępne w tej skali mogą być wykorzystane zdaniem autora do oceny przydatności wielostrefowych modeli matematycznych.

Pomijając już mało przydatne wyniki obliczeń punktowego modelu budynku (linia ciągła na górnej części rys. 4.3), także efekty symulacji w przypadku drugiego typu modelu (linia przerywana w górnej części rys. 4.3) znacznie odbiegają od danych pomiarowych.

Stosunkowo duże odchyłki rzeczywistych ilości powietrza wymienianego w poszczególnych pomieszczeniach, szczególnie - drogą infiltracji powietrza z otoczenia



Rys. 4.3. Wyniki obliczeń przepływów powietrza w badanym budynku uzyskane za pomocą modeli matematycznych (wykres górny) oraz rezultaty pomiarów wymiany powietrza dokonywanych w pomieszczeniach za pomocą metody znakowania gazem wskaźnikowym (zestawienie dolne - dla 6 pięter) [109, 110, 111]: IN - infiltracja powietrza; Ex - eksfiltracja powietrza; dw - drzwi wejściowe do mieszkań; KW - kanały wentylacyjne; L, P - mieszkania położone po lewej i prawej stronie klatki schodowej; ("___ " - dla modelu punktowego; "----" - przy wydzieleniu mieszkań jako odrębnych stref)

Fig. 4.3. The results of air flows' calculation for the tested buildings with the help of mathematical models (the upper diagram) and results of measurements of air change rates performed by use of tracer gas method (the lower comparison - for 6 floor levels) [109, 110, 111]: IN - air infiltration; Ex - air exfiltration; dw - entrance doors to flats; KW - ventilation ducts; L, P - flats located on the left and night side of the staircase; ("___ " for the building as a point; "----" - for the flats as seperate zones)

zewnętrznego, w porównaniu z odpowiadającym im wartościom obliczeniowym, świadczą o małej poprawności modeli. Jak wynika ze szczegółowych analiz przeprowadzonych w tym zakresie w pracach [20, 41, 68, 71, 85], stan taki jest efektem nie tylko przypadkowości i losowości badanego procesu. Jedną z głównych przyczyn jest również grupowanie pomieszczeń i innych przestrzeni. Wymaga to odpowiedniego skupiania czynników, o najczęściej losowym oddziaływaniu na procesy przepływu powietrza. Częściową eliminację uzyskać można m.in. przez wprowadzenie bardziej szczegółowego podziału przestrzeni budynku, niż miało to miejsce dotychczas. Oznacza to jednak zwiększenie ilości nieliniowych równań bilansowych, a tym samym znaczenia nabiera forma i sposób matematycznej realizacji obliczeń.

- Podstawą wszystkich dotychczasowych modeli jest ich odwzorowanie matematyczne w postaci układu równań bilansowych wyrażonych z reguły zależnościami (3.2)-patrz rys. 4.1. W grupie modeli, porównywanych w tabeli 4.1, najbardziej charakterystycznych dla całej ich populacji, bilansami obejmuje się poszczególne mieszkania (n-1 równań) oraz łączącą je klatkę schodową, nie wyróżniając w niej dodatkowych stref. Podobnie postępuje się z kanałami wentylacyjnymi, przy czym stanowią one jedynie elementy wyróżniane w strefach odpowiadających mieszkalnym częściom budynku.

Układ równań bilansowych dla całego budynku wyrażany jest w postaci ogólnej:

$$f_j(p_1, p_2, \ldots p_n) = 0, \qquad \text{gdzie } j = 1, 2, \ldots n \tag{4.3}$$

gdzie f_j oznacza nieliniową funkcję obliczanych wartości ciśnień p_i w poszczególnych strefach (patrz zależność (3.2)).

Z uwagi na silną nieliniowość układu równań (4.1) jego rozwiązanie uzyskuje się za pomocą metod iteracyjnych, których istotą jest budowanie kolejnych przybliżeń pierwiastków równań.

W ponad połowie modeli matematycznych mających status wielostrefowych wykorzystuje się do obliczeń metodę Newtona. Podkreślając prostotę formuł kolejnych przybliżeń zwraca się jednak uwagę na jej lokalną zbieżność. Skuteczne jej zastosowanie wymaga rozpoczęcia obliczeń od wartości początkowych, będących już dobrym przybliżeniem rozwiązań. Ponieważ informacje takie są trudne do uzyskania, omawiana metoda jest zwykle modyfikowana. Modyfikacje polegają z reguły na zastosowaniu najpierw metod niezależnie

zbieżnych [102] lub innych procedur pozwalających na przybliżenie rozwiązań [14], a następnie wprowadzenie algorytmów opartych na metodach szybkozbieżnych.

Z uwagi na dużą ilość obliczanych zmiennych i wynikające stąd trudności w obliczaniu pochodnych (f_j') powszechne są dyskretne warianty metody Newtona. Pochodne zastępowane są ich przybliżeniami różnicowymi, co w efekcie daje układy liniowe, których rozwiązanie sprowadza się do realizacji ich zapisu macierzowego. Szczególnie popularne są tutaj metody Choleskiego-Banachiewicza, eliminacja Gaussa lub modyfikacje metody Newtona (Steffensen, Brown, Levenberg-Marquard itp.) [19, 25, 36, 71, 99, 102].

W niewielkiej części modeli matematycznych rozwiązanie nieliniowego układu równań(4.1) sprowadza się do problemu optymalizacji (zwykle minimalizacji) funkcji:

$$F(p_1, p_2, \ldots p_n) = \sum_{j=1}^{n} \left| f_j\left(p_1, p_2, \ldots, p_n\right) \right|^2 \qquad (4.4)$$

lub innych funkcji rzeczywistych modułów f_j. Stosowane tutaj mogą być różne algorytmy procedur optymalizacyjnych: z ograniczeniem pierwiastków lub bez, gradientowe, modyfikacji kierunków itp. Numeryczne realizacje optymalizacji są niewątpliwie bardziej czasochłonne niż proste metody iteracyjne. Można jednak stwierdzić [15, 42, 55, 71], że w przypadku dużych układów silnie nieliniowych równań metody minimalizacji są efektywne. Wynika to z faktu, że dla funkcji wielu zmiennych metoda Newtona (i jej pokrewne) może nie być zbieżna, zwłaszcza przy błędnym wyborze wartości startowych [71, 95]. Minimalizując funkcję (4.3) zawsze otrzymujemy rozwiązanie, chociaż na ogół bez gwarancji, że jest to minimum globalne. Problem rozwiązania układów nieliniowych równań jest zagadnieniem samym w sobie zarówno z teoretycznego, jak i praktycznego punktu widzenia.

Dlatego też zdecydowano się na krótkie jego scharakteryzowanie, mimo że w pracy nie dokonywano szczegółowego porównania metod obliczeniowych. Ocena ta jest jednak wystarczająca do stwierdzenia, że każda metoda iteracyjna zastosowana do rozwiązywania układu równań nieliniowych podlega tym samym ograniczeniom zbieżności jak klasyczna metoda Newtona. Oznacza to, że nie ma zadowalających metod rozwiązywania takich układów, a zastosowanie jakiejkolwiek z nich poprzedzone jest jedynie ogólnym stwierdzeniem ich cech zbieżności. W praktyce większą uwagę zwraca się więc na jak najszybsze dojście do przybliżonych z założoną dokładnością rozwiązań układów równań. Sprowadza się to głównie do ograniczenia czasu obliczeń, uzyskiwanego w wyniku

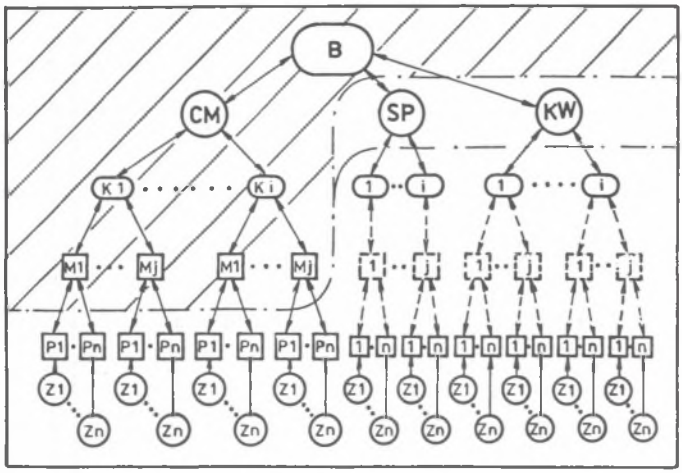
zmniejszenia równań bilansowych. W ten sposób matematyczna strona realizacji modeli staje się jedną z przyczyn zmniejszenia ilości stref wydzielonych z budynku.

4.3. Sformułowanie problemu badań przepływów i wymiany powietrza w budynkach wielostrefowych

Wieloaspektowość procesów wymiany powietrza sprawia, że różne mogą być cele ich badania. W zależności od tego stosuje się różne metody, obejmując analizami różne przestrzenie i obiekty. Do podstawowych kierunków badań zaliczyć należy ustalanie wpływu procesu na zużycie ciepła do ogrzania budynków, wiążące się z cieplną optymalizacją obiektów i systemów [8, 10, 53, 54, 89, 90], a także analizy jakości procesów wentylacyjnych, w których istotne znaczenie ma skuteczność wymiany powietrza jako miernika oceny rozdziału powietrza w badanych przestrzeniach z uwagi zarówno na warunki cieplne, jak i migrację zanieczyszczeń w obrębie budynków. W badaniach tych korzystna dla identyfikacji procesów jest komputeryzacja pomiarów oraz ich uzupełnianie wciąż rozwijanymi metodami numerycznymi, zwiększającymi możliwości przeprowadzanych analiz.

Biorąc powyższe pod uwagę, w niniejszej pracy zajęto się problemem badania wymiany powietrza w budynkach, w których na skutek zróżnicowania cech i własności procesu pożądany jest podział na dobieraną zgodnie z potrzebami ilość wzajemnie połączonych przestrzeni. Główny akcent położono na aspekt zużycia ciepła w procesach naturalnej wymiany powietrza, jako najtrudniejszych pomiarowo z uwagi na złożony wpływ sił napędowych procesu. Przy realizacji powyższego aspektu za wystarczające uważa się operowanie wartościami średnimi poszczególnych parametrów [39, 72, 74, 86, 96]. W tej sytuacji pomocne dla ocen są metody komputerowej symulacji przepływów powietrza oparte na modelach matematycznych procesów i budynków. W badaniach tego typu korzystne jest traktowanie budynków jako systemów składających się z dużej ilości elementów, którymi powietrze przepływa lub przenika. Stosowane dotychczas modele nie są kompletne w tym zakresie. Poważnym ich mankamenetem jest operowanie nadmiernie skupionymi parametrami oraz niedocenienie wpływu oddziaływania wewnętrznych przepływów powietrza na jego wymianę z otoczeniem zewnętrznym, a także przepływów powietrza z zewnątrz na skutek działania wiatru. Jeszcze większe zastrzeżenia można mieć w stosunku do kanałów wentylacji naturalnej czy też przestrzeni szybów pionowych typu klatek schodowych, które są najmniej dokładnie opisywanymi elementami budynków. Stan obecny w omawianym zakresie ilustruje

zakreskowane pole na rys. 4.4., przedstawiającym podział budynków z uwzględnieniem wszystkich przestrzeni. Objęcie badaniami elementów położonych poza tym polem jest z wielu względów pożądane i stanowi jeden z celów postulowanego w wielu pracach rozwoju metod pomiarowych oraz obliczeniowych [2, 9, 36, 80]. W tym znaczeniu system zastępujący budynek odpowiada wymaganiom w zakresie odwzorowania rzeczywistego podziału na przestrzenie oraz uwzględnienia specyfiki przepływów powietrza przez szyby pionowe i kanały wentylacyjne. W ten sposób możliwy jest również szczegółowszy niż dotychczas opis różnicujących się parametrów i czynników decydujących o przepływach i wymianie powietrza, zarówno w przestrzeniach wewnętrznych, jak i otoczeniu zewnętrznym.



Rys. 4.4. Podział budynków (schemat) [72, 74, 111, 117]: B - budynek; CM - części mieszkalne; SP - szyby pionowe (np. klatki schodowe, szyby wind itp.); K- kondygnacje; M - mieszkania; P- pomieszczenia); z - warunki zewnętrzne)

Fig. 4.4. The division of buildings (scheme) [72, 74, 111, 117]: B - buildings; CM- habitable parts of buildings; SP - vertical shafts (as example staircase, lifts etc); K - floor levels; M - flats; z - external conditions

Zdaniem autora, dla badania tak złożonych systemów korzystne jest poszukiwanie uproszczonych rozwiązań pod warunkiem dostępności danych opisujących proces w systemach rzeczywistych uzasadniających wprowadzone uproszczenia. Wobec trudności w uzyskiwaniu takich danych pożądane jest utworzenie modelu bliższego podstawowemu (szczegółowemu), który umożliwiałby dokonywanie zarówno weryfikacji fizycznej, jak i matematycznej powszechnie stosowanych modeli scalonych (uproszczonych). Opracowanie

takiego modelu podyktowane jest zatem również określeniem zasadności stosowanych uproszczeń i nie oznacza jednoznacznego odrzucenia modeli scalonych.

W rozdziale 5 niniejszego opracowania przedstawiono propozycję metody realizującej powyżej sformułowane wymagania.

5. PROPONOWANA METODA BADANIA WYMIANY POWIETRZA W WIELOSTREFOWYCH BUDYNKACH MIESZKALNYCH

5.1. Założenia wstępne

W związku z wnioskami wynikającymi zarówno z pomiarów, jak i ocen teoretycznych za celowe uznano podjęcie analiz opartych na metodzie dedukcyjnej, w której założono, że budynek rozpatrywany jest od wewnątrz jako zbiór określonej ilości przestrzeni, wynikających zarówno z istnienia wewnętrznych przegród działowych, jak i specyficznych cech przepływów powietrza przez szyby pionowe oraz kanały wentylacyjne, a także zróżnicowanego wpływu sił napędowych badanego procesu. Realizacja takiej analizy wymaga przeprowadzenia dyskusji odnośnie do możliwości opisu elementów struktury systemu zastępującego budynek, odwzorowania istotnych powiązań pomiędzy tymi elementami oraz wyboru metody symulacji przepływów powietrza wraz z opracowaniem programu komputerowego.

Przed przystąpieniem do analizy przyjęto, że jej efekt końcowy w możliwie największym stopniu odpowiadać będzie wymaganiom uniwersalności i kompleksowości. Dotyczy to zarówno sposobów odzwierciedlania struktury wewnętrznej budynków, jak i procesów wymiany powietrza z uwagi na opisy poszczególnych przestrzeni oraz oddziaływania czynników kształtujących te procesy. Założenia te odnoszą się głównie do wprowadzonego sposobu symulacji przepływów powietrza i realizującego go programu komputerowego. Przy jego opracowywaniu zastosowano rozwiązania pozwalające na zachowanie odpowiedniej elastyczności i podatności na modyfikacje w zakresie wprowadzanych opisów oraz możliwości objęcia obliczeniami modeli budynków i procesów o różnej złożoności. Możliwości te, w zamierzeniu autora, odnoszą się również do uwzględniania wyników pomiarów lub ich sekwencji, co znajduje uzasadnienie w wyeliminowaniu dysproporcji pomiędzy nimi a rezultatami symulacji.

Stworzenie szerokich możliwości zastosowań symulacji komputerowej przepływów powietrza, również do badania konkretnych budynków istniejących, jest jednym z najistotniejszych założeń wstępnej opracowanej metody.

Wśród innych wymagań do najważniejszych zaliczono następujące założenia:

- badania symulacyjne poprzedzić należy zebraniem danych odnośnie do geometrycznych cech badanego budynku i własności przepływów powietrza w poszczególnych jego przestrzeniach, a przede wszystkim w kanałach wentylacji naturalnej i szybach pionowych,
- zebranie powyższych informacji oraz skonstruowanie systemu zastępującego badany budynek stanowić powinno pierwszy etap badań będący podstawą do wykonania analiz zasadniczych,
- zasadnicze badania powinny być dokonywane za pomocą symulacji komputerowej, przy czym realizujący ją program obliczeniowy powinien umożliwiać wprowadzenie dowolnie dokładnego modelu budynku w zakresie odwzorowywania jego struktury wewnętrznej wraz z jej opisem,
- zastosowany program obliczeniowy powinien być tak opracowany, aby możliwe było wprowadzenie zmian, a także ingerencja w szybkość i dokładność obliczeń, do czego wskazane jest wykorzystanie innych niż dotychczas metod matematycznych.

Proponowana metoda była tematem pracy autora realizowanej na Politechnice Śląskiej w ramach Resortowego Programu Badawczo-Rozwojowego [109] i upowszechniona za pośrednictwem publikacji i referatów na krajowych i zagranicznych konferencjach [72-76, 111-120]. Metoda ta jest rozwinięciem metod obliczeniowych proponowanych przez D. Cacavelliego [23], C. Melo [55] i M.E. Feustela [35, 36] oraz metod pomiarowych opracowanych przez M.D.A.E.S. Pererę [80] w zakresie przede wszystkim realizacji postulatów odnośnie do uszczegółowiania przestrzennego struktury budynków. Proponowana metoda zawiera wiele elementów zbieżnych z nimi, ale nie stanowią one jej istoty. Inne jest w niej podejście do strefowania wewnętrznej przestrzeni budynków oraz opisu szybów pionowych i kanałów wentylacji naturalnej. Odbiega także od dotychczasowych rozwiązań sposób opisu połączeń pomiędzy wydzielonymi z budynku strefami, odwzorowujący istotne dla badanego procesu wewnętrzne drogi przepływu powietrza. Wprowadzone do opisu oryginalne modyfikacje stanowią dorobek autora i mają charakter uniwersalny, podobnie jak opracowany do realizacji przepływów powietrza nowy program komputerowy o zdecydowanie większych możliwościach operacyjnych niż dotychczasowe.

5.2. Strefowanie wewnętrznej przestrzeni budynków

Jednym z postawowych założeń opracowanej metody jest dowolność w konstruowaniu systemu zastępującego budynek. W omawianym przypadku dotyczy to głównie ilości stref wydzielanych w jego przestrzeni wewnętrznej. J. Railio i P. Saarnio [85, 86] oraz M.E. Feustel i wsp. [34, 36], dyskutując te zagadnienia, poddają w wątpliwość stosowane dotychczas sposoby podziału nie proponując jednak konkretnych rozwiązań. Wątpliwości te wynikają przede wszystkim z koncepcji skupiania kilku przestrzeni w jedną strefę, niezależnie od zakresu zmian czynników wymuszających ruch powietrza. W jeszcze większym stopniu dotyczy to przestrzeni szybów pionowych i często pomijanych kanałów wentylacji naturalnej [74, 110]. W związku z powyższymi wątpliwościami wprowadzono pełne odwzorowanie struktury wewnętrznej części mieszkalnych budynków oraz pionowych szybów w częściach komunikacyjno-użytkowych i kanałach wentylacyjnych. Podstawą podziału wewnętrznej przestrzeni budynków mogą być wyniki pomiarów przedstawione w rozdziale 3 opracowania uzasadniające ich celowość i pozwalające na określenie kryteriów strefowania.

5.2.1. Części mieszkalne budynków

W obrębie mieszkalnych części budynków uzasadniony jest podział wynikający z istnienia wewnętrznych przegród działowych. Oznacza to, że każde pomieszczenie, niezależnie od jego połączenia z sąsiednimi, stanowi elementarną przestrzeń, zwaną dalej *strefą rzeczywistą*. Jest to również realizacja wcześniejszych postulatów autora sprecyzowanych w pracach [68, 71, 107], zmierzających do wydzielenia z budynku stref wewnętrznych charakteryzujących się pośrednim kontaktem z otoczeniem zewnętrznym.

Modelem każdej z uzyskanej w ten sposób strefy jest punkt skupiający jej pojemność powietrzną, dla którego określone są drogi i kierunki przepływu powietrza. Wynikają one z istnienia szczelin w stolarce budowlanej oraz otworów wlotowych do kanałów wentylacyjnych w rzeczywistych powierzchniach przegród otaczających wydzielone strefy.

Pokreślić należy zaletę takiego podziału związaną z możliwością konfrontacji z wynikami pomiarów, stanowiącą jedno z wymagań opracowanej metody. Pomiary takie mogą być w tym przypadku dokonywane za pomocą wzorcowych technik znakowania gazem, które są dobrze opanowane w stosunku do pojedynczych pomieszczeń.

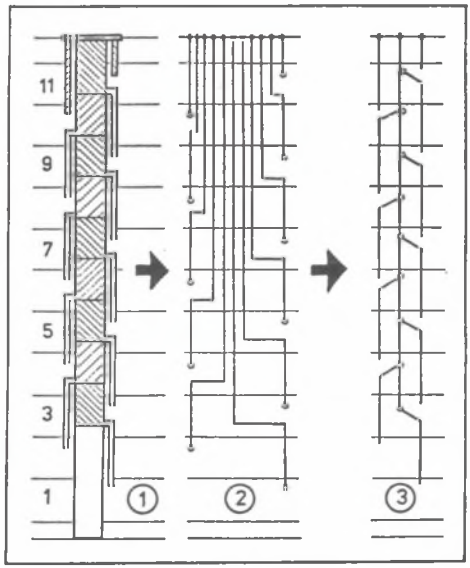
5.2.2. Przestrzenie pionowe przechodzące przez całą wysokość budynków

Do przestrzeni tych należą kanały wentylacyjne oraz przede wszystkim różnego rodzaju pionowe szyby o charakterze komunikacyjnym. Współuczestniczą one w procesie wymiany powietrza w częściach mieszkalnych w różnym stopniu, w zależności od ich rozwiązania oraz sposobu połączenia z pomieszczeniami.

Podstawą proponowanego podziału przestrzeni pionowych mogą być wyniki pomiarów zestawione w rozdziale 3 oraz wnioski sformułowane w rozdziale 4 niniejszego opracowania.

- Bezpośrednie uwzględnienie kanałów wentylacji naturalnej jest możliwe jedynie w 4 na 50 analizowanych w pracy [36]. Możliwości takie posiadają również modele S. Bergströma [17], E. Szczechowiaka [29, 95] oraz niektóre modele autora niniejszego opracowania [71]. Sprowadzają się one do wprowadzenia ich jedynie jako elementów struktury budynków podobnie jak szczelin w stolarce budowlanej. Zakłada się z reguły kwadratową zależność całkowitych strat ciśnienia od normatywnych ilości powietrza przepływającego nimi, co przy powszechnym wykorzystaniu charakterystyk przepływowych w postaci zależności (3.1) (dla $\alpha = 0,5$) sprowadza się do obliczenia współczynników przepływu powietrza (S_{KW}). Obliczeń tych dokonuje się poza modelem obliczeniowym za pomocą znanych i dostępnych procedur [104-110], a ich wyniki w postaci zestawień współczynników S_{KW} stanowią dane wprowadzane do zasadniczego modelu. Szczególnie charakterystyczny jest tutaj sposób traktowania zbiorczych kanałów wentylacyjnych. Układ taki składa się z naturalnie wydzielonych odcinków, którymi z założenia przepływa różna ilość powietrza, co schematycznie przedstawiono na rys. 5.1. Wartości współczynników S_{KW} obliczane są przy założeniu, że kanałami przepływa średnia ilość powietrza, wynikająca ze sposobu prowadzenia kanałów i ilości włączanych do nich odgałęzień. Uproszczenie takie sprowadza się więc do zastąpienia kanału zbiorczego - kanałami indywidualnymi, które w konsekwencji oznacza zmianę struktury kanałów stanowiących integralny element struktury budynków. Oprócz powyższego, sposób charakteryzowania kanałów wentylacji naturalnej budzi również innego rodzaju wątpliwości. Częstemu ich pomijaniu lub traktowaniu na równi ze szczelinami w przegrodach towarzyszy uproszczenie wynikające z podobieństwa ciśnień panujących w ich obrębie i budynku. Nie negując tego, podkreślić jednak należy, że w stosunku do szczelin kanały te mają zdecydowanie mniejsze opory przepływu, a więc dużo większe współczynniki S_{KW}. Oznacza to, że właśnie w warunkach wspomnianego podobieństwa ciśnień przepływać nimi mogą duże ilości powietrza. W praktyce przepływy te zmieniać się mogą w obrębie

pojedynczego kanału w dość szerokim zakresie, co oczywiście powoduje zmianę współczynników S_{KW}. Zmiany te nie są uwzględniane i korygowane w żadnym z dotychczas stosowanych modeli obliczeniowych [71, 95].



Rys. 5.1. Podział zbiorczych kanałów wentylacji naturalnej (przykład) [74, 111]: 1 - schemat połączeń; 2 - dotychczas stosowany; 3 - proponowany do wprowadzenia

Fig. 5.1. The division of collective ventilation ducts (example) [74, 111]: 1 - scheme of connections; 2 - prevailing up till now; 3 - suggested for using

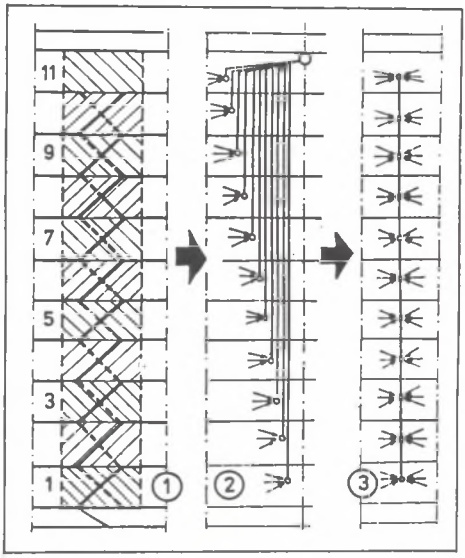
Podobne zastrzeżenia dotyczą wykładników potęgowych α w zależnościach (3.1) stanowiących charakterystyki przepływowe kanałów. Przyjęcie ich wielkości równych 0,5 w typowych procedurach obliczeniowych jest poprawne, jeżeli kanałami przepływają normatywne ilości powietrza. W praktyce są jednak one wypadkową wielu oddziaływań, które doprowadzić mogą do relatywnie dużego zmniejszenia tych ilości powietrza. W konsekwencji jego ruch może odbywać się w strefie przepływów przejściowych, co wymaga zmiany wielkości wykładnika α. Na podstawie analiz przeprowadzonych w tym zakresie w pracach [104, 106, 109] stwierdzić można, że zmiany te mają wpływ na obliczenia przy spadku ilości powietrza poniżej 10% ich wartości normatywnych. Stan taki występować może w okresach minimalnych wymuszeń, ale także może mieć charakter lokalnych zmian w obrębie kanałów zbiorczych na skutek podobnych zmian parametrów powietrza w wentylowanych pomieszczeniach. Wszystkie te wątpliwości mogą być uwzględnione jedynie w wyniku pełnej

realizacji połączeń w obrębie kanałów wentylacyjnych, czego ilustracją jest wprowadzenie ich podziału wg schematu 3 na rys. 5.1. Dla budynku 10-piętrowego z kanałami zbiorczymi wystąpi więc 9 stref o identycznych pojemnościach powietrznych, zwiększonych o 2 strefy odpowiadające kanałom indywidualnym. Ilość tych stref może być zwiększona lub zmniejszona niezależnie od rozwiązania kanałów i w zależności od opisu wprowadzanych wymuszeń. Ma to miejsce przykładowo przy uwzględnianiu zróżnicowania temperatur powietrza w odgałęzieniach kanałów zbiorczych (rozdział 3.2.3) lub gradientu temperatury wzdłuż ich wysokości.

• Typowym reprezentantem szybów pionowych są klatki schodowe, w których często zlokalizowane są inne szyby, np. zsypy śmieci lub szyby wind. Mają one kubaturę porównywalną z przyległymi pomieszczeniami i kontaktują się z nimi poprzez szczeliny w drzwiach wejściowych do mieszkań. Wzdłuż swej wysokości ograniczone są pionowymi przegrodami o dużej ilości takich szczelin, również połączonych z otoczeniem zewnętrznym w zależności od lokalizacji klatek schodowych w obrębie budynków.

W dotychczas stosowanych modelach obliczeniowych klatki schodowe nie są reprezentowane w sposób jawny. Traktowane są zwykle jako jedna, bliżej nie określona strefa wyrażona pojedynczym równaniem bilansującym strumienie powietrza wymieniane z mieszkaniami i otoczeniem zewnętrznym. Równanie to stanowi z punktu widzenia metod obliczeniowych podstawowy układ zamykający bilanse w poszczególnych mieszkaniach (patrz zależności bilansowe (4.2)). Realizowane jest to poprzez takie przybliżenie wartości ciśnienia w najwyższym punkcie klatki schodowej, aby wszystkie równania bilansowe spełnione były z przyjętą dokładnością [25, 56, 71, 100]. W konsekwencji postępowanie takie sprowadzone jest do realizacji indywidualnych przepływów powietrza, w sposób przedstawiony przykładowo na schemacie 2 - rys. 5.2. Nie pozwala to uwzględniać charakterystycznych zmian temperatur powietrza, a w konsekwencji prowadzić może do błędnego określania różnic ciśnień pomiędzy pomieszczeniami i klatką schodową. Do wniosków takich doszli H.E. Feustel i wsp. [35, 36] oraz A.S. Zohrabian i wsp. [103], nie proponując jednak żadnych rozwiązań. Rozwiązanie zaproponował autor niniejszego opracowania [74, 111, 119], wykorzystując wnioski z badań własnych, a także analiz wykonanych przez A.J. Reynoldsa [87, 88] obejmujących badanie charakteru przepływów powietrza w klatkach schodowych z uwzględnieniem zróżnicowanych oddziaływań zjawisk cieplnych i aerodynamicznych. Proponowane rozwiązanie sprowadza się do wydzielenia jako elementarnej części klatki

schodowej przestrzeni ograniczonej płaszczyznami przechodzącymi przez podesty w ciągach schodów. Ideę takiego podziału zastosowano przy opracowywaniu proponowanej metody i ilustruje ją schemat 3 na rys. 5.2. Klatka schodowa jest zastąpiona układem szeregowo połączonych stref o jednakowej pojemności powietrznej, przy czym umowne płaszczyzny poziome są przedłużeniem poszczególnych stropów budynku. W przypadkach uzasadnionych korzystne może być inne przeprowadzenie umownych płaszczyzn działowych, jednak celowe jest utrzymanie ilości wydzielanych stref równych ilości kondygnacji w budynku.



Rys. 5.2. Podział klatek schodowych (przykład) [74, 111, 117]: 1 - schemat klatki schodowej z zaznaczonym ciągiem schodów; 2 - dotychczas stosowany; 3 - proponowany do wprowadzenia

Fig. 5.2. The division of staircases (example) [74, 111, 117]: 1 -scheme with stair plane; 2 - prevailing up till now; 3 - suggested for using

Z uwagi na umowność płaszczyzn działowych i podobieństwo proponowanych podziałów strefy uzyskane w jego wyniku określane są jako *strefy umowne*. W wyniku dokonanego podziału cała przestrzeń wewnętrzna budynków zastępowana jest systemem wzajemnie połączonych, rzeczywistych i umownych stref, przy czym sposób tych połączeń odwzorowuje wszystkie istotne drogi przepływu powietrza.

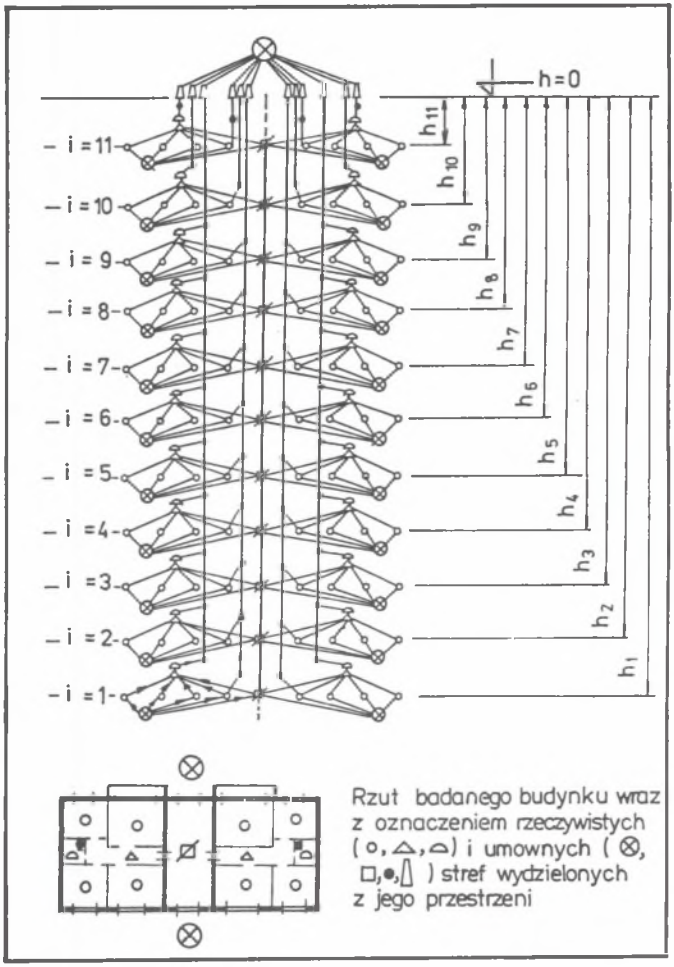
5.3. Model systemu zastępczego

W systemie zastępującym rzeczywisty budynek cała jego przestrzeń sprowadzona jest do przestrzennej sieci powietrznej o strukturze odpowiadającej powyżej określonym zasadom wydzielania poszczególnych przestrzeni. Cały układ odwzorowywanych połączeń powiązany jest z otoczeniem zewnętrznym poprzez odpowiednio kontaktujące się z nim przestrzenie. W celu zachowania kompletności i zgodności opisów wskazane jest objęcie podziałami również i otoczenia zewnętrznego. Mają one charakter umowny, zaś ilość wyróżnianych tu stref wynikać będzie ze szczegółowości opisów oddziaływania warunków środowiskowych na wewnętrzne przepływy powietrza.

Cała przestrzeń budynku zastąpiona jest zbiorem elementów dyskretnych, którymi są poszczególne strefy. Ich pojemność powietrzna skupiona jest w punktach węzłowych systemu, przy czym węzły odpowiadające otoczeniu zewnętrznemu określone są nieskończoną pojemnością. Wszystkie te węzły połączone są gałęziami odpowiadającymi wyróżnionym drogom przepływu powietrza. Lokalizacja węzłów jest jednoznacznie określona przez skupienie pojemności powietrznej odpowiadających im stref w środku ich ciężkości. Oznacza to, że obiektem ocen będzie przestrzenny rozkład charakterystycznych zmiennych w całym budynku, nie zaś w każdej ze stref. Z uwagi na wykorzystnie metody numerycznej niezbędna jest również dyskretyzacja tych zmiennych, a także charakterystycznego dla nich wektora. W omawianym przypadku jest to równoznaczne z przyjęciem kierunków przepływu powietrza wzdłuż wszystkich gałęzi systemu, przy czym za wyjściowe przyjęto tutaj wymagania normatywne. Zgodnie z nimi powietrze napływa z otoczenia zewnętrznego przez nieszczelności w oknach oraz z klatki schodowej przez nieszczelności w drzwiach wejściowych, zaś po zużyciu jest usuwane kanałami wentylacyjnymi na zewnątrz.

Przykładem systemu zastępczego dla budynku 10-piętrowego (rozdział 3) jest układ stref i ich połączeń przedstawiony na rys. 5.3. W systemie tym przestrzenie pionowe wprowadzone zostały zgodnie z propozycjami ich strefowania określonymi na rys. 5.1. i 5.2. Warto podkreślić, że struktura tak skonstruowanego systemu zastępczego odpowiada w dużej części realizacji dyskutowanych powyżej postulatów odnośnie do zwiększenia miarodajności wyników obliczeń.

Z uwagi na złożoność systemów zastępczych, a taże ułatwiającą ich realizację komputeryzację obliczeń nacisk położono na możliwość opracowania w miarę uniwersalnych

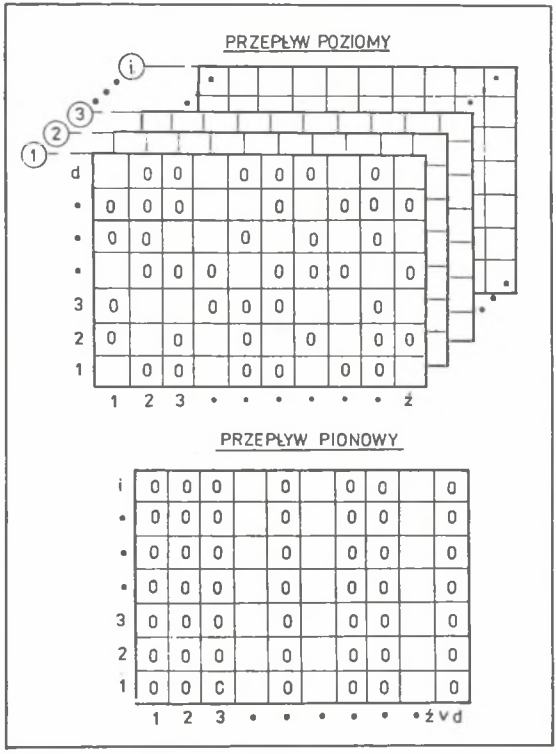


Rys. 5.3. Struktura systemu zastępczego dla badanego budynku (przykład) [74, 111, 117]

Fig. 5.3. The structure of substitute system for the tested building (example) [74, 111, 117]

opisów. W przypadku budynków mieszkalnych - wielokondygnacyjnych ich podstawą może być typowość rozplanowania przestrzeni na kolejnych piętrach. Ta charakterystyczna cecha sprawia, że system rozpatrywany może być jako układ połączeń warstwowych. Warstwami są w tym przypadku poszczególne piętra, kontaktujące się pomiędzy sobą poprzez szyby pionowe i zbiorcze kanały wentylacji naturalnej. Ideę takich opisów przedstawiono schematycznie na rys. 5.4. Sprowadza się ona do opisu wszystkich wyróżnionych dróg przepływu powietrza,

zarówno w poziomach, jak i pionie budynku. Poszczególne poziomy, tj. warstwy, oznaczone są tutaj indeksem "i". Wprowadzenie do układu połączeń wektora zmian jednoznacznie określa dla każdego węzła węzły sąsiednie, tj. źródłowy (z) i docelowy (d). Opis każdej z warstw zawiera więc zestawienie połączeń pomiędzy poszczególnymi węzłami. Podobny jest opis połączeń pionowych, przy czym wskazany jest węzeł, w którym następuje bezpośrednio kontakt z przepływami poziomymi.



Rys. 5.4. Idea opisów połączeń pomiędzy strefami systemu zastępczego ("0" - brak połączeń) [109, 110]

Fig. 5.4. The idea of connections' description between zones in a substitute system ("0" - lack of connections) [109, 110]

Przedstawione powyżej zasady konstruowania systemu zastępczego wraz z opisem charakterystycznych dla niego połączeń są nie tylko wynikiem porządkowania i systematyzowania omawianej problematyki. Uznano je za niezbędne również z uwagi na formę i sposób gromadzenia odpowiednich wielkości wejściowych, którymi są dane źródłowe oraz

wartości parametrów będące podstawą modelowania matematycznego i realizującego model programu komputerowego.

5.4. Model matematyczny przepływów powietrza i jego realizacja

Szczegółową analizę modelowania matematycznego przepływów powietrza w budynkach wielostrefowych przedstawiono w pracy [109], a wnioski zebrano w rozdziale 4.2 niniejszego opracowania. Charakterystyczne dla stosowanych dotychczas modeli jest pomijanie rozważań odnośnie do ścisłości matematycznej rozwiązań, co jest zrozumiałe wobec braku zadowalających metod realizacji układów równań nieliniowych. Nie towarzyszy jednak temu zwrócenie uwagi na fizyczną stronę badanych zagadnień, do której w pracy zaliczono m.in. nadmierną agregację przestrzeni wewnętrznej. Jednak przedstawione w rozdziałach 5.2 i 5.3 opracowania zasady podziału budynków na strefy oraz sposób konstruowania systemów je zastępujących, stanowiących swego rodzaju siatki różnicowe, pozwalają na większe niż dotychczas zwrócenie uwagi na interpretację fizyczną badanych procesów.

Do uniwersalnych metod numerycznych wykorzystywanych w badaniu procesów przepływowych należy metoda bilansów elementarnych [96]. Mimo że stosowana była dotychczas jedynie w odniesieniu do procesów przepływów ciepła, jej zalety sprawiają, że może być ona przydatna również do badania przepływów powietrza. Do podstawowych zalet omawianej metody zalicza się dużą łatwość rozwiązywania zagadnień, w których występuje złożoność procesów oraz skomplikowane układy warstwowe. Wobec wielostrefowości budynków wykorzystanie adaptacji omawianej metody jest jak najbardziej uzasadnione. Adaptacja ta wymaga jedynie zastąpienia bilansów energii bilansami strumieni powietrza przez dyskretne elementy systemu, którymi są poszczególne strefy budynku.

5.4.1. Ogólna koncepcja obliczeń iteracyjnych

Ze względu na brak doświadczeń w zakresie stosowania metody bilansów elementarnych do symulacji przepływów powietrza w wielostrefowych systemach (budynkach) głównym warunkiem jej wykorzystania było opracowanie odpowiedniej dla złożoności systemów koncepcji obliczeń iteracyjnych.

W celu zrealizowania tej koncepcji założono, że w poszczególnych strefach obiektu o kubaturach K_i, w określonej chwili czasowej τ, panują ciśnienia p_i. Bilans masy powietrza

przepływającego przez daną strefę "i", posiadającą połączenia ze strefami sąsiednimi "j", można zapisać w postaci:

$$\sum_j m_{ji} = \Delta m_i \tag{5.1}$$

gdzie m_{ji} są masami powietrza dopływającego (lub/i odpływającego) do strefy "i", zaś Δm_i jest przyrostem masy powietrza w tej strefie.

Przyrost masy powietrza w stałej objętości wywołuje wzrost ciśnienia panującego w rozpatrywanej strefie . Z zasady zachowania masy wynika, że lewa strona bilansu (5.1) musi być równa zeru w stanie ustalonym. W odniesieniu do omawianego modelu implikuje to żądanie, aby przyrosty masy powietrza w kolejnych przybliżeniach zmierzały do zera (tzn. $\Delta m_i \rightarrow 0$).

Powyższy bilans masowy może być zastąpiony bilansem strumieni objętości powietrza (rozdział 4.1) wyrażonym dla rozpatrywanej strefy równaniem:

$$\sum_j V_{ji}^* = \Delta \vartheta_i \tag{5.2}$$

gdzie V_{ji}^* są strumieniami objętości powietrza dopływającego (lub/i odpływającego) do strefy "i", zaś $\Delta \upsilon_i$ jest przyrostem objętości powietrza w strefie, w stosunku do którego obowiązują takie same założenia jak w odniesieniu do przyrostu masy powietrza. Jednocześnie wszystkie ujęte w bilansie strumienie objętości przeliczane są do jednego ciśnienia, panującego w strefie "i".

Strumienie objętości powietrza V_{ji}^* rozpisywane są za pomocą równań przepływowych (3.1) z uwzględnieniem wyróżnionych dróg przepływu powietrza równych ilościom elementów dla niego przepuszczalnych w danej strefie przy założonych kierunkach przepływu powietrza (rozdział 5.3). Ilości powietrza dopływającego do strefy "i" połączeniami "j" ze strefami sąsiednimi są więc określone zależnością:

$$V_{ji}^* = S_{ix} \left(\left| p_x - p_i \right| \right)^{\alpha_{ix}} \operatorname{sgn} \left(p_x - p_i \right) \frac{p_i}{p_x} \Delta \tau \tag{5.3}$$

gdzie przez x oznaczono numer elementu przepuszczalnego dla powietrza pomiędzy strefami "i" oraz "j", zaś $\Delta \tau = \tau_{k+1} - \tau_k$ (k - numer kolejnych kroków iteracji).

Realizacja obliczeń polega na określeniu przyrostów ilości powietrza w danej strefie dokonywanych za pomocą zależności (5.3) dla kolejnych kroków czasowych τ_k, τ_{k+1},.... Dodawanie tak ustalonych przyrostów $\Delta\upsilon_i$ o ciśnieniu p_i do strefy o kubaturze K_i (= V_i), w której panuje ciśnienie p_i, powoduje wzrost ciśnienia. Jego zwiększenie jest wyrażone wzorem:

$$p_i^* = p_i \frac{V_i + \Delta\vartheta_i}{V_i} \tag{5.4}$$

gdzie p_i^* jest ciśnieniem panującym w strefie "i" w chwili τ_{k+1} , tj. po wykonaniu kroku iteracji.

Powyższe uwagi dotyczą stref wydzielonych wewnątrz budynków. W przypadku strefowania otoczenia zewnętrznego i wyróżniania w nim stref o nieskończonej pojemności powietrznej dodanie lub odjęcie dowolnie skończonego strumienia powietrza nie powoduje zmiany ciśnienia.

W efekcie przybliżenie rozwiązania równań bilansowych (5.3) polega na wykorzystaniu procedur stosowanych w procesach iteracyjnych określonych zapisem (4.3). Tak sformułowana koncepcja obliczeń iteracyjnych odbiega od ich formy stosowanej w podstawowej metodzie bilansów elementarnych.

5.4.2. Zasady realizacji obliczeń w modelu wielostrefowym

Z uwagi na dużą ilość bilansowanych stref w systemie zastępującym budynek (rys. 5.3.) oraz niezbędne w tym przypadku sprawdzenie skuteczności powyższej różnicowej metody iteracyjnej konieczne było opracowanie zasad przeprowadzania obliczeń. Za najważniejszą,ze względu na praktyczne wykorzystanie modelu wielostrefowego, uznano stabilność dokonywanych obliczeń, przy jednoczesnej ich zbieżności [103]. W przypadku omawianego systemu wielostrefowego powyższe wymaganie sprowadzić można do uzyskiwania rozwiązań równań (5.3) drogą odpowiednio małych zmian ich pierwiastków, tak aby poszczególne bilanse dążyły do zera w miarę kolejnych kroków czasowych, tzn.:

$$V_{ji}^* \to 0 \quad \text{przy} \quad \begin{cases} k = 0, 1, 2, ... \\ \Delta\vartheta_i^{(k+1)} \le \Delta\vartheta_i^{(k)} \end{cases} \tag{5.5}$$

Powyższy warunek oznacza, że przyrost pojemności powietrznej w jakiejkolwiek strefie systemu nie powinien być większy od wartości ustalonej w poprzednim kroku czasowym.

Spełnienie tego warunku wymaga z kolei wprowadzania małych zmian uwzględniających wymuszenia procesu przepływu powietrza związanych z przyjętą metodą symulacji i opracowaną koncepcję obliczeń iteracyjnych. W omawianym przypadku dotyczy to głównie sposobu dokonywania obliczeń oraz założeń mających decydujące znaczenie dla zbieżności iteracji i prędkości wykonywania symulacji.

Jako podstawowe założenie wyjściowe do wykonywania obliczeń przyjęto, że dokonywane one będą jako ciąg następujących po sobie przepływów elementarnej objętości powietrza przez poszczególne węzły skupiające pojemności powietrzne stref i łączące je gałęzie (patrz rys. 5.3). Przez elementarną objętość powietrza rozumieć należy taką jego ilość, której przepływ nie spowoduje istotnych zmian wielkości obliczanych, tzn. ciśnień w jakiejkolwiek strefie. W ramach niniejszej pracy nie przeprowadzano szczegółowych analiz w powyższym zakresie przyjmując jedynie za podstawę wnioski przedstawione w pracach M.W. Bodego [19] oraz T.T. Quaca i wsp. [84]. Analizując modelowanie matematyczne dla zbiorów wzajemnie połączonych elementów, stwierdzają oni, że korzystne jest, aby elementarna objętość medium przez nie przepływającego stanowiła odpowiednio małą część pojemności najmniejszego z elementów. Ustalenie tej części wymagało już dokonywania symulacji i obserwowania stabilności obliczeń, co oznaczało konieczność przyjęcia długości kroku czasowego odpowiedniego dla skutecznego wykorzystania metody obliczeniowej. Wobec braku rozważań teoretycznych w powyższym zakresie ustalenie długości tego kroku, a także elementarnej objętości powietrza wymagało wykonania dużej ilości doświadczeń (testów) i obserwacji zbieżności procesu iteracyjnego. Jednocześnie do wykonania tych testów niezbędne było rozwiązanie problemu warunków startowych również oparte na doświadczeniach wynikających z obserwacji zbieżności metody i szybkości symulacji dla wybranych wersji rozkładów ciśnień we wszystkich strefach systemu, poza strefami zewnętrznymi, w przypadku których rozkłady te są znane.

W wyniku przeprowadzonych testów za najskuteczniejszy z szeregu analizowanych sposobów wprowadzania warunków startowych uznano przypadek różnicowania ciśnień na poszczególnych poziomach systemu wynikający ze średniej arytmetycznej pomiędzy poziomem rozważanym a położonym powyżej (z uwzględnieniem znanego rozkładu ciśnień w strefach zewnętrznych). Przydatność powyższej wersji wynika głównie z faktu, że już w momencie rozpoczęcia symulacji występuje przepływ powietrza przez wszystkie strefy systemu zastępczego. Należy jednak podkreślić, że w praktyce obliczeń wykorzystujących opracowaną

metodę symulacja rzadko rozpoczyna się od narzuconych arbitralnie warunków początkowych. Przeważnie wykorzystuje ona wyniki innych (wcześniejszych) symulacji, zmieniając jedynie warunki środowiskowe (patrz rozdział 5.5).

Równolegle ze sposobami wprowadzania warunków startowych analizowano szereg wersji różniących się elementarną objętością powietrza przepływającego przez system w obrębie pojedynczego kroku czasowego oraz długościami tego kroku.

Na podstawie obserwacji zmian ciśnienia w wyniku wprowadzania elementarnych objętości powietrza stwierdzono, że celowe dla stabilności symulacji jest, aby nie przekraczała ona 10% pojemności najmniejszej ze stref w rozpatrywanych systemach, odniesionej do pojedynczego kroku czasowego. W omawianym przypadku strefami tymi są kanały wentylacyjne, którym odpowiadają elementarne objętości powietrza nie przekraczające 0.005 m^3 dla typowych wymiarów kanałów.

Decydujące znaczenie zarówno dla zbieżności iteracji, jak i szybkości symulacji ma prawidłowe przyjęcie kroku czasowego. Przedstawione w tabeli 5.1 dane są wynikiem obserwacji procesu iteracyjnego w systemach o małej ilości stref z uwzględnieniem wybranych ich elementów (dróg przepływu powietrza). Im dłuższy jest krok czasowy, tym szybciej uzyskać można ustalony przepływ powietrza, większe jest jednak niebezpieczeństwo utraty zbieżności obliczeń. W wyniku tak przeprowadzonych doświadczeń wstępnych stwierdzono, że możliwe jest przyjęcie określonych długości kroków czasowych, dla których iteracja jest zbieżna, jednak trudne jest uzyskanie maksymalnej szybkości symulacji. Jednocześnie przy większej złożoności systemów zastępczych, a więc wzajemnym połączeniu wszystkich elementów zestawionych w tabeli 5.1, wskazane jest wprowadzenie do obliczeń najmniejszej z uzyskanych długości kroków czasowych, przy czym ich ostateczną wartość uzyskać można dopiero na drodze testowania modelu w trakcie jego obliczeń. Przy dużej ilości bilansowanych stref charakterystyczna jest oscylacja znaku równań (5.3) wskazująca na utratę stabilności obliczeń. Jest to szczególnie charakterystyczne na początku symulacji, kiedy to w systemie występuje duża niejednorodność wielkości obliczanych, a przede wszystkim niezrównoważenie bilansów.

W związku z brakiem jakichkolwiek danych pomocnych do rozwiązania powyższego problemu zaproponowano dynamiczną zmianę długości kroku czasowego w trakcie trwania symulacji uzależnioną od jej przebiegu. Opierając się na dużej ilości symulacji w systemach

Tabela 5.1

Przykładowe zestawienie długości wstępnych kroków czasowych dla głównych dróg przepływu powietrza

Wyszczególnienie	Długość wstępnego kroku czasowego $\Delta\tau$, s
Okna w mieszkaniach	0.0016
Drzwi wewnętrzne w mieszkaniach	0.0003
Drzwi wejściowe do mieszkań	0.0005
Drzwi wejściowe do budynku	0.0003
Drzwi wejściowe do łazienek	0.0207
Klatka schodowa	0.0079
Kanały wentylacji naturalnej	0.0445

złożonych, zaleca się rozpoczynanie obliczeń od przyjęcia długości kroku czasowego o rząd lub dwa mniejszego od najmniejszego z zestawionych w tabeli 5.1. Oznacza to, że nie powinien on być większy od 1×10^{-6}s. W trakcie trwania obliczeń i w zależności od przebiegu symulacji użytkownik (przy sterowaniu ręcznym) lub procedury programu komputerowego (przy sterowaniu automatycznym) zmieniają długość kroku czasowego.

Zgodnie z opracowaną koncepcją iteracji po wykonaniu każdego jej kroku (k = 0,1,2,...) obliczane są strumienie objętości powietrza wpływającego i wypływającego z budynku oraz ustalana jest suma przyrostów objętości powietrza we wszystkich strefach. Jeżeli iteracja jest zbieżna, to w kolejnych przybliżeniach ilości powietrza wpływającego i wypływającego zmierzają z danej strefy do tej samej, różnej od zera wartości, natomiast suma przyrostów objętości powietrza zmierza do zera (patrz zależność (5.2)). Uruchomienie odpowiednich procedur (patrz rozdział 5.5.2) pozwala na wydłużenie lub skrócenie długości kroku czasowego, a tym samym wybranie możliwie najdłuższego, dla którego iteracja jest zbieżna, tzn. suma przyrostów objętości powietrza maleje do zera.

Określonym w ten sposób długościom kroków czasowych odpowiadać powinny odpowiednio ustalone kroki zmian wartości wielkości charakteryzujących stan warunków środowiskowych. W omawianym przypadku są to różnice temperatur i prędkości wiatru jako podstawowe czynniki wymuszające przepływy powietrza. Wprowadzenie kroków zmian tych czynników dla pojedynczego kroku czasowego nie decyduje o stabilności symulacji, jest jednak

pożądane ze względu na zachowanie sensu fizycznego badanego procesu [96]. Na podstawie dokonanych obserwacji procesu symulacji stwierdzić można, że wystarczającym rozwiązaniem jest podział założonych wartości tych wielkości proporcjonalnie do długości ustalonego kroku czasowego. W ten sposób postulat poprawności fizycznej związano z warunkami określającymi stabilność zastosowanej metody.

Problemem zbieżności metody nie zajmowano się szczegółowo, przyjmując jedynie, że w wielu przypadkach wynika ona wprost ze stabilności obliczeń [18, 19, 27, 42, 111]. Sprzyja temu wprowadzenie procedur zmiany długości kroków czasowych, które jednocześnie jest korzystne z uwagi na zachowanie efektywności zastosowanej metody.

Realizacja obliczeń, oparta na powyższych zasadach, wymaga sformułowania warunków jednoznacznego opisu badanego procesu.

5.4.3. Definiowanie danych wejściowych do realizacji modelu

Przeprowadzenie komputerowej symulacji przepływów powietrza musi być poprzedzone zestawieniem dużej ilości danych charakteryzujących warunki panujące na przegrodach zewnętrznych oraz wewnętrzne drogi przepływu.

• W zakresie oddziaływania warunków środowiskowych przeprowadzono niezbędną adaptację stosowanych dotychczas zależności matematycznych do określenia ciśnień kształtujących się na przegrodach zewnętrznych. Dla przedstawionego na rys. 5.5. schematu budynku z zachowaniem podziału na strefy wprowadzonego w rozdziale 5.3 opracowania jednym z efektów takiej adaptacji [109, 110] może być zależność:

$$p(\tau) = 1{,}74 \cdot 10^{-3} p_o(\tau) \left\{ 19{,}7\, h_i \left[\frac{1}{T_z(\tau)} - \frac{1}{T_w(\tau)} \right] + \right.$$

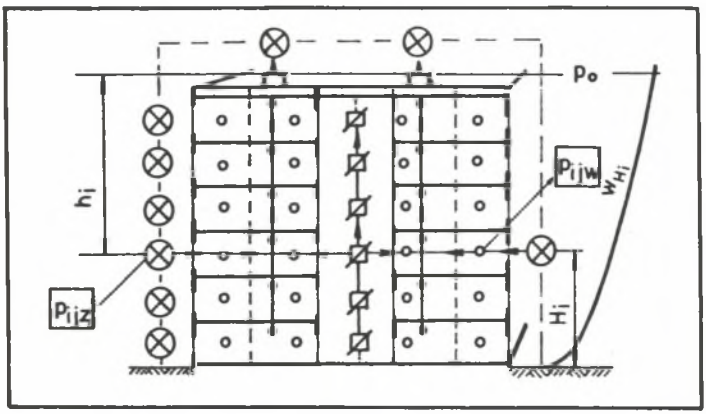
$$\left. \overline{c_{ij}}\,(\tau, \Theta) \left[W_{Hi}(\tau) \right]^2 \frac{1}{T(\tau)} \right\}, \qquad (5.6)$$

której współczynniki wynikają z uwzględniania zmian prędkości wiatru ze zmianą wysokości nad poziomem gruntu w terenie miejskim [5, 11, 28, 71, 92, 94].

Zależność powyższa ma charakter uniwersalny z uwagi na kompleksowość wprowadzanych informacji. Dotyczą one ciśnienia atmosferycznego (p_o), zewnętrznych i wewnętrznych temperatur powietrza (T_z, T_w), a także prędkości wiatru (w) i współczynników konwersji jego

ciśnienia dynamicznego ($\bar{C}$) uzależnionych od wymiarów geometrycznych budynków oraz kierunku działania wiatru w stosunku do ich fasady (Θ).

W zależności (5.6) podkreślono możliwość wprowadzenia opisów zmienności poszczególnych wielkości w czasie, co wynika z budowy równań bilansowych (5.1) i (5.2). Należy jednak zwrócić uwagę na brak takich opisów w odniesieniu do omawianego procesu. Ponadto z uwagi na konieczną konfrontację wyników obliczeń i pomiarów oraz możliwe do zastosowania metody pomiarowe nie wydaje się pożądane na obecnym etapie formułowanie takich opisów. W związku z tym zdecydowano się na zastępowanie zmienności poszczególnych wielkości wybranymi stanami określających je parametrów charakterystycznych dla procesu i decydujących o wymuszeniach.



Rys. 5.5. Opis oddziaływania wyporu cieplnego i naporu wiatru w proponowanej metodzie (schemat) [110]

Fig. 5.5. The description of stack and wind effect in the suggested method (scheme) [110]

Podstawą takich uśrednień mogą być jedynie wyniki pomiarów w budynkach istniejących. Na podstawie tego typu pomiarów [30, 32, 40, 48, 106, 108] stwierdzić można, że przy dominacji wyporu termicznego wystarczającym okresem uśredniania jest okres 1 godziny. Sytuacja ulega zmianie przy znaczącym oddziaływaniu naporu wiatru. W warunkach tych dochodzi do szybkich zmian przepływów powietrza, obejmujących w skrajnych przypadkach okresy krótsze od 1 minuty [5, 11, 56, 75, 96, 106, 110]. Jednak jednoznaczne określenie tych okresów w dużej mierze zależy również od sposobu odizolowania poszczególnych stref oraz szeregu zjawisk towarzyszących przepływom powietrza. Dlatego też w opracowanej metodzie

nie narzucano warunków uśredniania parametrów w określonych okresach czasu, zakładając jedynie, że wykonujący obliczenia dysponować będzie danymi uzasadniającymi ich wybór.

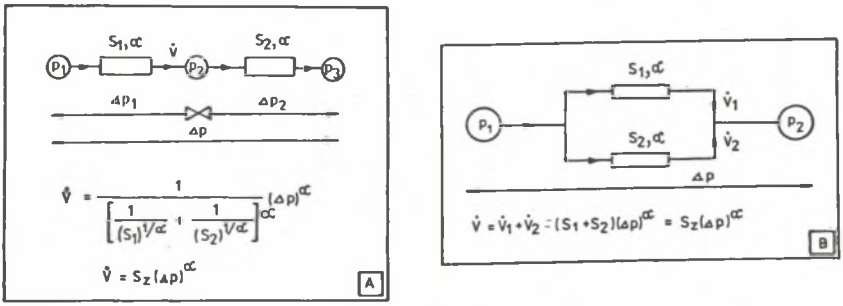
- Drugim, niezbędnym do wykonania symulacji przepływów powietrza rodzajem danych są charakterystyki przenikania powietrza przez elementy dla niego przepuszczalne oraz jego ruchu pomiędzy strefami wydzielanymi z kanałów wentylacyjnych i szybów pionowych.

Charakterystyki przenikania powietrza przez elementy stolarki budowlanej zawierają informację o wartościach współczynników S i wykładników α w opisujących je zależnościach (3.1). Są one ogólnie dostępne w literaturze, a sposób ich uzyskiwania szczegółowo opisany jest w pracach [2-11,104-110], a także w rozdziale 3.1 niniejszego opracowania. Nie rozwijając dalej problemu formułowania tych danych, podkreślić należy jednak, że nie wyczerpuje on problematyki ich szacowania, szczególnie przy zindywidualizowaniu tych opisów.

W związku z ujednoliceniem opisów przepływu powietrza w systemie wielostrefowym, sprowadzonym do zastosowania zależności (3.1), za celowe uznano sprecyzowanie określania charakterystyk dla kanałów wentylacji naturalnej i szybów klatek schodowych. Jak wynika z założeń przyjętych w rozdziale 5.2.2 opracowania, z obu elementów strukturalnych wydzielane są strefy umowne połączone gałęziami, na których umieszczone są opory przepływu powietrza przez każdą ze stref. Podobnie jak strefy, również i odpowiadające im opory mają charakter umowny, a podstawą ich wyznaczenia może być system zastępczy, w którym stanowią one układ pionowo połączonych stref (rys. 5.1, 5.2 i 5.3).

Dla układu kanałów zbiorczych, przedstawionego na rys. 5.1., wstępne obliczenia oporów i odpowiadających im współczynników przepływu (S_{KW}) przeprowadzane są dla normatywnych ilości powietrza (rozdział 5.2.2) z uwzględnieniem podziału określonego schematem 3 na rys. 5.1. Ich wstępny charakter wynika z faktu, że opracowana metoda umożliwia zmianę wartości tych współczynników, dostosowując je do zmiennych w dużym zakresie przepływów powietrza lub wartości uzyskanych na drodze pomiarowej [74, 111, 119]. Należy jednak podkreślić, że wykorzystanie procedur korygujących współczynniki S_{KW} wydłuża czas symulacji, który w przypadku analizowanego budynku przekracza 30 minut, co znacznie ogranicza praktyczną przydatność zastosowanych procedur. Natomiast pozytywnie ocenić należy możliwość dostosowania wartości współczynników S_{KW} do uzyskanych na drodze pomiarów ilości powietrza przepływającego otworami wlotowymi do kanałów.

W przypadku kanałów indywidualnych lub klatek schodowych realizowany jest schemat 3 na rys.5.2. W tym przypadku stosując zasady sumowania oporów możliwe jest również ich rozdzielenie, a w konsekwencji oszacowanie wartości współczynników przepływu. Sprowadza się to do zastosowania zależności zilustrowanych schematami na rys. 5.6 przy dysponowaniu wartościami zastępczych (całkowitych) współczynników S_z (patrz rys. 3.8). Wymaga to oczywiście znajomości obliczeniowych i pomiarowych metod wyznaczania tych wartości, które wyczerpująco przedstawiono w pracach autora [58, 63, 71, 76, 117].



Rys. 5.6. Określanie zastępczych współczynników przepływu (S_z) dla szeregowego (schemat lewy) i równoległego połączenia oporów (szczelin)

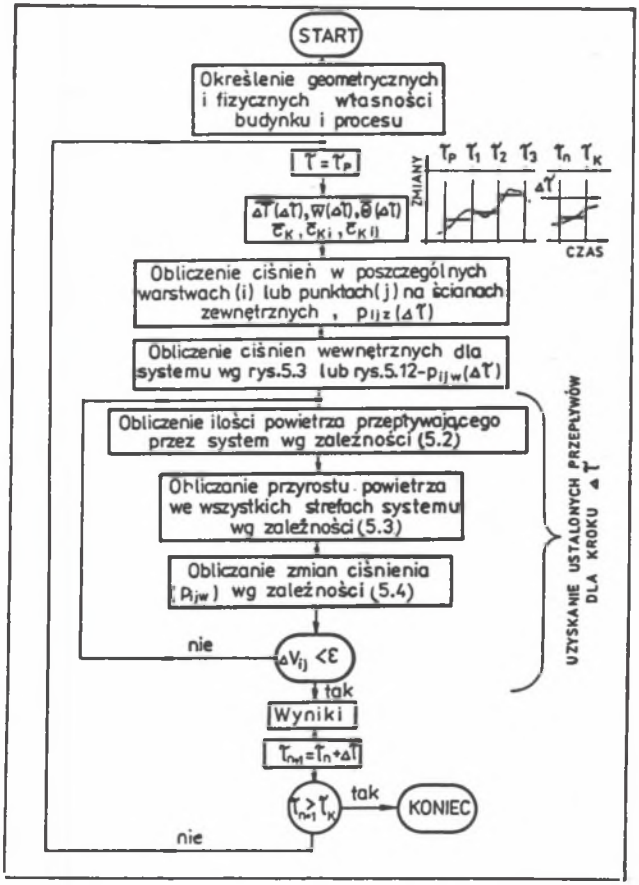
Fig. 5.6. The definition of replacing air flow coefficients (S_z) for series (scheme on the left) and parallel connections between air resistance (air-gaps)

5.5. Przeprowadzanie symulacji przepływów powietrza

Sposób dokonywania obliczeń przepływów powietrza w systemach wielostrefowych szczegółowo przedstawiono w pracach [109, 110] oraz opublikowano w referatach [72-76, 111-120]. Poniżej przedstawiono jedynie wybrane jego elementy decydujące zdaniem autora o uniwersalności i kompleksowości opracowanej metody oraz realizującego go programu komputerowego.

5.5.1. Realizacja modelu matematycznego

Warunkiem rozpoczęcia symulacji przepływów powietrza jest utworzenie systemu zastępującego budynek oraz zebranie informacji odnośnie do jego cech geometrycznych, a przede wszystkim właściwości fizycznych, określając przepływy powietrza wzdłuż wyróżnionych jego dróg. Dane te pozwalają na oszacowanie elementarnej objętości powietrza



Rys. 5.7. Schemat blokowy komputerowej symulacji przepływów powietrza zastosowanej w opracowanej metodzie [109, 110]

Fig. 5.7. The scheme of block diagram for computer simulation of air flows in the elaborated method [109, 110]

oraz wstępnej długości kroku czasowego wraz z towarzyszącymi im zmianami kroków parametrów określających wpływ warunków środowiskowych.

Ogólny schemat blokowy obliczeń przedstawiono na rys. 5.7. Symulację przeprowadza się dla przyjętego czasokresu zmian warunków środowiskowych ($<\tau_p, \tau_k>$), dla którego dokonano podziału na odcinki (okresy) z uśrednionymi wartościami parametrów określających oddziaływanie uwzględnianych wymuszeń badanego procesu. Wprowadzenie tych wartości

pozwala na obliczenie ciśnień panujących w zewnętrznych strefach systemu (zależność (5.7)). Istotne znaczenie ma następny etap symulacji, w którym obliczane są ciśnienia wewnętrzne będące podstawą do określenia warunków początkowych dla zastosowanej metody iteracyjnej. W zależności od zróżnicowania tych ciśnień w stosunku do wartości spełniających wszystkie równania bilansowe różny może być czas dokonywanych obliczeń. Można go wydatnie skrócić, gdy dysponuje się danymi umożliwiającymi przybliżenie początkowych wartości ciśnień, co jednak wymaga doświadczenia i umiejętności przeprowadzającego symulację. W rozdziale 5.4.2 niniejszego opracowania opisano sposób deklaracji warunków startowych oparty na obserwacji zbieżności i szybkości procesu iteracyjnego. Najistotniejsze jest jednak zwrócenie uwagi na praktyczne wykorzystanie jako warunków początkowych wyników symulacji przeprowadzonej wcześniej, co znacznie skraca czas przeprowadzania obliczeń.

Nie wyklucza to oczywiście wprowadzania, bliższych rozwiązaniu, wstępnych warunków początkowych, jak przykładowo - określonych sekwencji danych uzyskanych na podstawie pomiarów.

Zasadnicze obliczenia dokonywane są za pomocą metody opisanej w rozdziałach 5.4.1 i 5.4.2 opracowania. Zakończenie symulacji następuje, gdy przyrosty lub ubytki ilości powietrza w jakiejkolwiek strefie systemu nie będą przekraczać pojemności powietrznej najmniejszej z jego stref. Określona jest ona wartością ε, stanowiącą przyjętą tolerancję w sensie zamknięcia bilansów.

Do przeprowadzania obliczeń opracowano nowy program komputerowy o oryginalnych rozwiązaniach w zakresie dokonywanych symulacji oraz ogólnej koncepcji symulacji przepływów powietrza.

5.5.2. Charakterystyka programu komputerowego

Opracowany program symulacyjny o nazwie "SYMVENT" charakteryzuje się rozwiązaniami odbiegającymi od dotychczas stosowanych modeli (rozdział 4.2 opracowania). Z tego też powodu za celowe uznano krótkie jego scharakteryzowanie z podkreśleniem głównych zalet użytkowych.

Program napisany został w języku Turbo Pascal V.5.5. Program źródłowy składa się z programu głównego (SYMVENT. PAS) oraz 6 uzależnionych modułów zawierających procedury inicjujące pracę programu, czytające i zapisujące pliki zawierające opis struktury budynku (z wersją przechowywania tego opisu). Istotne znaczenie mają procedury

odpowiedzialne za komunikację między użytkownikiem i programem, za pomocą których możliwa jest zmiana dowolnych parametrów i czynników opisujących i decydujących o badanym procesie, wraz z możliwością obserwacji wprowadzanych zmian i ich skutków. Modułem końcowym są procedury wyświetlające na ekranie, drukujące i magazynujące wyniki symulacji. Żaden z powyższych modułów nie występuje samodzielnie i jest sterowany programem głównym, który do rozpoczęcia pracy potrzebuje 2 pliki pomocnicze. Są to pliki: konfiguracyjny (ftg) i tablic współczynników konwersji wiatru (wiatr txt). W pliku konfiguracyjnym zawarte są m.in. opisy warunków środowiskowych (T_w, T_z, w, Θ), przy czym możliwa jest zmiana dowolnego z nich. Dane do programu wprowadzane są z klawiatury, a wyniki wyprowadzane na ekran, drukarkę lub do zbioru zewnętrznego.

Opracowany program realizuje podstawowe wymagania w zakresie elastyczności w sposób znacznie szerszy, niż ma to miejsce w modelach porównywanych w tabeli 4.1. Dotyczy to zarówno modułów opisujących parametry i czynniki charakterystyczne dla systemu, jak i sposobu pozyskiwania wyników. Możliwe jest to dzięki opracowaniu procedur sterujących pracą całego programu w postaci tzw. menu głównego. Opis tych procedur oraz realizowane przez nie zlecenia zestawiono w tabeli 5.2. Należy zwrócić uwagę na procedurę pozwalającą na skonstruowanie nowego systemu wielostrefowego. Ma ona charakter uniwersalny, ponieważ umożliwia objęcie analizami budynku o innej konstrukcji i cechach niż przyjęte jako wyjściowe. Podobna uniwersalność dotyczy zmian, jakie można wprowadzić do opisu zaakceptowanego systemu. Może być zmieniony opis dowolnej strefy i jej połączeń ze strefami sąsiednimi. Oznacza to, że zmienić można wartości wielkości charakteryzujących przepływ powietrza wzdłuż wyróżnionych jego dróg. Dotyczy to współczynników S i wykładników α (zależność (3.1)) dla dowolnego elementu przepuszczalnego dla powietrza. Jest to szczególnie pomocne przy wprowadzeniu do symulacji wyników pomiarów lub ich sekwencji dotyczących przykładowo ilości powietrza przepływającego otworami wlotowymi do kanałów wentylacyjnych.

Wśród zalet opracowanego programu podkreślić należy również sposób dokonywania symulacji. W trakcie jej trwania na ekranie, oprócz wyników obliczeń zestawionych w tabelach dotyczących nadciśnień w systemie oraz poziomych i pionowych przepływów powietrza, obserwować można licznik ilości kroków czasowych, ich wartość, symulowany czas trwania przepływu powietrza w systemie oraz ich bilans całkowity będący miarą odchylenia symulowanych przepływów od ich stanu stacjonarnego. Jednocześnie możliwe jest

porównywanie ilości powietrza wpływających do budynku z otoczenia zewnętrznego z ich wartościami wypływającymi z budynku na zewnątrz, które dla procesu stacjonarnego powinny być równe. Obserwacja stopnia ich wyrównania pozwala przerwać obliczenia w dowolnym momencie, przykładowo przy zadowalającej użytkownika tolerancji w tym zakresie lub celem kontynuowania obliczeń w czasie późniejszym.

Tabela 5.2

Zestawienie procedur i realizowanych przez nie zleceń w ramach opracowanego programu

Nazwa procedury	Opis realizowanych zleceń
Czytanie opisu systemu	Zestaw plików informujących o przyjętej strukturze budynku (4 pliki) w układzie opisów jak na rys. 5.4
Zmiana opisu systemu	Dodanie lub wyeliminowanie z poprzednio wprowadzonego opisu dowolnej strefy źródłowej i docelowej (rozdział 5.3) oraz całych kolumn w opisie poziomych lub pionowych połączeń systemu
Nowy opis systemu	Zrealizowanie nowych opisów badanego budynku, w tym również o innej konstrukcji niż przyjęty poprzednio
Zapis struktury systemu Wydruk opisu systemu	Nagranie i wydrukowanie zaakceptowanego opisu struktury badanego budynku
Symulacja	Wykonanie obliczeń za pomocą przyjętej metody iteracyjnej
Czytanie konfiguracji programu Zapis konfiguracji programu	Akceptacja i wczytanie pliku konfiguracyjnego wraz z możliwością zmiany zawartych w nim informacji
Koniec pracy programu	Przejście do systemu operacyjnego

Jednak najbardziej interesująca z punktu widzenia użytkownika programu jest możliwość ingerencji w symulację. Polega ona na dowolnej zmianie długości kroku po czasie w trakcie trwania obliczeń. W stosunku do założonej jego wartości wejściowej równej 1×10^{-6} s można go wielokrotnie zwiększać lub zmniejszać przez wybranie odpowiedniego zlecenia, a tym samym dostosowywać do złożoności systemu i w konsekwencji skracać czas obliczeń. Wydatne ograniczenie tego czasu uzyskuje się, wywołując odpowiednią procedurę eliminującą przekazywanie wyników dla poszczególnych kroków czasowych na ekran. Ponowne wywołanie tej procedury przywraca możliwość śledzenia symulacji i zorientowania się o stopniu wyrównania bilansów oraz ewentualnej dalszej zmianie kroku po czasie.

Podobnie łatwe jest dokonywanie zmian wielkości charakteryzujących dowolny przepływ poziomy lub pionowy pomiędzy strefami systemu, a także warunków środowiskowych. Uzyskuje się to przez uaktywnienie odpowiedniego zlecenia w trakcie symulacji, a więc poza zestawionymi w tabeli 5.2 procedurami głównymi.

5.6. Skuteczność i efektywność proponowanej metody symulacyjnej w odniesieniu do wybranych parametrów i czynników napędowych procesu wymiany powietrza

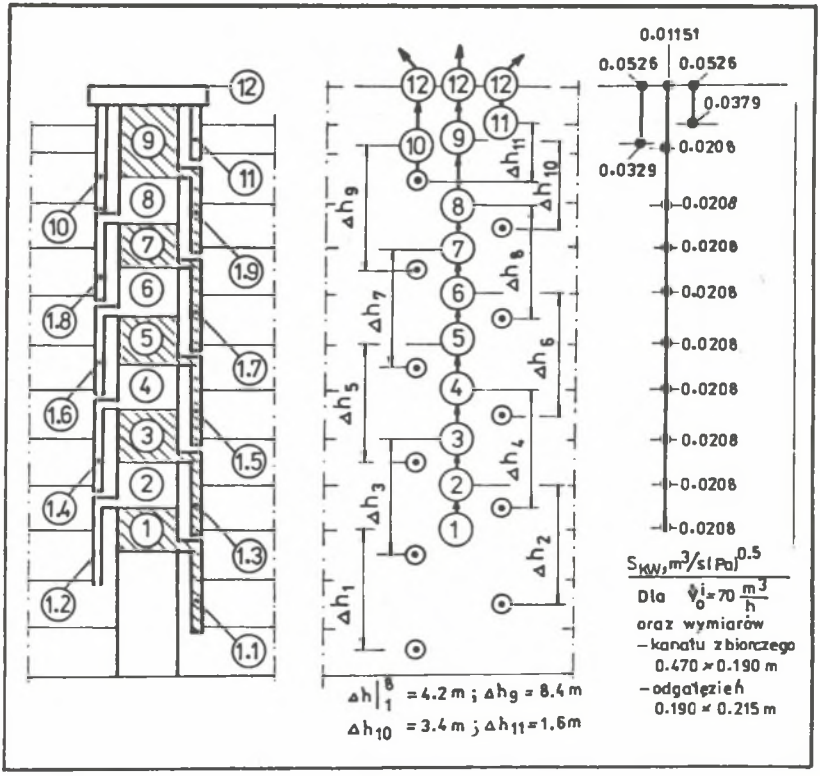
Główną zaletą opracowanej metody jest możliwość dokonywania ocen wybranej kompozycji parametrów i czynników kształtujących badany proces. Jednocześnie istotne jest tutaj znaczne zwiększenie zakresu ich wyboru w stosunku do możliwości dotychczas wykorzystywanych. Dlatego też w niniejszym opracowaniu skoncentrowano się głównie na określeniu skuteczności metody z uwagi na te elementy badanego procesu, które mogą mieć zdaniem autora znaczny wpływ na wymianę powietrza. Zaliczono do nich przede wszystkim kanały wentylacji naturalnej, różnicowanie temperatur powietrza w obrębie klatki schodowej oraz oddziaływanie na proces naporu wiatru.

Przedstawione poniżej wyniki analiz dotyczą budynku mieszkalnego, dla którego dysponowano kompletem wyników pomiarów (rozdział 3 pracy).

5.6.1. Kanały wentylacji naturalnej

Układy kanałów wentylacji naturalnej są najmniej dokładnie opisywanym elementem struktury budynków, na co zwrócono uwagę w rozdziale 4.2 opracowania. Jak wynika z wcześniejszych prac autora [58, 74, 76], w zależności od stosowanych uproszczeń (rys. 5.1) współczynniki przepływu powietrza dla tych kanałów różnicują się w granicach ±100%. Tak duże zróżnicowanie nie może być bez znaczenia dla miarodajności wyników symulacji.

W celu sprawdzenia wpływu określania charakterystyk przepływowych kanałów dokonano ich uszczegółowienia, opierając się na zasadach podziału na strefy (rozdział 5.2). Na rys. 5.8 przedstawiono końcowy efekt w postaci współczynników przepływu powietrza dla wydzielonych ze zbiorczego układu kanałów stref, uzyskany za pomocą algorytmu obliczeniowego opisanego w pracach [106-109]. Wartości te wprowadzono do programu komputerowego jako dane wejściowe, przekonstruowując jednocześnie warstwy systemu zastępczego (rys. 5.3) w sposób schematycznie przedstawiony na rys. 5.9. Polega to na wydzieleniu kanałów zbiorczych i zróżnicowaniu ich rzędnych pionowych określających przesunięcie w stosunku



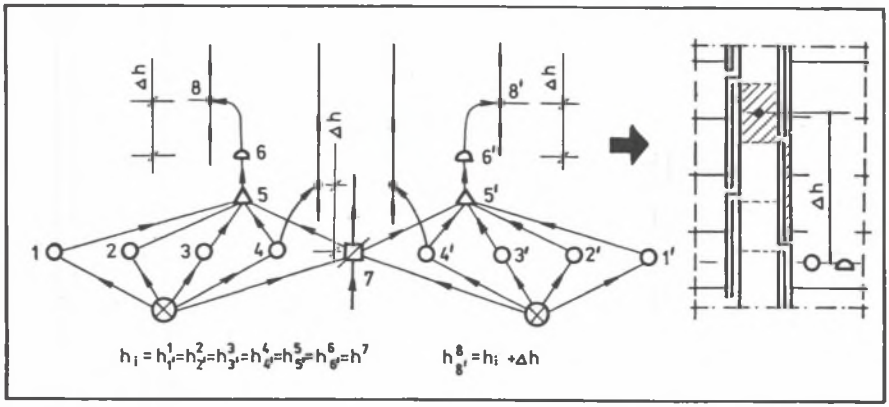
Rys. 5.8. Zestawienie współczynników przepływu powietrza przez strefy wydzielone ze zbiorczych kanałów wentylacyjnych (patrz rys. 5.1)

Fig. 5.8. The comparison of air flow coefficients distributed in collective ventilation ducts (look Fig. 5.1.)

do rzędnych określających położenie stref rzeczywistych (pomieszczeń wentylowanych). Wykonanie tej operacji sprowadza się do dodania pojedynczej kolumny w opisie pionowych połączeń (rozdział 5.5.2 pracy) i ma na celu możliwie najdokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych połączeń i warunków panujących w trakcie przeprowadzania pomiarów, z których wynikami porównywane mogłyby być rezultaty symulacji.

Obliczeń tych dokonywano w 2 wersjach opisu charakterystyk przepływowych kanałów. Pierwsza z nich realizowała tradycyjny sposób ich określania (schemat 1 na rys. 5.1). W drugiej wersji, stosując proponowany podział kanałów na strefy (schemat 2 na rys. 5.1.), wprowadzono do programu wartości współczynników przepływu powietrza zestawionie na rys. 5.8. Następnie przeprowadzając symulację przepływów w warunkach, dla których

dysponowano wynikami pomiarów ilości powietrza w poszczególnych odgałęzieniach kanałów (rys.3.7), doprowadzano do ich zgodności z rezultatami obliczeń. Uzyskiwano to zmieniając proporcjonalnie do ich zróżnicowania wartości współczynników przepływu przez kanały, uaktywniając odpowiednie zlecenie opracowanego programu komputerowego.



Rys. 5.9. Zmiana struktury warstwy systemu zastępczego (schemat)

Fig. 5.9. The modification of layer structure in the substitute system (scheme)

W efekcie dysponowano dwoma kompletami wartości współczynników przepływu powietrza przez kanały, z uwzględnieniem których dokonywano dużej ilości symulacji. Przeprowadzano je w warunkach odnotowywanych w trakcie pomiarów całkowitej wymiany powietrza za pomocą metody gazu znacznikowego w większości pomieszczeń badanego budynku (część tych wyników przedstawiają dane na dolnym schemacie rys. 4.3). W ten sposób otrzymano 3 zbiory danych, pomiędzy którymi występuje określony rozrzut wynikający z losowości badanego procesu i oczywiście sposobu określania charakterystyk kanałów. Z tego też względu ocenę wpływu sposobu charakteryzowania kanałów sprowadzono jedynie do określenia współzależności pomiędzy wymianą powietrza uzyskaną za pomocą obliczeń (WP_o) a jej wartością otrzymaną na drodze pomiarów (WP_m), w tych samych warunkach wymuszających ruch powietrza.

Nie wnikając szczegółowo w charakter zależności statystycznej pomiędzy tymi zbiorami danych, określono współczynnik korelacji:

$$r = \frac{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}\left(WP_i - \overline{WP_m}\right)\left(WP_i - \overline{WP_o}\right)}{W\left(WP_m\right)\cdot W\left(WP_o\right)} \qquad (5.8)$$

gdzie:

N - ilość wyników symulacji dla poszczególnych pomieszczeń i warunków środowiskowych (ponad 100 wartości jednostkowych w każdym zbiorze danych),

$W(WP_m)$; $W(WP_o)$ - wariancje opisujące rozproszenie w poszczególnych zbiorach danych, przy czym

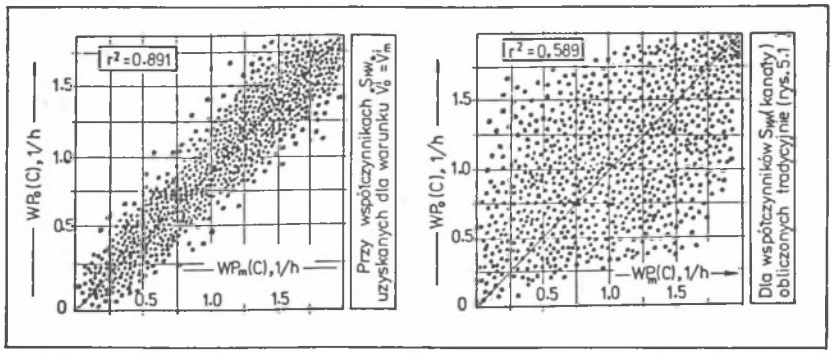
$$W(WP_{m,o}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(WP_i - \overline{WP_{m,o}})}{N - 1}} \tag{5.9}$$

$$\overline{WP_{m,o}} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(WP_i)_{m,o}}{N} \tag{5.10}$$

Wykorzystując opracowane elementarne procedury obliczeniowe [29, 103], dokonano niezbędnych ocen, przyjmując kwadrat współczynnika regresji jako szczególną miarę odchyleń zmienności poszczególnych wartości w stosunku do całkowitego odchylenia od poszczególnych wartości średnich. Wyniki tych ocen zestawiono na rys. 5.10 w odniesieniu do każdej z wersji opisu charakterystyk kanałów wentylacji naturalnej zastosowanych w badanym budynku.

Mimo że nie zajmowano się dokładnie losowością przepływów i wymiany powietrza oraz niepewnościami pomiarowymi, wydaje się, że uzyskane wyniki wystarczająco ilustrują przydatność proponowanego podziału i sposobu charakteryzowania kanałów dla opracowanej metody symulacyjnej. Za szczególnie wskazane dla jej miarodajności uważać można dokonywanie korekty współczynników przepływu powietrza dla kanałów na podstawie konfrontacji z wynikami pomiarów. Jednocześnie wskazane jest również dalsze udoskonalenie opracowanej metody w zakresie uelastycznienia i ciągłej korekcji wartości tych współczynników przy dalszym ograniczeniu czasu symulacji.

Wykonane analizy porównawcze są również podstawą do wnioskowania o przydatności statystycznych metod oceny do identyfikacji badanego procesu. W stosunku do nielicznych przypadków dotychczasowego ich wykorzystania [4, 30, 83] powinno jednak nastąpić ścisłe sformułowanie zasad prowadzenia badań statystycznych, wynikające ze szczegółowości opisu struktury wewnętrznej budynków.



Rys. 5.10. Zależność pomiędzy obliczonymi (o) i mierzonymi (m) wartościami całkowitej wymiany powietrza w poszczególnych strefach systemu zastępczego przy tradycyjnym (zestawienie po prawej) i proponowanym (po lewej) sposobie określania współczynników przepływu powietrza dla kanałów wentylacyjnych [74, 76, 111,117, 119]

Fig. 5.10. The correspondence of calculated (o) and measured (m) total air change rates for seperate zones of the substitutal system and for prevailing up till now (comparison on the right side) and suggested way of air flow coefficients determinations [74, 76,111, 117, 119]

5.6.2. Zróżnicowanie temperatur powietrza wewnętrznego

Jednym ze zjawisk wywołujących i towarzyszących przepływom powietrza pomiędzy poszczególnymi strefami systemu zastępczego jest zróżnicowanie temperatur powietrza. Jak wynika z pomiarów (patrz rozdział 3.2.4), największe zróżnicowanie ma miejsce w przestrzeniach klatki schodowej.

W celu sprawdzenia wpływu tego zróżnicowania przeprowadzono szereg symulacji przepływów powietrza w badanym budynku dla wybranych wersji gradientu temperatur wzdłuż wysokości klatki schodowej. Wersje te różnią się wartościami temperatur powietrza w poszczególnych strefach, na jakie podzielono klatkę, a ich oddziaływanie sprowadzono do porównania wymiany powietrza w poszczególnych mieszkaniach z wartościami odpowiadającymi tradycyjnemu sposobowi traktowania klatek schodowych, jako pionowych przestrzeni o jednakowej, średniej temperaturze, zwykle mniejszej od temperatur w przyległych mieszkaniach.

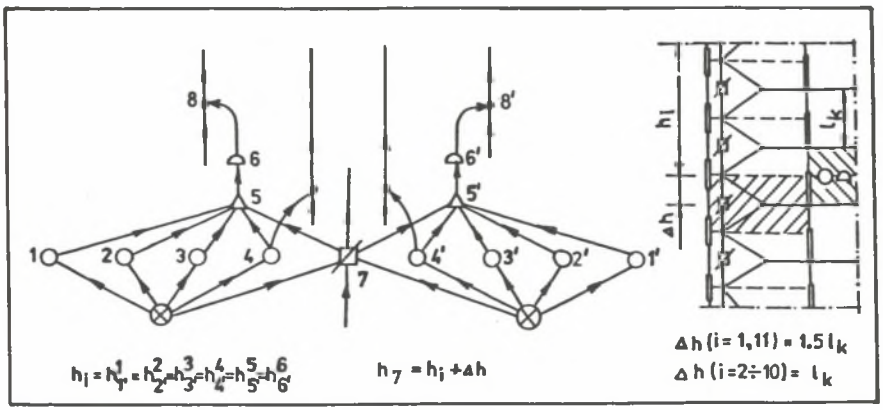
Z uwagi na zamierzony cel i trudności w bezpośredniej realizacji analiz konieczne było przeprowadzenie prac przygotowawczych mających podobne znaczenie, jak to miało miejsce w przypadku badania wpływu sposobu opisu kanałów wentylacyjnych. Ponieważ również i te

prace są charakterystyczne dla elastyczności opracowanej metody, zdecydowano się przedstawić w sposób skrótowy ich tok.

1. Dla proponowanego podziału klatki schodowej na strefy według zasad określonych na rys. 5.2 określono ich charakterystyki przepływowe. Dokonano tego na podstawie danych zebranych na rys. 3.8, wychodząc z założenia, że strefy te zastąpione będą układem szeregowo połączonych oporów oraz że opory te będą jednakowe dla każdej strefy [103]. Średnią wartość uzyskanego na podstawie testów ciśnieniowych współczynnika przepływu powietrza przez przestrzeń klatki schodowej (S_m) rozdzielono na 11 identycznych stref o współczynnikach dla każdej z nich, opierając się na zasadach przedstawionych na rys. 5.6. Uzyskane w ten sposób wartości wynosiły 0,26 $m^3/s\ (Pa)^{0,545}$.

   Uwaga: Podobne wartości współczynników przepływu uzyskać można, stosując uproszczony sposób sumowania oporów występujących w mieszkaniach traktowanych jako równoległe w stosunku do strefy w klatce schodowej na pojedynczym piętrze budynków [41, 45, 109, 111].

2. Wobec identycznych rzędnych pionowych stref rzeczywistych i umownych wydzielonych w każdej warstwie systemu (patrz rys. 5.3) niezbędne jest przyjęcie innego sposobu podziału przestrzeni klatki schodowej. Sprowadzić go można do zasad przedstawionych schematycznie na rys. 5.11. Polega to na jej podziale płaszczyznami umownymi



Rys. 5.11. Korekta warstwy systemu zastępczego z uwagi na zmianę podziału klatki schodowej (schemat) [110, 111, 117]

Fig. 5.11. The correction of layer in the substitute system in respect to change of the staircase division (scheme) [110, 111, 117]

przechodzącymi przez podesty schodów, na poziomie środka wysokości każdego piętra budynku. W ten sposób uzyskać można 11 stref umownych, z których każda przesunięta jest w stosunku do poziomu mieszkań o połowę wysokości kondygnacji (Δh).

3. Zmiana podziału klatki schodowej powoduje, że współczynniki przepływu powietrza powinny być rozdzielone proporcjonalnie do wysokości tych stref. Dotyczy to najniższej i najwyższej strefy, dla których wartości tych współczynników wynoszą 0,39 $m^3/s\ (Pa)^{0,545}$, ponieważ strefy pośrednie (2 do 10 kondygnacji) zachowują wartości poprzednio ustalone. Wprowadzenie do programu tak ustalonych danych jest podobnie łatwe, jak opisywano to w przypadku kanałów wentylacyjnych (patrz rozdział 5.6.1).

Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 5.3 jako porównanie całkowitej ilości powietrza infiltrującego z zewnątrz do każdego z mieszkań dla przyjętych wersji opisu zróżnicowania temperatur w klatce schodowej. Uzyskane wyniki porównań wskazują na niewielkie pogłębienie charakterystycznych zmian przepływów do mieszkań powietrza zewnętrznego, wynikających z kształtujących się w klatce schodowej układów różnic ciśnień (patrz rys. 3.9). Sięga ono kilkunastu procent i odpowiada dokładności pomiarów wykonywanych za pomocą metod gazów wskaźnikowych do określenia wymiany powietrza w mieszkaniach [4, 28, 38, 75]. Oznacza to, że różnicowanie się temperatur wzdłuż wysokości klatki schodowej nie jest decydujące dla obrazu symulowanych przepływów powietrza.

Należy jednak podkreślić, że w przypadku analiz obejmujących przepływy ciepła i powietrza możliwość uwzględnienia zmian tych temperatur ocenić można pozytywnie. Wskazują na to badania teoretyczne i eksperymentalne prowadzone od dłuższego czasu dla przepływów ciepła i masy pomiędzy pomieszczeniami o różnych temperaturach powietrza [11, 79, 83, 106]. Stan zaawansowania tych badań nie pozwala jednak w pełni wprowadzać uniwersalnych opisów badanych procesów. Gdyby w przyszłości udało się opracować je w postaci uogólnionych zależności matematycznych, to prawdopodobnie udałoby się bezproblemowo łączyć różnego typu modele, a także wyeliminować konieczność zmiany strefowania przestrzeni klatek schodowych lub innych szybów pionowych.

Tabela 5.3

Wpływ zróżnicowania temperatur w klatce schodowej 10-piętrowego budynku na wymianę powietrza w mieszkaniach przez jego infiltrację z otoczenia zewnętrznego

Numer kondygnacji	$\phi_1 = \dot{V}_1(IN)/\dot{V}_2(IN)$ [1]					
	wg PN-83/B-03406		w opraciu o pomiary $\upsilon = f(h)$			
	t_z = - 20°C, w = 0 m/s		t_z = + 4°C, w < 0,5 m/s		t_z = +15°C, w ⩾3,5 m/s	
	t_i, °C	ϕ	t_i, °C	ϕ	t_i, °C	ϕ
1	8,0	1,17	11,7	1,11	16,2	1,06
2	10,0	1,12	12,9	1,07	16,6	1,05
3	12,0	1,09	14,6	1,06	16,9	1,05
4	14,0	1,03	14,9	1,06	17,0	1,01
5	16,0	1,02	15,3	1,00	17,4	0,93
6	18,0	0,99	15,6	0,97	18,0	0,88
7	20,0	0,92	16,0	0,88	19,6	0,95
8	20,0	0,89	16,5	0,92	20,3	0,97
9	20,0	0,93	16,8	0,92	20,5	1,02
10	20,0	1,00	17,6	0,94	21,3	1,09
11	20,0	1,03	18,9	1,05	22,6	1,14

[1] Średnie temperatury powietrza dla całej przestrzeni klatki schodowej wynosiły odpowiednio: 16,2°C, 15,4°C i 18,8°C; odpowiadają im wartości $\dot{V}_2(IN)$. Wartości $\dot{V}_1(IN)$ uzyskano uwzględniając zróżnicowanie temperatur w strefach klatki schodowej.

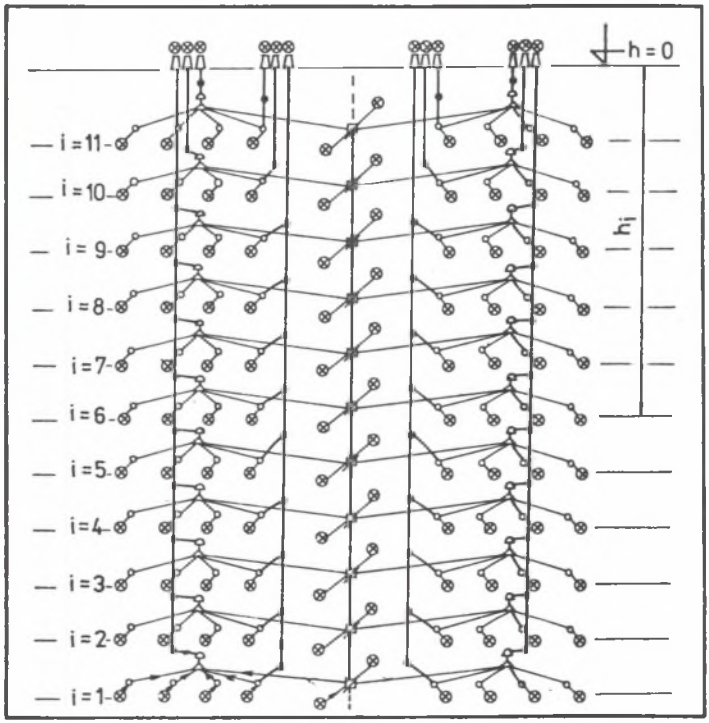
5.6.3. Modelowanie oddziaływania wiatru

Jednym z najbardziej kłopotliwych do ujęcia w zależności funkcyjne jest napór wiatru na budynki (patrz rozdział 2.4 opracowania). Uznaje się go za jedną z ważniejszych przyczyn złożoności procesów wymiany powietrza oraz niedokładności ich modeli.

Nie wnikając szczegółowo w mechanizm wpływu wiatru na budynki, uwagę należy zwrócić na brak możliwości eliminacji związanych z nim niepewności w opracowaniu danych wejściowych do modeli symulacyjnych. Powszechną prawidłowością jest wprowadzanie współczynników konwersji wiatru o wielkościach uśrednianych dla powierzchni

poszczególnych przegród zewnętrznych. Jedynie w nielicznych rozwiązaniach dotychczasowych modeli dopuszcza się ich różnicowanie wzdłuż wysokości, i to z reguły przegrody nawietrznej.

W opracowanej metodzie charakterystyczne jest większe niż dotychczas zagęszczenie podziału nie tylko wewnętrznych przestrzeni budynku, ale również stref umownych wydzielanych z otoczenia zewnętrznego. Ilość takich stref równa może być ilości otworów w przegrodach zewnętrznych, zwiększonej o ilość wylotów powietrza z kanałów wentylacyjnych. Ilustruje to schemat systemu zastępczego przedstawiony na rys. 5.12. W tym przypadku



Rys. 5.12. System zastępczy dla badanego budynku ze zwiększoną ilością stref zewnętrznych (schemat) [110, 117, 119]

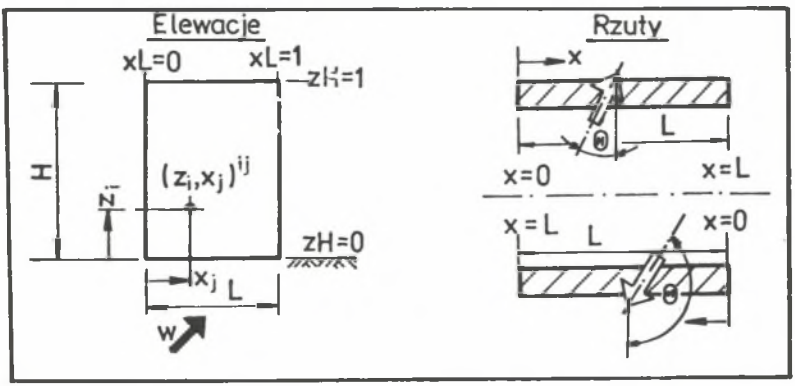
Fig. 5.12. The substitute system for tested building with large number of external zones (scheme) [110, 117, 119]

dla każdej strefy zewnętrznej przydzielić należy współczynniki konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru o wielkościach uzależnionych od kształtu, wielkości oraz położenia budynku w określonym terenie i lokalnych warunków jego zabudowy. Zebranie takich danych wejściowych, mimo że trudne, jest jednak możliwe. Możliwości te wiążą się z wykorzystaniem

założeń wprowadzanych do procedur obliczeniowych opracowanych przez M.V. Swami i S. Chandra [94] dla potrzeb ocen infiltracji i jakości powietrza w budynkach z wentylacją naturalną. Nawiązali oni do badań w tunelach aerodynamicznych, wprowadzając zasady definiowania współrzędnych otworów w ścianach zewnętrznych oraz opisu całego kompleksu parametrów charakteryzujących wpływ wiatru. Na rys. 5.13 przedstawiono schematycznie ideę tych opisów, sprowadzoną do fasady budynku i określenia kąta działania wiatru. Opierając się na ponad 5000 danych pomiarowych oraz wykorzystując całą dotychczasową wiedzę w zakresie opisów wpływu wiatru, autorzy powyższej pracy proponują zależności:

$$\overline{c_{ij}} = A+B(1/L) = f(L/H, xL, zH, \Theta,...) , \qquad (5.11)$$

pozwalające obliczyć współczynniki konwersji w dowolnym punkcie fasady okiennej budynku dla dowolnego kąta napływu wiatru (Θ). W zależnościach tych "l" jest poziomą odległości kolejnych punktów na fasadzie od jej środka ($-0,5 \leq l \leq +0,5$), zaś A i B są współczynnikami reprezentującymi cosinusoidalne oraz sinusoidalne składowe szeregu Fouriera [5, 11, 94], będące miarami średnich wielkości współczynników $\overline{c_{ij}}$ oraz ich fluktuacji odnotowywanych w trakcie pomiarów w tunelach aerodynamicznych, w wyniku zmiany kąta napływu wiatru do fasady.



Rys. 5.13. Zasada definiowania opisu budynku według [94]

Fig. 5.13. The principle of building description definition after [94]

Przybliżając tak określone zależności metodą regresji wielokrotnej ustalono, że współczynnik korelacji pomiędzy pomiarowymi i obliczeniowymi zbiorami analizowanych

danych sięga 0,90, co uznano za wystarczająco dokładne do ich wykorzystywania przy realizacji modeli obliczeniowych.

Powyższe zasady zastosowano także przygotowując dane do wykonania symulacji przepływów powietrza w ramach opracowanej metody. Zdefiniowano współrzędne wszystkich otworów w fasadzie badanego budynku oraz za pomocą zależności (5.11) obliczono współczynniki konwersji wiatru w tych miejscach dla przyjętych wersji zabudowy terenu. Celem obliczeń było porównanie wymiany powietrza w całym budynku w stosunku do jej wartości uzyskiwanych przy przyjęciu pojedynczych współczynników konwersji dla powierzchni poszczególnych ścian zewnętrznych. Wyniki porównań przedstawiono w tabeli 5.4 i dotyczą one okresu braku wyporu cieplnego ($\Delta T=0$) oraz meteorologicznej prędkości wiatru równej 3 m/s.

Podstawowym wnioskiem z przeprowadzonych porównań jest stwierdzenie dużych rozbieżności pomiędzy wymianą powietrza uzyskiwaną w warunkach przyjętych wersji zestawów danych wejściowych określających współczynniki konwersji wiatru. Największe rozbieżności występują dla budynków zlokalizowanych w gęstej zabudowie miejskiej. Przewidywać należy również dalsze zwiększenie tych rozbieżności, co wynikać może m.in. z uporządkowanego charakteru zależności (5.11), odbiegającego w stopniu trudnym do oceny od rzeczywistych oddziaływań wiatru [5, 75]. Na jedną z wielu przyczyn uwagę zwraca J. Ostrowski [78], omawiając kwestię wpływ wiatru na zabudowę. Stwierdza on, że rozkłady prędkości wiatru uzyskiwane na podstawie empirycznych współczynników (patrz uwagi do tabeli 5.4) dają większe niż w rzeczywistości wypełnienie profilu prędkości, a przede wszystkim większe średnie gradienty. Może być to powodem większego zróżnicowania współczynników konwersji wiatru, niż ma to miejsce w przypadku ich obliczania. M.V. Swami i S. Chandra [94] wniosek ten uwzględniają wprowadzając do swoich procedur obliczeniowych inne niż dotychczas zasady oceny wpływu zabudowy terenu. Zasady te opracowane przez B.G. Wirena [101] sprowadzają się do zastosowania zależności korekcyjnych dla zależności (5.11), ustalonych również na podstawie badań modeli układów zabudowy w tunelu aerodynamicznym. Dotyczą one jednak budynków o małej kubaturze i jako takie nie były wprowadzane do analiz wykonywanych w ramach niniejszego opracowania.

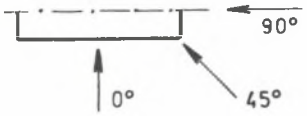
Tabela 5.4

Porównanie wymiany powietrza w badanym budynku uzyskanej za pomocą symulacji komputerowej dla 2 wersji współczynników konwersji wiatru

Kąt naporu wiatru [1] x, °	Zabudowa terenu [2]	$\frac{\dot{V}^2(\Theta=\Theta_x)}{\dot{V}^1(\Theta=0^o)}$	
		wersja 1 [3]	wersja 2 [4]
0	niska zabudowa rozproszona	1,00	1,19
	wysoka zabudowa zwarta	1,07	1,48
45	niska zabudowa rozproszona	0,89	1,07
	wysoka zabudowa zwarta	0,99	1,23
90	niska zabudowa rozproszona	0,55	0,90
	wysoka zabudowa zwarta	0,67	1,02

Uwagi

[1] Jako wyjściowy przyjęto kąt $\Theta = 0°$ - prostopadle do fasady z wejściem głównym.



[2] Zabudowę terenu uwzględniono przez zmianę prędkości wiatru nad terenem (zależność (5.7)), stosując zasady opracowane przez M.H. Shermana i D.T. Grimsruda [92] dla prędkości meterologicznej w_o mierzonej na poziomie $H_o = 10$ m sprowadzone do równania:

$$W_{Hi} = \delta\left(H_i / H_o\right)^{\beta} w_o$$

Zabudowa terenu	δ	β
Teren niezabudowany (stacja meteo.)	1,00	0,15
Niska zabudowa rozproszona	0,85	0,20
Wysoka zabudowa zwarta	0,47	0,35

[3] Na podstawie schematu modelu na rys. 5.3 dla 5 wielkości współczynników konwersji wiatru.

[4] Według schematu na rys. 5.10 oraz 102 wielkości współczynników konwersji wiatru.

Opracowana metoda jest otwarta na tego typu trudności. Nie narzucono w niej w sposób ścisły opisów wpływu wiatru, a zestawy współczynników konwersji wiatru są wprowadzane do osobnego pliku konfiguracyjnego programu komputerowego w postaci przyjętej przez przeprowadzającego symulację. Warto podkreślić, że właśnie dzięki takiej jego budowie możliwe było przeprowadzenie powyżej omówionych ocen porównawczych. Jednocześnie uzyskane ich wyniki, pomimo szeregu niepewności wynikających z uproszczonych opisów naporu wiatru, świadczą zdaniem autora o celowości przyporządkowywania współczynników otworom w ścianach zewnętrznych budynków zlokalizowanych w układach zabudowy miejskiej. Ponadto, na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można również sformułować wniosek ogólny odnośnie do koncepcji dokonywania analiz przepływów i infiltracji powietrza przy oddziaływaniu wiatru. Podstawą tej koncepcji jest nawiązanie do badań w tunelach aerodynamicznych dotyczących pewnych, charakterystycznych sytuacji dla naporu wiatru. Badając reakcję modeli o różnym poziomie uszczegółowienia omawianych procesów na strukturę opływu tych budynków można poszukiwać stanu reprezentatywnego dla danych sytuacji w założonym zakresie prawdopodobieństwa [76, 117]. Konsekwencją takich statystycznych analiz mogą być założenia badawcze odnośnie do opisów oddziaływania wiatru wprowadzanych do modeli symulacyjnych. Podstawowym warunkiem wykonania takich analiz jest możliwość dowolnie dobieranej ilości szczelin i otworów wewnątrz budynków oraz wirowej struktury i zmiennego rozkładu przestrzennego przepływów powietrza wokół budynków. Proponowany model pozwala dowolnie przyjmować dokładność badań infiltracji i wewnętrznych przepływów powietrza. W ten sposób wychodzi on naprzeciw analizom aerodynamicznym opływów budynków zarówno w tunelach, jak i w modelach przepływów i wymiany powietrza.

5.6.4. Elementy weryfikacji opracowanej metody

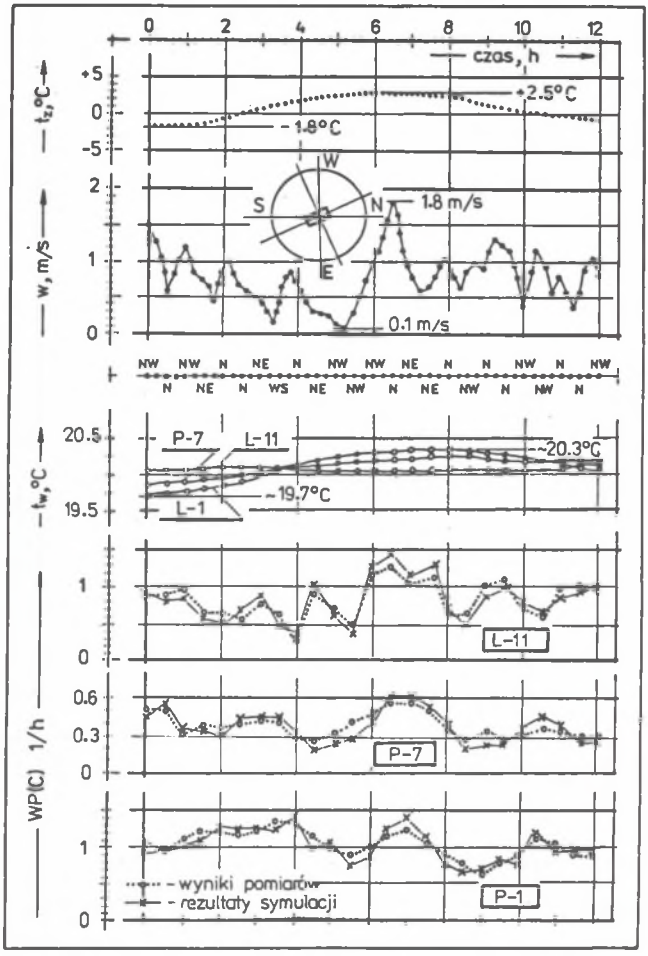
Przedstawione powyżej analizy ilustrujące możliwości opracowanej metody komputerowych badań symulacyjnych w całej rozciągłości potwierdzają jej przydatność do kompleksowego charakteryzowania procesów wymiany powietrza w budynkach wielostrefowych. Dają one również częściową odpowiedź na pytanie, czy dokonane w niej wzbogacenie arsenału sposobów ocen i środków do ich realizacji jest celowe z punktu widzenia rzeczywistego obrazu badanego procesu (np. patrz. rys. 5.10). Udzielenie pełnej odpowiedzi, a więc przeprowadzenie fizykalnej weryfikacji, jest jednak w omawianym przypadku utrudnione, szczególnie gdy badany budynek składa się z dużej ilości przestrzeni.

W takim zbiorze przestrzeni weryfikacja może dotyczyć ponadto jedynie podstawowego efektu procesu, jakim są ilości powietrza wymienianego w przestrzeniach, nie zaś parametrów i czynników towarzyszących i decydujących o omawianym procesie. Poza tym objęcie wszystkich parametrów i pomieszczeń jest praktycznie niewykonalne. Dlatego też weryfikacja metody w przypadku budynku wielostrefowego polegać może jedynie na porównaniu z wynikami pomiarów przeprowadzonych w wybranej (z reguły niewielkiej) ilości stref.

Przykładem takiego porównania są dane przedstawione na rys. 5.14 dla pomieszczeń zlokalizowanych na różnych poziomach badanego budynku. Symulacji komputerowej dokonywano przy uwzględnieniu powyżej zamieszczonych modyfikacji systemu zastępującego budynek, a do pomiarów wykorzystano metodę stałego stężenia gazu wskaźnikowego. Uzyskana duża zgodność wyników obliczeń i pomiarów (średnio 10%) była w dotychczasowych metodach obliczeniowych trudna do osiągnięcia [4, 18, 67, 71, 83, 98]. Należy zwrócić uwagę, że bardziej niekorzystne efekty porównań uzyskiwane przy większych prędkościach wiatru, niż to odnotowano na rys. 5.14, nie stanowią istotnej trudności w proponowanej metodzie. Wystarczające jest zagęszczenie podziału czasokresu objętego ocenami na większą ilość przedziałów czasowych, w których dokonuje się uśredniania warunków środowiskowych, a w tym prędkości i kierunków wiatru.

Bezpośrednie porównanie wyników uzyskanych za pomocą opracowanej metody symulacyjnej z rezultatami obliczeń wykonywanych z wykorzystaniem innych metod charakteryzujących się znacznym uproszczeniem struktury wewnętrznej nie jest wskazane.

Główną tego przyczyną jest brak precyzyjnych zasad skupiania przestrzeni wewnętrznych i oddziaływających czynników oraz wynikający z tego brak możliwości określania wymiany powietrza w pomieszczeniach skupionych w pojedyncze przestrzenie. Mimo że analizy takie nie wchodziły w zakres niniejszej pracy, proponowana metoda symulacyjna pozwala na ich dokonywanie. Jest to wynikiem możliwości konstruowania systemu zastępczego w dowolnie upraszczanej strukturze (patrz tabela 5.2), niemniej nawet i w tym przypadku niezbędny jest wybór i sprawdzenie tych zasad. W przyszłościowych realizacjach takich porównań mogą być wykorzystywane przedstawione w niniejszej pracy oceny istotności wpływu poszczególnych elementów struktury budynków i poszczególnych oddziaływań.



Rys. 5.14. Porównanie wyników symulacji komputerowej i pomiarów wymiany powietrza dla pokoi mieszkalnych położonych na 1 i 11 kondygnacji (po lewej stronie klatki schodowej - L1, L11) i na 7 kondygnacji (po prawej stronie klatki schodowej - P7)

Fig. 5.14. The comparison of simulated and measured air change rates in rooms located on the 1st and 11th floor level (on the left side of the staircase - L1, L11) and on the 7th floor level (on the right side of the staircase - P7)

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Dotychczas stosowane metody oceny przepływów i wymiany powietrza są niezadowalające. Przyczyną tego są stosowane przy ich wykorzystywaniu sposoby agregacji przestrzeni wewnętrznych i oddziaływających na nie czynników. Złożoność badanych procesów przy tak daleko idących ich uproszczeniach nie pozwala w pełni ujawniać wpływu wewnętrznych ruchów powietrza na jego wymianę, tym bardziej że nie opracowano do tej pory zasad konfrontacji tak uzyskanych wyników obliczeń z rezultatami możliwych do przeprowadzenia pomiarów.

Niniejsze opracowanie, będące podsumowaniem prac autora w dziedzinie badań przepływów i wymiany powietrza z uwagi na potrzeby cieplne pomieszczeń zlokalizowanych w budynkach mieszkalnych, jest próbą pokonania bariery na drodze zwiększania wiarygodności prognozowania tych przepływów. Szczególną uwagę zwrócono na wzajemne zależności pomiędzy czynnikami określającymi badane procesy a wewnętrznymi drogami przepływów powietrza. Oceniono również przydatność metod badawczych z tego punktu widzenia, podkreślając jednocześnie dużą rolę komputerowej symulacji przepływów powietrza dla ocen jego wymiany w budynkach złożonych z dużej ilości pomieszczeń wewnętrznych.

Zwrócono także uwagę na trudny do ujęcia w zależności funkcyjne wpływ wiatru na badany proces. Trudności te są wynikiem losowej zmienności ciśnień statycznych na przegrodach budynków na skutek losowych zmian prędkości i kierunku wiatru oraz lokalnej zabudowy. Jednocześnie podkreślono, że właśnie te trudności stanowią jedną z głównych przyczyn niedokładności modeli wielostrefowych. Opracowane rozwiązanie modelu ułatwia pokonanie tych trudności, umożliwiając obciążenie struktury budynków przestrzennym polem przepływów powietrza wokół nich.

Opracowanie proponowanej metody symulacyjnej poprzedzono realizacją następujących zagadnień:

- sformułowano adekwatne do wymagań i wyników pomiarów zasady podziału budynków na strefy rzeczywiste i umowne, których podstawą jest struktura wewnętrzna oraz zróżnicowanie parametrów powietrza w obrębie przestrzeni pionowych,
- opracowano sposoby konstruowania systemu zastępującego badane budynki, w którym poszczególne strefy stanowią elementy jednostkowe, wzajemnie powiązane i kontaktujące się bezpośrednio lub pośrednio z otoczeniem zewnętrznym,

- usystematyzowano i ujednolicono formy opisu zarówno stref/elementów systemu zastępczego, jak i połączeń pomiędzy nimi wraz z ich zdefiniowaniem, stanowiących uporządkowane zestawy informacji o geometrycznych i fizycznych cechach badanego procesu.

Przeprowadzone analizy dostarczyły danych do dalszej realizacji omawianych zagadnień, przy której szczególny nacisk położono na poszukiwanie nowych koncepcji w zakresie elastyczności i komplesowości metod analitycznych oraz zmniejszenia dysproporcji pomiędzy ich wynikami a rezultatami pomiarów. W tym celu:

1. Przedstawiono model matematyczny budynku i procesu dostosowany do wprowadzonego poziomu opisu systemu zastępczego, stanowiącego postulowane odwzorowanie budynku w postaci zdyskretyzowanego zbioru jego elementów jednostkowych (stref).

2. Opracowano zasady obliczeń numerycznych eliminujące trudności w rozwiązaniu układów o dużej ilości równań nieliniowych, wykorzystując metodę bilansów elementarnych, w której wprowadzono nową procedurę realizacji obliczeń iteracyjnych.

3. Sformułowano zasady symulacji przepływów powietrza w złożonych systemach zastępujących budynki o dużej ilości przestrzeni wewnętrznych, wprowadzając sposób określania wielkości kroków czasowych uzasadnionych fizycznymi cechami elementów systemów i stabilnością obliczeń iteracyjnych.

4. Opracowano nowy program komputerowy do symulacji badanych procesów oparty na powyższych zasadach obliczeń i charakteryzujący się oryginalnymi rozwiązaniami w zakresie:
   - śledzenia wyników obliczeń i ingerencji w czasie symulacji poprzez zmianę długości kroków czasowych, a tym samym - utrzymywanie stabilności obliczeń,
   - możliwości zróżnicowania geometrycznych i fizycznych cech każdego z elementów jednostkowych, systemu zastępczego oraz sposobu ich połączeń, co odpowiada wymaganiu elastyczności analiz,
   - konstruowania systemów o różnych poziomach uszczegóławiania zarówno struktury budynków, jak i procesów przepływu powietrza z uwagi na sposób opisu sił napędowych tych procesów, a szczególnie skomplikowanego oddziaływania wiatru,

- przeprowadzania badań symulacyjnych dla systemów dowolnie uszczegóławianych (co było dotychczas trudne do wykonania) i wynikająca stąd możliwość określania zarówno zasadności skupiania przestrzeni wewnętrznych, jak i sił napędowych, co odpowiada warunkowi kompleksowości analiz,
- możliwości znacznej poprawy wiarygodności uzyskiwanych wyników obliczeń przez wprowadzenie do nich danych otrzymanych z pomiarów, co głównie dotyczy najmniej dokładnie opisywanych elementów systemu, jakimi są pionowe przestrzenie.

Model i realizujący go program pozwalają na objęcie badaniami symulacyjnymi dowolnego budynku i kompozycji parametrów oraz czynników kształtujących badany proces, w dużo większym niż miało to miejsce dotychczas zakresie. Szerokie możliwości opracowanej metody dotyczą zarówno etapu tworzenia i opisu systemu zastępującego budynek, jak i sposobów realizacji badań symulacyjnych. W związku z tym zamieszczone w pracy wyniki analiz miały na celu jedynie zilustrowanie wprowadzonych zasad postępowania w ramach proponowanej metody.

Opracowanie niniejsze jest końcowym etapem badań autora mających na celu możliwie dokładne odwzorowanie cech i własności omawianych procesów za pomocą modeli o parametrach skupionych, przy jednoczesnym utrzymywaniu tych charakterystyk w kontakcie z rzeczywistym obrazem procesu przepływów powietrza. Uzyskany efekt pozwala nie tylko na dokonywanie ocen potrzeb cieplnych związanych z tymi przepływami, ale również może być wykorzystywany do analiz migracji zanieczyszczeń lub komfortu cieplnego w obrębie budynków o dużej ilości pomieszczeń wewnętrznych. Oznacza to, że proponowana metoda wymaga dalszych badań prowadzących do jej rozwinięcia i udoskonalenia. Do najważniejszych kierunków przyszłych prac należy zaliczyć m.in.:

- doskonalenie metod pomiarowych do badania procesów przepływów powietrza w celu ich gromadzenia w bazach danych pozwalających na wielokrotne ich wykorzystanie,
- opracowanie metodologicznych podstaw tworzenia bazy danych opisujących badane procesy w celu ich statystycznej analizy,
- dalsze udoskonalanie zasad symulacji określania oporów charakterystycznych elementów obiektu przy narzuconych przepływach powietrza, co ma znaczenie z uwagi na coraz silniejszą potrzebę normowania tych przepływów,

- rozwinięcie metod symulacyjnych w kierunku jednoczesnego dokonywania ocen procesów wymiany ciepła i powietrza, w celu uwiarygodnienia cieplnych analiz optymalizacyjnych,
- przeanalizowanie potrzeb i możliwości wyjścia poza deterministyczny charakter modeli matematycznych procesów wymiany powietrza i zastępowanie ich śledzeniem zjawisk przepływowych i cieplnych w poszczególnych elementach strukturalnych budynków,
- odrębne zagadnienie oczekujące rozwiązania - wpływ wiatru na budynki i zachodzące w nich procesy przepływu powietrza. Charakterystyczna dla oddziaływania wiatru duża zmienność i trójwymiarowość przepływów powietrza wokół budynków, a szczególnie w obrębie lokalnej zabudowy może być stopniowo opanowywana ilościowo przez przyjmowanie przestrzennych pól prędkości w powiązaniu z grupami budynków. Komputeryzacja badań i analiz pozwala w tych przypadkach na znacznie szybszy postęp niż dotychczasowe oceny związane z reguły z opływem pojedynczych budynków. Jednocześnie sposób doboru tych przestrzennych pól prędkości może być określony za pomocą kryteriów prawdopodobieństwa ich oddziaływania na infiltrację i przepływy powietrza wewnątrz budynków. Skutecznym narzędziem dla tego typu analiz jest proponowany w niniejszym opracowaniu model wielostrefowy.

Prezentowane w pracy zasady badań i przykładowe ich wyniki dotyczą budownictwa wielorodzinnego, dla którego przetestowano opracowaną metodę. Jednak zawarte w niej idee i koncepcje mogą być wykorzystane dla innego rodzaju budynków lub innych rozwiązań wentylacji. Jednym warunkiem ich adaptacji jest przeprowadzenie analizy strukturalnej obiektów oraz zebranie informacji o cechach i własnościach badanego procesu w wyróżnionych elementach strukturalnych. W pewnej mierze zakres zastosowania przedstawionego w pracy modelu wykracza również poza procesy wentylacyjne, gdyż może być wykorzystany do rozwiązania innych procesów przepływowych.

LITERATURA

[1] Ahlström K.E.: Nagra Metoder for Mätning av Lüftomsaltininger i Lokaler`,Tm, KTH, Vol. 1, No.4, Stockholm 1983.

[2] Infiltration Centre: Survey of Current Research into Air Infiltration in Buildings,Technical Note 7, Berkshire 1981.

[3] Air Infiltration Centre: Techniques and Instrumentation for the Measurement of Air Infiltration in Buildings, Technical Note 10, Berkshire 1983.

[4] Air Infiltration Centre: The Validation and Comparison of Mathematical Models of Air Infiltration, Technical Note 11, Berkshire 1983.

[5] Air Infiltration Centre: Wind Pressure Data Requirements for Air Infiltration Calculations, Technical Note 13&13.1, Berkshire 1984.

[6] Air Infiltration Centre: Review of Building Airtightness and Ventilation Standards, Technical Note 14, Berkshire 1984.

[7] Air Infiltration Centre: Leakage Distribution in Buildings, Technical Note 16, Berkshire 1985.

[8] Air Infiltration Centre: Ventilation Strategy a Selected Bibliography, Technical Note 17, Berkshire 1985.

[9] Air Infiltration & Ventilation Centre : Survey of Current Research into Air Infiltrationand Related Air Quality Problems in Buildings, Technical Note 19, Berkshire 1986.

[10] Air Infiltration & Ventilation Centre: A Review of Ventilation Effictiveness, Technical Note 21, Berkshire 1987.

[11] Air Infiltration & Ventilation Centre: Air Infiltration Calculation and Measurement Techniques - An Applications Guide, Berkshire, Coventry 1988.

[12] Alereza T.: Report on Rogress Review Workshop ASHRAE Special. Geomet. Project No. 17, 1977.

[13] Arens E. and others: A New Bioclimatic Chart for Environmental Design, NBS, No. 4/15, Washington 1980.

[14] Baker R.J., Nelder, J.A.: The GLIM System: Generalised Linear. Interactive Modelling, England 1978.

[15] Baranowski A. i inni: Modelowanie matematyczne i eksperymentalne ruchu powietrza w budownictwie mieszkalnym i towarzyszącym, Praca KOWiOP, Politechnika Śląska, 1978/90 (nie publikowana).

[16] Baranowski A., Mierzwiński, S.: Możliwości uproszczenia oddziaływania wiatru jako składnika obliczeń infiltracji powietrza w budynku, Materiały V Konfer. Naukowej, Poznań 1990.

[17] Begström S.: Den generalla metodem för beräkning av luftväxling i hus, Rapport R 129: 1985, Byggforskningstradet, Stockholm 1985.

[18] Bilsborrow R.E., Tricke, F.R.: Model Veryfication of Analogue Infiltration Prediction, Pergamon Press Building Science, Vol. 10, London 1985.

[19] Bode H.W.: Network Analysis and Feedback Amplified Design, 11th edition D.Van Nostrand Company Inc., 1956.

[20] Bohac D.L., Datt, G.S.: Approaches to Estimating Airflows in Large Multifamily Buildings, ASHRAE Transc, Part 1, No. 87-14-1, 1987.

[21] Bowen A.J.: A Wind Tunnel Investigation Using Simple Buildings Model for Air Infiltration Estimates, National Aero. Establishment, Report LTR-LA-209, Canada 1976.

[22] Brandes D.: Beitrage zür Bemessung und Berechnung von Lüftungssystemen für Wohnüngskuchen und - bader, Disertation, TU Dresden 1967.

[23] Brinkman W.A.R.: Zür Bestimmung des Lüftungswarmebedarfs hoher Gebaüde, Disertation, Berlin 1980.

[24] Cacavelli D.: Modelisation du comportment thermique de batiments multizones, These de Doctorat INSA, Lyon 1988.

[25] Camarerro R. and others: A Computer Code for Solving General Network Simulation in Buildings, 4th Inter. Symposium, Tokyo 1983.

[26] Charlesworth P.S.: Air Infiltration and Ventilation Guide to Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques, ASTM, Philadelphia 1990.

[27] Cole J.T., Zawacki T.S.: Application of a Generalized Model of Air Infiltration to Existing Homes, ASHRAE Transc., Part 2, 1980.

[28] Commision of the European Communities: Natural Ventilation in Large and Multicelled Buildings, Report IEA-EUR 10 (552 EN).

[29] Dembecki F., Szczechowiak E., Monowid P.: Skuteczność działania zbiorczych kanałów wentylacji naturalnej w budownictwie zintegrowanym, Prace Centralnego Ośrodka B-RTJ "Instal", Warszawa 1981.

[30] D'Ottavio T.W. and others: Error Analysis Techniques for Perfluorocarbon Tracer - Derived Multizone Ventilation Rates, Building Environment 23(4), BNL 39 867.

[31] Edwards R.E., Irwin, C.: Multiple Cell Air Movement Measurements, Proceedings of the 6th AIC Confer., Netherlands 1985.

[32] Etheridge D.W.: Application of the Constant Concentration Technique for Ventilation Measurement to Large Building, SERC Workshop, Coventry 1984.

[33] Feustel H.E., Kendon V.M.: Infiltration Models for Multicelluar Structures, Energy and Building, Vol.8, 1985.

[34] Feustel H.E. and others: Temperature and Wind - Induced Air Flow Patterns in a Staircase, LBL Report, No. 14589, Berkeley 1985.

[35] Feustel H.E.: Fundamentals of the Multizone Air Flow Model - COMIS, Technical Note 29 (AI&VC), Coventry 1990.

[36] Feustel H.E., Dieris J.: A Survey of Air Flow Models for Multizone Structures, LBL Report, No. 30288, Berkeley 1991.

[37] Gids W.: Influence of Different Parameters in Infiltration Heat Loss, Report of the TNO, Delft 1983.

[38] Grot R., Axley, J.: The Development of Models for the Prediction of Indoor Air Quality in Buildings, Proceeding of the 8th AI&VC Confer., Uberlingen 1987.

[39] Harrje D.T. and others: Air Infiltration Energy Use and Indoor Air Quality - How Are They Related? AI&VC Review, Vol.5, No.1, Berkshire 1983.

[40] Harrje D.T.: Tracer Gas Measurements in a Multifamily Building, Proceedings of the ASTM Symposium, Atlanta 1990.

[41] Herrlin M.K.: Luftstromming i Byggnader Berakningsmodell, Royal Institute of Technology, Stockholm 1987.

[42] Herrlin M.K.: MOVECOMP - A Multizone Infiltration and Ventilation Simulation Program, AI&VC Review, Vol. 9, No.3, Berkshire 1988.

[43] Jędrzejewska-Ścibak T., Rosada J.: Referat wygłoszony na Posiedzeniu Komisji Energetyki PAN (nie publikowany) 1987.

[44] Karolak J.: Wentylacja wysokich budynków mieszkalnych, COW Nr 3, 1973.

[45] Klote J.H.: Stairwell Pressurization, ASHRAE Transc., Vol. 86, 1980.

[46] Kronvall J.: Air in Building Components Proceedings of the 3rd AI&VC Confer., Berkshire 1984.

[47] Kvisgaard B., Collet P.F.: The User`s Influence on Air Change, Proceedings of the ASTM Symposium, Atlanta 1990.

[48] Lee H.: Thermal Effect on Pressure Distribution in Simulation High-Rise Buildings, ASHRAE Transc., Vol.91, 1985.

[49] Lillengren V.: Infiltration in Residential Buildings, KTH, Vol. 16, No.1, Stockholm 1981.

[50] Lyberg M.D., Boman C.A.: Measured and Building Code Values of Air Change Rate in Residentail Buildings, Proceedings of the 5th AI&VC Confer., Reno-Nevada 1984.

[51] Lyberg M.D.: Models of Infiltration and Natural Ventilation, Biulletin the National Swedish Institute for Building Research, M-23, Stockholm 1985.

[52] Majerski S., Nantka M.B.: Matematyczne modele procesów wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych - Zakres stosowania, Materiały Międzynarodowej Konferencji. N-T, Wrocław 1987.

[53] Mierzwiński S.: Dobór metod w systemowych badaniach jakości procesów wentylacji, COW, Nr 6-12, 1989.

[54] Mierzwiński S.: Ocena jakości rozdziału powietrza wentylacyjnego, COW, Nr 2, 1992.

[55] Melo C.: Flow an Algorithm for Calculation Air Infiltration into Building Proceedings of 3rd Intern. Congress on BEM/CBEM, Vol. 1, Laussane 1987.

[56] Muchlebach H.: Messmetoden zür Erfassung des Lüftwechsels und der Lüftdurchlassigkeit von Wohnbauten, HLH, No.5, 1984.

[57] Nantka M.B., Majerski S.: Skuteczność działania wentylacji w wielokondygnacyjnych budynkach mieszkalnych, COW, Nr 6, 1982.

[58] Nantka M.B., Majerski S.: A Numercial Method for Air Change Rate of Building Calculated, Proceedings of 5th International Conference on HVAC, Praga 1983.

[59] Nantka M.B.: Tightness of Prefabricated Outer Walls and its Influence on Heat Demand in Apartment Dwellings, AI&VC Review, Vol.4, No.2, Berkshire 1983.

[60] Nantka M.B.: Zużycie a straty ciepła w budownictwie wielkopłytowym i możliwości ich zmniejszenia, Gospodarka Paliwami i Energią, Nr 6 (I), Nr 7(II), 1984.

[61] Nantka M.B.: Theoretical and Experimental Studies of Heat Flows Due to the Air Infiltration and Ventilation, Proceedings of 7th Intern. Confer. on HVAV, Bratislava 1984.

[62] Nantka M.B.: Air Flow in Dwelling Houses from an Energy Point of View, Proceedings of the CLIMA 2000, Vol.2, Copenhagen 1985.

[63] Nantka M.B.: Wpływ dokładności charakterystyk aerodynamicznych szczelin na wiarygodność obliczeń wymiany powietrza w budynkach, Zeszyty Nauk. Pol. Śl., Seria - Inżynieria Środowiska, z. 26, Gliwice 1985.

[64] Nantka M.B., Majerski, S.: Ustalanie niezbędnych potrzeb cieplnych budynków mieszkalnych, COW, Nr 4, 1986.

[65] Nantka M.B.: Air Infiltration and Ventilation in Relation to the Thermal Performance of Dwelling Houses, Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 7, No. 1, London 1986.

[66] Nantka M.B.: A Study of Air Infiltration and Natural Ventilation in Dwelling Houses, Proceedings of Intern. Symposium, Fort Worth - Texas 1986.

[67] Nantka M.B.: Metody pomiaru infiltracji i wymiany powietrza, COW, Nr/5, 1986.

[68] Nantka M.B.: Przydatność metod badania wymiany powietrza dla określania strat ciepła, Materiały Sympozjum Naukowego PAN, Szczecin - Świnoujście 1988.

[69] Nantka M.B.: The Calculation of House Infiltration Rates, Proceeedings of the CLIMA 2000, Sarajewo 1989.

[70] Nantka M.B.: Comparison of Different Methods for Air Tightness and Air Change Rate Determination, Proceedings of the ASTM Symposium, Atlanta 1990.

[71] Nantka M.B.: Matematyczne modele naturalnych procesów wymiany powietrza, Zeszyty Nauk. Pol. Śl. Seria - Inżynieria Środowiska, z. 32, Gliwice 1990.

[72] Nantka M.B., Gliński H.: Badania infiltracji i wymiany powietrza w budynkach wielorodzinnych, Materiały Konfer. Nauk. PAN, Wrocław - Szklarska Poręba 1990.

[73] Nantka M.B.: Simplified Methods for Calculating Air Flows and Heat Losses in Dwelling Houses, Zeszyty Nauk. Pol. Śl., Seria - Inżynieria Środowiska, z. 31, Gliwice 1991.

[74] Nantka M.B.: Badania przepływów i wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych o złożonej strukturze wewnętrznej, COW, Nr 10 (I), nr 11 (II), 1991.

[75] Nantka M.B.: Problematyka naporu wiatru w badniach symulacyjnych przepływów i wymiany powietrza w budynkach, Materiały Konferencji N-T, Kraków 1991.

[76] Nantka M.B.: Symulacja przepływów i wymiany powietrza w złożonych systemach aerodynamicznych, Materiały IV Seminarium, Wisła 1991.

[77] Nylund O.: Energy Saving by Sealing the Envelope, Proceedings of 2nd AI&VC Confer., Stockholm 1981.

[78] Ostrowski J.: Ocena możliwości opisu zjawisk przepływu w warstwie atmosferycznej, Zeszyty Nauk. Pol. Śl., Seria Inżynieria Środowiska, z. 29, Gliwice 1988.

[79] Pelletret. R., Allard F. al all: Modelling of Large Openings, AI&VC review, Vol. 13, No.1, 1991.

[80] Perera M.D., Walker R.R.: Strategy for Measuring Infiltration Rates in Large, Multicelled and Naturally Building Using a Single Tracer Gas, Building Services Engineering Research and Technology, Vol. 6, No.2, London 1985.

[81] Petersen F.: Planform och Energibehov, Tekniska Meddelanden 169/170, KTH, Vol.9, Stockholm 1980.

[82] Piggins J.: A Preliminary Comparison of Calculated Building Ventilation Rates Using Six Different Pressure Coefficient Datasets, AI&VC Review, Vol.12, No.3, Berkshire 1991.

[83] Prur J.J.: A New Multi-Tracer Gas Technique for Measuring Interzonal Air Flows in Buildings, Ph.D.Thesis, London 1986.

[84] Quac T.T., Martel A., Camarero R.: A Computer Code for Solving General Network Simulation in Buildings, Proceedings of 4th Intern. Symposium, Tokyo 1983.

[85] Railio J., Seppanen O.: The Influence of Airtightness of the Operation of Ventilation System in Multistory Buildings, ASHRAE Transc., Vol. 90 (28), 1984.

[86] Railio J., Saarnio P.: Air Infiltration - Modelling and Practical Results, Technical Research, Centre of Finland (unpublished), 1985.

[87] Reynolds A. J.: The Scaling of Flows of Energy and Mass Through Stairwell, Building and Environment, Vol. 21, 1986.

[88] Reynolds A.J.: The Modelling of Stairwell Flows, Building and Environment, Vol. 23, 1988.

[89] Sandberg M.: The Multi-Chamber Theory Reconsidered from the Viewpoint of Air Quality Studies, Tekniska Meddelanden 280, KTH, Vol. 15, No. 4, Stockholm 1984.

[90] Sanberg M., Mattson M.: Two-dimensional Non-Isothermal Supply from how Velocity Therminals, AI&VC Review, Vol. 12, No.2, Berkshire 1991.

[91] Sherman M.H.: Air Infiltration in Buildings, Ph. D. Thesis (LBL-10712), Berkeley 1980.

[92] Sherman M.M., Grimsrud, D.T.: Wind and Infiltration Interactions, Annual Meeting of ASTM, New Orleans 1982.

[93] Sparevik P., Sjokvist L.: AC-and DC-Pressurization, KTH-Serien A4, No. 116, Stockholm 1985.

[94] Swami M.V., Chandra S.: Procedures for Calculating Natural Ventilation Airflows Rates in Buildings, Research project of ASHRAE, No. 448-RR, Cap Canaveral-Florida 1987.

[95] Szczechowiak E.: Model przepływu powietrza w budynku ze zbiorczymi kanałami wywiewnej wentylacji naturalnej. Prace Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, Wyd. Pol. Poznańskiej 1985.

[96] Tanaka H., Lee Y.: Scale Model Veryfication of Pressure Differentials and Infiltration Induced Across the Walls of a High-Rise Building, Journal of Wind Eng., Vol. 25, No.1,1986.

[97] Walker R.R.: Interpretation and Error Analysis of Multi-Tracer Gas Measurements to Determine Air Movement in a House, Proceeding of the 6th Ai&VC Confer., Netherlands 1985.

[98] Walton G.N.: Calculation of Inter-Room Air Movement for Multi-Room Building Energy Analysis, National Bureau of Standards, IR-2404, 1981.

[99] Walton G.N.: A Computer Algorith for Predicting Infiltration and Interroom Airflows, ASHRAE Transc., Vol. 90, part 1, 1984.

[100] Weier H.: Die Wirkung der Lüftungssysteme von Wohnbauten bei unterschiedlichen Ausenlüftzustanden, Lüft und Kaltetechnik, 1975/76.

[101] Wiren B.G.: Effects of Surronding Buildings on Wind Pressure Distribution and Ventilative Heat Losses, The National Swedish Institute for Building Research, Report No. 19, Stockholm 1985.

[102] Zeigler B.P.: Teoria modelowania i symulacji, PWN, Warszawa 1984.

[103] Zohrabian A.S. and others: A Numercial Study of Buoyancy - Driven Flows of Mass and Energy in a Stairwell, Proceedings of the 9th AI&VC Confer., Gent - Belgium 1984.

Zestawienie niektórych prac wykonanych przez autora oraz publikacji, na których wyniki powołano się w tekście:

[104] Rozpoznanie techniki wentylacyjnej w budownictwie mieszkaniowym, NB-280/RI-1, 1981.

[105] Zapotrzebowanie ciepła i wentylacja w budynkach systemu szczecińskiego, NB-156/RB-4/RI-1, 1981.

[106] Czynniki warunkujące zmniejszenie zużycia energii na cele ogrzewania i wentylacji w budynkach mieszkalnych, NB-420/RI-1, (1981/85 PR-8).

[107] Instalacje wewnętrzne c.o. w budownictwie mieszkaniowym przystosowane do rozliczania energii cieplnej u odbiorców, NB-741/RI-1, 1986/87, CBPR 5.9).

[108] Badania szczelności przegród i wymiany powietrza w pomieszczeniach spowodowanej jego infiltracją, NB-62/RI-1, (1988/89, CBPR 4.3).

[109] Program liczący przepływy powietrza w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych - badania wentylacji, (1990).

[110] Badania przepływów i wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych z uwagi na potrzeby cieplne pomieszczeń, BW-969/RI-1, (1991/92).

[111] Nantka M.B.: Simulation Model of Air Flows and Change in Multizone Dwelling Houses (New Concepts), Proceedings of International Symposium Air Flow in Multizone Structures, Budapest 1992.

[112] Nantka M.B., Baranowski A.: Działanie kanałów spalinowych w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych z wentylacją naturalną, COW Nr 8, 1992.

[113] Nantka M.B.: Bilansowanie globalnych potrzeb cieplnych budynków, Materiały X Zjazdu Ogrzewników Polskich, Warszawa 1993.

[114] Nantka M.B., Majerski S.: Wielorodzinne budownictwo mieszkaniowe - mikroklimat i zużycie energii, Materiały X Zjazdu Ogrzewników Polskich, Warszawa 1993.

[115] Nantka M.B.: Płaszczyzny współpracy branż w realizacji i eksploatacji energooszczędnego budownictwa, Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej pt."Fizyka budowli w teorii i praktyce", Łódź 1993.

[116] Nantka M.B., Baranowski A.: Modelowanie numeryczne procesów wentylacji naturalnej przy dominującym wpływie wiatru: Stan obecny i perspektywy, COW (w druku), 1993.

[117] Nantka M.B.: New Concepts Aimed to Improve the Multizone Model for Predicting the Air Flows in the Buildings', Proceeding of 6th International Conference on Indoor Air' 93, Helsinki 1993.

[118] Nantka M.B., Majerski S.: Prognozowanie potrzeb cieplnych budynków z uwagi na obciążenie cieplne systemów ciepłowniczych, Materiały VIII Krajowej Konferencji N-T, Poznań 1993.

[119] Nantka M.B., Gliński H.: Development of Multizone Air Flow Model for Indoor Air Quality Studies, Proceddings of International Scientific Conference "Indoor Air Quality Problems", Warszawa 1993.

[120] Nantka M.B.: Tests and Simulation of Air Flows in Multizone Dwelling Houses: The Alternative Method of Air Flow Prediction, Proceedings of 14th Annual Conference "Energy Imact of Ventilation and Air Infiltration", Copenhagen 1993.

PROBLEMY IDENTYFIKACJI PRZEPŁYWÓW I WYMIANY POWIETRZA W BUDYNKACH WIELOSTREFOWYCH Z WENTYLACJĄ NATURALNĄ

Streszczenie

W monografii przedstawiono problematykę badań dotyczących jednego z istotnych elementów decydujących o stratach ciepła i jakości powietrza w budynkach, jakim jest proces infiltracji i naturalnej wymiany powietrza. Omówiono czynniki i parametry kształtujące te procesy i przedstawiono dane charakteryzujące drogi przepływu powietrza przez budynek. Dokonano przeglądu metod badawczych, ilustrując go wynikami pomiarów i obliczeń. Zwrócono uwagę na małą przydatność tych metod do celów kompleksowej oceny przepływów i wymiany powietrza z uwagi na dużą ilość przestrzeni wewnętrznych. Opracowano nową metodę opartą na komputerowej symulacji przepływów powietrza. Przedstawiono założenia tej metody i sposób, w jaki można ją wykorzystać do ocen praktycznych. Głównym elementem, proponowanej metody jest traktowanie budynku od wewnątrz jako zbioru określonej ilości przestrzeni wewnętrznych związanych z jego strukturą oraz specyfiką procesu. Dotyczy to szczególnie kanałów wentylacji naturalnej i szybów pionowych, takich jak klatka schodowa. Charakterystyczna dla opracowanej metody jest podatność na modyfikacje danych opisujących budynek i proces oraz sposobu dokonywania symulacji. Zaprezentowano przykładowe testy i wyniki badań. Pozwalają one określić oddziaływanie wielkości opisujących przepływy powietrza w wydzielonych przestrzeniach oraz całym budynku.

PROBLEMS OF IDENTIFICATION OF AIR FLOWS AND CHANGE IN MULTIZONE BUILDINGS WITH NATURAL VENTILATION

Summary

The monograph presents problems of the research related to one of essential factor of heat losses and air quality of buildings i.e. to air infiltration and natural ventilation processes. Those factors and their parameters are discussed and the results of tests of their effect on the air paths in building are presented. Research methods applied within this area are reviewed, illustrated with measurement and calculation results. It is pointed out that the methods are of little practical applicability for complex evaluation of air flows and air change in buildings comprising great number of internal zones. In order to perform such the evaluation a new method is suggested, based on computer simulation of the air flow. The monograph presents assumptions for the method and the way in which it can be applied for practical purposes. The basis for the method is considering the indoors of the building as a set of a certain known number of internal zones related both to the building structure and to the specific features of the tested processes, especially for ducts of natural ventilation systems and vertical shafs such as a staircase. It is also characteristic of the method that it can be easily modified in respect of the data describing the structural elements of building and the process and the way in which the results are handled. Some examples of the tests and their results are also presented, they make it possible to determine the effect of parameters which define the flows in separated zones on the air change both within these zones and in the whole building.

ПРОБЛЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕЧЕНИЯ И ОБМЕНА ВОЗДУХА В МНОГОЗОННЫХ ЗДАНИЯХ С СИСТЕМАМИ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

Резюме

В моногрвфии представлено проблемы идентификации и исследования относящиеся к одному из существенных элементов потери тепла в зданиях - воздухопроницаемность и естественный воздухообмен. Обсуждено факторы и параметры влияющие на эти процессы и представлено практические данные для характеризования дороги течения воздуха через здание. Представлено просмотр разных метод исследования воздухообмена и полученные результаты измерений в существующих зданиях, тоже - результаты расчётов. Так, как эти методы (измеренные и расчётные) применямые до сих пор характеризовались неболшой практической пригодностью для комплексной оценки течений и обмена воздуха, был разработан новый метод математического анализирования этих течений. Представлено принципы этого метода и способ его практического применения. Главным элементом этого метода является способ разделения внутренного пространотва зданий. Это относиться особенно к каналом естественной вентиляци и вертикалным шахтом, таким как - лестничное клетки. Характеристичные для этого метода является его податливость на модификацие всех данных и способ математической реализаци расчётов воздухообмена. Представлено примерное результаты исследований. Эти результаты разрешають определитб влияние параметров на воздухообмен в помещениях и зданиях.