ZESZYTY
NAUKOWE
POLITECHNIKI
ŚLĄSKIEJ

Andrzej BARANOWSKI

MODELOWANIE WENTYLACJI NATURALNEJ BUDYNKÓW WIELORODZINNYCH

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

GLIWICE 2007

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
ZESZYTY NAUKOWE
Nr 1760

Andrzej BARANOWSKI

MODELOWANIE WENTYLACJI NATURALNEJ BUDYNKÓW WIELORODZINNYCH

GLIWICE 2007

Opiniodawcy
Prof. dr hab. inż. Krystyna JEŻOWIECKA-KABSCH
Prof. dr hab. inż. Bogdan MIZIELIŃSKI

Kolegium redakcyjne
REDAKTOR NACZELNY – Prof. dr hab. inż. Andrzej BUCHACZ
REDAKTOR DZIAŁU – Prof. dr hab. inż. Jolanta BOHDZIEWICZ
SEKRETARZ REDAKCJI – Mgr Elżbieta LEŚKO

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0867-6038

© Copyright by
Wydawnictwo Politechniki Śląskiej
Gliwice 2007

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ 7

1. WSTĘP 9

2. MECHANIZM WENTYLACJI NATURALNEJ 12

2.1. Zadania i sposoby wentylacji budynków mieszkalnych 12
2.2. Siły napędowe wentylacji naturalnej 14
2.3. Równania przepływu powietrza 21

3. PROGRAMY OBLICZENIOWE I SYMULACYJNE PRZEPŁYWÓW POWIETRZA WENTYLACYJNEGO 24

3.1. Modele empiryczne 24
3.1.1. Pomiary bezpośrednie 24
3.1.2. Testy ciśnieniowe 25
3.2. Modele teoretyczne 26
3.2.1. Modele jednostrefowe 26
3.2.2. Modele wielostrefowe 29
3.3. Programy zintegrowane 32
3.4. Weryfikacja eksperymentalna i porównawcza programów symulacyjnych 35
3.5. Współczesne badania zagadnień wentylacji naturalnej 37

4. MODEL MATEMATYCZNY I ALGORYTM OBLICZENIOWY PROGRAMU SYMULACYJNEGO 39

4.1. Ogólna charakterystyka programu 39
4.2. Założenia programu i model zastępczy obiektów symulacji 40
4.3. Model przepływów powietrza wentylacyjnego 43
4.4. Metoda rozwiązania 45
4.5. Przebieg obliczeń 47

5. OBLICZENIA SYMULACYJNE 53

5.1. Jakościowa analiza wpływu czynników warunkujących infiltrację powietrza 53
5.2. Wpływ różnicy temperatury powietrza 57
5.3. Wpływ wiatru 60
5.4. Jednoczesne oddziaływanie wiatru i wyporu cieplnego w sezonie grzewczym 68

6. WERYFIKACJA OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH 71

6.1. Pomiarowa weryfikacja obliczeń symulacyjnych 72
6.2. Obiekt badań 73
6.3. Zakres i metodyka pomiarów 74
6.3.1. Pomiar szczelności mieszkania 75
6.3.2. Pomiar wymiany powietrza 76
6.3.3. Rejestracja danych meteorologicznych 78
6.3.4. Pomiar zużycia energii 78
6.4. Obliczenia symulacyjne i porównanie z wynikami eksperymentu 79
6.4.1. Obliczenia infiltracji powietrza 79
6.4.2. Obliczenia obciążenia cieplnego badanego mieszkania 81

7. PRZYBLIŻONA METODA OBLICZANIA INFILTRACJI POWIETRZA 85
7.1. Ogólne założenia metody 87
7.2. Algorytm przybliżonych obliczeń infiltracji powietrza 88
7.3. Wzór obliczeniowy strumienia objętości powietrza infiltrującego 89
7.4. Wzór empiryczny do obliczania średniej różnicy ciśnienia na kondygnacji 91
8. OCENA DOKŁADNOŚCI PRZYBLIŻONYCH OBLICZEŃ INFILTRACJI I ZAKRES ZASTOSOWAŃ METODY 96
8.1. Porównanie wyników obliczeń przybliżonych i pomiarów infiltracji 96
8.2. Porównanie wyników obliczeń przybliżonych i symulacyjnych infiltracji 97
8.3. Zastosowanie przybliżonych obliczeń infiltracji powietrza do wyznaczania zapotrzebowania na ciepło w mieszkaniu 102
9. PODSUMOWANIE 106
LITERATURA 109
Streszczenie 116

CONTENTS

LIST OF MAIN ABBREVIATIONS 7

1. INTRODUCTION 9

2. MECHANISM OF NATURAL VENTILATION 12

2.1. Tasks and ways of ventilation of dwelling houses 12
2.2. Driving forces of natural ventilation 14
2.3. Air flow equations 21

3. PROGRAMS FOR CALCULATION AND SIMULATION OF VENTILATING AIR FLOWS 24

3.1. Empirical models 24
3.1.1. Direct measurements 24
3.1.2. Pressurization tests 25
3.2. Theoretical models 26
3.2.1. Single-zone models 26
3.2.2. Multi-zone models 29
3.3. Integrated programs 32
3.4. Empirical and comparative verification of simulation programs 35
3.5. Contemporary research on natural ventilation problems 37

4. MATHEMATICAL MODEL AND CALCULATION ALGORITHM OF THE SIMULATION PROGRAM 39

4.1. General description of the program 39
4.2. Assumptions of the program and an equivalent model of simulation objects 40
4.3. Ventilating air flows model 43
4.4. Method of solution 45
4.5. Calculation procedure 47

5. SIMULATION CALCULATIONS 53

5.1. Qualitative analysis of the influence of factors determining the air infiltration 53
5.2. Influence of air temperature difference 57
5.3. Wind effect 60
5.4. Simultaneous influence of wind and thermal buoyancy during the heating season 68

6. VERIFICATION OF SIMULATION CALCULATIONS 71

6.1. Measuring verification of simulation calculations 72
6.2. The object under testing 73
6.3. Range and method of measurements 74
6.3.1. Flat airtightness measurement 75
6.3.2. Air exchange measurement 76
6.3.3. Meteorological data recording 78
6.3.4. Measurement of energy consumption 78
6.4. Simulation calculations and comparison of their results with experiment ones 79
6.4.1. Air infiltration calculations 79
6.4.2. Calculations of the heat load of the examined flat 81

7. APPROXIMATE METHOD OF AIR INFILTRATION CALCULATION.....85
7.1. General assumption of the method.....87
7.2. Algorithm of the approximate calculations of air infiltration.....88
7.3. Calculation formula for the infiltrating air volume flow rate.....89
7.4. Empirical formula for the calculation of the mean pressure difference on a storey..91
8. ACCURACY ASSESSMENT OF THE APPROXIMATE INFILTRATION CALCULATION AND THE SCOPE OF THE APPLICATION OF THE METHOD.....96
8.1. Comparison of the results of approximate calculations and measurements of infiltration.....96
8.2. Comparison of the results of approximate calculations and simulation of infiltration.....97
8.3. Application of the approximate air infiltration calculations for the determination of heat demand in a flat.....102
9. CONCLUSIONS.....106
LITERATURE.....109
Abstract.....117

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A,B,C – stałe

a – współczynnik infiltracji

C_p – współczynnik ciśnienia wiatru

$\widetilde{C}_p$ – zastępczy współczynnik ciśnienia wiatru

F – funkcja celu

g – przyspieszenie ziemskie

h – wysokość

l – długość szczeliny

L – całkowita długość szczelin

N – liczba wymian powietrza

n – wykładnik

p – ciśnienie powietrza

p_T – ciśnienie wywołane różnicą temperatury powietrza

p_w – ciśnienie wywołane oddziaływaniem wiatru

R – współczynnik korelacji

s – odchylenie standardowe

t – temperatura powietrza

$\dot{V}$ – strumień objętości powietrza

w – prędkość wiatru

$\Delta\widetilde{p}_k$ – średnia różnica ciśnienia

ΔT – różnica temperatury powietrza

ε – dokładność obliczeń

ρ – gęstość powietrza

θ – kąt napływu wiatru

1. WSTĘP

Człowiek większą część swojego życia spędza w pomieszczeniach zamkniętych – w mieszkaniu, pracy, budynkach użyteczności publicznej. Wszędzie tam o jego samopoczuciu, zdrowiu, wydajności pracy w dużym stopniu decyduje klimat wewnętrzny. Jednym z ważniejszych jego elementów jest jakość powietrza wewnętrznego, na którą znaczący wpływ wywiera wentylacja pomieszczeń. Są dwa główne cele wentylacji pomieszczeń: dostarczenie odpowiedniej ilości świeżego powietrza do oddychania oraz usunięcie zanieczyszczeń powietrza. Technicznie realizacja wentylacji może być przeprowadzona w różny sposób – od najprostszego przewietrzania pomieszczenia, do w pełni zautomatyzowanej klimatyzacji. Niewątpliwie klimatyzowanie pomieszczeń jest rozwiązaniem najlepszym, z punktu widzenia osiąganych efektów, jednak jest to sposób bardzo energochłonny i dlatego kosztowny. W chłodnych i umiarkowanych strefach klimatycznych niewysokie budynki mieszkalne są powszechnie wyposażone w systemy wentylacji naturalnej (grawitacyjnej). Obserwuje się wzrost zainteresowania tym sposobem wentylacji pomieszczeń – pomimo znanych niedogodności – proponowane są nowe rozwiązania projektowe usprawniające działanie wentylacji naturalnej, np. przez rekuperacyjny odzysk ciepła, a także połączenie oświetlenia z wentylacją (Oliveira i in. 2001) i kominy słoneczne (Afonso i Oliveira, 2000), wzmacniające efekt wyporu cieplnego. Nie bez znaczenia jest również fakt, że wentylacja naturalna zaliczana jest do technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii (Sherman i Levin, 1996).

Wentylacja naturalna polega na takiej organizacji ruchu powietrza, aby świeże powietrze napływało do wentylowanego pomieszczenia na skutek infiltracji przez nieszczelności okien (ewent. nawiewniki), a powietrze zanieczyszczone było usuwane przez przewody wentylacyjne. Powietrze dostające się do wnętrza budynku musi zostać podgrzane (przy założeniu, że rozpatrywany jest okres sezonu grzewczego), co istotnie wpływa na bilans cieplny budynku. Z uwagi na coraz lepsze własności izolacyjne materiałów budowlanych, straty ciepła powstające na skutek jego przenikania przez powłokę budynku są coraz mniejsze, a nakłady cieplne niezbędne do podgrzania powietrza infiltrującego stanowią dominującą pozycję w bilansie energetycznym budynku. Możliwość łatwego obliczenia lub przynajmniej oszacowania infiltracji powietrza oraz wynikających stąd obciążeń cieplnych jest ważna zarówno z punktu widzenia jakości powietrza wewnętrznego, jak i oceny zapotrzebowania na ciepło, na różnych etapach istnienia budynku, poczynając od wstępnych oszacowań projektowych aż po audyt energetyczny. Potrzeby takie mogą dotyczyć zarówno

całego budynku wielorodzinnego, jak i poszczególnych mieszkań. Uzyskanie wiarygodnych danych wymaga przeprowadzenia odpowiednich pomiarów albo wykonania obliczeń symulacyjnych – oba sposoby w częstych zastosowaniach nie są zbyt dogodne, wymagają specjalistycznej wiedzy i wysokich kwalifikacji oraz posiadania odpowiednich narzędzi: numerycznych programów symulacyjnych lub aparatury pomiarowej. Brak możliwie prostej, a jednocześnie odpowiednio dokładnej metody obliczeniowej powoduje, że zarówno w praktyce projektowej, jak i w czasie eksploatacji budynków ocena wentylacji jest dokonywana sporadycznie i nieprecyzyjnie. Równolegle z doskonaleniem metod symulacyjnych, umożliwiających (z coraz większą precyzją) modelowanie skomplikowanych, wielostrefowych przestrzeni wentylowanych pojawiły się badania, mające na celu opracowanie prostych, często wskaźnikowych metod przewidywania przepływów powietrza wentylacyjnego (Concannon 2002). Proponowane procedury dotyczą jednak obiektów, które mogą być traktowane jak jednostrefowe, a więc nieprzydatne w przypadku budynków wielorodzinnych.

Celem podjętej pracy było opracowanie algorytmu obliczeń, umożliwiających oszacowanie, z dobrą dokładnością, infiltracji powietrza (lub odpowiednich nakładów ciepła) do mieszkań w wielorodzinnych budynkach, wyposażonych w system wentylacji naturalnej. Obliczenia takie powinny być wiarygodne w ujęciu średnim, np. w ciągu tygodnia, miesiąca czy nawet całego sezonu grzewczego, dla średnich (w odpowiednim przedziale czasu) wartości parametrów klimatu zewnętrznego. Przyjęto założenie, że metoda winna opierać się na podstawach fizycznych zjawiska infiltracji i uwzględniać możliwie wszystkie czynniki warunkujące przebieg wentylacji naturalnej. Do opracowania metody wykorzystany został własny program numeryczny, umożliwiający symulację przepływów powietrza wentylacyjnego w obiektach wielostrefowych. Przeprowadzona została duża liczba obliczeń numerycznych dla zmiennych w szerokim zakresie danych wejściowych oraz różnych struktur wewnętrznych w budynkach mieszkalnych, wyposażonych w system wentylacji grawitacyjnej. Uzyskane wyniki pozwoliły na szczegółową analizę zjawiska przepływów powietrza w zróżnicowanych warunkach klimatycznych i strukturach przestrzennych wentylowanych obiektów, a następnie ustalenie związków funkcyjnych tworzących algorytm przybliżonych obliczeń infiltracji powietrza.

W pracy przedstawiono mechanizm wentylacji naturalnej (rozdz. 2), a następnie dokonano przeglądu metod i narzędzi obliczeniowych i symulacyjnych dla wyznaczania przepływów powietrza wentylacyjnego oraz programów numerycznych umożliwiających przeprowadzanie zintegrowanej symulacji przepływów ciepła i substancji w obiektach

wielostrefowych. Przedstawiono również, na podstawie studiów literaturowych, współczesne prace i trendy badawcze w zakresie problematyki wentylacji budynków. W kolejnej części pracy (rozdz. 4) opisano autorski program symulacyjny *Multiven*, przedstawiając przyjęty model matematyczny, reprezentację numeryczną oraz sposób rozwiązania oparty na metodzie z dziedziny teorii optymalizacji. Wykonane, za pomocą programu *Multiven*, symulacje numeryczne przepływów powietrza wentylacyjnego dostarczyły uporządkowanych wyników obliczeń w szerokim zakresie zmienności parametrów klimatu zewnętrznego, a także dla różnych typów budynków wielorodzinnych, o zróżnicowanej konfiguracji wewnętrznej i lokalizacji. Rezultaty te wykorzystano do znalezienia zależności korelacyjnych pomiędzy czynnikami warunkującymi infiltrację powietrza i odpowiednimi strumieniami powietrza wentylacyjnego (rozdz. 5). W rozdz. 6 przedstawiono przebieg i wyniki pomiarów wykonanych w mieszkaniu budynku wielorodzinnego. Eksperyment obejmował pomiary szczelności mieszkania, wymiany powietrza oraz zużycia energii podczas blisko miesięcznej eksploatacji budynku, w czasie sezonu grzewczego. Wyniki pomiarów posłużyły do weryfikacji programów symulacyjnych oraz ich kalibracji.

Kluczowy dla pracy jest rozdz. 7, który przedstawia założenia proponowanej metody przybliżonego obliczania infiltracji powietrza w budynkach wielorodzinnych, algorytm obliczeń, współczynniki wzorów empirycznych oraz statystyczną ocenę dokładności wyznaczenia wartości tych współczynników. W kolejnym rozdziale przedstawiono porównania obliczeń przybliżonych, symulacji i pomiarów infiltracji powietrza oraz, na podstawie uzyskanych wyników, wykonano analizę dokładności takich obliczeń. Podobnych porównań wyników obliczeń i symulacji dokonano w zakresie niezbędnych nakładów cieplnych, związanych z infiltracją powietrza do mieszkań w okresie zimowym. W końcowej części pracy wskazano na możliwy i celowy zakres zastosowania opracowanej metody, pozwalającej z dobrą dokładnością oceniać infiltrację powietrza w mieszkaniach budynku wielorodzinnego.

2. MECHANIZM WENTYLACJI NATURALNEJ

2.1. Zadania i sposoby wentylacji budynków mieszkalnych

Wentylacja budynków powinna realizować dwa zasadnicze cele:

- dostarczać odpowiednią ilość świeżego powietrza (zwykle zewnętrznego), niezbędną do oddychania,
- usuwać zanieczyszczenia powietrza, powstające na skutek procesów metabolicznych ludzi (dwutlenek węgla i odory) oraz inne zanieczyszczenia (nadmiar wilgoci, nieprzyjemne zapachy, a także mikroorganizmy i zanieczyszczenia organiczne), zapewniając właściwą (w sensie przyjętych unormowań) jakość powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach wentylowanych.

W praktyce wentylacja może być technicznie przeprowadzona w różny sposób – od najprostszej wentylacji, zachodzącej wyłącznie na skutek działania sił naturalnych, aż do w pełni kontrolowanej wentylacji nawiewno-wywiewnej i klimatyzacji. Skuteczność wentylacji w znacznym stopniu zależy od sposobu organizacji ruchu powietrza w przestrzeniach wentylowanych. W mieszkaniach realizowana jest zwykle wentylacja mieszająca – świeże powietrze wpływające do mieszkania powoduje zmniejszenie stężenia zanieczyszczeń w powietrzu. Charakterystyczny dla wentylacji mieszkań jest również pożądany kierunek przepływu: świeże powietrze z zewnątrz powinno wpływać (np. drogą infiltracji) do pomieszczeń "czystych" w mieszkaniu, a więc sypialni, pokoju dziennego itd., przepływać przez resztę mieszkania aż do pomieszczeń zwykle najbardziej obciążonych zanieczyszczeniami, czyli kuchni i łazienki skąd powinno być usuwane na zewnątrz. Z uwagi na przepływy powietrza wentylacyjnego przez całe mieszkanie, taki rodzaj wentylacji nazywany bywa *międzystrefowym*. W pomieszczeniach biurowych oraz użyteczności publicznej preferowana jest wentylacja wyporowa, dzięki której powietrze zużyte, zanieczyszczone usuwane jest na skutek napływu świeżego powietrza. Skrajnie źle zaprojektowany system wentylacji daje w efekcie tzw. krótkie spięcie – świeże powietrze napływające do pomieszczenia wentylowanego jest praktycznie od razu usuwane na zewnątrz, nie dochodzi więc do wymiany powietrza albo jest ona znikomo mała.

Z uwagi na udział wentylacji w tworzeniu odpowiedniego mikroklimatu mieszkań, w szczególności odpowiedniej jakości powietrza, konieczne jest uzyskiwanie przynajmniej określonej, minimalnej wymiany powietrza. Regulacje w tym zakresie są bardzo różne – w większości krajów obowiązują normy lub wytyczne, jednak wzajemne porównania są utrudnione ze względu na używanie różnych miar – poza strumieniem objętości powietrza

wentylacyjnego (wyrażanego w m^3/h lub dm^3/s), podaje się wymianę powietrza jako jednostkowy strumień objętości, przypadający na 1 osobę lub też na 1 m^2 powierzchni podłogi pomieszczenia wentylowanego. Bardzo wygodną i często stosowaną miarą jest liczba wymian powietrza w badanej przestrzeni w ciągu godziny. Jeżeli znana jest kubatura wentylowanego pomieszczenia, to liczbę wymian łatwo można przeliczyć na jednostki strumienia przepływu powietrza. Przegląd zestawień regulacji i unormowań co do minimalnych, niezbędnych przepływów powietrza wentylacyjnego (Limb 2001) wskazuje, że wymiana powietrza powinna wynosić co najmniej 0,3 w ciągu godziny, jednak nie mniej, niż 5 – 8 dm^3/s na osobę. Przepisy są zwykle bardziej szczegółowe jeśli chodzi o niezbędne wartości strumieni powietrza usuwanego z takich pomieszczeń, jak kuchnie i łazienki – na ogół wymaga się 50 – 70 m^3/h. Podobne wymagania precyzowała Polska Norma (PN-83/B-03430), ustalając wielkości strumieni objętości powietrza usuwanego z kuchni, łazienek i ustępów na takim poziomie, że dla przeciętnego mieszkania liczba wymian powietrza powinna wynosić ok. 1 na godzinę. Precyzyjne ustalenie niezbędnego (czy też minimalnego) poziomu wentylacji jest raczej niemożliwe, z uwagi na różnorodność i zmienność kryteriów "dobrej wentylacji" i poprawnej jakości powietrza wewnętrznego. Podane powyżej liczby należy traktować jak minimalne wartości orientacyjne, być może właściwe z higienicznego czy też zdrowotnego punktu widzenia, a niekoniecznie i nie zawsze odpowiadające wszystkim potencjalnym użytkownikom.

Wymóg usuwania zanieczyszczeń podczas procesu wentylacji jest związany z problematyką jakości powietrza wewnętrznego lub szerzej – środowiska wewnętrznego. Zmienność zarówno źródeł, jak i poziomu stężeń zanieczyszczeń powietrza w budynkach mieszkalnych powoduje, że trudno ustalić uniwersalne liczbowe wymagania, co do intensywności wentylacji. Dominujące w mieszkaniach zanieczyszczenia są wynikiem eksploatacji tych mieszkań: są to produkty metabolizmu mieszkańców oraz zanieczyszczenia powstające podczas typowych czynności domowych (gotowanie, pranie, sprzątanie itp.). Trudniejsze do identyfikacji mogą okazać się zanieczyszczenia emitowane przez materiały budowlane lub elementy wyposażenia mieszkań. Zanieczyszczenia te są wykrywane czasem jedynie metodami analiz chemicznych. Podobne problemy stwarzają zanieczyszczenia organiczne – bakterie, grzyby pleśniowe i ich zarodniki, alergizujące pyłki roślin itp. Ocenia się, że średnio w mieszkaniu można zidentyfikować ok. 100 różnych substancji chemicznych. W większości krajów istnieją normy lub wytyczne ustalające największe, dopuszczalne stężenia zanieczyszczeń najczęściej występujących w mieszkaniach. Zalecenia takie opracowała również Światowa Organizacja Zdrowia (Limb 2001). Podawane w wytycznych

i normach wielkości strumieni powietrza wentylacyjnego uwzględniają konieczność usuwania typowych zanieczyszczeń powietrza, powstających podczas normalnej eksploatacji mieszkań. Obiektywne ustalenie jakości powietrza wewnętrznego jest bardzo trudne, z uwagi na indywidualny poziom wrażliwości ludzi. Pomiar wielkości stężenia poszczególnych substancji może wskazywać na ewidentne zagrożenia zdrowia i życia mieszkańców, w przypadkach przekroczenia stężeń uznanych za niebezpieczne z medycznego punktu widzenia. Pozostaje jednak problem takiej jakości powietrza, która jest odczuwalna jako niewłaściwa lub też jest niemierzalna. Coraz większego znaczenia nabierają badania w zakresie jakości powietrza i środowiska wewnętrznego, prowadzone na podstawie statystycznych analiz badań bezpośrednich odczuć ludzi (Fanger i in. 2003), pozwalające w jakimś stopniu na obiektywizację oceny jakości środowiska wewnętrznego.

Z problematyką wentylacji ściśle związane są też aspekty energetyczne eksploatacji mieszkania i całego budynku. Nakłady ciepła potrzebne do ogrzania infiltrującego z zewnątrz powietrza wentylacyjnego w bilansie cieplnym budynku stanowią istotną pozycję. Z tego punktu widzenia ustalenie właściwego poziomu wentylacji powinno polegać na minimalizacji kosztów wynikających z nakładów energetycznych, przy spełnieniu warunków wymiany powietrza na poziomie wynikającym zarówno z potrzeb życiowych użytkowników, jak i co najmniej normatywnej jakości powietrza wewnętrznego.

2.2. Siły napędowe wentylacji naturalnej

Wentylacja naturalna polega na wprowadzaniu powietrza z zewnątrz do budynku na skutek naturalnie powstającej różnicy ciśnienia między otoczeniem a przestrzenią wentylowaną. Napływ powietrza może odbywać się w sposób zamierzony i częściowo kontrolowany, przez np. nawiewniki, najczęściej jednak zachodzi drogą infiltracji zarówno przez intencjonalne nieszczelności stolarki budowlanej, jak i niezamierzone nieszczelności powłoki budynku. Przewidywanie i teoretyczne modelowanie zjawiska infiltracji oparte jest na modelach przepływu płynu przez otwór. Ruch powietrza warunkowany jest zarówno geometrią otworu, jak i różnicą ciśnienia wywołującą przepływ.

W wentylacji naturalnej dla wywołania różnicy ciśnienia decydujące są dwa czynniki: różnica temperatury powietrza po obu stronach przegrody z otworem oraz ruch powietrza po zewnętrznej stronie przegrody (wiatr).

Powietrze w warunkach normalnych, z dobrym przybliżeniem, może być traktowane jak gaz doskonały, a więc spełnione jest równanie:

$$\rho = \frac{p}{RT} \tag{2.1}$$

Dla płynu pozostającego w spoczynku obowiązuje równanie równowagi w postaci:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \tag{2.2}$$

Całkowanie równania (2.2), przy wykorzystaniu warunku (2.1) i założeniu stałej wartości temperatury prowadzi do zależności:

$$p = p_0 \, exp(-\frac{gz}{RT}), \tag{2.3}$$

gdzie indeks 0 oznacza wartość dla wybranego, dogodnego poziomu odniesienia (zwykle poziomu ziemi).

Rozwijając powyższe wyrażenie w szereg potęgowy można się ograniczyć z dobrym przybliżeniem do dwóch pierwszych wyrazów, ponieważ wielkość *g/RT* dla powietrza jest mała (rzędu 10^{-4} 1/m), stąd:

$$p = p_0 - \rho_0 g z \, . \tag{2.4}$$

Taki sam wynik uzyskuje się po scałkowaniu równania (2.2), przy założeniu stałej gęstości powietrza. Wynika stąd, że zmiana ciśnienia z wysokością nie wpływa na zmienność gęstości powietrza. Przyjęcie stałej gęstości powietrza jest wystarczająco dobrym przybliżeniem, przy rozpatrywaniu stref o standardowych wymiarach. Przy rozpatrywaniu pomieszczeń o dużej wysokości (np. atria) gęstość powietrza jest zmienna z wysokością i wpływa na rozkład ciśnienia wewnątrz danej strefy.

Różna temperatura powietrza po obu stronach przegrody powoduje, że odpowiednie słupy powietrza mają różną gęstość, a więc również pionowe gradienty ciśnienia. Powstała w ten sposób różnica ciśnienia powoduje efekt wyporu cieplnego. Zapisując, zgodnie ze wzorem (2.4), równania dla ciśnienia powietrza po stronie zewnętrznej i wewnątrz pomieszczenia (odpowiednio z indeksami *e* oraz *i*) można obliczyć różnicę ciśnienia wywołaną różnicą temperatury powietrza (a więc i gęstości) po obu stronach przegrody:

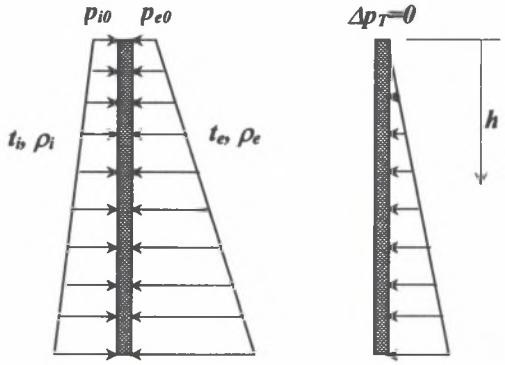
$$\Delta p_T = p_{e0} - p_{i0} - g(z - z_n)(\rho_e - \rho_i) \tag{2.5}$$

Równanie (2.5), wyrażające różnicę ciśnienia powietrza w stanie równowagi pomiędzy otoczeniem i wnętrzem, dla pewnej współrzędnej pionowej $z = z_n$ przyjmuje wartość $\Delta p_T = 0$. Wartość tej współrzędnej wyznacza płaszczyznę wyrównania ciśnienia (inaczej – płaszczyznę neutralną), powyżej której następuje wypływ z pomieszczenia, a poniżej – napływ powietrza z zewnątrz. Wyrównanie ciśnienia pomiędzy wnętrzem

i otoczeniem, występujące na pewnej wysokości przegrody jest konsekwencją spełnienia równania zachowania masy. Położenie płaszczyzny neutralnej wynika z geometrii rozmieszczenia otworów wzdłuż wysokości interesującej przegrody oraz różnic temperatur powietrza w poszczególnych strefach obiektu. Dla interesującego tutaj przypadku kanałowej wentylacji naturalnej położenie płaszczyzny wyrównania ciśnienia jest na poziomie wylotu przewodów wentylacyjnych (zwykle ponad poziomem dachu). Różnica ciśnienia wywołana wyporem cieplnym wyraża się wzorem:

$$\Delta p_T = (\rho_e - \rho_i) g h , \tag{2.6}$$

gdzie h – wysokość umieszczenia otworu, mierzona od płaszczyzny wyrównania ciśnienia.



Rys. 2.1. Ilustracja mechanizmu powstawania wyporu cieplnego
Fig. 2.1. Illustration of the stack effect mechanism

Powyższe rozważania dotyczyły powietrza pozostającego w spoczynku. Jeżeli oprócz różnicy temperatury powietrza zewnętrznego i wewnętrznego występuje ruch powietrza na zewnątrz przegrody, w rozważanym przepływie przez otwór istotnym czynnikiem staje się oddziaływanie wiatru. Ciśnienie na zewnątrz przegrody zwiększa się o wartość ciśnienia wiatru p_w, którego rząd wielkości wynika z równania Bernoulli'ego.

Równanie (2.5) przyjmie postać:

$$\Delta p = p_{e0} - p_{i0} - g(z - z_n)(\rho_e - \rho_i) + p_w \tag{2.7}$$

Należy zauważyć, że siły wymuszające naturalne przepływy powietrza wentylacyjnego są niezależne – ani prędkość, ani kierunek wiatru nie wpływają na efekt wyporu cieplnego, spowodowanego różnicą temperatur powietrza.

Wyznaczenie wartości ciśnienia powodującego naturalny przepływ powietrza wentylacyjnego jest dość trudne, zwłaszcza w odniesieniu do oddziaływania wiatru.

W praktyce obliczeniowej modele przepływów powietrza wentylacyjnego opierają się na równaniach stanu ustalonego. Precyzyjne modelowanie przepływów powietrza wentylacyjnego związane jest z uwzględnieniem stanów nieustalonych, przy wyznaczaniu sił napędowych infiltracji. Dotyczy to zwłaszcza oddziaływania wiatru, którego pole prędkości ma charakter stochastyczny. W warunkach rzeczywistych fluktuacjom podlegają zarówno bezwzględne wartości ciśnienia powietrza po obu stronach przegrody, jak i ciśnienie wywołane oddziaływaniem wiatru. Ciśnienie zewnętrzne p_e wynika z warunków atmosferycznych i stąd, poza składową wolnozmienną, możliwe jest wystąpienie fluktuacji. Ciśnienie wewnętrzne jest warunkowane ilością masy powietrza zawartego w danej objętości wentylowanego pomieszczenia i może się zmieniać wraz z chwilową ilością masy powietrza, a więc w przypadku, kiedy rozważany jest ruch powietrza w pomieszczeniu. W pomieszczeniach wysokich istotne jest również uwzględnienie stratyfikacji temperatury powietrza.

Konieczność uwzględniania zmiennych w czasie wartości ciśnienia związane jest przede wszystkim z niektórymi przypadkami eksploatacji obiektów wentylowanych. Gwałtowne porywy wiatru przy otwartych drzwiach i oknach doprowadzają do przeciągów i często szkód materialnych. Badania stanów nieustalonych pól ciśnienia są bardzo istotne przy modelowaniu rozprzestrzeniania zanieczyszczeń, a także w obiektach o zagrożeniu pożarowym. Turbulentny charakter przepływu wiatru indukującego infiltrację powietrza do budynku istotnie wpływa na wartość współczynnika C_p, ważnego w obliczeniach oddziaływania wiatru (Handa 1979). W kompleksowych analizach losowego oddziaływania wiatru stosowane są zarówno metody analizy spektralnej, jak i czasowej zmienności turbulentnych pulsacji wiatru. Niezależnie od stosowanego aparatu matematycznego, wskazuje się na dwa główne efekty turbulentnego charakteru oddziaływania wiatru na infiltrację powietrza: fluktuacje przepływających przez szczelinę strumieni powietrza, wynikających ze ściśliwości powietrza i przenikanie turbulentnych wirów (dyfuzja turbulentna) (Haghighat i in. 2000). Budowane modele odwzorowują zwykle proste, jednostrefowe pomieszczenia, wyposażone w jeden lub dwa otwory. Trudności w tworzeniu modeli bardziej złożonych struktur związane są nie tyle z aparatem matematycznym, co z brakiem danych pomiarowych dla przepływów nieustalonych, niezbędnych dla uzyskania wiarygodnych zestawów warunków brzegowych w modelach uwzględniających turbulencję przepływów. Niemniej jednak możliwe są oceny pulsacyjnych przepływów powietrza; w pracy (Miguel i Silva 2000) przedstawiono model pozwalający na ocenę amplitudy i pulsacji ciśnienia w pomieszczeniu, w zależności od geometrii szczeliny, a także stopnia

uchylenia okna. Dokładne analizy, dotyczące niestacjonarności przepływów wynikających z fluktuacji ciśnienia indukowanego wiatrem badał Etheridge (2000 a, b). Przedstawione przez niego modele matematyczne odwzorowują pojedyncze przestrzenie, wyposażone w dwa otwory o różnych charakterystykach przepływowych, wynikających z ich geometrii i w zróżnicowany sposób rozmieszczonych na ścianach w pomieszczeniach. Uzyskane rozwiązania równań modelowych zarówno dla przepływów średnich, jak i chwilowych, poza aspektem poznawczym pozwalają, dzięki zapisom w postaci parametrów bezwymiarowych, na aplikacje praktyczne w procesie projektowania układów wentylacji naturalnej. Zauważyć należy, że zbudowane dotychczas i częściowo gotowe do zastosowań praktycznych modele stanów nieustalonych dotyczą tylko prostych przypadków, a możliwości szerszych zastosowań wymagają znacznie większego stopnia uogólnienia i rozszerzeń na przestrzenie o bardziej złożonej konfiguracji.

Modelowanie stanów nieustalonych ciśnienia wymuszającego infiltrację jest celowe wtedy, gdy istotne są wartości chwilowe strumienia przepływu powietrza. W praktyce, przy wyznaczaniu wymiany masy lub energii w pomieszczeniu bardziej interesujące są wartości średnie, przy czasie uśredniania rzędu 0,5 – 1 godziny. Z tego punktu widzenia korzystnym okazuje się fakt, że średnia prędkość wiatru w czasie ok. 1 godziny może być traktowana jak stała (a więc stacjonarna) (Etheridge i Sandberg 1996), a w konsekwencji również ciśnienie indukowane przez wiatr na ścianie budynku pozostaje stacjonarne, przy uśrednieniu w czasie tego samego rzędu.

Wyznaczenie ciśnienia statycznego na ścianie budynku powstającego na skutek oddziaływania wiatru obarczone jest dużym stopniem niepewności. Ruch powietrza w niskich warstwach atmosfery jest bardzo skomplikowany, na skutek różnego rodzaju przeszkód zarówno naturalnych (nierówności terenu, wzniesienia, drzewa), jak i związanych z lokalną zabudową. Przeszkody te powodują występowanie zawirowań, zmieniających zarówno prędkość, jak i kierunek wiatru. Badania ruchu powietrza wskazują, że składowa pozioma prędkości wiatru jest zmienna z wysokością: przy powierzchni gruntu jest praktycznie zerowa i zwiększa się w przybliżeniu wykładniczo aż do tzw. wysokości gradientowej (ok. 600 m dla terenów niezabudowanych), gdzie osiąga stałą wartość. Na tej wysokości dominującymi stają się siły Coriolisa, wywołane ruchem obrotowym Ziemi (Grosso 1992). Wyznaczenie średniej prędkości wiatru na wysokości, która jest interesująca z uwagi na lokalizację szczelin (okien), przez które może zachodzić infiltracja, jest bardzo trudne i może przy obliczeniach przepływów powietrza wentylacyjnego stanowić duże źródło błędów. Prędkość wiatru

podawana przez najbliższą stację meteorologiczną jest zwykle znacząco różna od wartości rzeczywistej dla interesującego obiektu.

Średnią prędkość wiatru dla interesującej wysokości h, przy danej zmierzonej prędkości w_r można obliczyć według jednej z zależności potęgowych (Walker 1992, Awbi 1992):

$$\frac{w}{w_r} = c \cdot h^k \tag{2.8a}$$

$$\frac{w}{w_r} = \frac{c(h/10)^k}{c_r(h_r/10)^{k_r}}, \tag{2.8b}$$

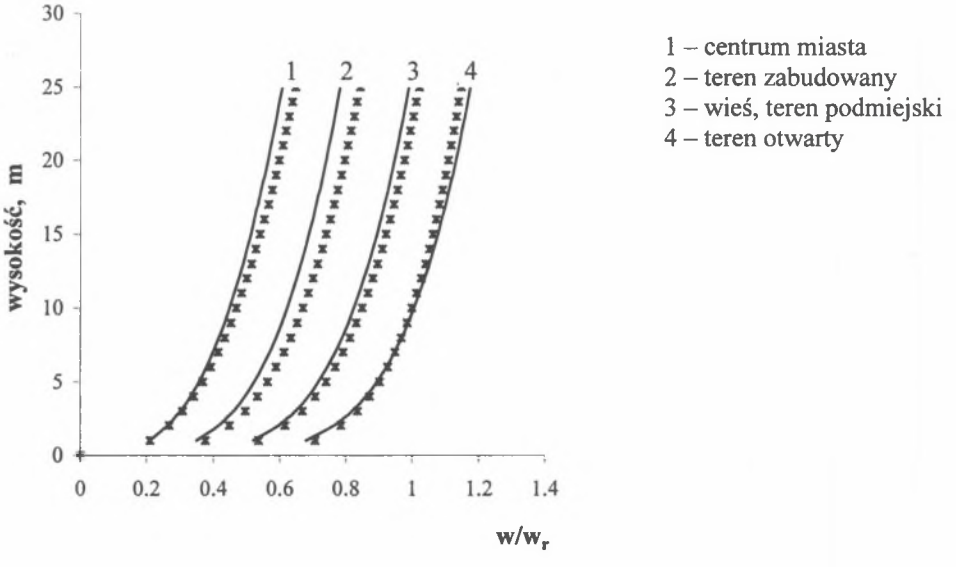
gdzie: h_r, h – wysokości odniesienia i bieżąca (zwykle $h_r = 10$ m),

w_r, w – odpowiednie prędkości wiatru,

c,k – stałe zależne od charakterystyki terenu,

r – indeks oznaczający miejsce pomiaru.

Odpowiednie współczynniki (różne dla poszczególnych wzorów) należy dobrać z dostępnej literatury (Liddament 1986, Awbi 1992, ASHRAE 1997). Przykładowe wielkości współczynników zamieszczono w tabeli 2.1.



Rys. 2.2. Rozkład prędkości wiatru dla różnej charakterystyki terenu wg wzoru 2.8a (linia ciągła) oraz 2.8b (linia punktowa)

Fig. 2.2. Wind speed distribution for different terrain classes acc. to Eq. 2.8a (solid line) and Eq. 2.8b (dotted line)

Analiza wykresu z rys. 2.2 wskazuje, że dokładność modelowania prędkości wiatru jest porównywalna, niezależnie od użytego wzoru. Istotne jest natomiast uwzględnienie zmienności prędkości wiatru w zależności od charakteru terenu, w szczególności w relacji do pomiaru w stacji meteorologicznej.

Tabela 2.1
Wartości współczynników we wzorze 2.8 (Liddament 1986)

rodzaj terenu	wzór 2.8a		wzór 2.8b	
	c	k	c	k
centrum miasta	0,68	0,17	1,0	0,15
teren zabudowany	0,52	0,20	0,85	0,20
wieś	0,35	0,25	0,67	0,25
teren otwarty	0,21	0,33	0,47	0,35

Rozkład ciśnienia indukowanego przez wiatr na poszczególnych ścianach budynku determinowany jest aerodynamiką opływanego budynku, konfiguracją terenu i sąsiadującej zabudowy, i lokalnym polem prędkości wiatru. Relacja pomiędzy ciśnieniem dynamicznym wiatru, o prędkości wyznaczonej dla interesującej wysokości ściany a odpowiednim ciśnieniem statycznym ma postać (Liddament 1988):

$$p_w = C_p \frac{\rho w^2}{2}, \tag{2.9}$$

C_p jest współczynnikiem ciśnienia wiatru (nazywanym również współczynnikiem konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru), jest on zdefiniowany następująco:

$$C_p = \frac{2(p - p_r)}{\rho w^2}, \tag{2.10}$$

gdzie p_r oznacza ciśnienie odniesienia (zwykle atmosferyczne).

Współczynnik C_p jest zależny od geometrii budynku, kierunku napływu wiatru, a także charakteru opływu przeszkody, wynikającego z sąsiadujących z badanym budynkiem miejscowych przeszkód i jest zmienny zarówno w pionie, jak i w poziomie. Dla celów praktycznych współczynnik ciśnienia wyznaczany jest empirycznie drogą pomiarów w tunelach aerodynamicznych. Wykonywanie takich badań dla obiektów rzeczywistych jest tak trudne technicznie, jak kosztowne. Testy w tunelach aerodynamicznych pozwalają, na podstawie zasad modelowania fizykalnego, odwzorować nie tylko badany obiekt, lecz również otoczenie, często w postaci skomplikowanej zabudowy sąsiadującej z danym budynkiem. Istnieje bogata baza wyników takich eksperymentów, częściowo zweryfikowana pomiarami wykonanymi w pełnej skali (Gandemer 1978, Allen 1984). Pomiary i eksperymenty w tunelach aerodynamicznych umożliwiły również opracowanie

stabelaryzowanych wartości współczynnika ciśnienia C_p, w zależności od charakteru terenu, kąta napływu wiatru, wysokości budynku i relacji pomiędzy długością a szerokością obiektu (dane te dotyczą budynków o kształtach prostopadłościanu) (Liddament 1986, Orme 1999). Dostępne w tej postaci wartości współczynników ciśnienia są wartościami przybliżonymi, uzyskanymi metodą interpolacji danych pomiarowych. Użyteczne są też mapy rozkładu współczynnika C_p na poszczególnych fasadach budynku, dla różnych kątów napływu wiatru (Gandemer 1978, ASHRAE 1997).

Modelowanie teoretyczne rozkładu ciśnienia wywołanego wiatrem na powierzchniach ścian jest utrudnione z uwagi na wielość czynników wpływających na ten proces. Obliczenia numeryczne z wykorzystaniem metod CFD dotyczą modelowania pól prędkości wiatru w otoczeniu budynku lub kompleksu budynków, przy czym dla właściwego sformułowania warunków brzegowych niezbędne są zwykle dane empiryczne (Hanson i in. 1982, Stathopoulos i Baskaran 1996).

Publikowane dane eksperymentalne umożliwiły budowę algorytmów i modeli obliczeniowych, opartych na różnych technikach regresji dla wyznaczania wartości współczynnika ciśnienia (Grosso 1992). Szczególnie dogodny w obliczeniach symulacyjnych infiltracji wzór obliczeniowy opracowany został metodami regresji nieliniowej, na podstawie ponad 5000 danych pomiarowych (Swami i Chandra 1988). Współczynnik C_p obliczany jest jako funkcja kąta napływu wiatru i względnych współrzędnych punktu na ścianie budynku. Współczynnik korelacji pomiędzy danymi pomiarowymi a wartościami uzyskanymi przy obliczeniach zależnością funkcyjną ma wartość 0,8, a więc zgodność jest dobra.

2.3. Równania przepływu powietrza

Przepływ powietrza pomiędzy otoczeniem a przestrzenią wentylowaną odbywa się przez szczeliny i otwory w powłoce budynku. Zasadniczą rolę odgrywają tu otwory i szczeliny przewidziane jako drogi przepływu powietrza, takie jak: okna, nawiewniki oraz intencjonalne szczeliny w stolarce budowlanej. Przy identyfikacji dróg przepływu powietrza należy pamiętać o nieszczelnościach w powłoce budynku, powstałych przy montażu poszczególnych elementów konstrukcji, a także szczelinach w miejscach przepustów instalacji wodociągowej, kanalizacyjnej czy elektrycznej. Pewnym stopniem przepuszczalności powietrza cechują się również materiały użyte do budowy ścian budynku, w zależności od stopnia ich porowatości.

Chwilowy ruch powietrza w szczelinie traktować można z dobrym przybliżeniem podobnie jak przepływ dwuwymiarowy. Równanie ruchu elementu płynu, wynikające

z równania Naviera-Stokesa, uzupełnione równaniem ciągłości daje pełny opis przepływu powietrza, jednakże rozwiązanie analityczne możliwe jest tylko w kilku specjalnych przypadkach. Z punktu widzenia potrzeb identyfikacji przepływu powietrza wentylacyjnego, istotne jest wyznaczenie strumienia objętości powietrza przepływającego przez szczelinę. W praktyce obliczeniowej interesująca jest charakterystyka przepływu otworu, a więc relacja między strumieniem przepływu a różnicą ciśnienia, wywołującą ruch powietrza. Otwory rzeczywiste cechuje zwykle nieregularność kształtów, wlot i wylot jest na ogół ostrokrawędziowy, a charakter przepływu w szczelinie jest trudny do zidentyfikowania. Dokładnie analizując zjawisko, należałoby uwzględniać stan nieustalony przepływu przez szczelinę ze wszystkimi tego konsekwencjami, a więc trudnościami w budowie modelu przepływu, identyfikacji warunków brzegowych i początkowych oraz samego rozwiązania. Badania takich modeli przepływu są ważne dla właściwej organizacji ruchu powietrza w pomieszczeniach; przegląd zarówno podstaw teoretycznych, jak i modeli i metod stosowanych w odniesieniu do takich przepływów znaleźć można w literaturze (Etheridge i Sandberg 1996).

W obliczeniach infiltracji powietrza rozważa się zwykle ustalony przepływ powietrza przez wąską szczelinę (głębokość szczeliny jest znacznie mniejsza od jej długości). Jeżeli przepływ jest laminarny, słuszne jest równanie Poiseuille'a (Awbi 1992):

$$\dot{V} = \frac{Lh^3}{12\mu D}\Delta p, \tag{2.11}$$

gdzie: L, h, D – odpowiednio: długość, wysokość i głębokość szczeliny,

μ – dynamiczny współczynnik lepkości powietrza,

Δp – różnica ciśnienia.

Strumień objętości $\dot{V}$ powietrza przepływającego przez relatywnie duży otwór opisuje zależność (wynikająca z równania Bernoulli'ego), w postaci:

$$\dot{V} = C_d A\sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \tag{2.12}$$

gdzie: C_d – współczynnik przepływu,

A – pole powierzchni przepływu,

Δp – różnica ciśnienia,

ρ – gęstość powietrza.

W praktyce dla obliczeń przepływu powietrza przez szczeliny okien lub drzwi powszechnie używane jest równanie potęgowe:

$$\dot{V} = C(\Delta p)^n, \tag{2.13}$$

gdzie: $\dot{V}$ – strumień objętości powietrza,

Δp – różnica ciśnienia,

C – współczynnik przepływu przez szczelinę,

n – wykładnik, zależny od charakteru przepływu.

Równanie (2.13) dominuje w zastosowaniach praktycznych, w wielu modelach obliczeniowych infiltracji, a także w normach ASHRAE, związanych z wentylacją budynków i pomiarach ich szczelności.

Historycznie konkurencyjne równanie, służące obliczeniom przepływu powietrza infiltrującego przez otwory w powłoce budynku, ma postać (Walker i in. 1998, Etheridge i Sandberg 1996):

$$\Delta p = A\dot{V} + B\dot{V}^2, \tag{2.14}$$

gdzie A,B – stałe.

Równanie to ma rozwiązanie analityczne w postaci:

$$\dot{V} = \frac{\sqrt{A^2 + 4B\Delta p} - A}{2B} \tag{2.15}$$

Przedmiotem dyskusji była kwestia poprawności modelowania przepływów powietrza przez szczeliny za pomocą równań (2.13) i (2.14). Szczegółowe porównania obu równań zarówno jeśli chodzi o dokładność modelowania, jak i interpretację fizykalną obu równań można znaleźć w literaturze (Etheridge i Sandberg 1996 i Etheridge 1998). Według tych publikacji różnice w wynikach obliczeń infiltracji za pomocą wskazanych równań mogą sięgać nawet 40%. Dotyczy to w szczególności przepływów powietrza przez przypadkowe nieszczelności w powłoce budynku, zachodzących przy bardzo małych różnicach ciśnienia. Powszechne stosowane równania potęgowego przepływu (2.13) znajduje uzasadnienie w jego interpretacji – może być rozumiane jako równanie aproksymujące empiryczną charakterystykę przepływu przez zdefiniowaną szczelinę elementów przegród budowlanych.

W dużej mierze dokładność obliczeń przepływu powietrza zarówno według wzoru (2.13), jak i (2.14) zależy od poprawnego wyznaczenia wartości różnicy ciśnienia warunkującej przepływ, a także od właściwej identyfikacji dróg przepływu powietrza i ustalenia charakterystyk przepływu.

3. PROGRAMY OBLICZENIOWE I SYMULACYJNE PRZEPŁYWÓW POWIETRZA WENTYLACYJNEGO

Metody obliczeniowe stosowane w wyznaczaniu infiltracji powietrza podzielić można na dwie grupy. Do pierwszej należą techniki oparte na pomiarach, a odpowiadające im modele nazywane są modelami empirycznymi. Drugą grupę tworzą modele opierające się na metodach teoretycznych, bazujących na równaniach zjawisk fizycznych związanych z przepływami powietrza wentylacyjnego. Zalicza się do niej obliczenia uproszczone, pozwalające tylko na przybliżone oszacowanie infiltracji powietrza, a także bardziej skomplikowane, zarówno co do dokładności odwzorowania dróg przepływu powietrza wentylacyjnego, jak i sił napędowych infiltracji. W grupie modeli teoretycznych wyróżnić można modele dla pojedynczych stref obliczeniowych i modele wielostrefowe (sieciowe).

Taki podział jest częściowo umowny, ponieważ modele teoretyczne w pewnym stopniu również oparte są na danych eksperymentalnych – np. wzór umożliwiający obliczenie strumienia objętości powietrza infiltrującego przez szczeliny stolarki budowlanej jest wzorem empirycznym, podobnie współczynniki oddziaływania wiatru używane w tych modelach są efektem pomiarów.

3.1. Modele empiryczne

3.1.1. Pomiary bezpośrednie

Jednorazowe wyznaczenie wymiany powietrza w badanej strefie, wykonane np. za pomocą metody gazów znacznikowych, jest wynikiem incydentalnym, wiarygodnym dla danej strefy pomiarowej (mieszkania, budynku), przy warunkach klimatycznych warunkujących infiltrację w czasie pomiarów. Uogólnianie takich wyników jest nieuprawnione z wyjątkiem sytuacji, gdy warunki pomiaru są typowe dla średnich wartości danych meteorologicznych w miejscu lokalizacji badanego obiektu, w pewnym przedziale czasu (np. sezon zimowy), a celem pomiaru jest oszacowanie średniej wielkości infiltracji w tym okresie. Dokładność wyników pomiaru w dużym stopniu zależy od prawidłowego przeprowadzenia eksperymentu (właściwe dawkowanie gazu, dokładne wymieszanie itd.) (Charlesworth 1988).

Wyniki pomiarów infiltracji są wykorzystywane w modelach empirycznych uwzględniających wpływ czynników klimatycznych. Wielokrotne pomiary wymiany powietrza w danym obiekcie, przy zmiennych (rejestrowanych) warunkach meteorologicznych, które odbywają się w dłuższym przedziale czasu mogą być przedstawione za pomocą metod regresji (liniowej lub nieliniowej) w postaci zależności liczby wymian

powietrza N od prędkości wiatru w i różnicy temperatury powietrza ΔT, według relacji (Liddament i Allen 1983):

$$N = A + B\Delta T + Cw^2, \tag{3.1}$$

gdzie A,B,C – współczynniki regresji.

3.1.2. Testy ciśnieniowe

Wykonanie pomiaru szczelności badanej strefy za pomocą testu ciśnieniowego nie daje bezpośrednio informacji o liczbie wymian powietrza, umożliwia jedynie budowę charakterystyki szczelności badanego obiektu, podając związek pomiędzy strumieniem przepływu powietrza a różnicą ciśnienia wymuszającą taki przepływ. Duża liczba wykonanych pomiarów ciśnieniowych umożliwiła ustalenie prostego związku pomiędzy szacunkową średnią wartością infiltracji powietrza a zmierzonym strumieniem objętości powietrza, przy różnicy ciśnienia 50 Pa. Relację taką zaproponował Sherman (1987):

$$\dot{V}_{\text{inf}} = \frac{\dot{V}_{50}}{20}, \tag{3.2}$$

gdzie: $\dot{V}_{inf}$ – przybliżona wartość strumienia objętości powietrza infiltrującego,

$\dot{V}_{50}$ – strumień objętości powietrza przy różnicy ciśnienia 50 Pa.

Współczynnik w mianowniku ma – w założeniu – odzwierciedlać średnie oddziaływanie sił napędowych infiltracji. Wyniki prac badawczych prowadzonych w ramach Annexu 8 International Energy Agency (Dubrul 1988) pozwoliły na uszczegółowienie wartości tego współczynnika, który może się wahać od 10 do 30, w zależności od wysokości budynku, ekspozycji na oddziaływanie wiatru oraz średniej prędkości wiatru (niższa wartość współczynnika odpowiada średniej prędkości wiatru powyżej 4 m/s, dla nieosłoniętego, wysokiego budynku). Powyższa metoda szacowania infiltracji jest możliwa do zastosowania tylko dla obiektu, dla którego przeprowadzono test ciśnieniowy.

Metody empiryczne pomimo ich prostoty, dają dość dobre wyniki dla dłuższego czasu i mogą być wykorzystywane dla orientacyjnej oceny średniej infiltracji powietrza. Zasadniczą wadą modeli empirycznych jest fakt, że muszą być one oparte na pomiarach dotyczących badanego budynku i w związku z tym nie jest możliwe stosowanie uzyskanych wyników ani w szerszym zakresie, ani przy projektowaniu nowych budynków.

3.2. Modele teoretyczne

W odróżnieniu od modeli empirycznych, modele teoretyczne budowane są na podstawie analizy podstaw fizycznych zjawiska infiltracji powietrza, a więc przy uwzględnieniu zarówno sił napędowych (oddziaływanie wiatru i różnicy temperatury powietrza), jak i równań przepływu powietrza wentylacyjnego, warunkowanych oporami przepływu w określonej strukturze badanego budynku.

Modele teoretyczne podzielić można na uproszczone modele jednostrefowe i modele sieciowe (wielostrefowe). W modelach uproszczonych uwzględniany jest efekt sił napędowych infiltracji, wynikający ze zmienności warunków meteorologicznych, a także szczelności powłoki budynku, jednak zarówno charakterystyki przepływu, jak i oddziaływanie wiatru i wyporu cieplnego ujęte są w sposób przybliżony. Zaletą takiego podejścia jest możliwość uzyskania rozwiązania bez konieczności stosowania iteracyjnych metod numerycznych, jednak dokładność wyników może być dyskusyjna, szczególnie dla pojedynczych obliczeń. W modelach sieciowych uwzględniane są na ogół wszystkie identyfikowalne ścieżki przepływu powietrza, z uwzględnieniem ich charakterystyk przepływu, szczegółowo modelowane są również siły wymuszające infiltrację i przepływy powietrza w badanym obiekcie.

3.2.1. Modele jednostrefowe

Istniejące algorytmy obliczeniowe większości modeli uproszczonych umożliwiają przybliżone wyznaczenie infiltracji powietrza w obiektach traktowanych jak jedna strefa obliczeniowa. Wynikowy strumień objętości powietrza infiltrującego jest zwykle wyznaczany metodą superpozycji infiltracji spowodowanej różnicą temperatur powietrza zewnętrznego i wewnętrznego oraz oddziaływania wiatru w postaci relacji:

$$\dot{V} = f\left(\dot{V}_T, \dot{V}_w\right), \tag{3.3}$$

gdzie: $\dot{V}$ – całkowity strumień objętości powietrza infiltrującego,

$\dot{V}_T$ – infiltracja wywołana wyporem cieplnym,

$\dot{V}_w$ – infiltracja na skutek działania wiatru.

Przegląd różnych modeli superpozycji przedstawił Sherman (1992). Najczęściej stosowana jest superpozycja "kwadratowa":

$$\dot{V}^2 = \dot{V}_T^2 + \dot{V}_w^2 \tag{3.4}$$

Metoda ta znalazła zastosowanie w modelu znanym w literaturze jako model LBL, opracowanym w Lawrence Berkeley Laboratory przez Shermana i Grimsruda (1980). Model LBL oparty jest na analizie wpływu sił napędowych infiltracji, uwzględniając zarówno oddziaływanie wiatru, jak i różnicę temperatury powietrza. Nieszczelności, przez które następuje przepływ powietrza obliczane są w modelu za pomocą tzw. efektywnej powierzchni przepływu, będącej miarą szczelności budynku. Wielkość ta wyliczana jest z wyników testu ciśnieniowego – strumień objętości powietrza uzyskany dla 50 Pa jest ekstrapolowany do ciśnienia referencyjnego, równego 4 Pa (Liddament 1986).

Metoda ta proponowana jest przez ASHRAE (ASHRAE 1997) w postaci równania:

$$\dot{V} = \frac{A_L}{1000}\sqrt{F_T \Delta T + F_w w^2}\,, \tag{3.5}$$

gdzie: $\dot{V}$ – strumień objętości powietrza infiltrującego, m^3/s,

A_L – efektywne, całkowite pole powierzchni przepływu powietrza, cm^2,

F_T – współczynnik wyporu cieplnego, $(dm^3/s)/(cm^4\,K)$,

ΔT – różnica temperatury powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku, K,

F_w – współczynnik oddziaływania wiatru, $(dm^3/s)^2/[cm^4\,(m/s)^2]$,

w – średnia prędkość wiatru, m/s.

Współczynnik F_T ujmuje rozkład szczelin (potencjalnych dróg infiltracji) budynku, natomiast F_w koryguje prędkość wiatru, z uwagi na klasę terenu i lokalne otoczenie budynku. Odpowiednie wzory obliczeniowe znaleźć można w literaturze (Sherman i Grimsrud 1980, Liddament 1996). Pomiarowe wyznaczanie wartości efektywnego pola powierzchni przepływu A_L może być znaczącym ograniczeniem w zastosowaniach. Istnieją jednak stabelaryzowane wartości jednostkowe różnych rodzajów nieszczelności, uzyskane na podstawie dużej liczby pomiarów ciśnieniowych (ASHRAE 1997). Współczynniki F_T i F_w równania (3.5) znaleźć można również w postaci stabelaryzowanej dla budynków do 3 kondygnacji (ASHRAE 1997). Uogólnieniem powyższej metody jest superpozycja o zmiennym wykładniku (Sherman 1992):

$$\dot{V}^{\frac{1}{n}} = \dot{V}_T^{\frac{1}{n}} + \dot{V}_w^{\frac{1}{n}}\,, \tag{3.6}$$

gdzie $n = 0{,}55 - 0{,}75$.

Oba sposoby niezależnego traktowania działania wiatru i wyporu cieplnego dawać mogą wyniki znacznie zawyżone, szczególnie wtedy, gdy siły oddziaływania wyporu cieplnego i wiatru są tego samego rzędu (Modera i in. 1983). Główną przyczyną tych niedokładności jest założenie, że ciśnienia indukowane występującym wyporem cieplnym

i wiatrem są niezależne przy kształtowaniu wynikowej różnicy ciśnienia pomiędzy badaną strefą a otoczeniem. Walker i Wilson (1992) opracowali program obliczeniowy AIM-2, w którym zmodyfikowana została metoda superpozycji strumieni objętości powietrza infiltrującego, w celu uwzględnienia interakcji sił napędowych infiltracji:

$$\dot{V} = \left(\dot{V}_T^{\frac{1}{n}} + \dot{V}_w^{\frac{1}{n}} + K\left(\dot{V}_T \dot{V}_w \right)^{\frac{1}{2n}} \right)^n \tag{3.7}$$

Współczynnik K wyznaczony został na podstawie wyników pomiarów infiltracji ($K \approx -0{,}33$). Przegląd różnych metod superpozycji przedstawił Sherman (1992), proponując jednocześnie "superpozycję uogólnioną" w postaci wzoru (3.7), w którym $n = ½$, natomiast współczynnik K jest wielkością zależną od kierunku wiatru, relacji pomiędzy siłami wyporu i wiatru, a także rozkładu nieszczelności w budynku.

Metoda superpozycji strumieni objętości powietrza infiltrującego zweryfikowana została empirycznie przez pomiary godzinowych wartości wymiany powietrza w budynkach metodą gazów znacznikowych (Walker i Wilson 1992). Pomiary przeprowadzone w dwóch różnych budynkach, w czasie ok. 1500 godzin wykazały, że średni błąd obliczeń metodami superpozycji wynosi ok. 10%, a więc jest do zaakceptowania, biorąc pod uwagę prostotę metod obliczeniowych.

W grupie modeli uproszczonych są też programy, których algorytmy uwzględniają w równaniach przepływu łączną różnicę ciśnienia, spowodowaną zarówno wyporem cieplnym, jak i wiatrem. Należy do nich program AIDA (Liddament 1996) opracowany przez Air Infiltration and Ventilation Center, w którym strumień objętości powietrza infiltrującego zapisywany jest równaniem potęgowym, a także program VENT (Liddament i Allen 1983). VENT jest jednym z niewielu programów, w którym równania przepływu powietrza przez szczeliny zapisane są w tzw. formie kwadratowej (równanie 2.14). Program VENT zasługuje na uwagę również z tego względu, że zastosowano w nim współczynnik korygujący przepływy powietrza przez szczeliny na skutek turbulentnych fluktuacji wiatru, które w modelach stanu ustalonego infiltracji są na ogół pomijane. W rzeczywistości wpływają one na infiltrację powietrza w przypadku, gdy różnica ciśnienia po obu stronach otworu jest mała, w porównaniu ze składową pulsacyjną ciśnienia wiatru (Liddament 1986).

Przedstawione modele uproszczone mogą być stosowane do obliczania przepływu powietrza tylko w obiektach jednostrefowych, w których zakłada się, że wewnątrz badanego obiektu panuje jednakowe ciśnienie i temperatura powietrza, a wewnętrzne przegrody budynku nie stanowią oporu dla przepływu powietrza. Przy takim założeniu nie jest możliwe

wyznaczenie ruchu powietrza wewnątrz budynku i w praktyce uzyskać można jedynie dane odnośnie wymiany powietrza w całym obiekcie. Jest to zwykle dobre przybliżenie przy bilansowaniu nakładów energetycznych budynku, natomiast model nie może być stosowany wówczas, gdy celem obliczeń przepływów powietrza jest ocena komfortu cieplnego lub rozprzestrzeniania zanieczyszczeń. Obszar zastosowań takich modeli jest właściwy dla małych domów jednorodzinnych, niewielkich pomieszczeń produkcyjnych, magazynowych itp.

3.2.2. Modele wielostrefowe

Numeryczne wyznaczenie wielkości strumieni objętości powietrza wentylacyjnego przepływającego w skomplikowanej strukturze wewnętrznej budynku wielorodzinnego wymaga budowy takiego modelu zastępczego, który ujmowałby zjawisko w sposób pełny. Umożliwiają to modele sieciowe, wielostrefowe, odwzorowujące układ pojedynczych stref obliczeniowych, połączonych zdefiniowanymi drogami przepływu powietrza. Strefy w modelu zastępczym reprezentują pojedyncze pomieszczenia lub całe mieszkania, a o ich wyborze decyduje zwykle przyjęcie założenia o stałości ciśnienia i temperatury powietrza w całej objętości strefy. Budowane modele wielostrefowe są na ogół bardzo uniwersalne, umożliwiają wyznaczenie strumieni objętości powietrza przepływającego przez poszczególne zdefiniowane otwory w powłoce budynku (np. okna) nie tylko co do wartości, ale i kierunku przepływu. Dostępna jest zwykle opcja obliczeń przepływów powietrza pomiędzy pomieszczeniami, wyznaczenia ciśnienia wewnątrz pojedynczych stref, a także obliczenia wymiany powietrza w funkcji parametrów klimatu zewnętrznego i charakterystyki szczelności budynku. Pewna liczba modeli umożliwia też symulację przepływu zanieczyszczeń powietrza pomiędzy strefami obliczeniowymi.

W literaturze przedstawiającej przegląd metod obliczeniowych infiltracji powietrza (Liddament i Allen 1983, Feustel i Kendon 1985) znaleźć można informacje o programach napisanych w latach 70. i 80. (prawdopodobnie pierwszym modelem wielostrefowym był program LEAKS, opracowany w 1970 r.). Przegląd dokonany przez Feustela i Kendona zawierający wykaz i krótką charakterystykę 50 programów symulacyjnych powstał na podstawie przeglądu literatury i badań ankietowych autora. Dane te mają w obecnej chwili raczej charakter historyczny, ponieważ większość opisanych programów powstała prawdopodobnie w wyniku doraźnych potrzeb badawczych, zaledwie kilkanaście z nich było dostępnych do ewentualnego wykorzystania przez osoby trzecie, a do chwili obecnej używane są tylko dwa – COMIS i CONTAM (Feustel i Dieris 1991).

Opublikowane dane przeglądowe pozwalają, niezależnie od aktualnej dostępności poszczególnych programów, na orientację co do możliwości obliczeniowych, metod rozwiązań oraz ograniczeń i założeń upraszczających, stosowanych w symulacjach numerycznych przepływów powietrza wentylacyjnego.

Idea algorytmów większości programów symulacyjnych oparta jest na równaniach bilansu strumieni masy lub objętości powietrza przepływającego przez każdy węzeł (strefę) sieci, a więc sprowadza się do rozwiązania układu równań (zwykle nieliniowych, algebraicznych). Różnice pomiędzy proponowanymi modelami symulacyjnymi polegają na różnych sposobach zapisu równań przepływu powietrza przez szczeliny, a także ujęciu sił napędowych infiltracji, rozkładu i charakterystyk przepływu szczelin oraz dokładności odwzorowania struktury wewnętrznej obiektu symulacji. We wszystkich modelach wielostrefowych, opartych na metodzie bilansu strumieni przepływu powietrza w węzłach sieci przyjmowane jest założenie o stałości temperatury powietrza i ciśnienia w całej objętości strefy. Jest to niewątpliwie ograniczenie dokładności modelowania przepływów powietrza, jednak z założenia programy te tworzone są w celu określenia wartości strumieni przepływu powietrza wentylacyjnego, przemieszczającego się przez granice wyznaczonych stref obliczeniowych, a nie dla modelowania ruchu powietrza w obszarze poszczególnych stref. Dla takich potrzeb właściwe są programy wykorzystujące procedury CFD.

Przegląd praktycznie dostępnych (zarówno komercyjnych, jak i wolnych od opłat) programów symulacyjnych opublikowany w 1999 r. (Orme 1999) zawiera informacje o 15 programach, z których 5 umożliwia obliczenia symulacyjne w budynkach wielostrefowych. Są to:

- AIOLOS
- BREEZE
- COMIS
- CONTAM
- PASSPORT Plus

Wymienione programy oferują podobne możliwości obliczeniowe, różnice związane są głównie ze sposobem obsługi, interfejsem oraz dostępnością dodatkowych modułów obliczeniowych i obszernością dołączonych ewentualnie baz danych, niezbędnych do zapisania modelu zastępczego i przeprowadzenia symulacji. Z wymienionych powyżej programów największą popularność zdobyły dwa – COMIS i CONTAM.

Pierwsza wersja programu CONTAM powstała w 1981 r. i cały czas była konsekwentnie rozwijana (Walton 1982, 1984, 1989, 1994), początkowo w wersji DOS, później dla systemu Windows. Program jest sieciowym modelem wielostrefowym, umożliwiającym symulację zarówno infiltracji powietrza z zewnątrz, jak i przepływów pomiędzy zadeklarowanymi strefami. Dostępna jest również procedura symulacji rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w zbudowanym modelu zastępczym obiektu dla zadanego źródła i rodzaju zanieczyszczenia. Algorytm programu oparty jest na bilansach strumieni masy powietrza przepływającego przez zdefiniowane strefy obliczeniowe. Możliwe jest również modelowanie przepływów powietrza przez kanały wentylacyjne, a więc odwzorowywanie realistycznych układów kanałowej wentylacji grawitacyjnej. Program wyposażony jest w bazy danych, które znacząco ułatwiają tworzenie modeli zastępczych badanych budynków. Są to charakterystyki szczelności typowych elementów przepływowych (drzwi i okien różnego typu, przepustów instalacyjnych, łączeń elementów konstrukcyjnych itd.), współczynników konwersji ciśnienia wiatru, a także schematów opisujących zmienność rozprzestrzeniania zanieczyszczeń, zachowania użytkowników, dodatkowego otwierania okien w cyklu godzinowym, dziennym lub tygodniowym.

Funkcjonalność programu symulacyjnego COMIS jest porównywalna z programem CONTAM, zarówno co do obszaru zastosowań, jak i sposobu użytkowania. COMIS jest wynikiem realizacji zadania badawczego "Multizone Air Flow Modelling", International Energy Agency, Annex 23 (Feustel 1999). Opublikowana obszerna dokumentacja programu (Feustel i Raynor-Hoosen 1990, Feustel i Smith 1995) umożliwia zapoznanie się z konstrukcją programu, algorytmem obliczeniowym oraz z założeniami przyjętymi przy budowie programu. Praca z programem możliwa jest zarówno w systemie DOS, jak i Windows. Dodatkowa nakładka, IISiBat (IISiBat 2.1 for COMIS 1995), umożliwia stosunkowo łatwą pracę przy tworzeniu modelu do symulacji. Wbudowana baza danych zawiera typowe elementy dla potrzeb modelowania zarówno wentylacji naturalnej, jak i mechanicznej oraz rozprzestrzeniania zanieczyszczeń. Ważnym modułem programu jest oryginalna procedura wyznaczania współczynnika ciśnienia wiatru na poszczególnych ścianach symulowanego obiektu, w zależności od kierunku napływu wiatru i charakterystyki otoczenia budynku.

Oba programy, COMIS i CONTAM, oferują podobną funkcjonalność oraz dokładność symulacji. Ich dodatkową zaletą jest powszechny dostęp (brak opłat licencyjnych), co zapewne przyczyniło się do popularności tych procedur.

Prace nad modelami wielostrefowymi prowadzone były także w Polsce. Jeden z pierwszych programów obliczeniowych przepływów powietrza wentylacyjnego w budynkach mieszkalnych przedstawiono w 1981 roku (Nantka i Majerski, 1981). Badania eksperymentalne, związane z pomiarami szczelności mieszkań i przepuszczalności powietrznej elementów stolarki budowlanej, a także wyznaczaniem na drodze pomiarowej wymiany powietrza w pojedynczych mieszkaniach (Nantka 1990) zostały uzupełnione opracowaniem wielostrefowego programu symulacyjnego, którego cechą wyróżniającą był oryginalny sposób traktowania bilansów strumieni przepływu powietrza w strefach obliczeniowych (Nantka 1993).

Pod koniec lat 80. powstała pierwsza wersja własnego, autorskiego programu symulacyjnego, pozwalająca na wykonywanie obliczeń infiltracji i przepływów powietrza wentylacyjnego w budynkach wielorodzinnych, przy różnym stopniu szczegółowości wyboru stref obliczeniowych (Baranowski i in. 1990). Budowa takiego programu była częścią realizacji zadania badawczego pt. "Modelowanie matematyczne i eksperymentalne ruchu powietrza wentylacyjnego w budownictwie mieszkaniowym i towarzyszącym" (Baranowski i in. 1987). Program ten był w następnych latach konsekwentnie rozwijany i poprawiany, znajdując zastosowanie w realizowanych przez autora pracach badawczych i ekspertyzach, a także w międzynarodowych programach badawczych (Baranowski i Pudełko 1996, Baranowski 1998, 1999, 2002).

3.3. Programy zintegrowane

Osobną grupę stanowią programy pozwalające na jednoczesną symulację przepływu ciepła i masy (powietrza). Obliczenia takie związane są na ogół z wyznaczaniem bilansu cieplnego badanego obiektu; ciepło niezbędne do podgrzania powietrza infiltrującego jest pozycją znaczącą, szczególnie w okresie zimowym.

Programy obliczeń cieplnych budynków zaczęły powstawać w latach 70. przede wszystkim w USA, z inicjatywy i przy wsparciu rządowym. W latach 80. używanych było przynajmniej kilkanaście programów komputerowych, służących do analiz energetycznych budynków (Ayres i Stamper 1995), wykorzystywanych przez duże firmy projektowe czy konsultingowe. Powstawały także powszechnie dostępne pakiety symulacyjne, umożliwiające obliczenia bilansu cieplnego budynków w trybie dynamicznym, również z uwzględnieniem urządzeń i instalacji grzewczych, wentylacyjnych i klimatyzacyjnych (Brager i de Dear 1998). Pewien standard w tym zakresie wyznaczyły takie programy jak: BLAST, DOE i TRNSYS (TRNSYS 1990, Sowell i Hittle 1995, Hong i in. 2000), których kolejne wersje są używane

od ponad 20 lat. Różnice między tymi programami polegają na sposobie ujmowania obciążeń cieplnych – algorytm programu BLAST oparty jest na równaniach bilansu cieplnego poszczególnych stref obliczeniowych, natomiast procedury obliczeniowe DOE i TRNSYS wykorzystują tzw. funkcje przejścia (McQuinston i Spitler 1992). Wymienione programy uwzględniają nakłady ciepła potrzebne do podgrzania powietrza infiltrującego, jednak wartości strumieni powietrza zewnętrznego, napływającego do poszczególnych stref obliczeniowych są danymi wejściowymi do programu symulacji obciążeń cieplnych, a więc konieczne są wcześniejsze obliczenia lub oszacowania przepływów powietrza wentylacyjnego. Na ogół możliwe jest nie tylko zadeklarowanie stałej liczby wymian powietrza, ale również uwzględnienie pewnej zmienności wentylacji, poprzez ustalenie określonych schematów czasowych. Taki sposób symulacji powoduje utratę dokładności obliczeń, ponieważ temperatura powietrza w strefach obliczeniowych zależy od infiltracji powietrza.

W obliczeniach zintegrowanych istotne jest uwzględnienie wzajemnego sprzężenia pomiędzy równaniami przepływu powietrza i bilansem cieplnym strefy, poprzez temperaturę powietrza, warunkującą zarówno różnicę ciśnienia wywołującą przepływ, jak i decydującą o bilansie cieplnym strefy obliczeniowej. Najprostszym sposobem realizacji symulacji zintegrowanej jest metoda sekwencyjna (Kendrick 1993), polegająca na oddzielnym rozwiązywaniu równań przepływu masy dla założonej temperatury w pomieszczeniu i wykorzystaniu obliczonych wartości strumieni przepływu powietrza w równaniu bilansu cieplnego strefy. Oznacza to ignorowanie napływu do pomieszczenia powietrza o temperaturze innej niż założona w strefie i w konsekwencji pewnego błędu, w zapisie bilansu cieplnego strefy. Taki sposób symulacji wykorzystany został np. w programie TARP (Walton 1982), jednym z pierwszych programów zintegrowanych. Metoda sekwencyjna jest stosowana zwykle przy implementacji procedur symulujących przepływy powietrza wentylacyjnego do programów obliczających obciążenia cieplne.

Sprzężenie pomiędzy zmiennością temperatury powietrza a infiltracją w strefie obliczeniowej realizuje częściowo metoda "ping-pong" (Hensen 1995): obliczony strumień masy (lub też zwykle strumienie) powietrza wpływający do strefy jest wielkością wejściową do równania bilansu cieplnego, z którego obliczana jest aktualna temperatura powietrza w strefie, wykorzystywana w kolejnym kroku obliczeniowym do wyznaczenia strumienia masy powietrza itd. Ten sposób symulacji zintegrowanej zastosowano łącząc program obliczeniowy przepływów powietrza COMIS z pakietem symulacji obciążeń cieplnych TRNSYS (Dorer i Weber 1999).

W pełni zintegrowane programy symulacyjne umożliwiają jednoczesne rozwiązywanie równań przepływu powietrza i ciepła w każdej strefie (Axley i Grot 1989). Zestawienia dostępnych programów (Orme 1999, Kendrick 1993) i przegląd literatury w tym zakresie (Sowell i Hittle 1995, Ayres i Stamper 1995, Hong i in. 2000) wskazują, że dostępność programów zintegrowanych jest ograniczona. W publikacji Kendricka (1993) zamieszczono opis 9 takich procedur, jednak większość z nich została opracowana w firmach projektowych lub badawczych dla własnych potrzeb i nie była szerzej dostępna. Wyjątkiem jest modułowy pakiet symulacji zintegrowanej ESP-r (Environmental System Performance) (ESRU 1999), którego pierwsza wersja była dostępna w 1977 roku i jest konsekwentnie rozwijany do chwili obecnej. Program ESP-r służy do komputerowej symulacji wymiany masy i energii w budynkach, z uwzględnieniem systemów i instalacji grzewczych i klimatyzacyjnych, źródeł ciepła, strategii regulacji, a także klimatu wewnętrznego i jakości powietrza. Jest jednym z niewielu programów symulacyjnych, pozwalających w sposób kompleksowy ocenić stan cieplny i własności użytkowe budynku. Istotną cechą programu jest budowa jego algorytmu obliczeniowego, który odwzorowuje pełne sprzężenie pomiędzy temperaturą i przepływami powietrza w budynku.

Program ESP-r stał się bardziej popularny od chwili powstania wersji pracującej w systemie operacyjnym Linux. W Polsce prawdopodobnie jedno z pierwszych zastosowań pakietu związane było z symulacyjnym wyznaczeniem nakładów cieplnych, niezbędnych do ogrzania budynku jedno- i wielorodzinnego, przy rozpatrywaniu różnych wariantów ogrzewania (Gawin 1998). Kompleksowa symulacja zintegrowana z wykorzystaniem programu ESP-r przeprowadzona została jako jedno z zadań międzynarodowego programu badawczego "Integrated Design Optimization of Building Energy Performance and Indoor Environment" (Baranowski i in. 2003). Obliczenia symulacyjne, zweryfikowane również pomiarowo, dotyczyły wielorodzinnego budynku mieszkalnego (Baranowski i Pudełko 2002, Baranowski i Ferdyn-Grygierek 2003).

Sprawdzone w praktyce programy obliczeń cieplnych – DOE-2 i BLAST – stały się podstawą zupełnie nowego pakietu obliczeń zintegrowanych EnergyPlus. Program ten wykorzystuje możliwości i idee niektórych modułów wspomnianych programów symulacji cieplnych, jednak jego kod źródłowy został całkowicie na nowo napisany. Program umożliwia zintegrowaną symulację przepływów ciepła i masy na podstawie równań bilansowych, zdefiniowanych przez użytkownika stref obliczeniowych, obliczeń przepływów powietrza i zanieczyszczeń w modelach wielostrefowych, identyfikacji transportu wilgoci w elementach

budynku, a także współpracy z zewnętrznymi, dodatkowymi modułami obliczeniowymi (Crawley i in. 2001).

Wśród modeli zintegrowanych wydzieloną grupę tworzą programy symulacyjne oparte na metodach CFD (Computational Fluid Dynamic). Programy te służą do dokładnych obliczeń rozkładu temperatury powietrza oraz pola prędkości w pojedynczych, wentylowanych przestrzeniach (Liddament 1996). Algorytmy obliczeniowe są dość skomplikowane, bowiem zagadnienie sprowadza się do numerycznego rozwiązania układu równań, opisującego turbulentne, nieustalone, konwekcyjne pola przepływów, zapisane w formie 3-wymiarowych równań różniczkowych. Stosowane techniki numeryczne to zarówno metody różnic skończonych, jak i elementów skończonych (Jones i Whittle 1992). Obszerne omówienie problematyki CFD w zastosowaniu do przepływów powietrza wentylacyjnego zawiera opracowanie Liddamenta (1991). Rozwój odpowiednich technik i kodów obliczeniowych przypada na lata 80. Zostały wtedy opracowane takie algorytmy, jak: SIMPLE, CHAMPION i PHOENICS, które były aplikowane do różnych programów obliczeniowych (Tuomaala i Rahola 1995), a także weryfikowane pomiarowo i wzajemnie porównywane (Liddament 1991). Podejmowane były również badania nad połączeniem programów symulacji przepływów ciepła i powietrza w budynku z kodami wykorzystującymi metody CFD, przy czym dokładny rozkład pól ciśnienia i temperatury powietrza obliczany był tylko w pewnych newralgicznych strefach badanego obiektu (np. z uwagi na szczególne wymagania komfortu cieplnego lub jakości powietrza). Pozostałe strefy modelowane były za pomocą "klasycznego" programu zintegrowanego (Negrao 1998). Niezależnie od stosowanej metody numerycznej, zasadniczy wpływ na wyniki symulacji mają przyjęte warunki brzegowe problemu oraz dobór siatki dyskretyzacji. Obecnie stosowane są komercyjne programy symulacyjne oferujące duże możliwości obliczeniowe, z zastosowaniem metod CFD, np. FLUENT, FLOVENT, VORTEX, FLOW3D (Hong i in. 2000).

3.4. Weryfikacja eksperymentalna i porównawcza programów symulacyjnych

Z punktu widzenia praktycznych zastosowań poszczególnych procedur symulacyjnych istotna jest ich dostępność oraz, potwierdzona eksperymentalnie, dokładność odwzorowań rzeczywistych procesów infiltracji i przepływów powietrza wentylacyjnego. Większość przedstawionych powyżej programów symulacyjnych była wielokrotnie weryfikowana. Obszerne porównanie i weryfikację empiryczną 10 programów symulacyjnych przeprowadzono w ramach prac Air Infiltration Centre (Liddament i Allen 1983). Badania objęły zarówno modele jednostrefowe (np. LBL, INFIL, Sepsy), jak i wielostrefowe (LEAKS,

VENT, ELA). Porównanie dokładności symulacji oparte było na kompleksowych zestawach danych pomiarowych, obejmujących opis budynku i otoczenia, zidentyfikowanych dróg przepływu powietrza, wyniki testu ciśnieniowego oraz dane meteorologiczne i wyniki pomiarów infiltracji powietrza. Symulacje przeprowadzono dla 3 zestawów danych, reprezentatywnych dla szerokiego zakresu warunków terenowych i danych klimatycznych. Modele wielostrefowe dawały wyniki bardzo zbliżone. Większe różnice można było zaobserwować w przypadku modeli jednostrefowych, co wynikało z różnych technik obliczeniowych, zastosowanych w tych modelach. Warto zauważyć, że najlepszą dokładność wyników uzyskano przy użyciu programu LBL: obliczone wartości liczby wymian powietrza mieściły się w przedziale ± 25% wielkości zmierzonych. Ten rezultat weryfikacji, pochodzącej z początku lat 80. jest o tyle istotny, że procedura obliczeniowa oparta na modelu LBL jest współcześnie stosowana dla budynków jednorodzinnych, jako zalecana przez ASHRAE (ASHRAE 1997). Program symulacyjny COMIS, który powstał jako efekt specjalnego programu badawczego (Feustel 1999) był szczegółowo weryfikowany podczas realizacji tego programu, poprzez wykorzystanie ponad 50 dobrze udokumentowanych pomiarowo układów wielostrefowych do porównań z odpowiednimi symulacjami (Borchiellini i Furbringer 1999). COMIS był też używany wielokrotnie przy realizacji prac badawczych związanych z wentylacją budynków, np. w programie badawczym International Energy Agency Annex 27 "Evaluation and Demonstration of Domestic Ventilation Systems", przy porównywaniu różnych systemów wentylacyjnych (Blomsterberg i in. 1999) czy też w badaniach eksperymentalnych i pomiarach przepływów powietrza wentylacyjnego i rozprzestrzeniania zanieczyszczeń w przestrzeniach wentylowanych przez okna, umieszczone na jednej ścianie ('single side ventilation') (Dascalaki i in. 1999).

W literaturze brak kompleksowych porównań wyników symulacji różnymi programami, przy jednoczesnej weryfikacji empirycznej rezultatów obliczeniowych, szczególnie dla obiektów wielostrefowych. Jedną z nielicznych prac w tym zakresie było przeprowadzenie symulacji współcześnie używanymi programami (COMIS, CONTAM i BREEZE), dla tego samego wielostrefowego budynku 3-kondygnacyjnego. Wyniki obliczeń przepływów powietrza wentylacyjnego były bardzo zbliżone (Orme 1999), jednak brak danych pomiarowych nie pozwala na wyciąganie daleko idących wniosków. Rozpatrywany przypadek był dość prosty (zaledwie 4 strefy obliczeniowe), a więc również trudno przesądzać o dokładności odwzorowań rzeczywistych przepływów powietrza w budynku wielostrefowym przez poszczególne programy symulacyjne.

Autorski program *Multiven* symulujący przepływy powietrza wentylacyjnego był zweryfikowany przez porównania wyników takich symulacji z tymi, które uzyskano za pomocą innych kodów numerycznych (Baranowski 2002). Przeprowadzono również weryfikację empiryczną przez porównanie wyników symulacji i pomiarów wymiany powietrza w jednym z mieszkań budynku wielorodzinnego (Baranowski 2001).

3.5. Współczesne badania zagadnień wentylacji naturalnej

Dokonany powyżej przegląd programów symulacyjnych obejmuje procedury, które są (lub były) ogólnie dostępne, zarówno jako programy komercyjne, jak i wolne od opłat, gotowe do użycia narzędzia symulacji numerycznej. W literaturze znaleźć można również informacje o programach symulacyjnych, przeważnie modeli wielostrefowych i programów zintegrowanych, które opracowywane były dla potrzeb określonych badań – zarówno rozwiązań systemów wentylacji, jak i problematyki nakładów energetycznych w budynkach (Inard i in. 1996, Hong i Jiang 1997, Aynsley 1997, Boyer i in. 1998, 1999).

Prace badawcze prowadzone w latach 90. dotyczyły różnych aspektów modelowania wentylacji naturalnej, a także ich weryfikacji empirycznych, pozwalających na dokładne rozpoznanie wzajemnej interakcji sił napędowych wentylacji naturalnej (Allard i Herrlin 1989, Hunt i Linden 1999). Komfort cieplny i jakość powietrza w budynku, przy zastosowaniu wentylacji naturalnej badał doświadczalnie Tsutsumi i in. (1996), wykonując pomiary w pełnej skali, a następnie uzupełniając eksperyment symulacjami przepływu powietrza, z uwzględnieniem zaburzeń turbulentnych. Zagadnienia modelowania przepływów powietrza przez duże otwory przedstawiono w (Li i in. 2000). Problem ten jest ważny w przepływach międzystrefowych, zwłaszcza dla wentylacji pożarowej, a także przy rozprzestrzenianiu się zanieczyszczeń. Badania jednoznaczności rozwiązań modeli przepływów powietrza dla różnych przypadków wzajemnego oddziaływania wyporu cieplnego i wiatru w obiektach wielostrefowych (Li i in. 2001) wskazały na konieczność uważnej interpretacji wyników symulacji przepływów powietrza w modelach wielostrefowych, z uwagi na możliwość uzyskiwania niejednoznacznych rozwiązań wielokrotnych.

W ostatnich latach, oprócz powstawania coraz to bardziej dokładnych programów symulacyjnych podejmowano prace zmierzające do budowy związków parametrycznych, wiążących siły napędowe wentylacji naturalnej z ilością powietrza infiltrującego oraz temperaturą w pomieszczeniu wentylowanym (Delgado i in. 1996, Linden 1999, Li i Delsante 2001). Kompleksowa ocena systemów wentylacji budynków, za pomocą procedur

uproszczonych, niewymagających programów symulacyjnych, była przedmiotem międzynarodowych prac badawczych w ramach Annexu 27: "Simplified Tools for Evaluation of Domestic Ventilation Systems" (Concannon 2002), w wyniku których opracowano prostą metodę wskaźnikową dla oceny badanego systemu wentylacji.

W kraju współczesne prace badawcze związane z wentylacją budynków prowadzone są zarówno metodami pomiarowymi, celem oceny jakości wentylowania budynków i pomieszczeń (Sowa 1999a,b, Baranowski i in. 2003), jak i z wykorzystaniem programów symulacyjnych (Mijakowski i Sowa 1998, 2001), dla badań jakości powietrza wewnętrznego, w aspekcie wentylowania pomieszczeń. Autorski program symulacji przepływów powietrza "Multiven" był wykorzystany jako jedno z narzędzi przy wykonywaniu projektu badawczego, dotyczącego systemowej symulacji budynku wielorodzinnego (Baranowski 2002). Program ten znalazł również zastosowanie w pracach badawczych związanych z oceną i prognozowaniem nakładów cieplnych w budynkach wielorodzinnych z wentylacją naturalną (Baranowski 1993a,b, 1994a), jakością powietrza wewnętrznego (Baranowski 1994b) oraz oceną efektów termorenowacji budynków mieszkalnych (Baranowski i Pudełko 1996, 2002).

4. MODEL MATEMATYCZNY I ALGORYTM OBLICZENIOWY PROGRAMU SYMULACYJNEGO

Autorski program symulacyjny *Multiven* zbudowany został dla umożliwienia obliczeń przepływów powietrza wentylacyjnego w budynkach wielorodzinnych. Skonstruowanie własnego kodu źródłowego miało na celu stworzenie możliwości dowolnego (w sensie założonych celów badawczych) kształtowania struktury modelu badanego obiektu, sposobu wprowadzania i zakresu danych wejściowych do obliczeń, a także badania różnych metod modelowania przepływów powietrza. Pomimo istnienia pewnej liczby programów symulacyjnych z tego zakresu (zarówno komercyjnych, jak i ogólnie dostępnych), ich wykorzystanie do sformułowanych powyżej celów jest niemożliwe, właśnie z powodu braku kodu źródłowego lub też warunków licencji, zakazujących wprowadzania zmian. Jednocześnie opisy takich programów zwykle nie podają wszystkich szczegółów, dotyczących zarówno zastosowanych wzorów, służących do modelowania przepływów powietrza, jak i zastosowanych metod matematycznych poszukiwania rozwiązania.

4.1. Ogólna charakterystyka programu

Program należy do grupy modeli sieciowo-węzłowych, pozwalających na odwzorowanie wewnętrznej struktury budynków wielorodzinnych jako układu stref obliczeniowych, połączonych zidentyfikowanymi ścieżkami przepływu powietrza. Pierwsza wersja programu powstała pod koniec lat 80. Możliwości obliczeniowe tej wersji były dość ograniczone – program umożliwiał przeprowadzenie symulacji dla co najwyżej 10 stref obliczeniowych, przy ustalonych warunkach meteorologicznych, deklarowanych przy uruchamianiu programu. Niemniej jednak program z powodzeniem wykorzystano w obliczeniach symulacyjnych przepływów powietrza w budynkach wielorodzinnych, przeprowadzono również analizy wpływu czynników pogodowych na proces wentylacji naturalnej (Baranowski i Mierzwiński 1990, Baranowski i in. 1990).

Obecnie wersja podstawowa programu umożliwia przeprowadzenie symulacji dla 100 stref obliczeniowych (zwiększenie tej liczby nie stanowi większego problemu). Założona standardowo liczba stref jest wystarczająca do zamodelowania typowego budynku wielorodzinnego, który w przypadku klasycznej konstrukcji składa się z pewnej liczby mieszkań usytuowanych w sposób powtarzalny na poszczególnych kondygnacjach. Możliwe jest dokonywanie modyfikacji konfiguracji modelu zastępczego, w zależności od rzeczywistej

konstrukcji budynku, np. przez uwzględnienie połączeń korytarzami pomiędzy kondygnacjami budynków wieloklatkowych.

Idea obliczeń opiera się na bilansowaniu strumieni objętości powietrza przepływającego przez każdą zadeklarowaną strefę. Pod uwagę brane są strumienie powietrza infiltrującego przez intencjonalne szczeliny stolarki okiennej, przepływ kanałami wentylacyjnymi, a także przepływy pomiędzy wydzielonymi strefami. Istotną cechą programu jest możliwość odwzorowania rzeczywistej struktury wewnętrznej wielorodzinnych budynków mieszkalnych, w których poszczególne kondygnacje łączy klatka schodowa. W algorytmie programu uwzględniono możliwość wystąpienia przepływów poziomych powietrza pomiędzy poszczególnymi mieszkaniami i klatką schodową oraz przepływy pionowe w szybie klatki schodowej.

Dane wejściowe, niezbędne do przeprowadzenia obliczeń, podzielić można na trzy grupy:

- dane ogólne, opisujące geometrię i wewnętrzną konfigurację obiektu, orientację budynku względem stron świata, a także liczbę okien i ich położenie na poszczególnych ścianach budynku;
- charakterystyki szczelności otworów okiennych, a także drzwi mieszkań i bramy budynku wraz z długością szczelin, charakterystyki przepływowe kanałów wentylacyjnych;
- zewnętrzne warunki klimatyczne (temperatura powietrza, prędkość i kierunek wiatru) oraz zakładana temperatura powietrza w strefach obliczeniowych.

4.2. Założenia programu i model zastępczy obiektów symulacji

Najważniejszym założeniem, przyjętym do budowy procedury numerycznej, jest stwierdzenie, że powietrze wentylacyjne może być traktowane jak gaz doskonały. Konsekwencje takiego założenia omówiono szczegółowo w rozdz. 2. Kolejne, ważniejsze założenia są następujące:

- pojedynczą strefę obliczeniową stanowi, wydzielona w strukturze badanego obiektu, przestrzeń, w której zakłada się, że zarówno temperatura powietrza, jak i ciśnienie jest stałe;
- w strefie nie występuje stratyfikacja temperatury, a więc pomija się ruch powietrza w obszarze strefy, dopuszczając jedynie przepływy powietrza przez granice strefy;
- przepływy powietrza wentylacyjnego zachodzą tylko przez zdefiniowane drogi przepływu;

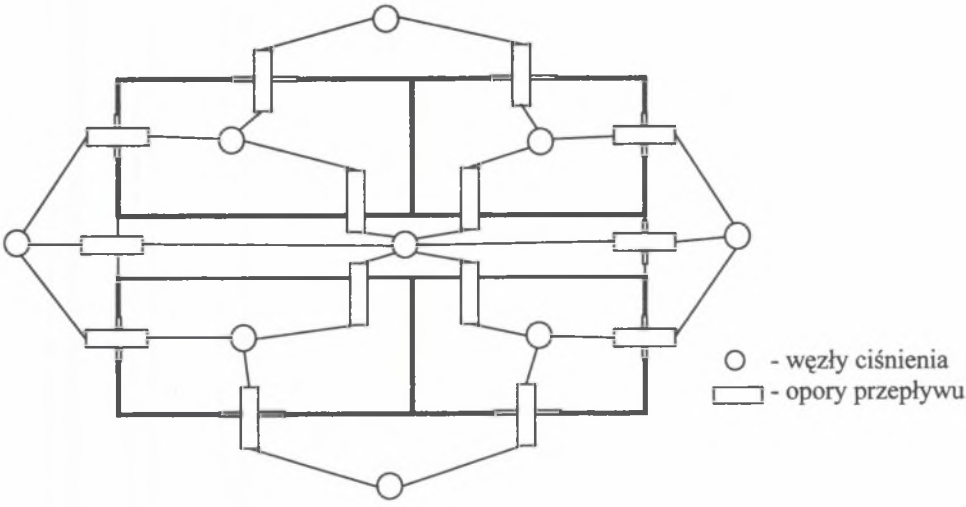
- pomiędzy wnętrzem obiektu a otoczeniem (infiltracja lub eksfiltracja) przez szczeliny okien i drzwi balkonowych i ewentualnie intencjonalne nawiewniki;
- powietrze zużyte jest usuwane kanałami wentylacji grawitacyjnej (standardowo indywidualnymi);
- możliwe są przepływy międzystrefowe powietrza (np. pomiędzy mieszkaniem i klatką schodową).

Konsekwencją powyższych założeń jest postać modelu zastępczego budynku, niezbędna dla przeprowadzenia symulacji. W strukturze badanego obiektu wyróżnić można skończoną liczbę stref obliczeniowych, wynikających zwykle, w sposób naturalny, z rozwiązań projektowych budynku. W praktyce strefy obliczeniowe definiuje się w sposób naturalny jako poszczególne pomieszczenia budynku, ograniczone przegrodami budowlanymi. Zakłada się również, zgodnie z przyjętymi założeniami, że strefa obliczeniowa nie jest szczelna, a więc możliwy jest przepływ powietrza przez brzegi obszaru ograniczającego.

Pojedyncza strefa obliczeniowa stanowi węzeł w układzie zastępczym obiektu, w którym ustala się pewne nad- lub podciśnienie, odniesione do ciśnienia otoczenia (ciśnienia atmosferycznego), będące skutkiem sił napędowych wymiany powietrza. Każda strefa połączona jest z sąsiednią (lub z otoczeniem budynku) dowolną, zidentyfikowaną liczbą ścieżek przepływu powietrza. Rysunek 4.1 przedstawia fragment zastępczego modelu sieciowego poziomych przepływów powietrza wentylacyjnego na parterze budynku wielorodzinnego.

Model zastępczy odwzorowuje również przepływy pionowe powietrza w klatce schodowej, podzielonej na strefy wydzielone poziomami kondygnacji. Przedstawiony na rys. 4.1 fragment modelu sieci przepływów powietrza jest jedną z wielu możliwych konfiguracji, a model konkretnego obiektu tworzony jest zawsze na podstawie analizy przepływów powietrza w danym budynku.

Wybór stref i identyfikacja ścieżek przepływu powietrza pomiędzy nimi a otoczeniem budynku tworzy model zastępczy obiektu, pozwalający na zapis równań bilansowych wymiany powietrza. Wybór stref obliczeniowych jest w zasadzie arbitralny, zależny od użytkownika programu i celu, jakiemu mają służyć obliczenia symulacyjne. Możliwe jest zarówno zbudowanie modelu zastępczego, odwzorowującego budynek wielorodzinny w postaci jednej strefy obliczeniowej, z pominięciem wewnętrznych powiązań między realnie istniejącymi pomieszczeniami, jak i modelu bardzo szczegółowego, obejmującego pojedyncze pokoje w poszczególnych mieszkaniach i inne, wydzielone konstrukcyjnie pomieszczenia budynku (piwnice, pralnie, suszarnie itp.).



Rys. 4.1. Fragment modelu sieci przepływów powietrza wentylacyjnego
Fig. 4.1. Part of the network model of the ventilating air flows

W każdym przypadku uwzględniane są jednak wszystkie drogi przepływu powietrza pomiędzy wnętrzem budynku a otoczeniem. Dokładność strefowania uzależniona jest od celu prowadzonych obliczeń. Szczegółowe odwzorowanie wszystkich pomieszczeń budynku może być wskazane, jeżeli interesujące są przepływy powietrza wewnątrz obiektu, dla ustalenia np. dróg rozprzestrzeniania zanieczyszczeń. Drugi, skrajny przypadek – potraktowanie całego obiektu jako jednej strefy obliczeniowej – stwarza jedynie możliwość przybliżonego oszacowania wymiany powietrza w całym budynku, np. dla potrzeb wskaźnikowej oceny niezbędnych nakładów ciepła, dla ogrzania powietrza infiltrującego. Zwykle najbardziej użyteczne jest wydzielenie całych mieszkań jako poszczególnych stref obliczeniowych, bowiem na ogół interesująca jest wymiana powietrza w całym mieszkaniu, a nie w poszczególnych jego pomieszczeniach. Z dużym prawdopodobieństwem można przyjąć, że drzwi wewnętrzne w mieszkaniach są otwarte, a więc temperatura powietrza i ciśnienie są w mieszkaniu wyrównane. W szczególnych przypadkach możliwe jest – jak wspomniano wyżej – zróżnicowanie wartości parametrów powietrza w obrębie mieszkania (np. założenie wyższej temperatury w łazience), prowadzi to jednak do zwiększenia liczby deklarowanych stref.

W programie przewidziano także możliwość deklarowania stref obliczeniowych, których obszar nie jest wyznaczony jednoznacznie przez przegrody budowlane. Taki typ stref pozwala np. na zamodelowania pionowych przepływów powietrza w szybie klatki schodowej,

przez jej podział na "wirtualne" strefy obliczeniowe, wydzielone poziomami poszczególnych kondygnacji budynku.

4.3. Model przepływów powietrza wentylacyjnego

Podstawowe założenia dotyczące równań przepływu powietrza i mechanizmów wymuszających ruch powietrza przedstawiono w rozdz. 2. W praktyce obliczeniowej modele przepływów powietrza wentylacyjnego opierają się na równaniach stanu ustalonego (rozdz. 3). Opracowany program numeryczny zbudowany jest na podstawie równań zjawisk fizycznych, związanych z przepływami powietrza wentylacyjnego oraz naturalnych sił wymuszających odpowiednie przepływy (różnica temperatur powietrza i oddziaływanie wiatru).

Równanie przepływu powietrza przyjęto w najczęściej stosowanej postaci potęgowej (wzór 2.13), zapisując je odpowiednio do rozpatrywanej drogi przepływu, a więc charakteru szczeliny i różnicy ciśnienia wywołującej ten przepływ. Strumienie objętości powietrza obliczane są według następujących zależności:

- infiltracja (lub eksfiltracja):

$$\dot{V}_{inf} = a \cdot L \cdot (\Delta p)^n , \tag{4.1}$$

gdzie: $\dot{V}_{inf}$ – strumień objętości powietrza,

a – współczynnik infiltracji,

L – całkowita długość szczeliny,

Δp– różnica ciśnienia powodująca przepływ,

n – wykładnik.

Występująca we wzorze (4.1) różnica ciśnienia:

$$\Delta p = p_T + p_W - p_x \tag{4.2}$$

jest sumą:

- różnicy ciśnienia, spowodowanej wyporem cieplnym:

$$p_T = (\rho_e - \rho_i) \cdot g \cdot h \tag{4.3}$$

- ciśnienia, na skutek oddziaływania wiatru:

$$p_W = C_p \cdot \frac{\rho_e \cdot w^2}{2} \tag{4.4}$$

- ciśnienia w strefie obliczeniowej (obliczane podczas symulacji) – p_x.

Wzór (4.1) znajduje zastosowanie w obliczeniach ilości powietrza infiltrującego do pomieszczenia (strefy), w którym panuje ciśnienie p_x, z otoczenia budynku, przez zdefiniowaną szczelinę.

- Przepływy międzystrefowe, wywołane różnicą ciśnienia indukowanego w poszczególnych strefach, zachodzące przez łączące drzwi:

$$\dot{V}_d = a_d \cdot L_d \cdot \left(p_{x(i)} - p_{x(i+1)}\right)^n, \tag{4.5}$$

gdzie: $\dot{V}_d$ – strumień objętości powietrza,

a_d – współczynnik infiltracji,

L_d – całkowita długość szczeliny drzwi,

$p_{x(.)}$ – wartość ciśnienia w strefie,

n – wykładnik,

- przepływy kanałami wentylacyjnymi:

$$\dot{V}_w = a_w \cdot \left(p_x - p_D\right)^n \tag{4.6}$$

gdzie: $\dot{V}_w$ – strumień objętości powietrza,

a_w – współczynnik przepływu w kanale,

p_x – wartość ciśnienia w strefie,

p_D – wartość ciśnienia na wylocie kanału,

n – wykładnik.

Wykładniki n, występujące w poszczególnych równaniach przepływu zależą od charakteru ruchu powietrza w odpowiednich szczelinach. Przy obliczaniu infiltracji powietrza przez szczeliny okien przyjmuje się zazwyczaj $n=2/3$ (Liddament 1986). W równaniu (4.5) dotyczącym przepływu powietrza przez drzwi wartość wykładnika n zależy od współczynnika przepuszczalności powietrza: dla drzwi szczelnych (np. pomiędzy mieszkaniem a klatką schodową) $n=2/3$, dla na ogół mniej szczelnych drzwi w mieszkaniu zakłada się $n=1/2$. Współczynniki przepływu w kanałach wentylacyjnych a_w wynikają z oporów przepływu w tych kanałach i jeżeli nie jest znana charakterystyka przepływowa kanału, to wartość a_w musi być obliczona na podstawie danych konstrukcyjnych i materiałowych kanału.

Identyfikacja wszystkich strumieni objętości powietrza wentylacyjnego, przepływającego przez strefę obliczeniową umożliwia – wykorzystując wzory (4.1), (4.5) i (4.6) – zapisanie równania bilansu tych strumieni dla każdej strefy obliczeniowej. W zapisie

równań bilansu dla danej strefy kierunek przepływu strumieni powietrza wynika z postaci zapisu równań przepływu – zakłada się, że w rozpatrywanej strefie panuje podciśnienie względem otoczenia, a więc zachodzić może tylko infiltracja powietrza – por. równanie (4.1) i (4.2). Przyjmuje się również, że zużyte powietrze wypływa do otoczenia kanałem wentylacyjnym (równanie 4.6), a także zakłada się, że przepływ pomiędzy strefami zachodzi w kierunku zgodnym ze wzrastającą numeracją stref. Ten sposób zapisu równań bilansowych pozwala na uzyskanie wyników symulacji zarówno co do wartości, jak i kierunku przepływu powietrza. Równanie bilansu dla typowej strefy (mieszkania) zwykle wygląda następująco:

$$\sum_{i=1}^{s} \dot{V}_{inf_i} - \dot{V}_D - \dot{V}_w = 0 \tag{4.7}$$

Sumowanie strumieni objętości powietrza infiltrującego należy przeprowadzić po wszystkich ścieżkach *s* napływu powietrza z otoczenia do danej strefy.

Pełny model przepływów powietrza wentylacyjnego w badanym obiekcie odwzorowany jest przez układ *n* nieliniowych równań algebraicznych typu (4.7) (gdzie *n* – liczba stref obliczeniowych), w których niewiadomymi są ciśnienia w strefach obliczeniowych p_x. Liczba niewiadomych jest równa liczbie stref obliczeniowych; ponieważ dla każdej strefy zapisywane jest równanie bilansu przepływów powietrza, więc otrzymany układ równań jest oznaczony.

4.4. Metoda rozwiązania

Rozwiązywanie układu równań nieliniowych metodami kolejnych przybliżeń, zwykle metodą Newtona i podobnymi, polega na kolejnych iteracjach kończących się, gdy zostanie osiągnięta zadeklarowana dokładność rozwiązania. Zasadniczą wadą tych metod jest fakt, że metody iteracyjne pozwalają na uzyskanie zbieżnego ciągu przybliżeń rozwiązania tylko wtedy, gdy pierwsze przybliżenie jest dostatecznie bliskie rozwiązaniu, a więc zapewniona jest co najwyżej zbieżność lokalna.

Obszerną klasę zagadnień numerycznych można rozwiązywać metodami z zakresu teorii optymalizacji (Korn i Korn 1983). Rozwiązywanie układu nieliniowych równań algebraicznych postaci:

$$f_i(x_1, x_2, \ldots, x_n) = 0, \quad i = 1,2,\ldots, n \tag{4.8}$$

zastępuje się poszukiwaniem ekstremum (w tym przypadku minimum) odpowiednio skonstruowanego funkcjonału, w zagadnieniach optymalizacyjnych zwanego funkcją celu:

$$F(x_1, x_2, \ldots, x_n) \Rightarrow min \tag{4.9}$$

Zastosowanie metody polegającej na kolejnych iteracjach określonej funkcji celu i sprawdzaniu w każdym kroku iteracyjnym zmniejszania się danego funkcjonału zwykle pozwala na uzyskanie zbieżności globalnej, niezależnie od wyboru punktu startowego (Luenberger 1974).

Funkcja celu może być zbudowana na podstawie normy w przestrzeni euklidesowej funkcji tworzących badany układ równań, w postaci:

$$F(x_1,x_2,...,x_n) \equiv \sqrt{\sum_{i=1}^{n} |f_i(x_1,x_2,...,x_n)|^2}, \tag{4.10}$$

możliwe jest również użycie innych postaci funkcji celu, wykorzystując np. rosnącą funkcję rzeczywistą modułów $|f_i|$ funkcji $f_i = f_i(x_1,x_2,..., x_n)$.

Poszukiwanie minimum danego funkcjonału sprowadza się, na gruncie teorii optymalizacji, do problemu minimalizacji bez ograniczeń, polegającej na konstruowaniu ciągu iteracji w ten sposób, aby przejście do następnego kroku wynikało z minimalizacji funkcji liczbowej zmiennych, przez znalezienie kierunku spadku. Wykorzystywane są dwie grupy metod: poszukiwań prostych (metody bezpośrednie) i metody spadku (Cea 1978). Pierwsza grupa metod jest stosowana w przestrzeniach skończenie wymiarowych i w odróżnieniu od grupy drugiej nie wykorzystuje się pochodnych badanej funkcji.

Stosowanie dostępnych algorytmów optymalizacyjnych powinno być poparte sprawdzeniem istnienia i jednoznaczności rozwiązania (zbieżności metody w zastosowaniu do badanego funkcjonału). Odpowiednie dowody zbieżności opierają się na podstawowym, w tym zakresie, twierdzeniu o odwzorowaniu zwężającym (Luenberger 1974). Dowód zbieżności algorytmu, wykorzystującego metody bezpośrednie poszukiwania minimum można znaleźć w (Cea 1978). Odpowiednie twierdzenie oparte jest na dość mocnym założeniu – badana funkcja musi być analityczna – co w odniesieniu do problemów technicznych nie jest znaczącym ograniczeniem, bowiem na ogół funkcje tworzące model matematyczny są dostatecznie regularne.

Spośród wielu dostępnych metod optymalizacyjnych wybrano metodę Rosenbrocka, należącą do grupy metod poszukiwań prostych. W tym wyborze kierowano się analizą porównawczą metod poszukiwania minimum bez ograniczeń, a także dostępnością algorytmów poszczególnych modułów tej metody (Szymanowski 1984). Zasada działania algorytmu zastosowanej metody polega (Findeisen i in. 1980) na realizacji kolejnych kroków iteracyjnych (obliczania wartości funkcji celu), wykonywanych najpierw lokalnie, na niewielkim obszarze określoności funkcji, w n wzajemnie ortogonalnych kierunkach

(n jest liczbą zmiennych badanej funkcji). Przejście do następnego obszaru poszukiwań ma miejsce wtedy, gdy przynajmniej w jednym z badanych kierunków uzyskano wynik pomyślny (zmniejszenie wartości funkcji celu). Ustalenie właściwego kierunku poszukiwań powoduje zwiększenie długości kolejnego kroku iteracji, natomiast wynik niepomyślny oznacza powrót do poprzedniego punktu i zmniejszenie długości kroku. Istota metody Rosenbrocka sprowadza się do tego, że wybrana na początku obliczeń baza ortogonalnych kierunków poszukiwań, utworzona z wersorów układu kartezjańskiego n współrzędnych może zostać obrócona, tworząc nowy układ współrzędnych. Dzieje się tak, jeżeli wykonanie kolejnych kroków próbnych, we wszystkich kierunkach bazy wyjściowej nie prowadzi do zmniejszenia wartości funkcji celu. Algorytm obrotu układu współrzędnych jest zabezpieczeniem w przypadku, gdy badana funkcja nie jest dostatecznie regularna, co mogłoby prowadzić do zatrzymywania działania algorytmu bez osiągnięcia minimum (Cea 1978). Bardziej szczegółowy opis metody znaleźć można w (Findeisen i in. 1980), a algorytmy poszczególnych modułów procedury minimalizacyjnej w (Szymanowski 1984).

W celu zastosowania opisanej metody rozwiązania układ n równań (gdzie n jest równe liczbie stref), który tworzy model matematyczny przepływów powietrza, przekształcany jest w funkcję celu według relacji 4.10:

$$F(p_{x1}, p_{x2}, \cdots p_{xn}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} f_i(p_{x1}, p_{x2}, \cdots p_{xn})^2}\,, \tag{4.11}$$

gdzie:

$$f_i(p_{x1}, p_{x2}, \cdots p_{xn}) = \left(\sum_{j=1}^{s} \dot{V}_{inf_j} - \dot{V}_D - \dot{V}_w \right)_i\,, \quad i=1,2,\ldots n$$

oznacza równanie bilansu strumieni objętości powietrza dla i-tej strefy.

4.5. Przebieg obliczeń

Przeprowadzenie symulacji musi być poprzedzone wprowadzeniem danych wejściowych, umożliwiających stworzenie modelu zastępczego badanego obiektu oraz danych klimatycznych, dla których mają być przeprowadzone obliczenia. W przypadku typowego budynku wielorodzinnego o powtarzalnych kondygnacjach i kształcie prostopadłościanu większość danych konstrukcyjnych jest powtarzalna, co ułatwia przygotowanie symulacji. Dane niezbędne do obliczeń są następujące:

a) Ogólny opis budynku:
   - wymiary budynku,

- liczba kondygnacji,
- liczba mieszkań na każdym piętrze,
- wysokość jednej kondygnacji,
- liczba stron (ścian) budynku, na których rozmieszczone są okna,
- maksymalna liczba okien na każdej deklarowanej ścianie budynku,
- kubatura poszczególnych mieszkań (stref obliczeniowych).

b) Opis okien i drzwi:
   - okna w poszczególnych mieszkaniach: całkowita długość szczelin, charakterystyka szczelności, współrzędne lokalizacji na poszczególnych ścianach budynku,
   - okna w klatce schodowej: dane jak wyżej,
   - brama budynku: całkowita długość szczelin, charakterystyka szczelności,
   - drzwi pomiędzy mieszkaniami a klatką schodową: całkowita długość szczelin, charakterystyka szczelności.

c) Dane klimatyczne: temperatura powietrza, prędkość i kierunek wiatru.

Wartość temperatury powietrza wewnątrz budynku jest standardowo deklarowana w strefach obliczeniowych jako jednakowa (np. zgodnie z Polską Normą (PN-82/B-02402)), istnieje również opcja pozwalająca na zróżnicowanie temperatur w poszczególnych mieszkaniach.

Dane meteorologiczne mogą być wprowadzane w trybie konwersacyjnym, po uruchomieniu programu lub też czytane z zewnętrznego zbioru, w zależności od wyboru opcji przez użytkownika. Pierwsza możliwość jest wygodna przy przeprowadzaniu pojedynczych symulacji, dla chwilowych ustalonych wartości klimatu zewnętrznego. Wykonywanie obliczeń dla dłuższego czasu, z krokiem czasowym definiowanym częstością notowań meteorologicznych, wymaga przygotowania odpowiedniego zbioru danych w pliku tekstowym. W podstawowej wersji programu założono powtarzalność danych, dotyczących zarówno wymiarów otworów okiennych, jak i ich szczelności, jednak możliwy jest również zindywidualizowany opis każdego okna i drzwi mieszkań w badanym budynku.

W programie wyróżnić można moduły obliczeń pomocniczych, niezbędnych do budowy poprawnego modelu przepływów powietrza. Obliczenia te dotyczą właściwego odwzorowania oddziaływania wiatru zarówno jego lokalnej prędkości, jak i ciśnienia indukowanego na poszczególnych ścianach budynku.

d) Rzeczywista prędkość wiatru.

W obliczeniach naporu wiatru na ściany budynku należy wziąć pod uwagę, że rzeczywista prędkość wiatru różni się od referencyjnych notowań meteorologicznych, w zależności od klasy terenu, gdzie zlokalizowano budynek oraz od charakteru zabudowy. W programie zastosowano wzór przeliczeniowy zalecany przez British Standards Institute (Liddament 1986, Orme 1999) z możliwością wyboru charakteru terenu, gdzie zlokalizowany jest obiekt. W obliczeniach uwzględniany jest również pionowy gradient prędkości wiatru na ścianie nawietrznej budynku:

$$w = w_r \cdot c \cdot h^k, \tag{4.12}$$

gdzie: w_r – prędkość referencyjna wiatru (notowania stacji meteorologicznej),

c, k – stałe związane z charakterystyką terenu i otoczenia budynku,

h – wysokość umiejscowienia interesującego punktu nas ścianie budynku.

e) Współczynnik oddziaływania wiatru C_p.

Współczynnik konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru obliczany jest w każdym kroku symulacji dla danego kierunku wiatru dla wszystkich (zadeklarowanych w opisie budynku) lokalizacji poszczególnych okien i drzwi balkonowych. Wykorzystano zależność współczynnika C_p od geometrii budynku, kąta napływu wiatru oraz współrzędnych lokalizacji okna, przez które zachodzi infiltracja dla określonej ściany budynku. Relacja ta opracowana została na podstawie regresji nieliniowej wyników badań eksperymentalnych, dla ponad 5000 pomiarów (Swami i Chandra 1988). W literaturze znaleźć można potwierdzenie zgodności tej relacji z danymi eksperymentalnymi (Grosso 1992).

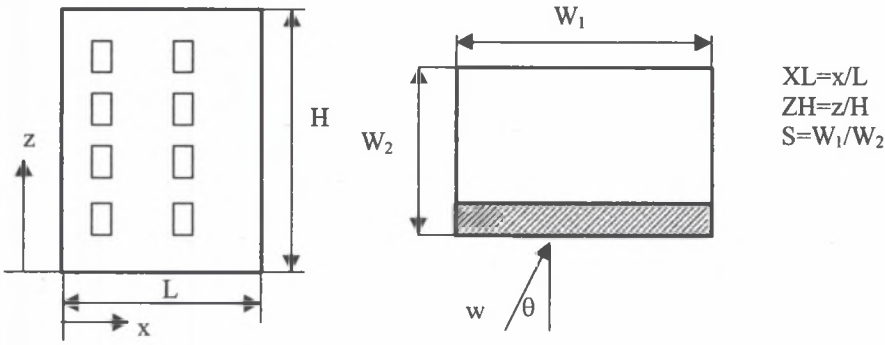
Obliczanie współczynnika C_p prowadzone jest na podstawie wzoru, który ma następującą postać (Swami i Chandra 1988):

$$\begin{aligned} C_p = {} & a_0 + a_1 \cdot \theta + a_2 \cdot \cos(2\theta) + a_3 \cdot ZH \cdot \sin(\theta) \cdot S^{0,169} + a_4 \cdot \cos(2\theta) \cdot S^{0,279} + a_5 \cdot \sin(2\theta) + \\ & + a_6 \cdot ZH \cdot \cos(\theta) + a_7 \cdot \cos(XR) + a_8 \cdot \cos(XR \cdot \theta) + a_9 \cdot \cos(XR \cdot \theta) \cdot S^{0,245} + \\ & + a_{10} \cdot ZH \cdot \cos(\theta) + a_{11} \cdot XR \cdot \sin(\theta) + a_{12} \cdot XL + a_{13} \cdot \cos(XR) \cdot S^{0,85} \end{aligned} \tag{4.13}$$

gdzie: a_1 - a_{13} – współczynniki regresji; ich wartości – w zależności od wysokości budynku – znaleźć można w (Swami i Chandra 1988);

θ – kąt napływu wiatru, rad;

pozostałe oznaczenia - jak na rys. 4.2.



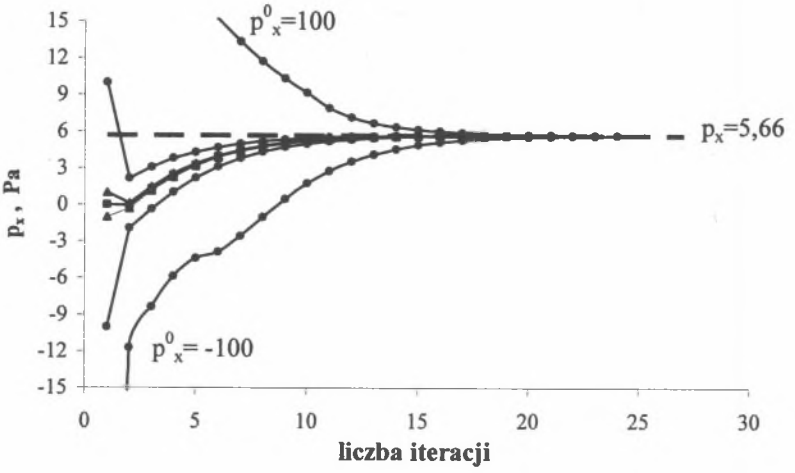
Rys. 4.2. Interpretacja charakterystycznych wymiarów i parametrów koniecznych do obliczeń C_p (wzór 4.13)
Fig. 4.2. Interpretation of characteristic dimensions and parameters necessary for calculation of the C_p (Eq. 4.13)

Wartość sumaryczna ciśnienia wywołanego oddziaływaniem wiatru i wyporem termicznym jest obliczana dla każdego otworu okiennego zdefiniowanego w danych wejściowych.

Na podstawie danych wejściowych i obliczenia rozkładu ciśnienia, zapisywane są wszystkie zidentyfikowane strumienie objętości powietrza wentylacyjnego, tworzące równanie bilansu (równanie 4.7) dla każdej strefy obliczeniowej. Niewiadomą, w każdym równaniu, jest wartość ciśnienia w danej strefie (p_{xi}), wynikająca z ustalenia warunków przepływu. Uzyskany układ równań zastępowany jest odpowiadającą mu funkcją n-zmiennych, gdzie n – liczba stref obliczeniowych (równanie 4.11), a niewiadome wartości ciśnień p_x w strefach obliczane są z warunku minimalizacji takiej funkcji celu.

Procedura poszukiwania minimum funkcji celu działa na podstawie algorytmu Rosenbrocka (opisanego powyżej). Podobnie jak w każdej procedurze iteracyjnej, konieczne jest zadanie wartości początkowych zmiennych – tutaj wartości ciśnienia indukowanego w strefach obliczeniowych. Przeprowadzone własne eksperymenty numeryczne pokazały, że wartości startowe p_x^0 nie wpływają na wartości rozwiązania, odległość wartości początkowych od rozwiązania wpływa jedynie na liczbę niezbędnych iteracji, nie wpływa to jednak znacząco na czas obliczeń. Rysunek 4.3. pokazuje zbieżność iteracji dla jednej ze stref obliczeniowych, przy różnych zadanych wartościach początkowych zmiennej niezależnej funkcji celu. Można zauważyć, że niezależnie od zadanej wartości początkowej osiągana jest wartość rozwiązania (tutaj: p_x = 5,66 Pa) przy porównywalnej liczbie kroków iteracji (ok. 15-17), z wyjątkiem mało realistycznej wartości startowej p_x = 100 Pa, gdzie liczba iteracji

przekracza 25. W przeprowadzanych symulacjach przyjęto zerowe wartości początkowe poszukiwanych ciśnień.



Rys. 4.3. Ilustracja zbieżności procesu iteracji dla różnych wartości początkowych rozwiązania
Fig. 4.3. Illustration of the iteration process convergence for different starting values

Dokładność obliczeń determinowana jest błędem wyznaczania minimum funkcji celu. W algorytmie Rosenbrocka, poza standardowo rozumianą dokładnością obliczeń ε, definiowaną jako różnica wyników dwóch kolejnych iteracji, konieczne jest ustalenie maksymalnej liczby kroków iteracyjnych dla danego kierunku poszukiwań oraz globalne ograniczenie liczby iteracji. W obliczeniach przyjęto $\varepsilon = 10^{-8}$, liczbę iteracji dla bieżącego kierunku poszukiwań ustalono jako równą 30, a maksymalną liczbę iteracji ograniczono do 1000. Zarówno dane literaturowe (Findeisen i in. 1980), jak i własne eksperymenty numeryczne potwierdzają trafność takich ograniczeń parametrów symulacji.

Wyniki symulacji zapisywane są w plikach tekstowych. W wersji standardowej dla każdego kroku obliczeń podawane są następujące wielkości:

- dane klimatu zewnętrznego,
- strumienie objętości powietrza infiltrującego do każdej strefy obliczeniowej,
- przepływy powietrza pomiędzy strefą a klatką schodową,
- przepływy kanałami wentylacyjnymi.

Wszystkie wartości strumieni objętości powietrza podawane są w m^3/h. Możliwe jest również wyprowadzenie innych, obliczanych podczas symulacji wielkości, np. współczynników konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru, rozkładu ciśnienia na

poszczególnych ścianach badanego obiektu, a także przepływy powietrza przez każde, zadeklarowane w opisie budynku, okno.

Zbudowany program symulacyjny umożliwił przeprowadzenie wielu badań i eksperymentów numerycznych w budynkach wielorodzinnych o różnorodnej strukturze wewnętrznej. Uzyskane wyniki symulacji dostarczyły informacji o przepływach powietrza wentylacyjnego w zdefiniowanych strefach obliczeniowych budynków dla zróżnicowanych warunków meteorologicznych.

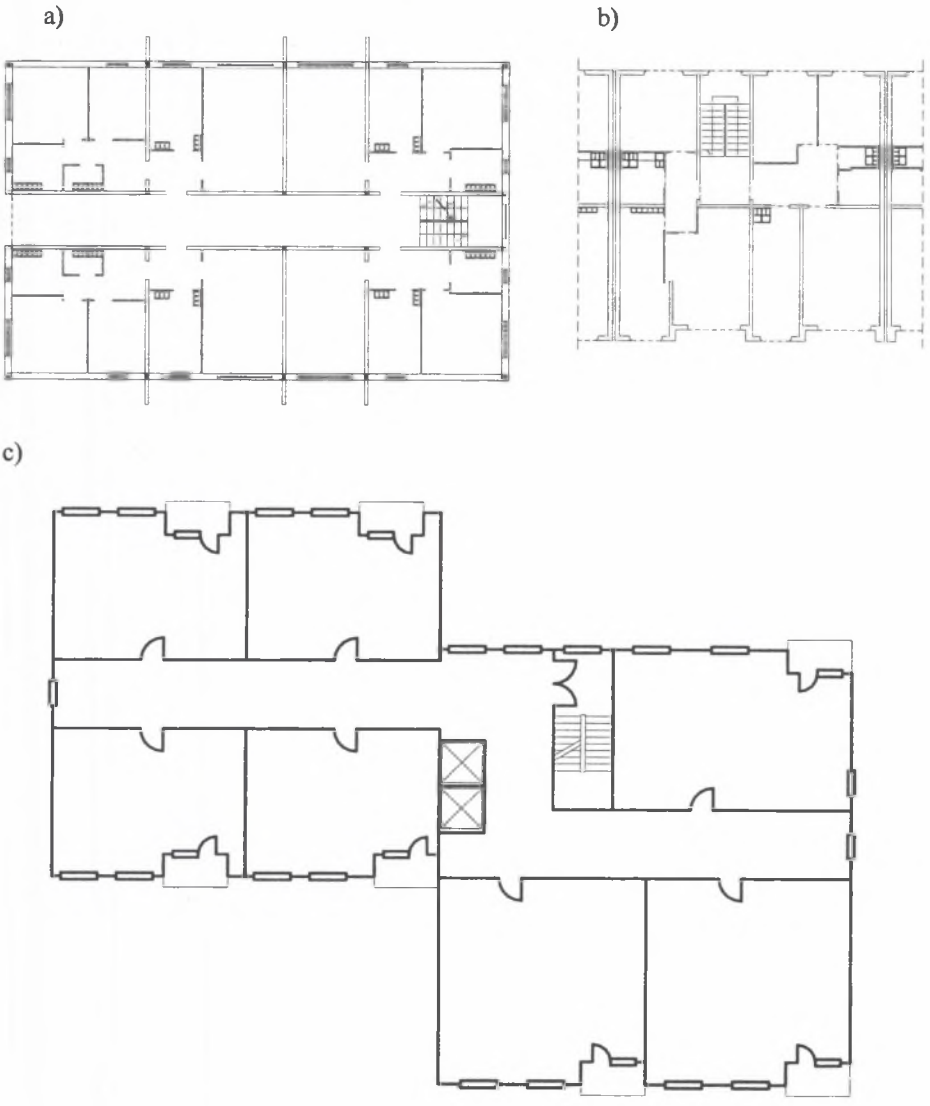
5. OBLICZENIA SYMULACYJNE

Program symulacyjny *Multiven* opracowano dla realizacji wielu prac naukowo-badawczych, ekspertyz (Baranowski i in. 1987, Nantka i Baranowski 1993, Baranowski 1993a, b, 1994a, b), projektów badawczych (Baranowski 1988, 2002). Wykorzystano go również w międzynarodowych programach badawczych, w których własne wyniki symulacji zweryfikowano innymi programami symulacyjnymi, a także wykonano bezpośrednie pomiary wymiany powietrza (Baranowski 1999, 2001). W dużej części obliczenia dotyczyły budynków wielorodzinnych, 5-kondygnacyjnych, ponieważ w krajowym budownictwie ten typ budynków jest dominujący, w nich też najczęściej stosowany jest system wentylacji naturalnej. Symulacje przeprowadzono także dla budynków wyższych (do 10 kondygnacji), także wieloklatkowych, co wymagało uwzględnienia poziomych przepływów korytarzami łącznikowymi. Niektóre typy budynków, będące przedmiotem symulacji, przedstawiono na rys. 5.1, prezentując rzuty kondygnacji powtarzalnych.

Większość prezentowanych dalej wyników symulacji i ich analiz jest efektem zrealizowanych prac badawczych. Dużą jednak liczbę symulacji wykonano dodatkowo w celu usystematyzowania wpływu poszczególnych czynników, warunkujących infiltrację na przepływy powietrza wentylacyjnego.

5.1. Jakościowa analiza wpływu czynników warunkujących infiltrację powietrza

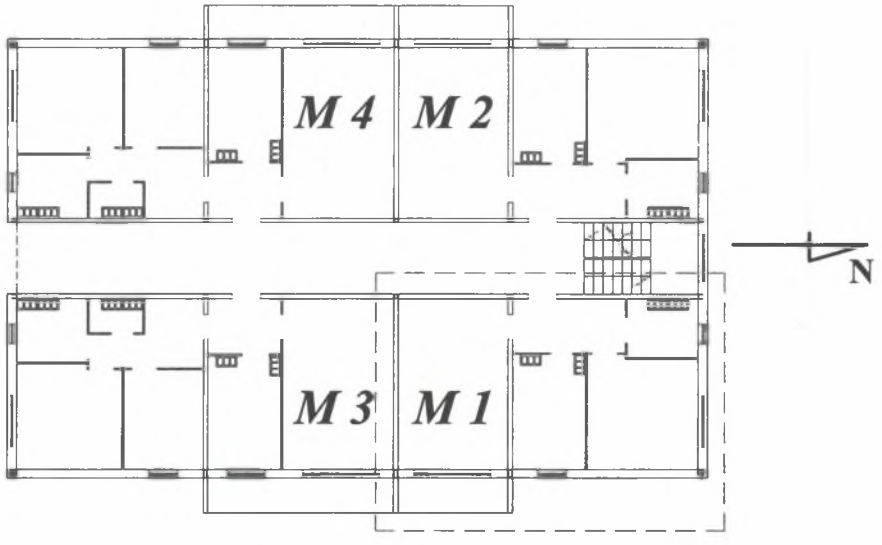
Analiza podstawowych – w obliczeniach infiltracji powietrza – równań (wzory 4.1-4.4) wiążących czynniki klimatu zewnętrznego nie daje, z uwagi na silnie nieliniową postać, czytelnego obrazu ich wpływu na ilość infiltrującego powietrza. Zauważyć należy, że o ile efekt wyporu cieplnego, wynikający z różnicy temperatury powietrza wewnątrz i na zewnątrz strefy obliczeniowej, jest łatwy do ustalenia, to oddziaływanie wiatru zależy nie tylko od jego prędkości, ale również od kierunku napływu, a więc istotna jest lokalizacja okien w rozpatrywanej strefie lub, inaczej – struktura rozplanowania mieszkań na danej kondygnacji budynku. Model wielostrefowy zastosowany w obliczeniach symulacyjnych stanowi sieć powiązań przepływów powietrza pomiędzy zadeklarowanymi węzłami sieci – strefami obliczeniowymi. Zmiana jakiejkolwiek wielkości w jednej strefie wywołuje reakcję w innych strefach obliczeniowych, co znacznie utrudnia prowadzenie analiz wpływu poszczególnych czynników na proces wentylowania mieszkań.



Rys. 5.1. Rzuty kondygnacji niektórych budynków wielorodzinnych będących obiektem symulacji: a) wolnostojący, b) w zabudowie szeregowej, c) układ szeregowy z korytarzami łączącymi (zaznaczono tylko całe mieszkania)

Fig. 5.1. Floor plans of some multi-family buildings being the object of simulation: a) detached, b) terraced, c) terraced with connecting corridors (whole flats shown only)

Budowa programu symulacyjnego umożliwia wprowadzanie danych wejściowych, zgodnie z potrzebami użytkownika. W odniesieniu do parametrów klimatu zewnętrznego możliwe jest podanie zbioru rzeczywistych notowań meteorologicznych pojedynczych wartości danych pogodowych, a także zestawu danych uporządkowanych rosnąco lub malejąco, z określonym krokiem zmienności danego parametru. Dla dokonania oceny wpływu poszczególnych czynników warunkujących przepływy powietrza wentylacyjnego wykonano symulacje, w których zmieniano różnicę temperatury powietrza na zewnątrz budynku i w strefach obliczeniowych, w zakresie od 5 do 40 K (co 5 K) oraz prędkość wiatru od 0 do 10 m/s (co 1 m/s), dla kierunków napływu od 0°do 360° (co 45°). Obliczenia przeprowadzono dla wszystkich kombinacji tych parametrów, a uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę wpływu poszczególnych czynników na proces wymiany powietrza. Analiza taka jest w znacznym stopniu ograniczona, bowiem z uwagi na nieliniowość równań przepływu powietrza nie jest możliwe zastosowanie reguł liniowej superpozycji, niemniej jednak uzyskać można przybliżony obraz oddziaływania klimatu zewnętrznego na proces infiltracji.



Rys. 5.2. Rzut parteru budynku 5 – kondygnacyjnego (linią przerywaną zaznaczono pion mieszkań, których dotyczą wyniki symulacji przedstawione w tym rozdziale)

Fig. 5.2. Ground floor plan of a 5 – storey building (the high-rise vertical run of the flats which the simulation results presented in this chapter concern was marked by a dashed line)

Obiektem większości prezentowanych symulacji był typowy w krajowych warunkach, 5-kondygnacyjny budynek wielorodzinny, wykonany w technologii wielkiej płyty, z tradycyjną drewnianą stolarką okienną (rys. 5.2).

Rozplanowanie poszczególnych, powtarzalnych kondygnacji, na każdej znajdowały się 4 mieszkania (oznaczone na rys. 5.2 symbolami M1 – M4), dawało możliwość zbadania przepływów powietrza wentylacyjnego, w zależności od orientacji względem stron świata (a więc i kierunku napływu wiatru) okien poszczególnych mieszkań.

Ważnym parametrem wpływającym na infiltrację powietrza jest szczelność powłoki budynku, w szczególności szczelin stolarki okiennej. Zestawienia stosowanych w różnych krajach współczynników infiltracji, wynikających z norm, zaleceń czy praktyki projektowej mogą być dobrym źródłem danych niezbędnych do obliczeń symulacyjnych (Orme i in. 1994). Równie wartościowym źródłem są publikowane wyniki pomiarów elementów wyposażania budynków, w tym okien i drzwi, szczególnie te, podawane przez znane ośrodki badawcze. Uśrednione wyniki badań przeprowadzonych przez British Research Establishment zamieszczono w (Orme i in. 1994). Więcej danych, które pochodzą z różnych źródeł publikuje Liddament (1986). Według tego źródła średni współczynnik infiltracji okien uszczelnionych wynosi ok. 0,5 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$, a okien nieszczelnych – 2,67 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$.

Pomiary własne (Baranowski, Gierczycka, Pudełko 2003) wykonane w mieszkaniu ze standardową, dodatkowo nieuszczelnianą stolarką drewnianą, dały wyniki na poziomie ok. 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$. Współcześnie wiele budynków jest modernizowanych i okna wymieniane są na nowe, wobec czego przeprowadzono również symulacje przy założeniu dobrej szczelności okien, na poziomie 0,1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$.

Model zastępczy budynku pozwala na uwzględnienie w bilansach przepływu powietrza przez klatkę schodową oraz pomiędzy mieszkaniami a klatką schodową przez szczeliny drzwi wejściowych. Przepuszczalność powietrzną drzwi mieszkań założono również na podstawie dostępnych w literaturze danych pomiarowych (Liddament 1986, Nantka 1990, Baranowski, Gierczycka, Pudełko 2003), przyjmując na poziomie 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$. Wykonano również symulacje, mające na celu zbadanie wpływu szczelności okien mieszkań i drzwi wejściowych, zmieniając współczynniki infiltracji dla okien od 0,1 do 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$, a dla drzwi mieszkań od 1 do3 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$.

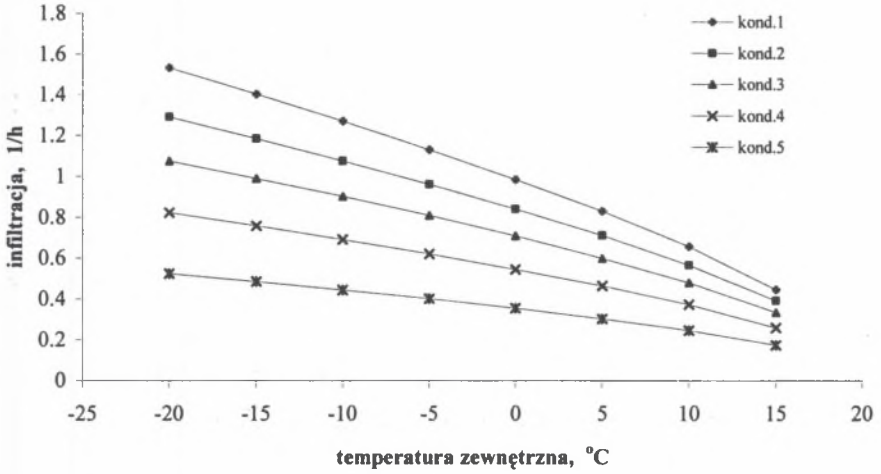
Istotnymi z punktu widzenia oddziaływania wiatru na infiltrację powietrza czynnikami są tzw. klasa terenu oraz lokalne przeszkody w bezpośrednim otoczeniu badanego obiektu. W obliczeniach założono, że badane budynki zlokalizowane są w zabudowanym obszarze miejskim.

We wszystkich obliczeniach oraz prezentacjach wyników przyjęto następującą konwencję, co do kierunków przepływu powietrza wentylacyjnego oraz kierunku wiatru:

- znak dodatni przypisany jest napływowi powietrza infiltrującego do mieszkania z otoczenia budynku, przepływowi z klatki schodowej do mieszkania oraz wypływowi przewodem wentylacyjnym z mieszkania poza budynek;
- ujemna wartość danego strumienia przepływu powietrza oznacza, że przepływ odbywa się w kierunku przeciwnym, niż zdefiniowano powyżej. Wprowadzono również pojęcie eksfiltracji oznaczającej wypływ powietrza z mieszkania do otoczenia – ma ona wartość dodatnią, o ile przepływ odbywa się we wskazanym kierunku;
- kierunek napływu wiatru podaje się w stopniach (od 0^{o} do 360^{o}), mierząc go od kierunku geograficznego północnego, zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara.

5.2. Wpływ różnicy temperatury powietrza

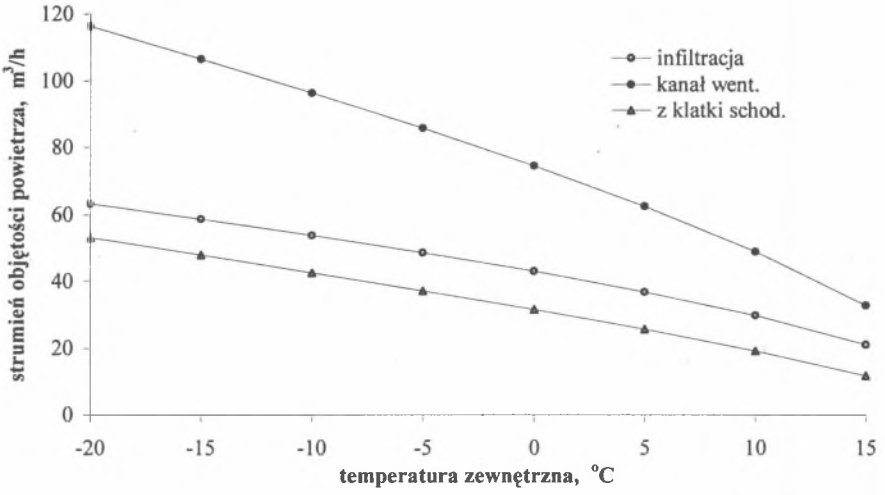
Różnica gęstości powietrza wewnątrz i na zewnątrz budynku ma zasadnicze znaczenie dla prawidłowego działania wentylacji naturalnej. Taki sposób wentylowania realizowany jest w budynkach wielorodzinnych za pomocą indywidualnych przewodów wentylacyjnych, odprowadzających zużyte powietrze poza budynek, zwykle powyżej poziomu dachu. Powstający wypór cieplny jest wprost proporcjonalny do długości kanału wentylacyjnego i znacznie maleje na najwyższych kondygnacjach budynku. Na rys. 5.3 przedstawiono wyniki symulacji infiltracji wyrażonej liczbą wymian na godzinę dla zaznaczonego pionu mieszkań budynku 5-kondygnacyjnego. Założono, że w każdej strefie temperatura powietrza wynosi 20°C, współczynnik infiltracji przez okna jest równy 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$, a prędkość wiatru – 0 m/s. Obliczone strumienie objętości powietrza infiltrującego przeliczono na liczbę wymian. Można zauważyć, że pomimo dużej wartości współczynnika infiltracji napływ świeżego powietrza na kondygnacji 5. jest zbyt mały dla zapewnienia poprawnej wentylacji mieszkań.



Rys. 5.3. Infiltracja powietrza w wybranym pionie mieszkań w zależności od sił wyporu cieplnego

Fig. 5.3. Air infiltration in the chosen vertical run of flats depending on the stack effect

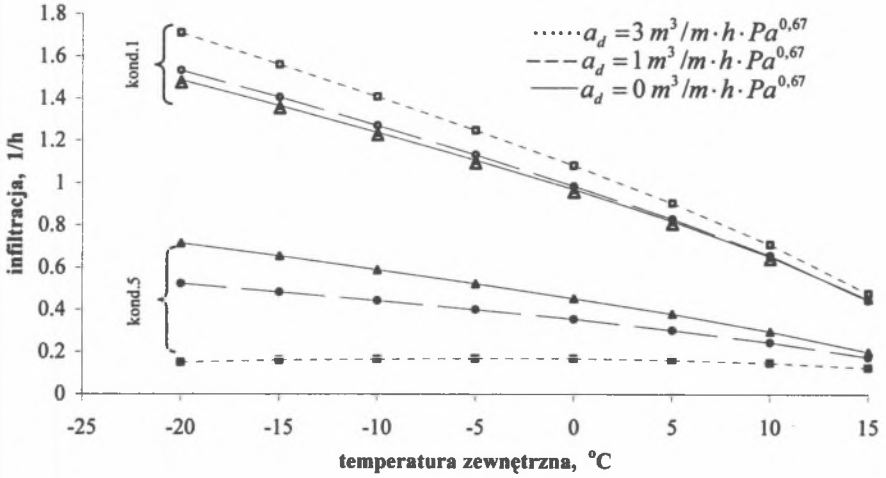
Często przyjmuje się, że miarą wymiany powietrza w mieszkaniach jest ilość powietrza, które jest usuwane przewodem wentylacyjnym. Taki sposób oceny wentylacji daje wprawdzie informację o wymianie powietrza w mieszkaniu, jednak właściwa liczba wymian powietrza nie gwarantuje odpowiedniej jakości powietrza napływającego do obserwowanej strefy. Usuwane z mieszkania powietrze może nie tylko być zastępowane przez powietrze z otoczenia budynku, infiltrujące przez szczeliny okien, ale również może wpływać do mieszkania z klatki schodowej. Powietrze w klatce schodowej jest mieszaniną powietrza świeżego, infiltrującego bramą budynku i oknami klatki schodowej oraz zużytego powietrza, usuniętego z mieszkań na niższych kondygnacjach. Na rys. 5.4 przedstawiono wszystkie strumienie objętości powietrza przepływające przez badaną strefę (mieszkanie na 5. kondygnacji). Można zauważyć, że z klatki schodowej wpływa do mieszkania prawie taki sam strumień objętości powietrza, jak infiltrujący z zewnątrz budynku, a więc jakość powietrza wpływającego do strefy może być niezadowalająca.



Rys. 5.4. Przepływy powietrza wentylacyjnego w mieszkaniu na 5 kondygnacji
Fig. 5.4. Ventilating air flows in the flat on the floor 5

Przyjęty model sieciowy budynku zakłada – zgodnie z rzeczywistością – powiązania stref obliczeniowych (mieszkań) z klatką schodową i możliwość przepływów powietrza tą drogą. Klatka schodowa stanowi naturalny komin, zasilany dodatkowo powietrzem infiltrującym oknami klatki i bramą wejściową budynku. Tworzący się rozkład ciśnienia pomiędzy mieszkaniami na poszczególnych kondygnacjach i klatką schodową wymusza przepływy powietrza przez nieszczelności drzwi mieszkań, co skutkuje napływem powietrza z klatki schodowej do mieszkań na wyższych kondygnacjach. Wymiana powietrza, mierzona strumieniem objętości powietrza wypływającego kanałami wentylacyjnymi, może więc wskazywać na właściwą liczbowo wymianę, jednakże jakość powietrza jest wątpliwa z uwagi na napływ powietrza z klatki schodowej, w dużej części pochodzącego z mieszkań na niższych kondygnacjach. Zwiększenie oporów przepływu powietrza pomiędzy mieszkaniami i klatką schodową (uszczelnienie drzwi do mieszkań) może zwiększyć infiltrację powietrza na wyższych kondygnacjach. Na rys. 5.5 dokonano porównania infiltracji powietrza do mieszkań na 1 i 5 kondygnacjach dla trzech wariantów szczelności drzwi do mieszkań:

- brak przepływu pomiędzy mieszkaniem a klatką schodową (linia ciągła),
- uszczelnione drzwi do mieszkania (linia przerywana),
- drzwi standardowe, nieuszczelnione (linia punktowa).



Rys. 5.5. Wpływ szczelności drzwi wejściowych mieszkania na wielkość infiltracji
Fig. 5.5. Influence of the airtightness of the main flat door on the air infiltration

Uszczelnienie drzwi zwiększa infiltrację powietrza w mieszkaniach na wyższych kondygnacjach, a nieco zmniejsza na kondygnacji pierwszej. Skrajny przypadek, polegający na budowie modelu zastępczego budynku wielorodzinnego, jako zbioru izolowanych od siebie stref obliczeniowych (mieszkań) jest mało realistyczny i może w obliczeniach infiltracji prowadzić do błędów.

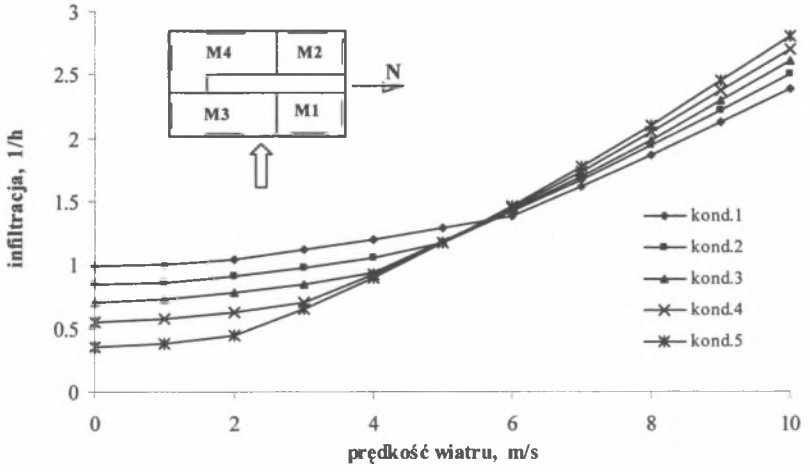
5.3. Wpływ wiatru

Oddziaływanie wiatru może w znaczący sposób wpływać ma funkcjonowanie wentylacji naturalnej zarówno zwiększając infiltrację powietrza, jak i przyczyniając się do zmniejszenia różnicy ciśnienia, wywołującej wypływ powietrza z mieszkania kanałami wentylacyjnymi. W skrajnie niekorzystnych warunkach oddziaływanie wiatru może powodować odwrócenie kierunku przepływu w kanałach wentylacyjnych. Takie przepływy mogą być szczególnie niebezpieczne, w przypadku przewodów odprowadzających spaliny z indywidualnych gazowych podgrzewaczy wody.

Ciśnienie indukowane przez wiatr jest różne na poszczególnych ścianach budynku, a nawet na różnych częściach powierzchni tej samej ściany. Oznacza to pewną trudność w formułowaniu uogólnień, co do sposobu oddziaływania wiatru na przepływy powietrza wentylacyjnego zarówno na poszczególnych kondygnacjach, jak i w poszczególnych mieszkaniach. Ogólnie można stwierdzić, że napływ wiatru powoduje zwiększenie infiltracji

od strony nawietrznej strefy, a zmniejszenie bądź nawet zmianę kierunku przepływu przez okna (eksfiltrację) od strony zawietrznej. Wzrost prędkości wiatru nasila te zjawiska.

Dla zobrazowania wpływu wiatru na infiltrację przeprowadzono symulacje, zakładając ustalony kierunek napływu wiatru przy zmiennych wartościach jego prędkości mierzonych na poziomie dachu budynku. W obliczeniach przyjęto stałą różnicę temperatury powietrza pomiędzy mieszkaniami i otoczeniem (20 K), a współczynnik infiltracji dla okien wynosił 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$. Na rysunku 5.6 przedstawiono zależności strumieni objętości powietrza infiltrującego do wybranego pionu mieszkań, przy napływie wiatru z kierunku 90° od prędkości wiatru.

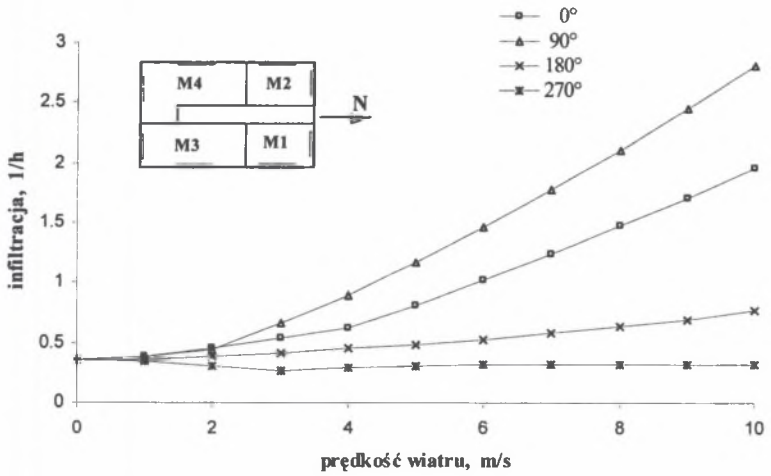


Rys. 5.6. Zależność infiltracji powietrza w pionie mieszkań M1 od prędkości wiatru
Fig. 5.6. Air infiltration in the M1 vertical run of flats versus the wind speed

Obserwuje się zwiększenie infiltracji powietrza wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Charakterystyczny jest, poczynając od pewnej prędkości wiatru, większy przyrost infiltracji na wyższych kondygnacjach budynku. Jest to wynikiem dominującego oddziaływania wiatru na wyższych kondygnacjach – zmniejsza się długość przewodów wentylacyjnych, a więc maleje wypór cieplny, natomiast szybko rośnie (z kwadratem prędkości wiatru) ciśnienie dynamiczne wiatru dla kierunku napływu wiatru na tę ścianę budynku, na której umieszczona jest większa część okien badanego pionu mieszkań. Na piątej kondygnacji zwiększenie infiltracji powietrza zaczyna się już przy prędkości wiatru ok. 2 m/s, dla pozostałych kondygnacji zjawisko to obserwuje się przy 5-6 m/s. Przywołane prędkości wiatru nie są stałe dla każdych warunków – zależą od temperatury zewnętrznej, kierunku wiatru i szczelności

powłoki budynku, a zwłaszcza współczynnika infiltracji okien mieszkań. Można przyjąć, że dominujący wpływ wiatru uwidacznia się, poczynając od trzeciej kondygnacji, przy prędkościach ok. 3-4 m/s.

Powyższe wyniki wskazują, że na najwyższych kondygnacjach budynku warunki wentylowania mieszkań są najmniej korzystne. Mieszkanie na najwyższej kondygnacji jest szczególnie podatne na oddziaływanie wiatru, bowiem wypór cieplny jest niewielki, z uwagi na krótki odcinek przewodu wentylacyjnego. Obraz wpływu kierunku wiatru przedstawiają symulacje wykonane dla kierunków napływu 0°, 90°, 180° i 270°, dla prędkości wiatru od 0 do 10 m/s oraz różnicy temperatury powietrza 20 K. Na rys. 5.7 przedstawiono zależność infiltracji w mieszkaniu na 5 kondygnacji od prędkości wiatru. Okna tego mieszkania usytuowane są na dwóch sąsiednich ścianach budynku, co odpowiada kierunkowi napływu wiatru 0° i 90°.



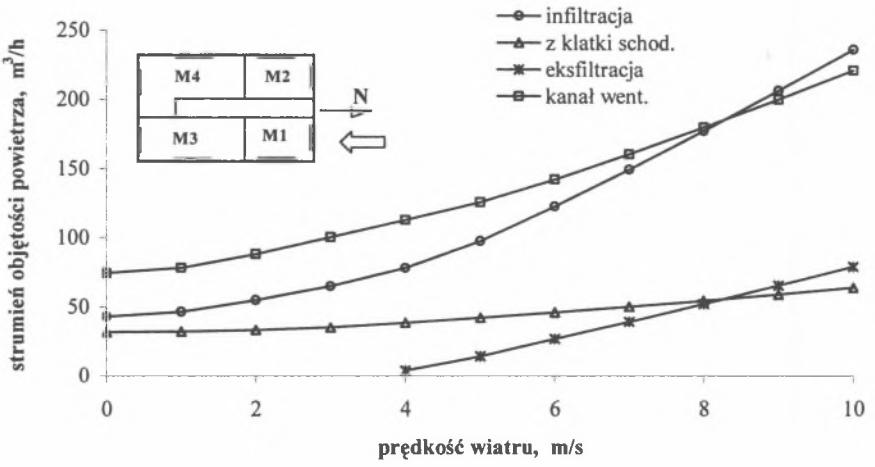
Rys. 5.7. Zależność infiltracji powietrza w mieszkaniu M1 na 5 kondygnacji od prędkości i kierunku wiatru

Fig. 5.7. Air infiltration in the M1 flat on the floor 5 in dependence of the wind speed and direction

Z wykresu wynika oczywista zależność wielkości infiltracji od kierunku napływającego wiatru: przy korzystnym – z punktu widzenia infiltracji – kierunku oddziaływania wiatru obserwuje się wzrost strumienia objętości powietrza infiltrującego wraz ze wzrostem prędkości wiatru. Jeżeli okna zlokalizowane są na ścianie zawietrznej w stosunku do kierunku napływu wiatru, to wówczas wywołane przez wiatr podciśnienie może zmniejszać infiltrację, ten przypadek, na rys. 5.7, odpowiada kierunkowi wiatru 270°.

Dla uzyskania pełnego obrazu wentylowania rozpatrywanej strefy konieczna jest identyfikacja wszystkich strumieni objętości powietrza przepływającego przez mieszkanie.

Na rys. 5.8 przedstawiono wyniki symulacji dla mieszkania w pionie "M1" na piątej kondygnacji budynku, dla kierunku wiatru 0° (północny). Niektóre okna tego mieszkania umieszczone są na ścianie północnej, a więc ten kierunek wiatru sprzyja zwiększeniu infiltracji.

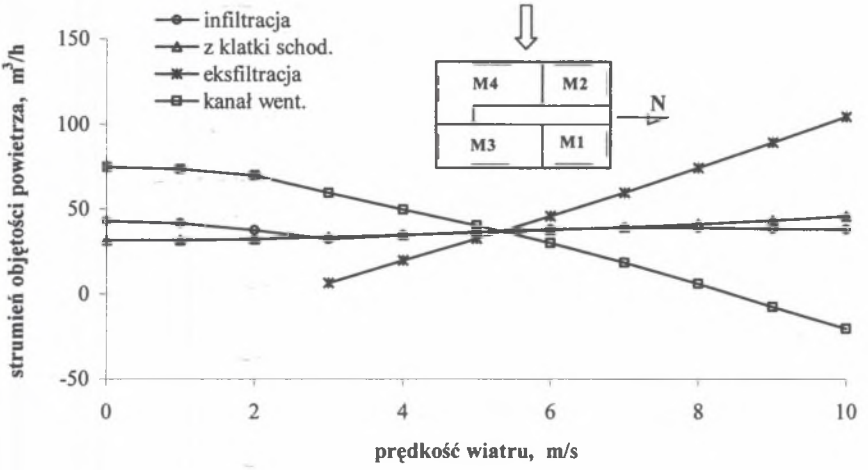


Rys. 5.8. Zależność strumieni objętości powietrza wentylacyjnego w mieszkaniu na 5. kondygnacji od prędkości wiatru, dla kierunku 0°

Fig. 5.8. Dependence of ventilating air volume flow rate in the flat on the floor 5 on the wind speed for the 0° direction

Wyniki symulacji wskazują, że ze wzrostem prędkości wiatru w mieszkaniu z oknami od strony nawietrznej wzrastają wszystkie strumienie objętości powietrza. Poczynając od prędkości wiatru ok. 4 m/s pojawia się eksfiltracja – wypływ powietrza przez okna mieszkania, jednocześnie też wyraźnie zwiększa się infiltracja. Charakterystyczny jest praktycznie niezmienny strumień objętości powietrza napływającego do mieszkania z klatki schodowej.

Dla tego samego mieszkania kierunek napływu wiatru 270° powoduje pogorszenie warunków wentylacji (rys. 5.9): napływ powietrza do mieszkania tylko mniej więcej w połowie zachodzi poprzez infiltrację z zewnątrz – reszta powietrza wpływa do strefy z klatki schodowej. Relacje te nie zależą od prędkości wiatru. Obserwuje się również nieprawidłową pracę kanału wentylacyjnego: ze wzrostem prędkości wiatru maleje strumień objętości powietrza usuwanego tą drogą, a przy większej prędkości wiatru kierunek przepływu odwraca się (tzw. cofka).



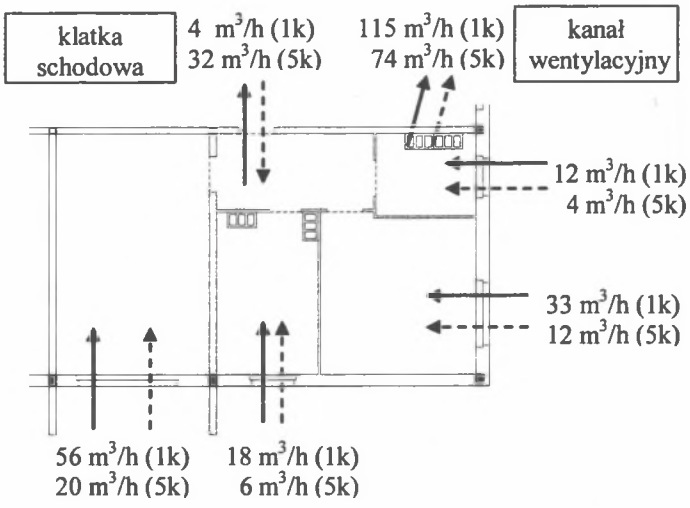
Rys. 5.9. Zależność strumieni objętości powietrza wentylacyjnego w mieszkaniu na 5. kondygnacji od prędkości wiatru, dla kierunku 270°
Fig. 5.9. Dependence of ventilating air volume flow rate in the flat on the floor 5 on the wind speed for the 270° direction

Poczynając od prędkości wiatru 2 m/s szybko wzrasta eksfiltracja powietrza z mieszkania przez okna, zastępując pracę kanału wentylacyjnego. Taki przebieg procesu jest zdecydowanie niewłaściwy, może być także niebezpieczny dla mieszkańców.

Ocena efektywności wentylowania określonej strefy byłaby zdecydowanie dokładniejsza, gdyby znane były wszystkie strumienie objętości powietrza przepływającego przez mieszkanie (zarówno co do wartości, jak i kierunku przepływu). Budowa programu Multiven umożliwia właśnie prowadzenie tego typu szczegółowych analiz składników bilansu tych strumieni powietrza w każdej z deklarowanych stref, jednak w zastosowaniach praktycznych zwykle nie jest to konieczne, a czasem nadmiar uzyskanych wyników obliczeń zaciemnia obraz przeprowadzonych symulacji.

Szczegółowe informacje o wszystkich zidentyfikowanych strumieniach objętości powietrza wentylacyjnego, przepływającego przez analizowaną strefę obliczeniową są

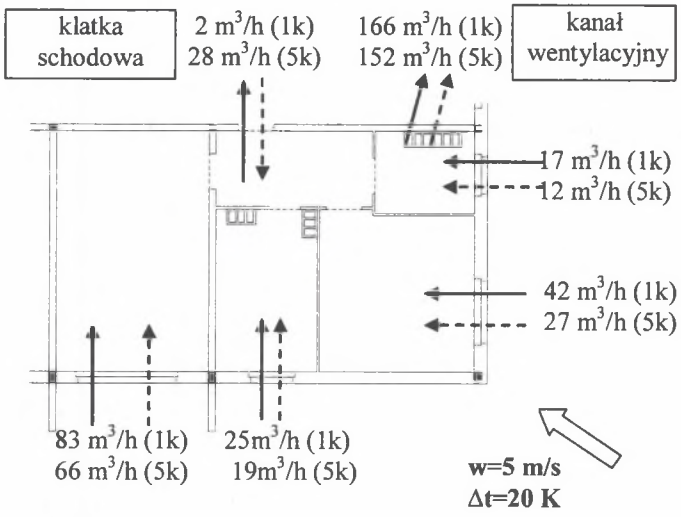
możliwe do uzyskania przez odpowiednią konfigurację modułu prezentacji wyników programu Multiven. Na rysunkach 5.10 i 5.11 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji przepływów powietrza wentylacyjnego w mieszkaniu M1, porównując wielkości i kierunki przepływu powietrza dla tych samych danych klimatycznych na parterze i na piątej kondygnacji (strzałki o liniach przerywanych dotyczą 5. kondygnacji).



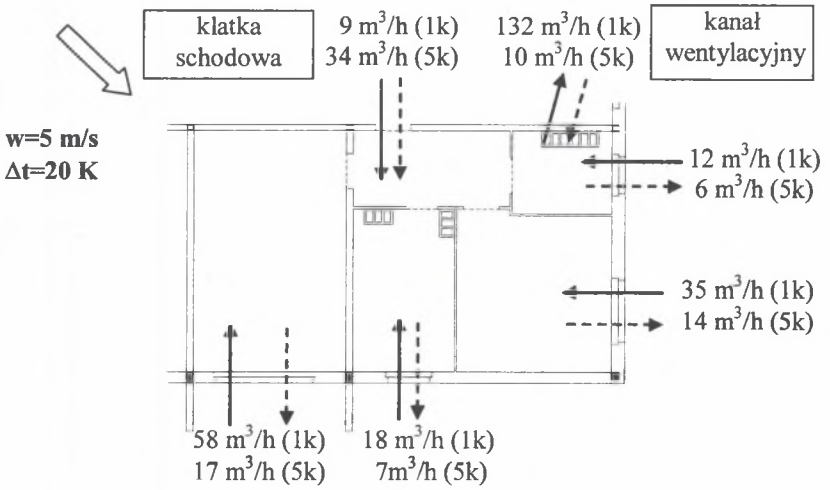
Rys. 5.10. Przepływy powietrza wentylacyjnego w mieszkaniach na 1. i 5. kondygnacjach przy braku oddziaływania wiatru
Fig. 5.10. Ventilating air flows in the flats on the floors 1 and 5 with no wind effect

Wyniki symulacji przedstawione na rys. 5.10 uzyskano przy założeniu, że temperatura otoczenia wynosi 0° C i tylko wypór cieplny wywołuje proces wentylacji mieszkania. Zasadnicza różnica w wentylowaniu mieszkań na 1. i 5. kondygnacjach polega na wyraźnie mniejszych strumieniach objętości powietrza infiltrującego do mieszkania na 5. kondygnacji. Liczba wymian powietrza mierzona właśnie infiltracją wynosi w mieszkaniu na parterze 0,98 w ciągu godziny, a na najwyższym piętrze zaledwie 0,35. Jeżeli miarę liczby wymian powietrza oprzeć na pomiarze wielkości strumienia objętości powietrza odprowadzanego kanałem wentylacyjnym (a jest to stosunkowo łatwy technicznie pomiar), to otrzymamy odpowiednio dla mieszkania na parterze N = 0,95, a na 5. kondygnacji N = 0,6, a więc prawie dwukrotnie lepszy, niż mierzony napływem świeżego powietrza.

a)



b)



Rys. 5.11. Przepływy powietrza wentylacyjnego w mieszkaniach budynku wielorodzinnego na 1. i 5. kondygnacjach przy różnych kierunkach wiatru

Fig. 5.11. Ventilating air flows in the flats of a multifamily building on the floors 1 and 5 for different wind directions

Wymiana powietrza w mieszkaniach na dolnych kondygnacjach jest zwykle realizowana na skutek infiltracji powietrza z otoczenia budynku, a zużyte powietrze wypływa

częściowo na klatkę schodową. W wyższej części budynku znaczące jest oddziaływanie wiatru. Rysunek 5.11 przedstawia obraz wpływu wiatru na wentylację mieszkań dla dwóch przypadków: kierunek napływu wiatru może intensyfikować infiltrację powietrza (rys. 5.11a) lub może być niekorzystny, z punktu widzenia wentylowania mieszkań (rys. 5.11b).

Powyższe przykłady potwierdzają ogólną prawidłowość dotyczącą oddziaływania wiatru: intensyfikacja infiltracji powietrza przez okna na ścianie nawietrznej oraz pogorszenie jej dla okien na ścianie zawietrznej budynku. O ile jednak wzrost infiltracji przy korzystnym kierunku wiatru jest podobny na wszystkich kondygnacjach, to oddziaływanie wiatru od strony zawietrznej może stwarzać duże problemy dla właściwej wentylacji mieszkań na wyższych kondygnacjach. Przypadek przedstawiony na rys. 5.11b pokazuje, że przy prędkości wiatru 5 m/s mieszkanie na 5 kondygnacji jest całkowicie pozbawione napływu świeżego powietrza z zewnątrz i wentylowane jest powietrzem z klatki schodowej. Dodatkowo zagrożenie może stwarzać odwrócony przepływ powietrza w przewodzie wentylacyjnym. Powyższy przypadek dotyczy warunków meteorologicznych stosukowo często spotykanych na wiosnę lub w jesieni, tj. dla niezbyt dużej różnicy temperatury powietrza (tutaj przyjęto, że temperatura zewnętrzna wynosi 0°C) i nieco większej od średniej prędkości wiatru. Ten niekorzystny wpływ wiatru dotyczy oczywiście tylko mieszkań, których okna są na ścianie zawietrznej budynku i dodatkowo podciśnienie indukowane przez wiatr przewyższa różnicę ciśnienia wywołaną wyporem cieplnym.

Pewną poprawę jakości wentylacji mieszkań na wyższych kondygnacjach można osiągnąć przez uszczelnienie drzwi łączących mieszkanie z klatką schodową (por. rys. 5.5).

Przedstawione analizy przepływu powietrza wentylacyjnego w strefie są bardzo obrazowe, pokazują bowiem różnice w jakości wentylowania różnych mieszkań w tej samej chwili. Są one jednak niezbyt przydatne, z punktu widzenia ustalenia bardziej ogólnych wniosków. Wyjątek mogą stanowić wyniki symulacji, np. dla średnich wartości klimatycznych w danym regionie dla sezonu grzewczego lub innych charakterystycznych danych pogodowych.

Rozpatrywanie ustalonych, chwilowych wartości zarówno prędkości, jak i kierunku wiatru jest sensowne tylko z punktu widzenia analiz oddziaływania poszczególnych czynników warunkujących infiltrację, natomiast nie daje podstaw do formułowania opinii o efektywności wentylacji naturalnej. O ile zmienność temperatury powietrza zewnętrznego jest wielkością stosunkowo wolnozmienną, to charakterystyka wiatru zarówno co do prędkości, jak i kierunku podlega dużej zmienności, szczególnie w warunkach miejskiej zabudowy. Zmienność wiatru w cyklu np. godzinowym powoduje, że jego oddziaływanie na

infiltrację powietrza z różnych stron budynku może zmieniać się z podobną okresowością, a więc sensowne jest ustalanie liczby wymian powietrza w poszczególnych mieszkaniach jako wartości średniej dla pewnego czasu (np. w cyklach 8-godzinnych). Charakterystyka wiatru na danym obszarze (średnia prędkość i częstotliwość występowania określonego kierunku wiatru) powinna być brana pod uwagę przy projektowaniu lokalizacji budynku, jego orientacji względem stron świata, z uwagi na rozkład mieszkań na danej kondygnacji, a w szczególności lokalizacji okien danego mieszkania w różnych ścianach budynku. W pewnym stopniu stwarza to możliwość infiltracji powietrza, niezależnie od kierunku napływu wiatru.

5.4. Jednoczesne oddziaływanie wiatru i wyporu cieplnego w sezonie grzewczym

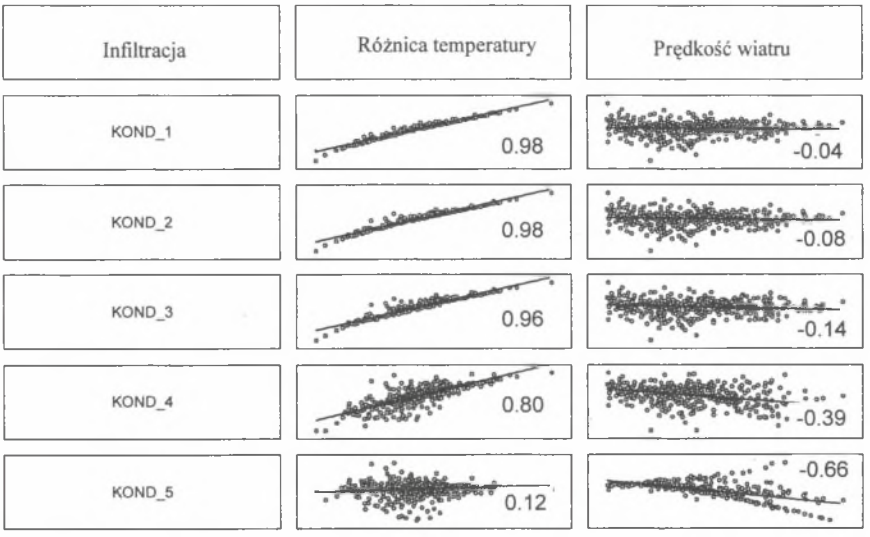
Prosta analiza wpływu klimatu zewnętrznego, a więc zarówno temperatury powietrza, jak i prędkości i kierunku wiatru jest utrudniona, ponieważ, jak pokazano wcześniej, oddziaływanie wiatru przy danej prędkości i kierunku napływu jest inne w każdej zdefiniowanej strefie. Z praktycznego punktu widzenia, dla danej lokalizacji budynku możliwe jest jedynie stwierdzenie, które ze zdefiniowanych w symulacjach stref przy danym kierunku wiatru uzyskają lepsze warunki infiltracji powietrza oraz gdzie te warunki się pogorszą. Oddziaływanie wiatru staje się dominujące, jeżeli maleją siły wyporu cieplnego. Szczególnie dotyczy to najwyższych kondygnacji budynku, gdzie bieżące warunki pogodowe mogą zarówno poprawiać infiltrację powietrza, jak i doprowadzać do eksfiltracji, w zależności od lokalizacji mieszkania względem kierunku napływu wiatru.

Oddziaływanie wiatru jest mniej znaczące na niższych kondygnacjach budynku, gdzie dominują siły wyporu cieplnego, a ciśnienie indukowane przez wiatr w niewielkim stopniu wpływa na wielkość strumieni objętości powietrza infiltrującego. Obserwuje się tutaj monotoniczny wzrost infiltracji powietrza do mieszkań wraz ze zwiększaniem różnicy temperatury powietrza i prędkości wiatru.

Przedstawione przebiegi zmienności infiltracji w funkcji parametrów klimatu zewnętrznego pokazują, że miarodajne informacje, co do jednoczesnego wpływu oddziaływania wyporu cieplnego i wiatru można uzyskać analizując dłuższe przebiegi czasowe. Przydatne dla takich ocen są metody statystyczne, pozwalające na poszukiwanie związków korelacyjnych pomiędzy interesującymi parametrami klimatu a wielkością infiltracji powietrza.

Na rys. 5.12 przedstawiono wybrane wyniki korelacji dla obliczeń symulacyjnych klimatu sezonu grzewczego. Wykres przedstawia związek pomiędzy infiltracją powietrza a różnicą temperatur oraz prędkością wiatru dla pięciu kondygnacji pionu mieszkań M1.

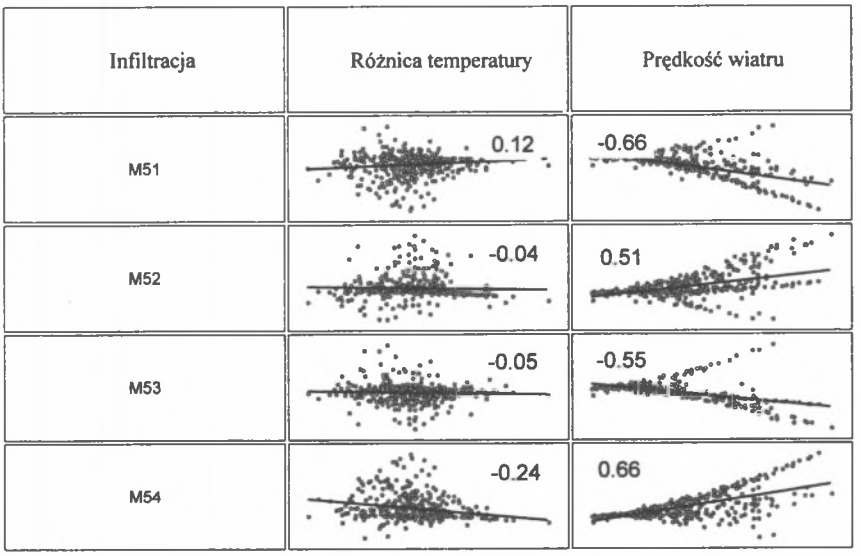
Zauważyć można mocną korelację infiltracji z występującą różnicą temperatur na niższych kondygnacjach oraz brak korelacji z prędkością wiatru. Obraz ten zmienia się już od czwartej kondygnacji, gdzie maleje związek z temperaturą powietrza, a wzrasta z prędkością wiatru. Jest to szczególnie widoczne na ostatniej kondygnacji (liczby w poszczególnych polach oznaczają współczynniki korelacji (w sensie Pearsona) dla odpowiednich wielkości).



Rys. 5.12. Korelacja infiltracji z różnicą temperatury powietrza i prędkością wiatru dla pionu mieszkań M1
Fig. 5.12. Correlation of infiltration with air temperature difference and wind speed for the M1 vertical run of flats

Kolejne obliczenia korelacyjne wykonano dla wszystkich mieszkań na piątej kondygnacji (rys. 5.13), celem sprawdzenia różnic w oddziaływaniu wiatru, z uwagi na różną lokalizację poszczególnych mieszkań względem dominującego, w badanym okresie, kierunku wiatru.

Obserwowane wyniki potwierdzają istotność oddziaływania wiatru na najwyższej kondygnacji budynku i to zarówno w zakresie intensyfikacji infiltracji (dodatni współczynnik korelacji z prędkością wiatru) dla mieszkań z oknami od strony nawietrznej, jak i zmniejszania infiltracji od strony zawietrznej. Podobny charakter działania wiatru daje się zaobserwować już od czwartej kondygnacji, chociaż skorelowanie infiltracji z prędkością wiatru jest blisko dwukrotnie mniejsze. Analogiczne wartości współczynników korelacji uzyskuje się dla innych pionów mieszkań budynku (a także dla budynków o innej konfiguracji i rozplanowaniu mieszkań).



Rys. 5.13. Korelacja infiltracji z różnicą temperatury powietrza i prędkością wiatru dla mieszkań na 5. kondygnacji

Fig. 5.13. Correlation of infiltration with air temperature difference and wind speed for the flats on the floor 5

6. WERYFIKACJA OBLICZEŃ SYMULACYJNYCH

Formalna zgodność równań bilansowych przepływów powietrza wentylacyjnego, uzyskana na drodze obliczeń symulacyjnych nie gwarantuje poprawnego odwzorowania realnie zachodzącej infiltracji i przepływów powietrza obliczanych w wielostrefowym modelu badanego obiektu. Źródła błędów pojawiać się mogą przy wprowadzaniu danych opisujących geometrię i wewnętrzną konfigurację obiektu, wzajemne powiązania deklarowanych stref obliczeniowych czy też charakterystyk przepływu poszczególnych dróg przemieszczania się powietrza. Uniknięcie tego typu błędów w dużym stopniu zależy od użytkownika programu, ale także od dostępności szczegółowej dokumentacji obiektu symulacji. Dane meteorologiczne wprowadzane do programu również stwarzają potencjalną możliwość uzyskania wyników odbiegających od rzeczywistości. Szczególnie dotyczy to wartości prędkości i kierunku wiatru, znanych na ogół z notowań stacji meteorologicznych, odległych od miejsca lokalizacji interesującego budynku. Dalsze nieścisłości wyników mogą być wynikiem przyjętego modelu matematycznego, opartego na zbyt wielu uproszczeniach i czasami błędnych założeniach.

Weryfikacja poprawności symulacji może być dokonana w różny sposób. W odniesieniu do kompleksowych symulacji obciążeń cieplnych budynków opracowana została metodyka postępowania przy testowaniu programów symulacyjnych, nazwana "BESTEST", będąca wynikiem prac międzynarodowego zespołu ekspertów, w ramach programu International Energy Agency (Judkoff i Neymark, 1995). Procedura testowa składa się z trzech etapów:

- weryfikacja analityczna: wynik symulacji jest porównywany z dobrze znanym rozwiązaniem analitycznym, dotyczącym pojedynczego zjawiska (np. cieplnego), przy bardzo prostych, dobrze zdefiniowanych warunkach brzegowych;
- weryfikacja empiryczna: wyniki symulacji są porównywane z bezpośrednimi pomiarami w obiekcie rzeczywistym lub wykonanymi podczas eksperymentu laboratoryjnego;
- testy komparatywne: porównania dotyczą wyników symulacji danym programem przy wykonywaniu tzw. analizy wrażliwości, polegającej na badaniu reakcji programu na wprowadzane, ekstremalne wartości poszczególnych parametrów modelu. W ramach tego etapu mogą być również dokonywane porównania wyników symulacji innymi programami ("porównania międzymodelowe").

Cytowana procedura testująca jest w swoich założeniach na tyle ogólna, że jej idee mogą być stosowane dla różnych programów symulacyjnych.

Przeprowadzenie wszystkich etapów weryfikacji obliczeń nie zawsze jest jednak możliwe. Najlepszą formą weryfikacji poprawności obliczeń symulacyjnych są niewątpliwie pomiary, wykonane na podstawie dobrze zaplanowanego i przeprowadzonego eksperymentu. W przypadku wielokondygnacyjnego budynku mieszkalnego powstają jednak duże trudności zarówno metodologiczne, jak i techniczne. Pełna weryfikacja programu symulacyjnego wymagałaby przeprowadzenia jednoczesnych pomiarów wymiany powietrza we wszystkich deklarowanych strefach obliczeniowych, przy jednoczesnej rejestracji lokalnych warunków klimatu zewnętrznego i temperatury powietrza w poszczególnych strefach. Pomiary takie, przeprowadzane zwykle z wykorzystaniem znaczników gazowych, mogą dostarczyć informacji o wymianie powietrza w przeciągu kilku godzin, a nie wartości chwilowych, zmiennych zgodnie z sekwencją notowań pogodowych. Przeprowadzenie eksperymentu obejmującego jednocześnie co najmniej kilkanaście stref byłoby technicznie dość trudne i kosztowne. Alternatywą są precyzyjne i możliwie wielokrotne (dla różnych warunków pogodowych) pomiary wymiany powietrza w jednym mieszkaniu i porównanie z wynikami obliczeń symulacyjnych dla tej strefy.

Innym sposobem ustalenia poprawności działania programu symulacyjnego jest porównanie wyników uzyskanych za pomocą różnych procedur symulacyjnych, dla tych samych warunków obliczeniowych. Szczególnie warte uwagi są te programy, które zostały sprawdzone empirycznie.

6.1. Pomiarowa weryfikacja obliczeń symulacyjnych

Poprawność i dokładność symulacyjnych obliczeń infiltracji powietrza programem Multiven została sprawdzona empirycznie zarówno bezpośrednio, poprzez porównanie pomiarów wymiany powietrza z wynikami obliczeń symulacyjnych, jak i pośrednio. Ten drugi sposób weryfikacji polegał na pomiarach zużycia energii na potrzeby grzewcze i wentylacyjne w wybranym mieszkaniu budynku wielorodzinnego w czasie ok. 3 tygodni, a następnie wykonaniu obliczeń symulacyjnych obciążenia cieplnego dla tych samych warunków klimatycznych za pomocą programu TRNSYS (TRNSYS 1990). Jako dane wejściowe do tych obliczeń wprowadzone zostały wyniki symulacyjnych obliczeń infiltracji powietrza, uzyskane za pomocą programu *Multiven*. W bilansie cieplnym mieszkania zużycie energii na podgrzanie powietrza infiltrującego jest porównywalne lub nawet większe niż straty ciepła na drodze przenikania, a więc w rozpatrywanej strefie obliczeniowej stanowi istotny składnik całkowitych, niezbędnych nakładów cieplnych. Stopień zgodności wyników

pomiaru i symulacji zużycia energii w danej strefie obliczeniowej może więc wskazywać pośrednio na poprawność symulacyjnych obliczeń infiltracji powietrza.

6.2. Obiekt badań

Pomiary wymiany powietrza i niezbędnych nakładów cieplnych przeprowadzono w pojedynczym mieszkaniu zlokalizowanym w 5-kondygnacyjnym, wolnostojącym budynku wielorodzinnym (rys. 6.1). Budynek wykonany w technologii wielkiej płyty nie był poddawany żadnym pracom renowacyjnym zarówno w zakresie ochrony cieplnej, jak i wymiany stolarki okiennej, a więc reprezentował stan typowy dla większości zasobów mieszkaniowych. Przeprowadzenie eksperymentu było możliwe w 2-pokojowym mieszkaniu o kubaturze ok. 125 m^3, usytuowanym na parterze budynku.

Rys. 6.1. Fotografia badanego budynku
Fig. 6.1. Photograph of the examined building

Budynek wyposażony był w centralne ogrzewanie wodne, dwururowe, pionowe, dla którego źródłem ciepła był węzeł wymiennikowy. Poszczególne pomieszczenia mieszkań ogrzewane były grzejnikami żeliwnymi, wyposażonymi w termostatyczne zawory regulacyjne. System wentylowania budynku oparty był na naturalnej wentylacji grawitacyjnej, realizowanej za pomocą indywidualnych kanałów wentylacyjnych. Wloty do przewodów usytuowane były w kuchni i łazience każdego mieszkania. Mieszkanie było umeblowane i w pełni wyposażone w typowe urządzenia gospodarstwa domowego, jednak w czasie trwania pomiarów nie było zamieszkane.

Rys. 6.2. Rzut badanego mieszkania
Fig. 6.2. Plan of the examined flat

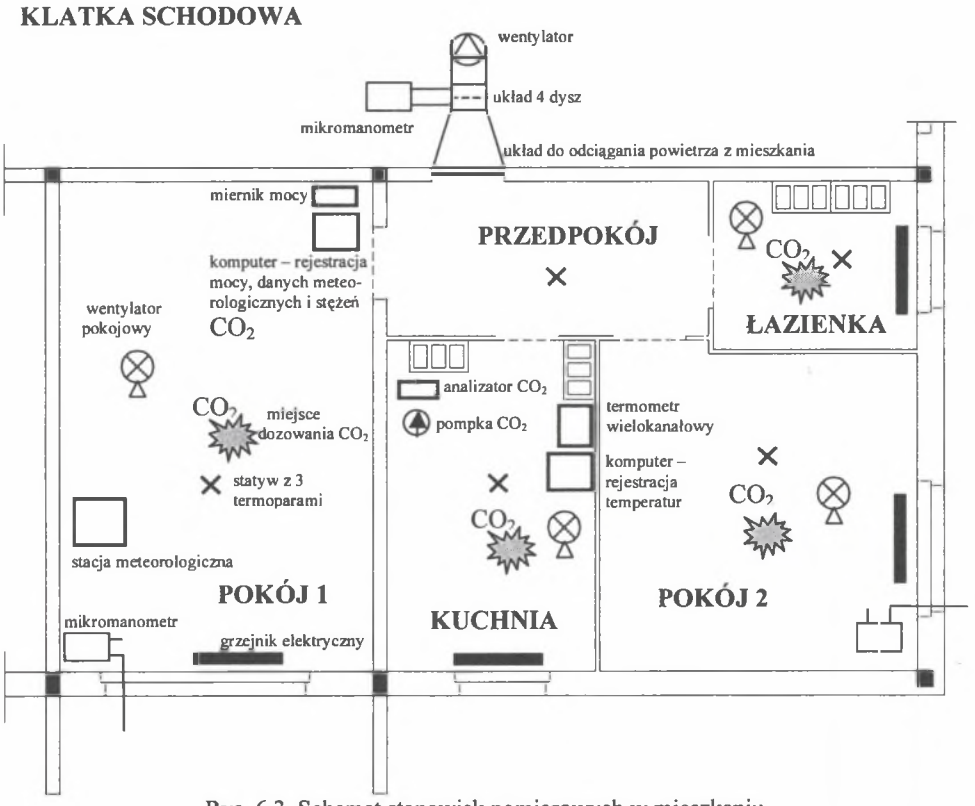
Przed wykonaniem pomiarów mieszkanie poddano dokładnym oględzinom, w celu identyfikacji ewentualnych nieszczelności w przegrodach budowlanych innych niż szczeliny stolarki okiennej, a wszystkie przepusty instalacyjne zostały dokładnie uszczelnione.

6.3. Zakres i metodyka pomiarów

Eksperyment polegał na przeprowadzeniu następujących pomiarów (Baranowski i in. 2003):

- wyznaczenie szczelności mieszkania metodą testów ciśnieniowych,
- wielokrotne pomiary wymiany powietrza w mieszkaniu metodą zaniku stężenia gazu znacznikowego,
- rejestracja parametrów klimatu zewnętrznego,
- pomiar i rejestracja temperatury powietrza we wszystkich pomieszczeniach w mieszkaniu,
- pomiar i rejestracja zużycia energii na potrzeby grzewcze i wentylacyjne.

Rozmieszczenie aparatury pomiarowej w badanym mieszkaniu przedstawiono na rys. 6.3.



Rys. 6.3. Schemat stanowisk pomiarowych w mieszkaniu
Fig. 6.3. Schematic diagram of the measuring stands in the flat

6.3.1. Pomiar szczelności mieszkania

Przeprowadzenie testów ciśnieniowych mieszkania pozwala uzyskać charakterystykę szczelności w postaci:

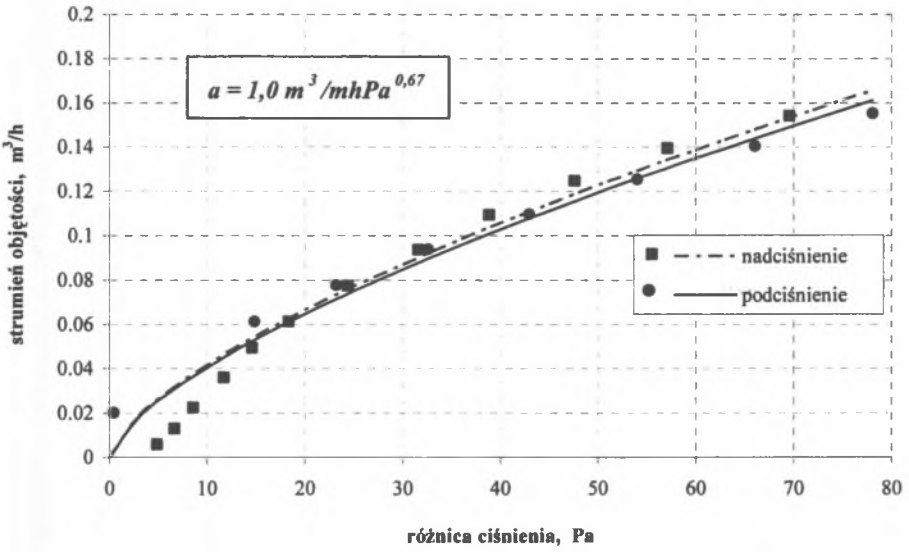
$$\dot{V} = k(\Delta p)^n , \tag{6.1}$$

gdzie: $\dot{V}$ – strumień objętości powietrza,

Δp – różnica ciśnienia.

Pomiary wykonano za pomocą odpowiednio skonstruowanych "drzwi ciśnieniowych", wyposażonych w układ wentylatorów umożliwiających uzyskanie w badanym mieszkaniu zarówno podciśnienia, jak i nadciśnienia w zakresie od 0 do 70 Pa, a więc zgodnie ze wskazaniami literaturowymi (Charlesworth 1988). Wykonanie serii pomiarów pozwoliło na znalezienie charakterystyki szczelności w postaci funkcji aproksymującej wyniki pomiarów:

$$\dot{V} = 0{,}0088 \cdot (\Delta p)^{0{,}67} \tag{6.2}$$



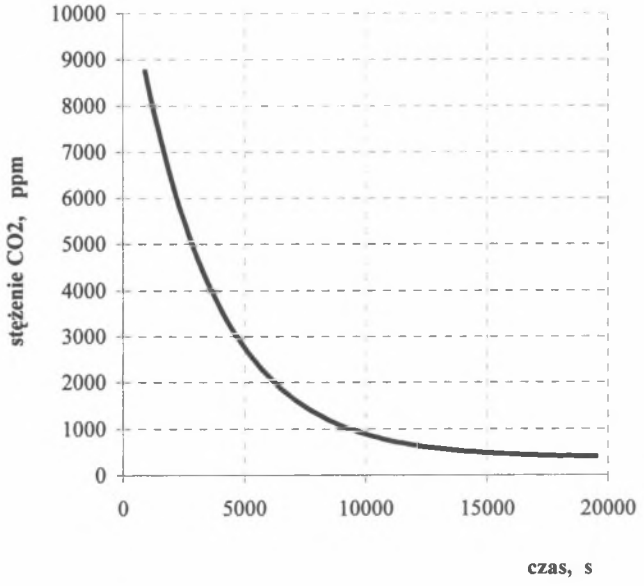
Rys. 6.4. Charakterystyka szczelności mieszkania
Fig. 6.4. Characteristic of the airtightness of the flat

Porównując powyższe równanie z podstawowym równaniem infiltracji powietrza przez szczeliny obliczono współczynnik infiltracji dla okien badanego mieszkania, o wartości a = 1,01 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{2/3}$. Oznaczało to przyjęcie założenia, że całkowity napływ powietrza do mieszkania odbywa się tylko przez szczeliny okien i drzwi balkonowych, co było uzasadnione starannym przygotowaniem mieszkania (wyeliminowanie potencjalnych nieszczelności) przed przeprowadzeniem pomiarów.

6.3.2. Pomiar wymiany powietrza

Pomiary wymiany powietrza wykonano 8-krotnie, przy średniej temperaturze powietrza zewnętrznego, zmieniającej się od 2°C do 10,8°C i prędkości wiatru od 2,4 m/s do 4,2 m/s. W eksperymencie zastosowano metodę zaniku stężenia gazu znacznikowego (Charlesworth, 1988), wybierając dwutlenek węgla jako znacznik dozowany jednocześnie we wszystkich pomieszczeniach mieszkania. Zastosowano unikatową metodę dawkowania CO_2 w postaci zestalonej (tzw. suchy lód), uzyskując równomierne nasycenie powietrza znacznikiem we wszystkich pomieszczeniach mieszkania. Powietrze z poszczególnych pomieszczeń zasysane było pompką przez przewody zaopatrzone na końcu w mikrorurki, a następnie przez rozdzielacz kierowane do miernika stężenia CO_2 (rys. 6.3). Dla uwzględnienia zróżnicowania wielkości pomieszczeń długości mikrorurek były dobrane jako odwrotnie proporcjonalne do kubatur poszczególnych pomieszczeń.

Po osiągnięciu odpowiedniego nasycenia powietrza w mieszkaniu dwutlenkiem węgla rozpoczynano automatyczną rejestrację stężenia CO_2 w powietrzu. Jako miernik stężenia CO_2 użyto Carbon Dioxide Monitor – Model 2600-SP, o zakresie pomiarowym 0-10 000 ppm. Sygnał analogowy napięciowy 0÷9 V z miernika zamieniany był na sygnał cyfrowy przez moduł analogowo-cyfrowy, a następnie przeliczany na stężenia w ppm. Rejestracja stężenia znacznika odbywała się za pomocą specjalnie napisanego dla potrzeb badań programu komputerowego, dzięki czemu na ekranie monitora możliwa była również bieżąca obserwacja wyników pomiaru. Pomiar i kontrola poziomu stężenia znacznika były szczególnie istotne na początku i przy końcu każdego pomiaru, pozwalały na ocenę stopnia przekroczenia naturalnego poziomu stężenia CO_2 i rozpoczęcia pomiaru wymiany powietrza, a także chwili zakończenia eksperymentu.



Rys. 6.5. Krzywa zaniku stężenia CO_2 w badanym mieszkaniu
Fig. 6.5. CO_2 concentration decay curve for the examined flat

Pomiar stężenia znacznika odbywał się z krokiem czasowym 2 sekundy. Zarejestrowane wyniki aproksymowano metodą najmniejszych kwadratów za pomocą funkcji wykładniczej, będącej rozwiązaniem równania różniczkowego opisującego zmianę stężenia znacznika w określonej kubaturze pomieszczenia. Wyznaczone wartości liczby wymian powietrza wynosiły od 0,66 do 1,11 1/h, w zależności od warunków atmosferycznych. Przykładowy wykres krzywej zaniku stężenia znacznika przedstawiono na rys. 6.5.

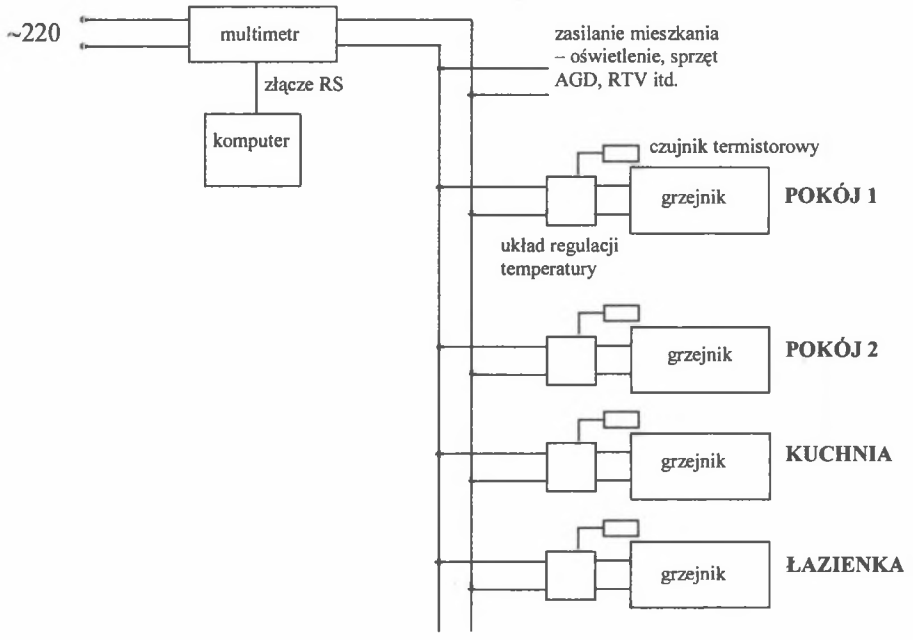
6.3.3. Rejestracja danych meteorologicznych

Pomiar i rejestracja danych klimatu zewnętrznego prowadzone były za pomocą zainstalowanej w mieszkaniu przenośnej stacji meteorologicznej z czujnikami umieszczonymi na dachu budynku. Oprogramowanie przyrządu umożliwiało ciągły pomiar parametrów klimatu zewnętrznego, natomiast rejestracja danych odbywała się co 5 minut, przy czym zapisywane wartości były średnimi z tego przedziału czasu. Mierzono i rejestrowano następujące wielkości: temperaturę powietrza zewnętrznego, średnią i maksymalną prędkości wiatru, kierunek wiatru, ciśnienie barometryczne, wilgotność względną powietrza zewnętrznego, promieniowanie słoneczne na płaszczyznę poziomą.

6.3.4. Pomiar zużycia energii

Idea pomiaru zapotrzebowania na energię w mieszkaniu polegała na zastąpieniu istniejącego układu grzejników centralnego ogrzewania odpowiednio dobranymi ogrzewaczami elektrycznymi i w konsekwencji polegała ona na pomiarze poboru mocy elektrycznej dostarczanej do mieszkania. Każdy z grzejników wyposażony był w elektroniczny układ regulacji temperatury sterujący pracą grzejnika. Układ pomiaru mocy oparty był na programowalnym multimetrze sprzężonym z komputerem, co pozwalało na rejestrację poboru mocy z zadanym krokiem czasowym (2 sekundy). W skład zestawu pomiarowego wchodził też układ pomiaru temperatury powietrza w każdym pomieszczeniu mieszkania, a także w pomieszczeniach sąsiadujących z badaną strefą (rys. 6.6).

Eksperyment przeprowadzono w ciągu trzech tygodni marca 2000 r. Wyniki pomiarów opracowano, tak aby możliwe było ich porównanie z rezultatami obliczeń symulacyjnych: dokonano uśrednień godzinowych wszystkich pomiarów oraz uporządkowano poszczególne grupy wyników, uwzględniając ewentualne przesunięcia czasowe w zapisanych plikach.



Rys. 6.6. Schemat układu pomiaru poboru mocy w mieszkaniu
Fig. 6.6. Schematic diagram of the system for flat power consumption measurement

6.4. Obliczenia symulacyjne i porównanie z wynikami eksperymentu

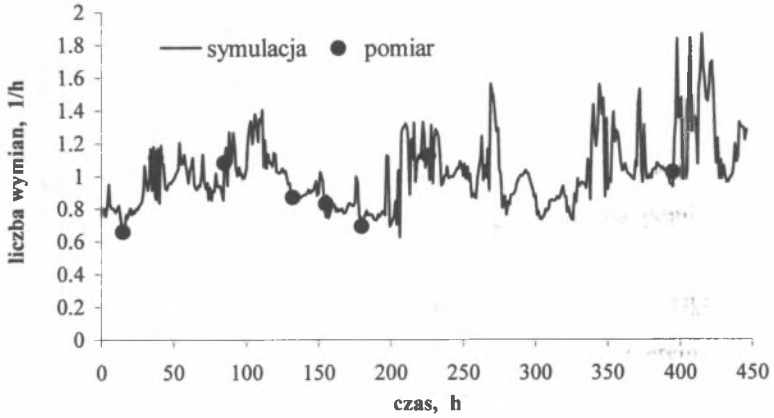
Pomiary przeprowadzone w opisanym powyżej zakresie umożliwiły wykonanie realistycznych obliczeń symulacyjnych zarówno infiltracji powietrza, jak i obciążenia cieplnego badanego mieszkania. Jako dane wejściowe do programów symulacyjnych wykorzystano wyniki pomiarów szczelności mieszkania, obliczając na ich podstawie wartość współczynnika infiltracji powietrza, zapis danych pogodowych w czasie trwania eksperymentu oraz wyniki pomiaru temperatury powietrza zarówno w obrębie mieszkania, jak i jego otoczeniu (sąsiednie mieszkania, klatka schodowa). Ten ostatni zestaw danych umożliwił obliczenia bilansu cieplnego mieszkania z dobrą dokładnością, pozwalając na zapis realistycznych warunków brzegowych przy symulacji pojedynczej strefy cieplnej.

6.4.1. Obliczenia infiltracji powietrza

Za pomocą programu *Multiven* wykonano obliczenia symulacyjne infiltracji powietrza (w badanym mieszkaniu) dla tych samych danych klimatycznych, przy których przeprowadzane były pomiary wymiany powietrza. Celem uzyskania większej dokładności obliczeń, symulacje przeprowadzono wykorzystując dane klimatu zewnętrznego,

zarejestrowane podczas pomiarów przez lokalną stację meteorologiczną z krokiem czasowym 5 minut.

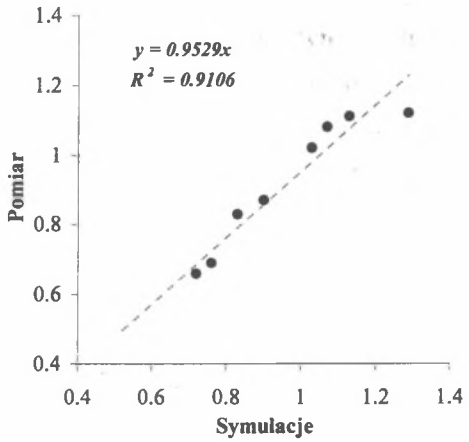
Wyniki obliczeń symulacyjnych wykonane z krokiem czasowym 5 min. w czasie ok. 2,5 godzin (2 stałe czasowe dla pomiaru zaniku stężenia) uśredniono i przeliczono na liczbę wymian powietrza. Przebieg zmienności infiltracji, uzyskany drogą symulacji dla zarejestrowanych warunków meteorologicznych, przedstawiono na rys. 6.7, zaznaczając punktami zmierzone wartości liczby wymian powietrza. Porównanie wyników pomiarów i symulacji przedstawiono w tabeli 6.1.



Rys. 6.7. Przebieg zmienności infiltracji w badanym mieszkaniu w czasie pomiarów
Fig. 6.7. Air infiltration variation in the examined flat during the measurements

Tabela 6.1
Zestawienie wyników symulacji i pomiarów wymiany powietrza

Wyniki symulacji	Wyniki pomiarów	Błąd względny
0,72	0,66	9,1 %
1,13	1,11	1,8 %
1,07	1,08	-0,9 %
0,90	0,87	3,4 %
0,83	0,83	0,0 %
0,76	0,69	10,1 %
1,29	1,12	15,2 %
1,09	1,02	1,0 %



Rys. 6.8. Korelacja wyników symulacji i pomiarów wymiany powietrza
Fig. 6.8. Correlation of the air change rate simulation and measurement results

Zgodność wyników symulacji z pomiarami okazała się bardzo dobra (R^2 = 0,9106 rys. 6.8), co pozwala wnioskować, że program symulacyjny *Multiven* jest właściwym narzędziem do obliczeń przepływów powietrza wentylacyjnego.

6.4.2. Obliczenia obciążenia cieplnego badanego mieszkania

Dla potrzeb symulacji obciążenia cieplnego mieszkania wykorzystano pakiet symulacyjny TRNSYS, umożliwiający modelowanie zachowania cieplnego budynku z wyodrębnionymi strefami cieplnymi. W modelu cieplnym strefy uwzględniane są (bilansowane) następujące strumienie ciepła:

- przenikanie ciepła przez przegrody zewnętrzne,
- przenikanie ciepła przez przegrody wewnętrzne (ściany działowe, stropy),
- wewnętrzne zyski ciepła (mieszkańcy, oświetlenie, urządzenia),
- ogrzewanie pomieszczeń,
- straty ciepła na infiltrację i przewietrzanie,
- zyski ciepła od promieniowania słonecznego.

Możliwe jest również modelowanie połączeń stref przyległych przez zadanie odpowiednich warunków brzegowych. Rozwiązanie równań bilansu cieplnego uzyskiwane jest metodą funkcji przejścia, a więc brana jest pod uwagę "historia cieplna" przegród, przy uwzględnieniu w symulacjach pojemności cieplnej tych przegród. Wynikiem przeprowadzanych obliczeń symulacyjnych są przebiegi czasowe wartości obciążeń cieplnych w poszczególnych strefach, przy zadanych czasowych przebiegach temperatury wewnętrznej i parametrach klimatu zewnętrznego. Uzyskać można również informacje o czasowej zmienności poszczególnych składników bilansu cieplnego.

W trakcie przeprowadzania pomiarów zużycia energii wszystkie drzwi wewnętrzne w mieszkaniu były otwarte, a zmierzony rozkład temperatury powietrza w poszczególnych pomieszczeniach był praktycznie taki sam. Dla zachowania porównywalności warunków pomiarów i symulacji, obliczenia numeryczne przeprowadzono tworząc jednostrefowy, zastępczy model cieplny wybranego mieszkania. Wykorzystany został moduł programu TYPE56, w którym możliwe jest symulowanie jednej strefy cieplnej, przy podaniu brzegowych warunków rozkładu temperatury powietrza strefy obliczeniowej. Znajomość danych materiałowych i struktury wszystkich ścian i przegród budowlanych budynku umożliwiły zapis odpowiednich plików wejściowych do symulacji.

Standardowa wersja pakietu TRNSYS nie zawiera modułu obliczeń infiltracji, możliwa jest tylko deklaracja w pliku konfiguracyjnym programu liczby wymian powietrza w danej strefie cieplnej. Dla uwzględnienia przebiegu zmienności infiltracji wykorzystano wyniki obliczeń symulacyjnych programem Multiven dla zarejestrowanych w czasie eksperymentu danych klimatycznych. Konieczna była odpowiednia konwersja tych rezultatów oraz zapis w składni programu TRNSYS wielu instrukcji, umożliwiających czytanie tych wielkości.

Przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych dostarczyło zbiór wyników następujących strumieni ciepła:

- straty ciepła przez przenikanie,
- straty ciepła wywołane infiltracją,
- zyski ciepła od nasłonecznienia,
- całkowite, niezbędne nakłady cieplne.

W tabeli 6.2 zestawiono średnie dobowe wartości ciepła dostarczonego (Q_d), uzyskane z pomiarów oraz porównano je z wartościami obliczonymi w symulacji. Brak wyników pomiaru mocy w dniach 12-14 marca spowodowany był awarią sieci elektrycznej w budynku. Dokładność symulacji obciążenia cieplnego odniesiona do pomiarów jest zadowalająca, Stosunkowo duże błędy względne (20 – 30%) podczas dwóch pierwszych dni pomiarów można wyjaśnić faktem rozpoczęcia eksperymentu i stabilizacją warunków cieplnych w mieszkaniu. Pomijając dwa pierwsze wyniki, otrzymujemy odpowiednio:

- błąd względny: od –10% do +13%
- błąd systematyczny: +0.4%
- odchylenie standardowe: 12.8%

W tabeli zamieszczono również inne składowe bilansu cieplnego (średnie dobowe): straty ciepła przez przenikanie (Q_p) oraz spowodowane przez infiltrację powietrza (Q_w).

Tabela 6.2

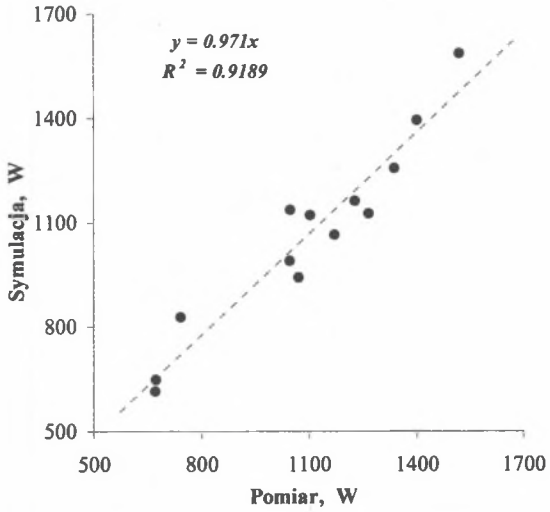
Zestawienie wyników pomiarów i symulacji strumieni ciepła w badanym mieszkaniu

Dzień	Temp. zewn. °C	Q_p W	Q_w W	Q_d symul. W	Q_d pomiar W	Błąd wzgl. %
1	7,8	493	428	782	1195	-34,6
2	3,8	497	666	1035	1338	-22,6
3	3,4	519	703	1047	1136	-7,8
4	2,9	481	721	1071	942	13,7
5	-0,7	675	989	1519	1586	-4,2
6	2,1	492	753	1046	989	5,8
7	6,8	460	483	742	828	-10,4
8	8,3	387	399	674	648	4,0
9	8,9	347	407	672	614	9,4
10	1,6	532	815	1171	1065	10,0
11	2,3	569	820	1266	1125	12,5
12	4	456	664	962	*	-
13	3,3	469	673	970	*	-
14	6,2	425	512	709	*	-
15	2,1	504	853	1103	1121	-1,6
16	0,3	549	876	1227	1162	5,6
17	0,3	583	901	1338	1256	6,5
18	0,2	608	948	1401	1394	0,5
19	0,3	610	895	1361	1222	11,4
20	2,3	580	756	1140	1152	-1,0
21	5	469	573	927	847	9,4

* brak pomiaru

Można zauważyć, że niezbędne nakłady ciepła potrzebne do podgrzania powietrza infiltrującego (Q_w) są większe, niż straty ciepła związane z przenikaniem ciepła przez przegrody (Q_p) – średnio stanowią ok. 2/3 całkowitych nakładów ciepła. Wynika stąd, że dokładność wyznaczenia infiltracji w znacznym stopniu decyduje o poprawności bilansu cieplnego badanej strefy.

Korelacja wyników symulacji i pomiarów mocy dostarczanej do mieszkania, przedstawiona na rys. 6.9, potwierdza dobrą zgodność obu grup wyników (R^2=0,9189). Uzyskano w ten sposób pośrednie potwierdzenie poprawności obliczeń symulacyjnych programem *Multiven*.



Rys. 6.9. Korelacja wyników symulacji i pomiarów nakładów cieplnych w mieszkaniu
Fig. 6.9. Correlation of the simulation and measurement results of heat input to the flat

Przeprowadzona empiryczna weryfikacja wyników symulacji numerycznej wykazała dobrą dokładność wyników obliczeń dla badanego mieszkania. Pozytywny wynik porównań wyników pozwala sądzić, że symulacje przepływów powietrza wykonane za pomocą programu Multiven dla całego budynku dają również rezultaty zgodne ze stanem rzeczywistym; dotyczy to również symulacji obciążeń cieplnych. Uzyskanie dobrej zgodności pomiarów i symulacji jest tym istotniejsze, że dotyczy zamieszkałego i normalnie eksploatowanego mieszkania w budynku wielorodzinnym.

7. PRZYBLIŻONA METODA OBLICZANIA INFILTRACJI POWIETRZA

Dokładność wyznaczania infiltracji powietrza wynikać powinna z celu, któremu te dane mają służyć. W najbardziej ogólnym ujęciu, znajomość infiltracji jest konieczna dla sformułowania opinii o jakości powietrza wewnętrznego oraz dla ustalenia niezbędnych nakładów ciepła dla podgrzania napływającego z otoczenia powietrza. Dotyczy to oczywiście sezonu grzewczego, kiedy temperatura otoczenia jest niższa niż w wentylowanych pomieszczeniach. Innym przypadkiem jest tzw. nocne chłodzenie, które bywa stosowane w okresie letnim, szczególnie w budynkach biurowych, wentylowanych w systemie wentylacji naturalnej. W wymienionych przypadkach wyznaczanie chwilowych wartości infiltracji, z małym krokiem czasowym, nie daje wiarygodnej informacji o jakości powietrza wewnętrznego i komforcie cieplnym, ani też nie pozwala na realistyczną ocenę zapotrzebowania na ciepło do podgrzania infiltrującego powietrza. Chwilowa zmienność infiltracji może być znaczna, głównie z powodu oddziaływania wiatru. Ocena skuteczności wentylowania pomieszczeń powinna być dokonywana raczej w dłuższym (kilkugodzinnym) przedziale czasu, jako wartość średnia z obliczonych chwilowych wartości dla danego przedziału czasu. Uśrednienie takie pozwala na zniwelowanie chwilowych, skokowych zmian wartości strumieni objętości powietrza infiltrującego, w konsekwencji dając bardziej realistyczny obraz wymiany powietrza.

Uzasadnienie dla sensu poszukiwania prostych metod obliczeniowych wynika z potrzeb utylitarnych. Poza programami symulacyjnymi i ewentualnie bezpośrednimi pomiarami, nie ma stosunkowo prostych sposobów ustalenia poprawności wentylowania mieszkań w budynkach wielorodzinnych, wyposażonych w systemy wentylacji grawitacyjnej. Bardzo przybliżone metody, oparte tylko na szacowaniu sił wyporu cieplnego, obarczone są dużym błędem. Obliczenia symulacyjne nie są zbyt częstym narzędziem używanym na etapie prac projektowych i podczas eksploatacji budynków mieszkalnych. Stosowanie programów symulacyjnych wymaga, poza koniecznością opanowania sposobu użytkowania, pracochłonnego przygotowania danych wejściowych. Wykorzystanie profesjonalnych pakietów symulacyjnych dla celów komercyjnych jest też na ogół dość kosztowne (zakup licencji).

Obliczenia infiltracji powietrza wykonywane dla zadanych, ustalonych wartości klimatu mogą być konieczne w pewnych, szczególnych przypadkach, np.:

- badania wpływu poszczególnych czynników klimatycznych warunkujących wymianę powietrza w budynku,
- ustalania poprawności działania systemu wentylacji naturalnej, przy jednoczesnej weryfikacji pomiarowej,
- ustalania ekstremalnych wartości liczby wymian powietrza, z uwagi na wytyczne projektowania, normy itp. (minimalna, obliczeniowa temperatura otoczenia w sezonie grzewczym),
- przy występujących okresowo zjawiskach atmosferycznych, zakłócających pracę kanałów wentylacyjnych (silne wiatry typu fenowego),
- ustalanie wpływu na wartość infiltracji rozplanowania mieszkań w budynku i orientacji okien dla dominującego w danym regionie kierunku i prędkości wiatru.

Chwilowe wartości strumieni objętości powietrza infiltrującego do budynku (obliczone dla ustalonych danych klimatycznych) nie są miarodajne zarówno dla oceny jakości mikroklimatu, jak i w celu ustalenia niezbędnych nakładów ciepła do podgrzania tego powietrza.

Czas uśredniania przy wyznaczaniu infiltracji powietrza dla oceny komfortu cieplnego i jakości powietrza w mieszkaniu nie powinien być krótszy niż jedna godzina. Dłuższe czasy uśredniania powinny uwzględniać dobową zmienność temperatury powietrza zewnętrznego, z tego punktu widzenia przyjęcie średnich 8-godzinnych czasów uśredniania wydaje się być dobrym przybliżeniem.

Obliczenia infiltracji i wynikających stąd niezbędnych nakładów ciepła, jako składnika bilansu cieplnego strefy czy też całego budynku jest na ogół potrzebne do oszacowania całkowitych nakładów cieplnych podczas całego sezonu grzewczego, ewentualnie w cyklach miesięcznych czy tygodniowych. Eksperyment pomiarowy pokazał, że symulacyjne wyznaczenie infiltracji w dłuższym czasie (w tym przypadku ok. 3 tygodnie) jest wystarczająco dokładne dla potrzeb bilansu cieplnego badanego obiektu.

Analizując wartości liczbowe obliczeń symulacyjnych (dla tego przypadku), obliczono średnią wartość infiltracji powietrza dla badanego okresu, a następnie wykonano symulacje dla ustalonych parametrów klimatu, będących średnimi wartościami z interesujących 3 tygodni notowań. Porównanie wygląda następująco:

- uśredniona liczba wymian: $N = 1{,}01 \pm 0{,}21$ 1/godz.
- liczba wymian dla wartości średnich klimatu: $N_{śr} = 0{,}914$ 1/godz.

Strumień objętości powietrza infiltrującego obliczony dla średnich parametrów klimatu wymaga dostarczenia ok. 717 W ciepła dla podgrzania do temperatury powietrza w badanym mieszkaniu. Obliczenia cieplne wykonane programem symulacyjnym TRNSYS pokazują, że średnia wartość ciepła dostarczanego na potrzeby wentylacji wynosi – w badanym okresie – 706 W (por. tab. 6.2). Dobra zgodność obliczeń zarówno liczby wymian powietrza, jak i niezbędnych nakładów cieplnych prowadzi do idei oszacowań infiltracji powietrza dla danego obiektu w dłuższym czasie przez obliczenia dla średnich wartości parametrów klimatu w tym przedziale czasu. Dotyczyć to może zarówno obliczeń w cyklach kilkunastodniowych, jak i dla okresu kilku miesięcy, np. sezonu grzewczego. Wygodny w takich przypadkach byłby prosty algorytm obliczeniowy, który mógłby zastąpić symulacje komputerowe.

7.1. Ogólne założenia metody

Podstawowym kryterium, które przyjęto przy opracowywaniu metody była możliwie dobra zgodność wyników obliczeń uproszczonych z rezultatami symulacji komputerowej, przynajmniej w sensie wartości średnich.

Przyjęto, że obliczenia będą oparte na podstawowym równaniu przepływu powietrza przez szczeliny okien (wzór 4.1), za pomocą którego obliczana będzie infiltracja powietrza w pojedynczej strefie (np. mieszkaniu) budynku wielorodzinnego. Analiza równania przepływu wskazuje, że dla wykonania obliczeń niezbędny jest zestaw danych, takich jak w przypadku symulacji:

– parametry klimatu zewnętrznego,
– temperatura powietrza w strefie,
– współczynnik infiltracji,
– długość szczelin okien.

Oznacza to, że nie będą pomijane żadne istotne czynniki decydujące o napływie powietrza do budynku, a uproszczenia obliczeniowe związane będą ze sposobem ujęcia poszczególnych składników równania przepływu.

Model sieciowy obiektu wielostrefowego w realizacji numerycznej prowadzi do układu równań bilansowych, w których wielkościami niewiadomymi jest ciśnienie indukowane w poszczególnych strefach obliczeniowych. Rozwiązanie modelowego układu równań umożliwia obliczenie wartości poszczególnych strumieni objętości powietrza dla zadeklarowanych dróg przepływu.

W proponowanej metodzie obliczeniowej skupiono się na sposobie przybliżonego wyznaczenia wartości różnicy ciśnienia wywołującego przepływ powietrza. Ciśnienie powstające w strefach, w warunkach przepływu powietrza wentylacyjnego jest skutkiem zróżnicowanych oporów przepływu pomiędzy poszczególnymi strefami i oddziaływań sił napędowych infiltracji. Taki złożony układ nie poddaje się analizom, prowadzącym do prostych zależności funkcyjnych. Wstępna analiza zmienności wartości różnicy ciśnienia Δp na podstawie wyników symulacji pozwoliła zaobserwować pewne prawidłowości w zależności od deklarowanych w danych wejściowych warunkach klimatycznych oraz lokalizacji strefy obliczeniowej i parametrów szczelności okien. Przeprowadzony został eksperyment numeryczny, polegający na wykonaniu dużej liczby symulacji zarówno dla zmiennych skokowo parametrów klimatu zewnętrznego, jak i zróżnicowanych współczynników infiltracji powietrza, a także różnej konfiguracji wewnętrznej struktury budynków wielorodzinnych. Uzyskanie wyników symulacji w postaci wartości ciśnienia w strefach obliczeniowych umożliwiło poszukiwanie empirycznych związków funkcyjnych dla wyznaczenia ciśnienia w żądanej strefie, w zależności od różnicy temperatury powietrza na zewnątrz i wewnątrz budynku, prędkości i kierunku wiatru oraz szczelności okien.

7.2. Algorytm przybliżonych obliczeń infiltracji powietrza

Obliczenia strumienia objętości powietrza infiltrującego według proponowanej metody dotyczą wszystkich dróg napływu powietrza do danej strefy, za pomocą jednego wzoru obliczeniowego. Takie podejście stwarza konieczność uwzględnienia możliwości przepływu powietrza przez okna usytuowane w różnych ścianach badanego budynku, a więc zarówno operowanie na sumie długości szczelin wszystkich okien strefy, jak i właściwe uwzględnienie różnych współczynników konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru dla poszczególnych okien. W metodzie zaproponowano przyjęcie zastępczego współczynnika C_m, obliczanego jak średnia ważona ze wszystkich współczynników dla poszczególnych ścian budynku, w których usytuowane są okna.

Analiza wyników kilku tysięcy symulacji wykazała, że wartości poszukiwanej różnicy ciśnienia przyjmują zbliżone wartości we wszystkich mieszkaniach leżących na tej samej kondygnacji. Zaobserwowano natomiast znaczącą zmienność tego ciśnienia dla różnych kondygnacji, a także w zależności od współczynnika szczelności okien, dla tych samych chwilowych danych klimatu zewnętrznego i temperatury powietrza w mieszkaniach. Zmiana powyższych danych wejściowych skutkowała oczywiście zmianą wartości różnicy ciśnienia, odpowiednio na poszczególnych kondygnacjach. Przeprowadzone próby różnych wariantów

aproksymowania wartości poszukiwanej różnicy ciśnienia wzorem empirycznym, zawierającym wszystkie czynniki, warunkujące jej zmienność dostarczały związków funkcyjnych, odwzorowujących poszukiwaną wielkość z niezadowalającą dokładnością. Przyjęto, że współczynniki wzorów empirycznych będą poszukiwane oddzielnie zarówno dla deklarowanych współczynników infiltracji powietrza, jak i dla poszczególnych kondygnacji.

7.3. Wzór obliczeniowy strumienia objętości powietrza infiltrującego

Przybliżone wyznaczenie infiltracji powietrza w wybranej strefie (mieszkaniu) budynku wielorodzinnego oparte jest na podstawowym równaniu przepływu przez szczeliny stolarki budowlanej w postaci:

$$\dot{V}_m = a \cdot l_m \cdot \left(\Delta p_{k,m}\right)^{0,67}, \tag{7.1}$$

gdzie: $\dot{V}_m$ – strumień objętości powietrza infiltrującego do strefy m,

a – współczynnik infiltracji,

l_m – całkowita długość szczelin w strefie m,

$\Delta p_{k,m}$ – różnica ciśnienia między strefą m na kondygnacji k a otoczeniem,

Dane niezbędne do przeprowadzenia obliczeń:

- współczynnik infiltracji powietrza przez okna,
- długość szczelin okien w strefie dla każdej ściany budynku,
- prędkość i kierunek wiatru,
- współczynniki konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru (dla ścian budynku z oknami danej strefy),
- temperatura powietrza na zewnątrz budynku i w mieszkaniu.

Analiza wyników kilku tysięcy symulacji wykazała, że wartości różnicy ciśnienia we wszystkich mieszkaniach, leżących na tej samej kondygnacji przyjmują bardzo zbliżone wartości, dla tych samych chwilowych danych klimatu zewnętrznego i temperatury powietrza w mieszkaniach. Zróżnicowanie wartości różnicy ciśnienia w poszczególnych mieszkaniach na danej kondygnacji jest wynikiem oddziaływania wiatru, stąd średnia wartość różnicy ciśnienia dla danej kondygnacji jest korygowana z uwagi na lokalizację strefy, przez zastępczy współczynnik ciśnienia wiatru:

$$\Delta p_{k,m} = \Delta \widetilde{p}_k + \widetilde{C}_p \cdot w^2, \tag{7.2}$$

gdzie: $\Delta p_{k,m}$ – różnica ciśnienia między strefą m na kondygnacji k a otoczeniem,

$\Delta \widetilde{p}_k$ – średnia wartość różnicy ciśnienia w mieszkaniach na kondygnacji k,

$\widetilde{C}_p$ – zastępczy współczynnik ciśnienia wiatru,

w – prędkość wiatru.

Właściwe uwzględnienie oddziaływania wiatru na proces infiltracji powietrza wymaga przeliczenia ciśnienia dynamicznego wiatru na ciśnienie statyczne, indukowane na poszczególnych ścianach budynku, za pomocą odpowiednich współczynników. Ponieważ proponowany wzór obliczeniowy (wzór 7.1) ujmuje strumienie objętości powietrza, mogące napływać przez okna usytuowane w różnych ścianach budynku, powstała konieczność użycia współczynnika zastępczego $\widetilde{C}_p$, uwzględniającego tę sytuację. Aby go wyznaczyć, proponuje się zastosowanie średniej ważonej ze współczynników konwersji dla poszczególnych ścian, przy czym wagami są sumy długości szczelin okien, usytuowanych na danych ścianach budynku. Wartość współczynnika $\widetilde{C}_p$ można zatem wyznaczyć z zależności:

$$\widetilde{C}_p = \frac{\sum C_{p,i} \cdot l_i}{\sum l_i}, \tag{7.3}$$

gdzie: $\widetilde{C}_p$ – zastępczy współczynnik ciśnienia wiatru (dla danego mieszkania),

$C_{p,i}$ – współczynnik ciśnienia wiatru dla i-tej ściany budynku,

l_i – długość szczelin okien mieszkania na i-tej ścianie,

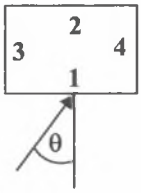
$\sum l_i$ – suma długości szczelin wszystkich okien mieszkania,

Współczynniki oddziaływania wiatru są wyznaczane drogą bezpośrednich pomiarów lub przy użyciu technik modelowania fizykalnego. Odpowiednie wartości tych współczynników można znaleźć w literaturze (np. Gandemer 1978, Liddament 1996). W tabeli 7.1 zestawiono wartości współczynników konwersji ciśnienia dynamicznego wiatru dla niektórych kierunków napływu wiatru, opublikowane przez Air Infiltration and Ventilation Centre (Liddament 1986). Cytowane wartości dotyczą budynku w zabudowie miejskiej, otoczonego konstrukcjami o wysokości co najmniej równej wysokości danego budynku.

Tabela 7.1

Współczynniki oddziaływania wiatru C_p dla różnych kierunków wiatru θ (Liddament 1986)

kąt / strona	0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
1	0,25	0,05	-0,25	-0,3	-0,25	-0,3	-0,25	0,05
2	-0,25	0,3	0,25	0,05	0,2	0,05	-0,25	-0,3
3	-0,25	-0,05	-0,2	0,05	0,25	0,3	-0,25	-0,3
4	-0,25	-0,3	-0,25	-0,3	-0,25	0,05	0,2	0,05



Przytoczone w tabeli wartości współczynników nie są uniwersalne – mogą być stosowane dla niskich budynków wolnostojących; niemniej jednak dają one pewną orientację co do rzędów wielkości tych współczynników i przy braku innych danych mogą być użyte do szacunkowych obliczeń infiltracji.

7.4. Wzór empiryczny do obliczania średniej różnicy ciśnienia na kondygnacji

Przeprowadzone próby różnych wariantów aproksymowania poszukiwanej wartości różnicy ciśnienia $\Delta\widetilde{p}_k$ potwierdziły tę zależność – najlepszą dokładność odwzorowania uzyskano poszukując współczynników wzorów empirycznych oddzielnie zarówno dla deklarowanych współczynników infiltracji powietrza, jak i dla poszczególnych kondygnacji.

W obliczeniach aproksymacyjnych wykorzystana została metoda najmniejszych kwadratów, jako stosunkowo prosta w realizacji i dająca zwykle dobre wyniki. Kryterium doboru współczynników poszukiwanej funkcji aproksymującej należy w tej metodzie do tzw. kryteriów mocnych, ponieważ zawiera sumę kwadratów odchyłek, a więc liczb nieujemnych, stąd minimalizacja równania kryterium daje warunki dobrej aproksymacji (Mochnacki i Majchrzak, 1994).

Przyjęto, że wzory funkcji aproksymujących, odpowiednie dla danego współczynnika infiltracji a oraz numeru kondygnacji k, poszukiwane będą w postaci ogólnej:

$$\Delta\widetilde{p}_k = A \cdot w^2 + B \cdot \Delta T + C, \tag{7.4}$$

gdzie: $\Delta\widetilde{p}_k$ – średnia różnica ciśnienia na k-tej kondygnacji, Pa,

w – prędkość wiatru, m/s,

ΔT – różnica temperatury powietrza, K,

A, B, C – współczynniki aproksymacji.

Kryterium, zgodnie z metodą najmniejszych kwadratów, miało postać sumy kwadratów odchyłek, mierzonych jako różnica wartości różnicy ciśnienia $\Delta\widetilde{p}_k$, obliczonego założonym wzorem aproksymacyjnym i wyznaczonego metodą symulacji numerycznej:

$$F(A,B,C)=\sum_{j=1}^{n}\left(A\cdot w_j^2+B\cdot\Delta T_j+C-\Delta p_{k,j}\right)^2\Rightarrow\min, \tag{7.5}$$

gdzie: $F(A,B,C)$ – funkcja celu,

Δp_{kj} – średnia wartość różnicy ciśnienia na k-tej kondygnacji, obliczona dla j-tej symulacji.

Współczynniki aproksymacji wyznaczane były na podstawie wyników ok. 8000 pojedynczych symulacji, wykonanych dla zmiennych warunków klimatycznych, różnych współczynników infiltracji powietrza oraz konfiguracji budynków. Zgodnie ze wstępnymi analizami zmienności różnicy ciśnienia poszukiwano przybliżonych równań dla różnych współczynników infiltracji powietrza, w zakresie od 0,1 do 1 $m^3/m\cdot h\cdot Pa^{0,67}$, obejmując w ten sposób zarówno wymagania normatywne szczelności okien, jak i przypadki występujące w budynkach eksploatowanych od dłuższego czasu, ze zużytą stolarką okienną. Poszukiwanie minimum wartości funkcji $F(A,B,C)$ wykonano modułem Solver arkusza kalkulacyjnego Excel. W tabeli 7.2 zestawiono obliczone wartości współczynników równania 7.4.

Jakość aproksymacji oceniona została zarówno co do miary rozproszenia, jak i korelacji (Bobrowski, 1986). Dla wszystkich wyznaczonych funkcji aproksymujących obliczono rozrzut wyników aproksymacji i wartości danych różnicy ciśnienia Δp_k, jako odchylenie standardowe, zdefiniowane za pomocą odchyłek wartości różnicy ciśnienia z symulacji i aproksymowanych:

$$\varepsilon_i=\Delta p_{k,i}-\Delta\widetilde{p}_{k,i}, \tag{7.6}$$

stąd odchylenie standardowe obliczono według wzoru:

$$s=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i^2} \tag{7.7}$$

Tabela 7.2

Wyznaczone współczynniki aproksymacji dla wzoru (7.4)

	kond. 1	**kond. 2**	**kond. 3**	**kond. 4**	**kond. 5**
a = 0,1 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
A	0,27329	0,25239	0,23166	0,20963	0,22027
B	0.651911	0,52564	0,40116	0,26467	0,13375
C	-0,61157	-0,41739	-0,24237	-0,07379	0,00545
a = 0,3 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
A	0,23120	0,21742	0,20298	0,19140	0,21195
B	0,55929	0,45057	0,34365	0,22653	0,11265
C	-0,26848	-0,09817	0,03151	0,11775	0,11714
a = 0,5 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
A	0,18915	0,17918	0,17282	0,17239	0,20271
B	0,46466	0,37251	0,28484	0,18797	0,09240
C	-0,03761	0,14027	0,22033	0,25189	0,19398
a = 0,7 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
A	0,15384	0,15183	0,15198	0,15917	0,19650
B	0,38524	0,30445	0,23229	0,15346	0,07320
C	0,11452	0,29575	0,35015	0,33973	0,23570
a = 1,0 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
A	0,11583	0,12276	0,13077	0,14870	0,19043
B	0,29552	0,22848	0,17309	0,11427	0,05400
C	0,22219	0,39072	0,42199	0,37418	0,27743

Korelację wartości ciśnienia uzyskanego za pomocą wzoru empirycznego i obliczonego programem *Multiven* wyznaczono poszukując równania prostej regresji liniowej, przechodzącej z założenia przez początek układu współrzędnych, w postaci równania:

$$\Delta\tilde{p}_k = m \cdot \Delta p_k , \tag{7.8}$$

gdzie m – współczynnik nachylenia prostej regresji.

Obliczono również kwadrat współczynnika korelacji (R^2). Wyniki powyższych obliczeń, wykonanych dla wszystkich proponowanych wzorów empirycznych, przedstawiono w tablicy 7.3. Uzyskane rezultaty były bardzo dobre – wartość współczynnika R^2 dla każdego przypadku była lepsza niż 0,9, a współczynnik nachylenia prostej regresji był we wszystkich równaniach bliski wartości 1. Oznacza to, że przybliżony sposób obliczania ciśnienia

w poszczególnych strefach z powodzeniem może być stosowany we wzorze na wielkość strumienia objętości powietrza infiltrującego, bez obawy popełnienia grubego błędu.

Tabela 7.3

Wartości odchylenia standardowego, współczynników regresji liniowej i korelacji przy wyznaczaniu $\Delta\widetilde{p}_t$

	kond. 1	**kond. 2**	**kond. 3**	**kond. 4**	**kond. 5**
a = 0,1 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
s	0.1505	0.1445	0,1476	0,1731	0,2556
m	0,999	0,999	0,999	0,999	0,998
R^2	0,998	0,997	0,996	0,989	0,967
a = 0,3 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
s	0,1364	0,1389	0,1452	0,1978	0,2746
m	0,999	0,999	0,999	0,999	0,994
R^2	0,998	0,997	0,994	0,982	0,957
a = 0,5 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
s	0,1497	0,1572	0,1791	0,2392	0,2983
m	0,999	0,999	0,999	0,997	0,991
R^2	0,996	0,994	0,987	0,965	0,943
a = 0,7 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
s	0,1381	0,1428	0,1782	0,2697	0,4952
m	0,999	0,999	0,999	0,995	0,971
R^2	0,995	0,992	0,982	0,943	0,816
a = 1,0 $m^3/m\,h\,Pa^{0,67}$					
s	0,1295	0,1499	0,2069	0,3050	0,3441
m	0,999	0,999	0,998	0,992	0,982
R^2	0,993	0,985	0,962	0,905	0,912

gdzie: s – odchylenie standardowe
m – współczynnik nachylenia prostej regresji
R^2 – kwadrat współczynnika korelacji

Analiza wartości wyznaczonych aproksymacyjnie współczynników równania empirycznego (wzór 7.4) mogłaby sugerować, że możliwe jest ich uśrednienie, np. dla wszystkich kondygnacji czy też różnych szczelności. Takie postępowanie spowodowałoby w konsekwencji wystąpienie znaczących błędów w obliczeniach infiltracji, szczególnie w przypadku występowania "wyrazistych" zjawisk pogodowych: dużej prędkości wiatru i niskiej temperatury otoczenia, co potwierdziły próbne symulacje dla innych (uproszczonych) wariantów wzoru empirycznego. Próby wprowadzenia do wzoru

empirycznego numeru kondygnacji (czy też – równoważnie – wysokości wzniesienia danej strefy ponad poziom odniesienia) znacząco pogarszały jakość aproksymacji w przypadku dodania składnika liniowego lub komplikowały wzór obliczeniowy na skutek konieczności zastosowania wielomianu wyższego rzędu, ponieważ zmienność wyznaczonych współczynników jest istotnie nieliniowa w funkcji wysokości położenia strefy.

Wzór umożliwiający przybliżone obliczanie strumienia objętości infiltrującego powietrza w zdefiniowanej strefie budynku wielorodzinnego powstaje ze skojarzenia równań (7.1) – (7.3), z wykorzystaniem wyznaczonych wartości współczynników A,B,C (Tab. 7.2):

$$\dot{V}_m = a \cdot l_m \cdot \left(\left(C_m + A \right) \cdot w^2 + B \cdot \Delta T + C \right)^{0,67} \tag{7.9}$$

8. OCENA DOKŁADNOŚCI PRZYBLIŻONYCH OBLICZEŃ INFILTRACJI I ZAKRES ZASTOSOWAŃ METODY

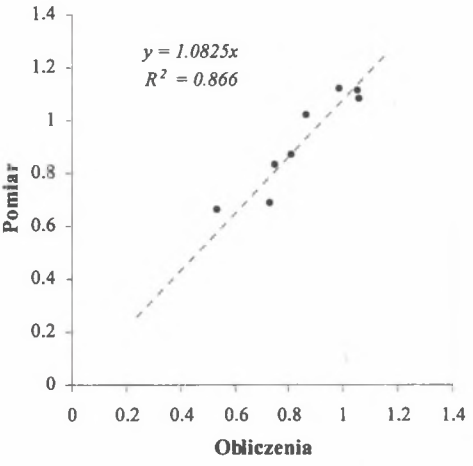
Opracowana, przybliżona metoda obliczania infiltracji powietrza została sprawdzona przez porównanie wyników obliczeń i symulacji komputerowej programem *Multiven* dla różnych zakresów zmienności parametrów klimatu zewnętrznego i struktury powiązania stref obliczeniowych w wielorodzinnych budynkach mieszkalnych. Porównano również chwilowe wartości infiltracji powietrza uzyskane drogą pomiarów z odpowiednimi obliczeniami przybliżonymi. Przy opracowywaniu metody liczono się z możliwością, że dokładność wyznaczania infiltracji dla pojedynczych obliczeń może być niezbyt dobra. Algorytm i wzory empiryczne konstruowane były z zamysłem zastosowań do oszacowania przynajmniej rzędu wielkości strumieni objętości powietrza infiltrującego do mieszkań w dłuższym czasie, np. w cyklach tygodniowych, miesięcznych czy też sezonu grzewczego.

8.1. Porównanie wyników obliczeń przybliżonych i pomiarów infiltracji

Pomiary wymiany powietrza w jednym z mieszkań budynku wielorodzinnego posłużyły weryfikacji dokładności działania programu symulacyjnego. Użycie wyników pomiarów wymiany powietrza wydaje się również uzasadnione dla sprawdzenia poprawności obliczeń przybliżonych. Obliczenia infiltracji powietrza wykonano na podstawie zarejestrowanych w czasie pomiarów danych meteorologicznych, zapisywanych co 5 minut. Przyjęto, że pomiar wymiany powietrza zachodzi w czasie pierwszej godziny eksperymentu i stąd obliczenia infiltracji wykonano dla średniej wartości prędkości i kierunku wiatru oraz temperatury zewnętrznej, występujących w tym czasie. Wyniki przybliżonych obliczeń infiltracji zestawiono w tablicy 8.1, porównując je z odpowiednimi rezultatami pomiarowymi. Dokładność obliczeń przybliżonych w relacji do wyników pomiarów oceniono obliczając ich wzajemną korelację, przy założeniu regresji liniowej – rys. 8.1. Wzajemna korelacja liczby wymian powietrza, zmierzona i obliczona przybliżoną metodą, jest nieco gorsza niż uzyskana drogą symulacji ($R^2 = 0{,}9106$), niemniej zgodność wyników można uznać za dobrą – średni błąd względny obliczeń wynosi ok. –8%.

Tabela 8.1
Zestawienie wyników obliczeń i pomiarów wymiany powietrza

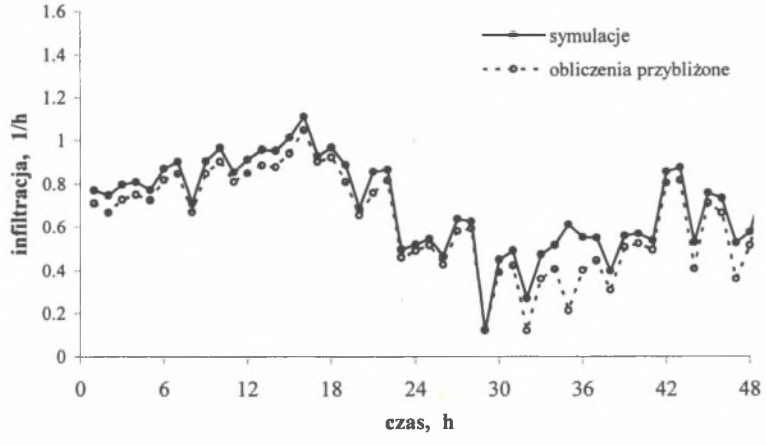
Wyniki pomiarów	Obliczenia przybliżone	Błąd względny
0,66	0,54	-18,4 %
1,11	1,06	-4,9 %
1,08	1,06	-2,1 %
0,87	0,81	-6,6 %
0,83	0,75	-9,9 %
0,69	0,73	6,1 %
1,12	0,98	-12,2 %
1,02	0,86	-15,3 %



Rys. 8.1. Korelacja wyników obliczeń i pomiarów wymiany powietrza
Fig. 8.1. Correlation of the air change rate simulation and measurement results

8.2. Porównanie wyników obliczeń przybliżonych i symulacyjnych infiltracji

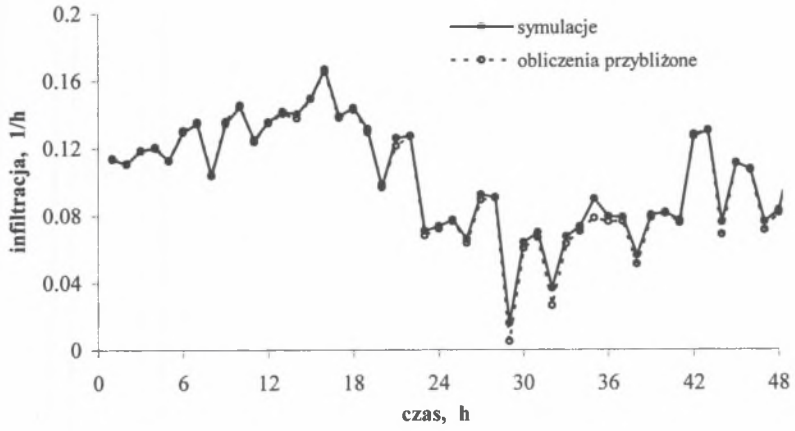
Przebieg zmienności infiltracji powietrza, mierzonej liczbą wymian w czasie 48 godzin w jednym z mieszkań na parterze budynku, uzyskany drogą obliczeń symulacyjnych oraz za pomocą proponowanej metody przedstawiono na rys. 8.2.



Rys. 8.2. Porównanie wyników symulacji z obliczeniami przybliżonymi infiltracji (okna nieszczelne, a = 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$)
Fig. 8.2. Comparison of the simulation and approximate calculation results of infiltration for leaky windows (a= 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$)

Wykres ten daje możliwość jakościowej oceny dokładności obliczeń przybliżonych: charakter zmienności infiltracji jest podobny dla obu metod, chociaż obliczenia przybliżone dają wartości nieco mniejsze niż symulacje.

Dokładność obliczeń infiltracji powietrza metodą przybliżoną jest lepsza, jeżeli dotyczy szczelnych okien. Rysunek 8.3 przedstawia infiltrację powietrza w tym samym mieszkaniu i dla tych samych parametrów meteorologicznych, z tą różnicą, że założono współczynnik infiltracji powietrza a = 0,1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$, dziesięciokrotnie mniejszy niż dla obliczeń, których wyniki pokazano na rys. 8.2.

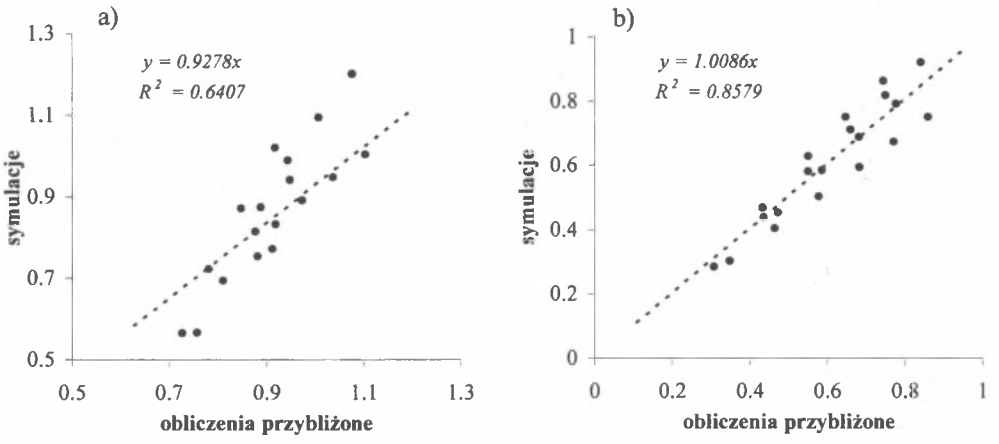


Rys. 8.3. Porównanie wyników symulacji i obliczeń przybliżonych infiltracji w przypadku szczelnych okien (a = 0,1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$)

Fig. 8.3. Comparison of the simulation and approximate calculation results of infiltration for airtight windows (a= 0,1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$)

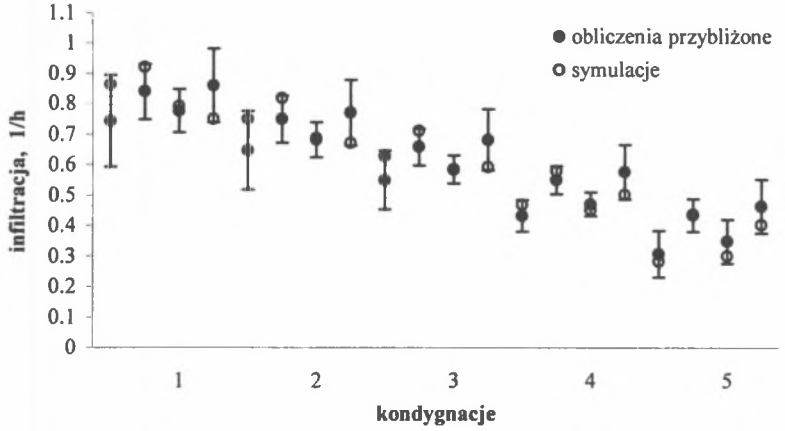
Można sądzić, że dobra zgodność wyników symulacji i obliczeń przybliżonych dla pojedynczych obliczeń oznacza równie wysoką korelację przy porównywaniu wartości średnich infiltracji z dłuższego czasu. Wykresy z rys. 8.2 i 8.3 przedstawiają infiltrację powietrza dla krótkich okresów czasu i pomimo wizualnej zgodności obu grup wyników miarą poprawności obliczeń przybliżonych, w porównaniu z symulacjami, powinna być ich wzajemna korelacja. Opracowanie wyników symulacji i obliczeń przybliżonych potwierdzają, że im dłuższy czas uśredniania, tym zgodność średnich wyników tych obliczeń i symulacji jest lepsza. Prezentowane na rys. 8.4 korelacje dotyczą infiltracji powietrza w mieszkaniach, w których współczynnik infiltracji a = 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$. Wartość ta jest reprezentatywna dla budynków, które nie były poddane termorenowacji, a stan stolarki okiennej jest daleki od współczesnych standardów. Współczynnik korelacji pomiędzy średnimi wynikami obliczeń przybliżonych i średnimi wynikami z obliczeń symulacyjnych wynosi ok. 0,8 przy czasie

uśredniania równym 3 tygodnie (rys. 8.4a) i 0,93 dla uśredniania w czasie 6 miesięcy (rys. 8.4b).



Rys. 8.4. Korelacja wyników symulacji i obliczeń przybliżonych infiltracji powietrza przy różnym czasie uśredniania: a) 3 tygodnie, b) 6 miesięcy
Fig. 8.4. Correlation of the air infiltration simulation and approximate calculation results for different averaging time: a) 3 weeks, b) 6 months

Dobrą zgodność wyników obliczeń infiltracji metodą przybliżoną i pochodzących z symulacji uzyskano dla sezonu grzewczego na podstawie danych meteorologicznych zarejestrowanych w okresie od października do kwietnia, w sezonie 2000/2001. Dokładność obliczeń przybliżonych oszacowano zaznaczając na wykresie (rys. 8.5) odchylenie standardowe obliczeń.



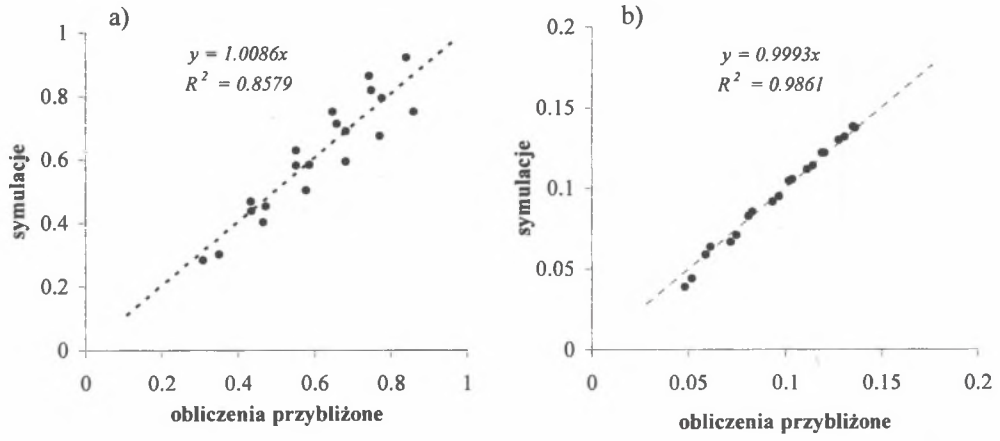
Rys. 8.5. Porównanie średnich wyników obliczeń przybliżonych i symulacji infiltracji (czas uśredniania: 6 miesięcy, okna nieszczelne, a = 1 $m^3/m^3 \cdot h \cdot Pa^{0,67}$)
Fig. 8.5. Comparison of the average results of approximate calculations and simulations of infiltration (averaging time: 6 months, leaky windows a = 1 $m^3/m^3 \cdot h \cdot Pa^{0,67}$)

Bezpośrednie porównanie symulacji z obliczeniami infiltracji powietrza mierzonej liczbą wymian (a więc unormowanej miarą kubatury wentylowanych mieszkań) dla sezonu grzewczego, potwierdza większą dokładność obliczeń średnich dla dłuższych przedziałów czasu – odchylenia standardowe obliczeń są zauważalnie mniejsze w porównaniu z krótszym czasem uśredniania:

– dla 6 miesięcy średnie odchylenie standardowe wynosi 0,08, średni błąd względny -1,1% (rys. 8.5),

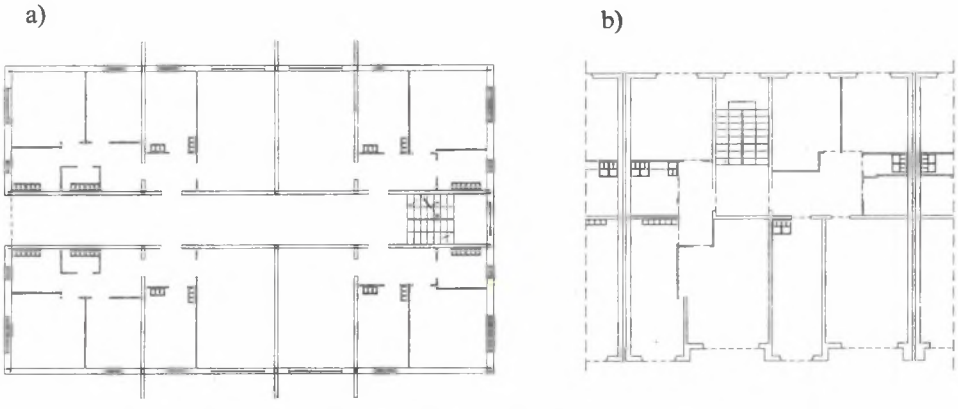
– dla 3 tygodni średnie odchylenie standardowe wynosi 0,2, a średni błąd względny -14%.

Dokładność przybliżonych obliczeń jest tym lepsza, im mniejszy jest współczynnik infiltracji powietrza w mieszkaniach. Dotyczy to nie tylko przypadku pojedynczego mieszkania (por. rys. 8.2 i 8.3), ale wszystkich mieszkań w budynku. Zależność tę obrazują wykresy korelacji wzajemnej wyników obliczeń przybliżonych i symulacji, przedstawione na rys. 8.6 dla współczynników infiltracji a = 1 oraz a = 0.1 $m^3/m^3 \cdot h \cdot Pa^{0,67}$.



Rys. 8.6. Korelacja wyników symulacji i obliczeń przybliżonych infiltracji powietrza przy różnej szczelności okien: a) okna nieszczelne, b) okna uszczelnione
Fig. 8.6. Correlation of the air infiltration simulation and approximate calculation results for different airtightness of windows: a) leaky windows, b) airtight windows

Metodę przybliżonego obliczania infiltracji sprawdzono też dla budynku 5-kondygnacyjnego o innej konfiguracji – jednego z segmentów szeregowego budynku wielorodzinnego z dwoma mieszkaniami na każdej kondygnacji (rys. 8.7b). Obliczenia – według proponowanej metody – przeprowadzono dla danych klimatycznych obejmujących sezon grzewczy 2000/2001, zarejestrowanych przez lokalną stację meteorologiczną. Porównanie wyników symulacji oraz obliczeń przybliżonych (wartości średnie w okresie sezonu grzewczego) dla różnych współczynników infiltracji powietrza zestawiono w tablicy 8.2. Średni błąd względny obliczeń zawierał się w przedziale 8 – 10%.



Rys. 8.7. Rzuty kondygnacji badanych budynków 5 – kondygnacyjnych:
a – wolnostojący, b – segment zabudowy szeregowej
Fig. 8.7. Floor plans of examined 5-storey buildings: a) – detached, b) – terraced

Tabela 8.2

Porównanie średniej liczby wymian powietrza w mieszkaniach budynku szeregowego

	średnia liczba wymian, 1/h: symul. / obliczenia ± odch. stand.		
	a = 0,1	a = 0,5	a =1,0
kond. 1	0,107/0,121 ± 0,01	0,426/0,491 ± 0,07	0,617/0,720 ± 0,13
kond. 2	0,089/0,106 ± 0,01	0,369/0,431 ± 0,07	0,536/0,632 ± 0,12
kond. 3	0,068/0,089 ± 0,01	0,303/0,368 ± 0,07	0,444/0,544 ± 0,12
kond. 4	0,045/0,069 ± 0,01	0,227/0,289 ± 0,07	0,338/0,508 ± 0,18
kond. 5	0,022/0,048 ± 0,01	0,155/0,204 ± 0,06	0,234/0,324 ± 0,11

We wszystkich analizowanych przypadkach uzyskano dobrą zgodność wyników infiltracji obliczonej w sposób przybliżony i metodą dokładnej symulacji: wartość kwadratu współczynnika korelacji (R^2) wahała się od 0,95 do 0,98.

Dobre wyniki obliczeń przybliżonych dla tego typu budynku, wynikają m.in. z konfiguracji mieszkań i lokalizacji okien – praktycznie oba mieszkania na piętrze mają porównywalne warunki infiltracji (przy tej samej klasie przepuszczalności powietrznej okien). Ulokowanie okien tylko na dwóch przeciwległych ścianach budynku powoduje, że uwzględnienie w obliczeniach przybliżonych oddziaływania wiatru jest obarczone mniejszą niepewnością.

8.3. Zastosowanie przybliżonych obliczeń infiltracji powietrza do wyznaczania zapotrzebowania na ciepło w mieszkaniu

Znajomość wielkości infiltracji powietrza jest ważna nie tylko z punktu widzenia jakości powietrza wewnętrznego, ale również dla ustalenia niezbędnych nakładów ciepła, w których udział potrzeb związanych z podgrzaniem powietrza infiltrującego jest znaczący.

Proponowaną metodę przybliżonego wyznaczania infiltracji zastosowano do takich obliczeń, a wyniki porównano z obliczeniami cieplnymi, z uwzględnieniem symulacyjnego wyznaczenia infiltracji powietrza. Przeprowadzone powyżej porównania dokładności wyznaczania infiltracji wskazują, że również dokładność wyników obliczeń cieplnych będzie podobna.

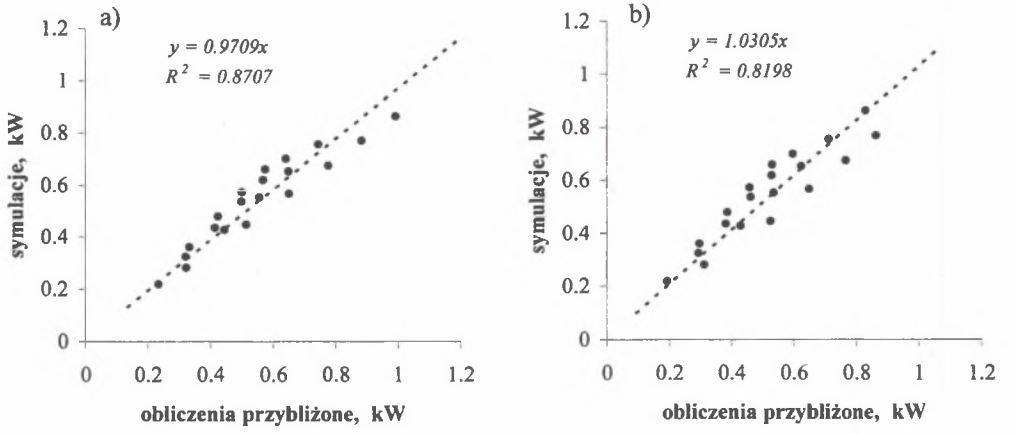
Metoda uproszczonego obliczania infiltracji została sprawdzona w odniesieniu do sezonu grzewczego, z uwagi na istotne znaczenie oszacowania niezbędnych nakładów ciepła, potrzebnych do ogrzania chłodnego powietrza napływającego do mieszkań. Za pomocą programu *Multiven* przeprowadzono symulacje numeryczne, natomiast obliczenia przybliżone zostały wykonane za pomocą opracowanych wzorów empirycznych. W przypadku symulacji strumienie objętości powietrza infiltrującego były przeliczane w programie na odpowiadający

im strumień ciepła, niezbędny do podgrzania, do założonej temperatury powietrza w strefie obliczeniowej. W podobny sposób obliczano konieczne nakłady ciepła, przy przybliżonym wyznaczaniu infiltracji dla średnich warunków meteorologicznych w danym okresie.

Obliczenia i symulacje wykonano dla parametrów klimatu monitorowanego w sezonie grzewczym roku 2000/2001, w okresie od października do kwietnia, a następnie porównano korelacje średnich z obu grup wyników (rys. 8.8a). Dodatkowo obliczono nakłady cieplne związane z infiltracją dla średnich danych meteorologicznych, dla rozpatrywanego czasu, a mianowicie:

- średnia temperatura powietrza: 3,3°C,
- średnia prędkość wiatru: 2,1 m/s,
- średni kierunek wiatru: 215°

i również obliczono korelację ze średnią z wyników symulacji, z krokiem godzinowym (rys. 8.8b).



Rys. 8.8. Porównanie wyników obliczeń przybliżonych i symulacji nakładów ciepła na potrzeby wentylacyjne: a) średnie z symulacji i obliczeń dla całego sezonu, b) obliczenia – dla średnich w sezonie danych klimatycznych, symulacje – średnie z wyników dla całego sezonu

Fig. 8.8. Comparison of the results of approximate calculation and simulation of heat input for ventilation purposes: a) both calculation and simulation as seasonal average, b) calculation as obtained for the set of averaged heating season climatic data; simulation as seasonal average

Przedstawione wyniki obliczeń cieplnych dotyczą mieszkań z oknami nieszczelnymi, dla których współczynnik infiltracji a = 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$. Podobnie jak w przypadku przybliżonych obliczeń infiltracji, dokładność obliczeń strumieni ciepła zwiększa się wraz ze

zwiększeniem szczelności okien (dla współczynnika infiltracji a = 0.1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$ współczynnik korelacji jest bliski 0,99).

Porównanie dokładności obliczeń przybliżonych nakładów cieplnych i infiltracji powietrza z odpowiednimi wynikami symulacji dają podobne rzędy wielkości współczynników korelacji (por. rys. 8.6a i 8.8a). Wartość średniego błędu względnego obliczeń dla sezonu grzewczego wynosi ok. -2%, natomiast przy obliczeniach dla poszczególnych miesięcy waha się od –15% do +13%, przy założeniu małej szczelności okien. Powtórzenie obliczeń i symulacji dla szczelnych okien (a = 1 $m^3/m \cdot h \cdot Pa^{0,67}$) dawało podobne wyniki – dokładność obliczeń mierzona średnim błędem względnym, odniesionym do średnich wyników symulacji, wynosiła również ok. –2%.

Przeprowadzone obliczenia, porównania i analizy pozwalają na sformułowanie wniosków odnośnie przydatności proponowanej metody przybliżonych obliczeń infiltracji i relatywnego zużycia ciepła, a także możliwości zastosowań metody. Przedstawiony sposób obliczania infiltracji jest niewątpliwie łatwiejszy do praktycznego zastosowania niż wykonanie adekwatnych symulacji numerycznych, chociaż zastosowanie metody wymaga przygotowania danych wejściowych, podobnych jak w przypadku obliczeń symulacyjnych. Algorytm obliczeń jest prosty i łatwy do zrealizowania, np. w arkuszu kalkulacyjnym, co pozwala na pewną automatyzację obliczeń. Pamiętając o celu tworzenia takiej metody, którym jest umożliwienie oszacowania infiltracji powietrza oraz koniecznych odpowiednich nakładów ciepła w sezonie grzewczym dla podgrzania tego strumienia powietrza można stwierdzić dobrą dokładność wyników obliczeń przybliżonych. Zarówno dla tych obliczeń wykonywanych dla ustalonych, chwilowych danych klimatycznych, jak i przy obliczeniach przeprowadzonych w dłuższym czasie średni błąd względny nie przekracza 10% (w porównaniu z odpowiednimi symulacjami numerycznymi). W niektórych przypadkach błąd ten jest większy, szczególnie dla mieszkań na najwyższych kondygnacjach budynku, w przypadku małej przepuszczalności powietrznej okien. Miarą dokładności metody jest też wartość współczynników korelacji wzajemnej wyników obliczeń przybliżonych i symulacji, które w przypadku wyznaczania infiltracji są w granicach od 0,8 do 0,99, przy czym najlepszą korelację uzyskano przy obliczeniach dla całego sezonu grzewczego. Oznacza to, że metoda może być stosowana z dobrym przybliżeniem do szacowania zapotrzebowania ciepła na cele wentylacji naturalnej, właśnie w tym okresie. Szczególnie istotne są wyniki obliczeń przeprowadzonych dla średnich (w danym przedziale czasu) parametrów klimatu (temperatury zewnętrznej, prędkości i kierunku wiatru). Porównanie ich z uśrednionymi dla tego okresu wynikami symulacji pokazuje, że wykonanie przybliżonych obliczeń może być

podstawą do dość dokładnego oszacowania zarówno średniej wymiany powietrza w poszczególnych mieszkaniach, jak i odpowiadającego temu zapotrzebowaniu na ciepło. Przeprowadzenie odpowiednich obliczeń dla średnich – w danym czasie i miejscu lokalizacji budynku – parametrów klimatu może okazać się dobrym sposobem sprawdzenia jakości wentylacji w różnych strefach istniejącego budynku, a także pomóc w podejmowaniu decyzji modernizacyjnych, mających wpływ na działanie wentylacji naturalnej (np. uszczelnianie powłoki budynku).

Dobra zgodność wyników obliczeń – za pomocą proponowanej metody – potwierdza zasadność założenia przyjętego przy konstrukcji wzorów przybliżonego obliczania infiltracji, jako przydatnego dla szacowania wymiany powietrza w mieszkaniach, w dłuższym czasie.

9. PODSUMOWANIE

Wentylacja naturalna jest procesem, który niezbyt łatwo daje się kontrolować, a więc również prognozowanie może być obarczone dużą niepewnością. Metody pomiarowe wymiany powietrza, a także programy symulacyjne, umożliwiają ilościową ocenę infiltracji, jednak w przypadku pomiarów wyniki są wiarygodne, pod warunkiem stabilnych warunków meteorologicznych, najlepiej przy bezwietrznej pogodzie. Obliczenia symulacyjne mogą być uznane za realistyczne o tyle, o ile dokładne jest odwzorowanie badanego obiektu i dróg przepływu powietrza, za pomocą algorytmu numerycznego oraz jeżeli zgodne z rzeczywistością są wejściowe dane meteorologiczne. W pracy przedstawiono zarówno wyniki pomiarów wymiany powietrza, jak i odpowiednich symulacji numerycznych wykazując, że właściwie wykorzystany program symulacyjny może być wystarczająco dokładnym narzędziem dla oceny jakości wentylowania budynków wielorodzinnych. Przeprowadzony wielodniowy eksperyment pomiarowy potwierdził, że autorski program symulacyjny z dobrą dokładnością modeluje przepływy powietrza wentylacyjnego w skomplikowanej strukturze wielorodzinnego budynku mieszkalnego i w związku z tym wyniki obliczeń, uzyskanych tym programem mogą być wykorzystane do utworzenia algorytmu obliczeń przybliżonych infiltracji powietrza.

Dla potrzeb realizacji celu pracy niezbędne było przeprowadzenie wielu symulacji przepływów powietrza wentylacyjnego dla zróżnicowanych warunków klimatycznych, jak też dotyczących różnej konfiguracji budynków. Wyniki tych obliczeń umożliwiły pokazanie relacji pomiędzy poszczególnymi czynnikami warunkującymi infiltrację powietrza do mieszkań. Wspomniane korelacje dotyczyły nie tylko parametrów meteorologicznych, ale również wentylowania mieszkań w powiązaniu z lokalizacją budynku i wewnętrzną konfiguracją mieszkań.

Główny cel pracy, polegający na opracowaniu metody obliczeniowej, umożliwiającej z możliwie dobrą dokładnością prognozowanie infiltracji powietrza w mieszkaniach budynku wielorodzinnego, został w pełni osiągnięty. Proponowany wzór obliczeniowy ujmuje wszystkie, istotne dla infiltracji czynniki zarówno związane z lokalizacją i strukturą interesującej strefy obliczeniowej, jak i danymi meteorologicznymi, warunkującymi zjawisko. Uzyskana dokładność obliczeń infiltracji, odniesiona do wyników odpowiednich symulacji, jest na dobrym poziomie, nie tylko dla średnich, obliczonych dla dłuższego czasu, ale również w przypadku pojedynczych obliczeń.

Proponowany sposób obliczeń infiltracji powietrza może z dobrym skutkiem zastąpić szczegółowe obliczenia symulacyjne, dając oszacowanie ilościowe zarówno wentylowania mieszkań, jak i koniecznych na ten cel nakładów ciepła. Takie lub podobne sposoby przybliżonych obliczeń mogą być bardzo przydatne w niedalekiej przyszłości, w związku z regulacjami Unii Europejskiej w zakresie aspektów energetycznych eksploatacji budynków i konieczności przedstawienia minimalnych, zintegrowanych nakładów energii zarówno dla budynków istniejących, z uwagi na konieczność ich termorenowacji, jak i sporządzenia certyfikatów energetycznych dla nowych budynków. Uproszczona metoda obliczania infiltracji może znaleźć zastosowanie na różnych etapach istnienia budynku, poczynając od wstępnych projektów, a kończąc na audytach energetycznych. Szacowanie infiltracji na podstawie proponowanej metody może być przydatne we wszelkiego rodzaju ekspertyzach i ocenach działania systemów wentylacji grawitacyjnej budynków.

Śledząc kierunki działań wiodących ośrodków, które organizują prace badawcze w skali międzynarodowej, można zauważyć dwa główne kierunki badań w zakresie identyfikacji przepływów powietrza wentylacyjnego w budynkach i potrzeb cieplnych związanych z infiltracją powietrza. Pierwszy z nich znajduje wyraz m. in. w pracach Międzynarodowej Agencji Energii (IEA), realizowanych w ramach programu "Energy Conservation in Buildings and Community Systems" w postaci tzw. Annexów – kilkuletnich prac badawczych, prowadzonych przez naukowców z całego świata. W ostatnim czasie projekty te dotyczą problematyki możliwości kontroli jakości funkcjonowania budynków, traktowanych jak zintegrowany układ powłoki i systemów grzewczych i wentylacyjnych. W ramach tych prac powstają procedury (zarówno pomiarowe, jak i obliczeniowe), umożliwiające uproszczoną (niemniej możliwie dokładną), często wskaźnikową ocenę działania układów budynek – systemy wyposażenia.

Drugi kierunek badań to programy badawcze dotyczące zaawansowanych, szczegółowych programów symulacyjnych. Celem tych badań jest testowanie, weryfikacja i sprawdzenie przydatności w praktycznych zastosowaniach procedur numerycznych, służących do szczegółowych badań dynamiki funkcjonowania budynków, również z uwagi na aspekt energetyczny, w ujęciu zintegrowanej symulacji przepływów ciepła i substancji.

Można sądzić, że oba kierunki – zarówno tworzenie procedur uproszczonych, jak i bardzo szczegółowych modeli dynamiki przepływów powietrza i ciepła – będą zgodnie współistniały, odpowiadając na potrzeby różnych grup użytkowników. Wydaje się również, że tworzenie nowych modeli czy też procedur obliczeniowych i symulacyjnych będzie postępować równolegle do tworzenia nowych rozwiązań w zakresie systemów wyposażenia budynków, w tym również rozwiązań wentylacji.

LITERATURA

1. Afonso C., Oliveira A., 2000. *Solar chimneys: simulation and experiment.* Energy and Buildings, 32, 71-79.
2. Allard F., Herrlin M., 1989. *Wind-Induced Ventilation.* ASHRAE Transactions, 95(2), 722-728.
3. Allen C., 1984. Wind pressure data requirements for air infiltration calculations. TN 13. Air Infiltration Centre, Bracknell, UK.
4. Allen C., 1985. Leakage distribution in buildings. TN 16. Air Infiltration Centre, Bracknell, UK.
5. ASHRAE 1997. ASHRAE Handbook-fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, USA.
6. Awbi H.B., 1992.Ventilation of Buildings, E&FN SPON, New York.
7. Axley J., Grot R., 1989. *The Coupled Airflow and Thermal Analysis Problem in Building Airflow System Simulation.* ASHRAE Transactions, 95(2), 621-628.
8. Aynsley R.M., 1997. *A resistance approach to analysis of natural ventilation airflow networks.* Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67&68, 711-719.
9. Ayres, J.M., Stamper E., 1995. *Historical development of building energy calculations.* ASHRAE Transactions, 101(1), 841-849.
10. Baranowski A., Knobloch B., Mierzwiński S., Wąsacz M., 1987. *Modelowanie matematyczne i eksperymentalne ruchu powietrza wentylacyjnego w budownictwie mieszkaniowym i towarzyszącym. Instytut Ogrzewnictwa, Wentylacji i Ochrony Powietrza*, Gliwice 1987 (niepublikowane).
11. Baranowski A., Mierzwiński S., 1990. *Napór wiatru na budynek jako skupiony parametr w obliczeniach infiltracji powietrza.* Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 146, Częstochowa, seria: Budownictwo, z. 3, 101-111.
12. Baranowski A., Mierzwiński S., Wąsacz M., 1990. *Analiza symulacyjna przepływu powietrza wentylacyjnego w obrębie budynku mieszkalnego.* Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Gliwice, seria: Inżynieria Środowiska, z. 33, 127-138.
13. Baranowski A., 1993a. *Influence of Air Infiltration on Heat Losses in Multifamily Dwelling Houses.* Proceedings of 14th AIVC Conference "Energy Impact of Ventilation and Air Infiltration", Copenhagen, Denmark, September 1993, 457-463.
14. Baranowski A., 1993b. *Natural Ventilation in Multi-family Dwelling Houses at Simulated Heat Season Climate Conditions - Numerical Prediction and Analysis.* Proceedings of International Scientific Conference "Indoor Air Quality Problems - From Science to Practice", Warsaw, Poland, November 1993, 57-62.
15. Baranowski A., 1994a. *Prediction of Air Flow in Multifamily Dwelling House in Consideration of Energy Consumption and Indoor Air Quality.* Proceedings of the Fourth International Conference ROOMVENT'94, vol.1, Kraków, Poland, June 1994, 617-624.

16. Baranowski A., 1994b. *The Role of Infiltration for Indoor Air Quality: A Case Study in Multifamily Dwelling Houses in Poland.* Proceedings of 15th AIVC Conference "The Role of Ventilation", Buxton, Great Britain, September 1994, 133-139.

17. Baranowski A., Pudełko D., 1996. *Possibilities of energy conservation in multi-family dwelling houses in the consideration of the effectiveness of natural ventilation.* Proceedings of 5th International Conference on Air Distribution in Rooms, ROOMVENT '96, vol. 3, Yokohama, Japan, 17-19 July 1996, 285-290.

18. Baranowski A., 1998, Sprawozdanie z realizacji Projektu Badawczego KBN Nr 7 T07G 005 09. Modelowanie nieustalonych przepływów powietrza wentylacyjnego i wymiany ciepła w wielokondygnacyjnych budynkach mieszkalnych. Gliwice 1998, (niepublikowane).

19. Baranowski A., 1999. *Multifamily building. Case study.* W: Annex 30 "Bringing Simulation to Application. Final Report". André P., Lebrun J. [ed.], University of Liège, Thermodynamics Laboratory, Belgium, July 1999.

20. Baranowski A., 2001. *Measurement and Simulation of Air Exchange in the Existing Building.* Proceedings of Clima 2000/Napoli 2001 World Congress - Napoli (I), 15-18 September 2001.

21. Baranowski A., 2002. Sprawozdanie z realizacji Projektu Badawczego KBN Nr 7 T07G 013 17. Weryfikacja systemowej symulacji budynków wielokondygnacyjnych w aspekcie nakładów energetycznych i przepływów powietrza wentylacyjnego. Gliwice 2002, (niepublikowane).

22. Baranowski A., Pudełko D., 2002. *Experimental Verification of Thermal Analysis of Existing Building.* Proceedings of 6th International Conference on System Simulation in Buildings, Liège, December.

23. Baranowski A., Gierczycka E., Pudełko D., 2003. *Badania eksperymentalne nakładów energetycznych oraz przepływów powietrza wentylacyjnego w wielorodzinnym budynku mieszkalnym.* Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja nr 4, 24-29, nr 5, 26-30.

24. Baranowski A., Ferdyn-Grygierek J., 2003. *Zintegrowana symulacja numeryczna nakładów ciepła i wymiany powietrza w mieszkaniu budynku wielorodzinnego.* Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja nr 9, 11-14.

25. Blomsterberg A., Carlsson T., Svensson C., Kronvall J., 1999. *Air flows in dwellings-simulations and measurements.* Energy and Buildings, 30, 87-95.

26. Bobrowski D., 1986. Probabilistyka w zastosowaniach technicznych. WNT, Warszawa.

27. Borchiellini R., Furbringer J-M., 1999. *An evaluation exercise of a multizone air flow model.* Energy and Buildings, 30, 33-51.

28. Boyer H., Garde F., Gatina J.C., Brau J., 1998. *A multimodel approach to building thermal simulation for design and research purposes.* Energy and Buildings, 28, 71-78.

29. Boyer H., Lauret A.P., Adelard L., Mara T.A., 1999. *Building ventilation: a pressure airflow model computer generation and elements of validation.* Energy and Buildings, 29, 283-292.

30. Brager G.S., de Dear R.J., 1998. *Thermal adaptation in the built environment: a literature review*. Energy and Buildings, 27, 83-96.

31. Caccavelli D., Roux J.J., Allard F., 1988. *A simplified approach of air infiltration in multizones buildings*. Proceedings of 9th AIVC Conference "Effective Ventilation", Gent, Belgium.

32. Cea J., 1978. Optymalizacja. Teoria i algorytmy. PWN, Warszawa.

33. Charlesworth P.S., 1988. Air Exchange Rate and Airtightness Measurement Techniques – An Applications Guide. Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, Great Britain.

34. Concannon P., 2002. Simplified Tools for Evaluation of Domestic Ventilation Systems. Technical Synthesis Report IEA ECBCS Annex 27. Faber Maunsell Ltd, Hertfordshire, UK.

35. Crawley D. B. et al, 2001. *EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program*. Energy and Buildings, 33/4, 443-457.

36. Dascalaki E., Santamouris M., Bruant M., Balaras C.A., Bossaer A., Ducarme D., Wouters P., 1999. *Modelling large openings with COMIS*. Energy and Buildings, 30, 105-115.

37. Delgado D., Borges J., Conde P., 1996. *Wind action and temperature difference effects on the ventilation rate of a two-storey building communicating with the outside environment by a chimney*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 65, 371-381.

38. Dorer V., Weber A., 1999. *Air, contaminant and heat transport models: integration and application*. Energy and Buildings, 30, 97-104.

39. Dubrul C., 1988. Inhabitant Behaviour with Respect to Ventilation – a Summary Report of IEA Annex 8. TN 23. Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, England.

40. ESRU 1999., ESP-r: a building and plan energy simulation environment, User Guide. Version 9 Series. ESRU Publication, University of Strathclyde, Glasgow.

41. Etheridge D., Sandberg M., 1996. Building Ventilation: Theory and Measurement. J.Wiley &Sons, New York.

42. Etheridge D.W., 1998. *A Note on Crack Flow Equations for Ventilation Modelling*. Building and Environment, 33(5), 325-328.

43. Etheridge D.W., 2000a. *Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design – mean flow rates*. Building and Environment, 35, 111-133.

44. Etheridge D.W., 2000b. *Unsteady flow effects due to fluctuating wind pressures in natural ventilation design – instantaneous flow rates*. Building and Environment, 35, 321-337.

45. Fanger P.O., Popiołek Z., Wargocki P. [red.], 2003. Środowisko wewnętrzne. Wpływ na zdrowie, komfort i wydajność pracy. Politechnika Śląska, Gliwice.

46. Federspiel C.C., 1999. *Air-Change Effectiveness: Theory and Calculation Methods*. Indoor Air, 9, 47-56.

47. Feustel H.E., Kendon V.M., 1985. *Infiltration Models for Multicellular Structures – A Literature Review*. Energy and Buildings, 8(2), 123-136.

48. Feustel H.E., Dieris J., 1991. A Survay of Air Flow Models for Multizone Structures. Lawrence Berkeley Laboratory Report, LBL-30288.

49. Feustel H.E., 1999. *COMIS – an international multizone air-flow and contaminant transport model*. Energy and Buildings, 30, 3-18.

50. Feustel H.E., Raynor-Hoosen A. [ed.], 1990. COMIS – Fundamentals. Berkeley, USA.

51. Feustel H.E., Smith B.V. [ed.], 1995. COMIS 2.1 – User's Guide. Berkeley, USA.

52. Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., 1980. Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji. PWN, Warszawa.

53. Fordham, M., 2000. *Natural ventilation*. Renewable Energy, 19, 17-37.

54. Gandemer J., 1978. *Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles*. Cahiers du centre scientifique et Technique du batiment, N° 187, Paris.

55. Gawin D. [red.], 1998. Komputerowa symulacja procesów wymiany masy i energii w budynku. Przykłady zastosowań. Politechnika Łódzka.

56. Grosso M., 1992. *Wind pressure distribution around buildings: a parametrical model*. Energy and Buildings, 18, 101-131.

57. Haghighat F., Brohus H., Rao J., 2000. *Modelling air infiltration due to wind fluctuation – a review*. Building and Environment, 35, 377-385.

58. Handa K., 1979. Wind induced natural ventilation. Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden.

59. Hanson T., Smith F., Summers D., Wilson C.B., 1982. *Computer simulation of wind flow around buildings*. Computer-aided Design, 14(1), 27-31.

60. Hensen J.L.M., 1995. *Modelling coupled heat and airflow: Ping-pong vs onions*. Proceedings of the 16th AIVC Conference "Implementing the Results of Ventilation Research", Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK, 253-262.

61. Hong T., Jiang Y., 1997. *A New Multizone Model for the Simulation of Building Thermal Performance*. Building and Environment, 32(2), 123-128.

62. Hong T., Chou S.K., Bong T.Y., 2000. *Building simulation: an overview of developments and information sources*. Energy and Buildings, 35, 347-361.

63. Hunt G.R., Linden P.F., 1999. *The fluid mechanics of natural ventilation – displacement ventilation by buoyancy-driven flows assisted by wind*. Building and Environment, 34, 707-720.

64. IISiBat 2.1 for COMIS. User Manual. IEA-ECB Annex 23. 1995.

65. Inard Ch., Bouia H., Dalicieux P., 1996. *Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model*. Energy and Buildings, 24, 125-132.

66. Jones P.J., Whittle G.E., 1992. *Computational Fluid Dynamic for Building Air Flow Prediction – Current Status and Capabilities*. Building and Environment, 27(3), 321-338.

67. Kendrick J., 1993. An Overview of Combined Modelling of Heat Transport and Air Movement. TN 40. Air Infiltration Centre, Coventry, UK.

68. Korn G.A., Korn T.M., 1983. Matematyka dla pracowników naukowych i inżynierów. PWN, Warszawa.

69. Li Y., Delsante A., Symons J., 2000. *Prediction of natural ventilation in buildings with large openings*. Building and Environment, 35, 191-206.

70. Li Y., Delsante A., 2001. *Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces*. Building and Environment, 36(2), 59-71.

71. Li Y. i in., 2001. *Some examples of solution multiplicity in natural ventilation*. Building and Environment, 36, 851-858.

72. Liddament M., Allen C., 1983. The validation and comparison of mathematical models of air infiltration. TN 11. Air Infiltration Centre, Bracknell, UK.

73. Liddament M., 1986. Air Infiltration Calculation Techniques – An Applications Guide. Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK.

74. Liddament M.W., 1988. *The calculation of wind effect on ventilation*. ASHRAE Transactions, 1645-1660.

75. Liddament M.W., 1991. A Review of Building Air Flow Simulation. TN 33. Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK.

76. Liddament M.W., 1996. A Guide to Energy Efficient Ventilation. Air Infiltration and Ventilation Centre, Bracknell, UK.

77. Liddament M.W., Orme M., 1998. *Energy and ventilation*. Applied Thermal Engineering, 18, 1101-1109.

78. Limb M., 2001. A Review of International Ventilation, Airtghtness, Thermal Insulation and Indoor Air Quality Criteria. TN 55 Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK.

79. Linden P.F., 1999. *The fluid mechanics of natural ventilation*. Annu. Rev. Fluid Mech., 31, 201-238.

80. Luenberger D.G., 1974. Teoria optymalizacji. PWN, Warszawa.

81. Lyberg M.D., 1997. *Basic Air Infiltration*. Building and Environment, 32(2), 95-100.

82. McQuinston F., Spitler J.D., 1992. Cooling and Heating Load Calculation Manual. ASHRAE, 2nd ed.

83. Miguel A.F., Silva A.M., 2000. Analysis of wind-induced internal pressure in enclosures. *Energy and Buildings*, 32, 101-107.

84. Mijakowski M., Sowa J., 1998. *Symulacja działania wentylacji naturalnej w budynku jednorodzinnym w cyklu rocznym*. Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce '97. Wydawnictwo Instytutu Ogrzewnictwa i Wentylacji, Warszawa.

85. Mijakowski M., Sowa J., 2001. *Określanie zastępczych charakterystyk przepływu powietrza przez mieszkania dla potrzeb obliczeń wentylacji naturalnej*. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja nr 1, 24-30.

86. Mochnacki B., Majchrzak E., 1994. Metody numeryczne. Podstawy teoretyczne, aspekty praktyczne i algorytmy. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

87. Modera M.P., Sherman M.H., Levin P.A., 1983. A Detailed Examination of the LBL Infiltration Model with the Mobile Infiltration Test Unit. *ASHRAE Trans*. 89 (2).

88. Nantka M.B., 1990. *Metody pomiaru wymiany powietrza w budynkach mieszkalnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 979, Gliwice, seria: Inżynieria Środowiska, z. 32, 27-45.

89. Nantka M.B., 1993. Problemy identyfikacji przepływów i wymiany powietrza w budynkach wielostrefowych z wentylacją naturalną. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1214, Gliwice, seria: Inżynieria Środowiska, z. 36.

90. Nantka M.B., Baranowski A., 1993. *Modelowanie numeryczne procesów wentylacji naturalnej przy dominującym wpływie wiatru. Stan obecny i perspektywy.* Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja nr 10, 329-333, nr 11, 365-367.

91. Nantka M., Majerski S., 1981. A numerical method for air change rate of building calculated. Proceedings of the 5th International Conference on HVAC, Praha 1981.

92. Negrao C.O.R., 1998. *Integration of computational fluid dynamics with building thermal and mass flow simulation.* Energy and Buildings, 27, 155-165.

93. Oliveira A.C., Silva A.R., Afonso A.C., Varga S., 2001. *Experimental and numerical analysis of natural ventilation with combined light/vent pipes.* Applied Thermal Engineering 21(2001), 1925-1936.

94. Orme M., 1999. Applicable Models for Air Infiltration and Ventilation Calculations. TN 51, Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK.

95. Orme M., Liddament M., Wilson A., 1994. Numerical Data for Air Infiltration and Natural Ventilation Calculations. TN 44, Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry, UK.

96. PN-83/B-03430 Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania.

97. PN-82/B-02402 Ogrzewnictwo. Temperatury ogrzewanych pomieszczeń w budynkach.

98. Sherman M.H., 1987. *Estimation of infiltration from leakage and climate indications.* Energy and Buildings vol. 10(1), 81-86.

99. Sherman M.H., 1992. *Superposition in Infiltration Modeling.* Indoor Air 2 101-114.

100. Sherman M.H., Grimsrud D.T., 1980. Infiltration-pressurisation correlation: Simplified physical modeling. *ASHRAE Transactions*, 86(2), 778-807.

101. Sherman M.H., Levin H., 1996. Renewables in ventilation and indoor air quality. Proceedings of World Renewable Energy Congress, Denver, USA, 562-567.

102. Sowa J., 1999a. *Analiza działania wentylacji naturalnej w budynku wielorodzinnym na podstawie testów ciśnieniowych wybranych mieszkań.* Materiały VII Konferencji Naukowo - Technicznej "Fizyka Budowli w teorii i praktyce - Łódź '99", 456-463.

103. Sowa J., 1999b. *Ocena intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach na podstawie interpretacji zmian stężenia dwutlenku węgla.* Zeszyty Naukowe Politechniki Warszawskiej, Inżynieria Środowiska, z. 31, 23-46.

104. Sowell E.F., Hittle D.C., 1995. *Evolution of building energy simulation methodology.* ASHRAE Transactions, 101(1), 850-855.

105. Stathopoulos T., Baskaran B.A., 1996. *Computer simulation of wind environmental conditions around buildings.* Engineering Structures, 18(11), 876-885.

106. Swami M.V., Chandra S., 1988. *Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow.* ASHRAE Transactions, 94(1), 243-266.

107. Szymanowski J. [red.], 1984. Metody optymalizacji w języku FORTRAN. PWN, Warszawa.

108. TRNSYS 1990. TRNSYS A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison.

109. Tsutsumi J., Katayama T., Ishii P., Hayashi T., 1996. *Investigation and numerical simulation of the wind effects on thermal comfort in a house*. Journal of Wind Egineering and Industrial Aerodynamics, 60, 267-280.

110. Tuomaala P., Rahola J., 1995. *Combined Air Flow and Thermal Simulation of Buildings*. Building and Environment, 30, 255-265.

111. Walker I.S., 1992. *Pressure Coefficients on Sheltered Buildings*. Air Infiltration Review, 13(4).

112. Walker I.S., Wilson D.J., 1992. *Evaluating Models for Superposition of Wind and Stack Effect in Air Infiltration*. Building and Environment, 28(2), 201-209.

113. Walker I.S., Wilson D.J., Sherman M.H., 1998. *A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations*. Energy and Buildings, 27, 293-299.

114. Walton G.N., 1982. *Airflow and Multiroom Thermal Analysis*. ASHRAE Transactions, 88(1), 78-91.

115. Walton G.N., 1984. *A Computer Algorithm for Predicting Infiltration and Interroom Airflows*. ASHRAE Transactions, 90(1), 601-610.

116. Walton G.N., 1989. *Airflow Network Models for Element-Based Building Airflow Modeling*. ASHRAE Transactions, 95(2), 611-620.

117. Walton G. N., 1994. CONTAM 94. *A Multizone Airflow and Contaminant Dispersal Model with a Graphic User Interface*. Air Infiltration Review, 16(1), 674-679.

MODELOWANIE WENTYLACJI NATURALNEJ BUDYNKÓW WIELORODZINNYCH

Streszczenie

Monografia poświęcona jest problematyce wentylacji naturalnej budynków wielorodzinnych, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnienia infiltracji powietrza do mieszkań. Tematyka ta jest ważna, ponieważ napływ powietrza zewnętrznego do budynku jest jednym z istotniejszych czynników wpływających na wielkość niezbędnych nakładów cieplnych (w sezonie grzewczym), a także decydującym o jakości powietrza wewnętrznego.

W pierwszej części pracy przedstawiono zasady i sposoby wentylacji budynków, omówiono czynniki wpływające na wielkość infiltracji powietrza oraz dokonano krytycznego przeglądu metod badawczych i obliczeniowych służących do wyznaczania przepływów powietrza wentylacyjnego.

W dalszej części pracy przedstawiony został autorski program symulacyjny, umożliwiający symulację przepływów powietrza wentylacyjnego w obiektach wielostrefowych. Wyniki dużej liczby obliczeń numerycznych, wykonanych dla różnych typów budynków mieszkalnych i szerokiego zakresu zmienności parametrów klimatu pozwoliły na szczegółową analizę zjawiska przepływów powietrza wentylacyjnego w złożonej strukturze obiektów wielostrefowych.

Program został zweryfikowany doświadczalnie przez porównanie wyników obliczeń symulacyjnych z pomiarami wymiany powietrza przeprowadzonymi w pojedynczym mieszkaniu budynku wielorodzinnego. Eksperyment obejmował pomiary szczelności mieszkania, wielokrotne pomiary wymiany powietrza metodą zaniku stężenia gazu znacznikowego, a także pomiary i rejestracje zużycia energii podczas kilkutygodniowej eksploatacji budynku w czasie sezonu grzewczego.

Na podstawie wyników dużej liczby obliczeń symulacyjnych opracowano przybliżoną metodę wyznaczania infiltracji powietrza w mieszkaniach budynków wielorodzinnych, wyposażonych w system wentylacji naturalnej. Przeprowadzono analizę dokładności proponowanego algorytmu, porównując obliczenia przybliżone z wynikami symulacji numerycznej oraz przeprowadzonymi pomiarami infiltracji powietrza. Pozytywne wyniki oceny dokładności metody pozwalają na jej rekomendację do szacunkowych ocen wymiany powietrza w mieszkaniach budynku wielorodzinnego.

MODELLING OF NATURAL VENTILATION OF MULTI-FAMILY HOUSES

Abstract

The monograph is devoted to the problems of natural ventilation of multi-family buildings under particular consideration of the issue of air infiltration into flats. The subject matter is of importance because the outdoor air inflow into a building is one of most significant factors affecting the amount of necessary heat input (during the heating season) as well as deciding indoor air quality.

In the first part of the work, the principles and ways of ventilating buildings were presented, the factors influencing the air infiltration rate were discussed and a critical review was done of test and calculation methods of determining ventilating air flows.

In a further part, an author's simulation program was presented enabling the simulation of ventilating air flows in multi-zone building objects. The results of a large number of numerical calculations carried out for different types of residential buildings and a wide variability range of climatic parameters allowed a broad analysis of the phenomenon of ventilating air flows in complex structure of multi-zone objects.

The program was experimentally verified by comparison of the simulation calculations with the measurements of air exchange that were executed in a single flat in a multi-family building. The experiment covered the measurements of the airtightness of the flat, the repeated measurements of air exchange using a tracer gas decay method and also the measurements and recording of energy consumption in the course of several weeks' exploitation of the building in the heating season.

Based on a large number of simulation calculations, an approximate method was developed for determination of air infiltration in flats of multi-family buildings equipped with a natural ventilation system. An accuracy analysis of the algorithm proposed was made by comparing the approximate calculations to the numerical simulation results and the carried out measurements of air infiltration. The positive results of the accuracy estimation of the method allow it to be recommended for the estimated prediction of the air exchange in flats in a multi-family building.

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel./faks (0-32) 237-13-81
www.wydawnictwopolitechniki.pl

Sprzedaż i Marketing
tel. (0-32) 237-18-48
wydawnictwo_mark@polsl.pl

Nakł. 100 + 50	Ark. wyd. 9	Ark. druk. 7,375	Papier offset. 70x100, 80g
Oddano do druku 08.08.2007 r.	Podpisano do druku 08.08.2007 r.		Druk ukończ. w sierpniu 2007 r.

Wydrukowano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach, ul. Kujawska 1
zam. 303/07